

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 676.024.46
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-15-21



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ФРАКЦИЙ БЕЛОГО КОРУНДА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ

Вильмис А.Л., Дробаденко В.П., Дьяченко Е.Н., Некоз К.С., Скрипка А.А., Шалаева А.А.

Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), Москва, Россия

Аннотация. Проблема классификации порошковых материалов, таких как белый электрокорунд, находит всё большее значение в контексте современных производственных процессов, требующих высокой степени точности и качества. С увеличением требований к качеству этих материалов и их характеристикам возникает необходимость в разработке эффективных и точных методов классификации, способных разделять порошок на фракции с различной насыпной плотностью и размером частиц, что позволит оптимизировать производственные процессы и повысить эффективность конечной продукции. Классификация по насыпной плотности важна не только для достижения оптимальных эксплуатационных свойств готовой продукции, но и для повышения рентабельности процесса за счет уменьшения отходов и улучшения управляемости сырьевых потоков. Целью работы является исследование возможности классификации порошка белого электрокорунда на лабораторном электростатическом сепараторе по фракциям, отличающимся насыпной плотностью. Для проведения процесса электростатической сепарации применялся сепаратор электростатический барабанного типа ЭЛКОР-1. Новизна экспериментального исследования состоит в проведении анализа с измененной насыпной плотностью и изменяемыми условиями проведения анализа (ток, напряжение, выключение/включение нагрева сепаратора, положение электродов, скорость вращения барабанов) для определения параметров разделения белого корунда на фракции F120 и F60. В результате определены наиболее целесообразные условия для проведения сепарации и получения наименьших значений насыпной плотности для фракции F120 (класс крупности $-0,125+0,106$ мм) и фракции F60 (класс крупности $-0,3+0,25$ мм). Изученные нами закономерности электростатической сепарации белого корунда позволяют оптимизировать выбор технологических методов обогащения, исключая энергозатратные и малоэффективные процессы для фракции F60 ($-0,3+0,25$ мм).

Ключевые слова: дробление, гранулометрический анализ, насыпная плотность, электрокорунд, электростатическая сепарация, зернистость

© Вильмис А.Л., Дробаденко В.П., Дьяченко Е.Н., Некоз К.С., Скрипка А.А., Шалаева А.А., 2026

Для цитирования

Экспериментальное исследование классификации фракций белого корунда методом электростатической сепарации / Вильмис А.Л., Дробаденко В.П., Дьяченко Е.Н., Некоз К.С., Скрипка А.А., Шалаева А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 15-21 <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-15-21>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE CLASSIFICATION OF WHITE FUSED ALUMINA FRACTIONS BY ELECTROSTATIC SEPARATION

Vilmis A.L., Drobadenko V.P., Dyachenko E.N., Nekoz K.S., Skripka A.A., Shalaeva A.A.

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

Abstract. The classification of powder materials, such as white fused alumina, is gaining increasing importance in modern manufacturing processes that demand high precision and quality standards. As requirements for material quality and characteristics become more stringent, there is a growing need to develop efficient and precise classification methods capable of separating powder into fractions with different bulk densities which will optimize production processes and increase the efficiency of the final product. Bulk density classification is crucial not only for achieving optimal performance characteristics of the final product but also for enhancing process profitability through waste reduction and improved raw material flow management. The objective of this study is to investigate the feasibility of classifying white fused alumina powder into fractions with distinct bulk densities using a laboratory-scale electrostatic separator. The experiments have employed an ELKOR-1 drum-type electrostatic separator. The novelty of this experimental research lies in conducting analysis with modified bulk density and variable process parameters (current, voltage, heater activation/deactivation, electrode positioning, drum rotation speed) to determine optimal separation conditions for F120 and F60 white fused alumina fractions. The study has identified the most appropriate operating parameters for achieving separation and obtaining minimal bulk density values for the F120 fraction (particle size $-0.125+0.106$ mm) and F60 fraction (particle size $-0.3+0.25$ mm). The researched patterns of white fused alumina electrostatic separation allow for optimization of enrichment method selection, particularly by eliminating energy-intensive and inefficient processes for the F60 fraction ($-0.3+0.25$ mm).

Keywords: crushing, granulometric analysis, bulk density, fused alumina, electrostatic separation, granularity

For citation

Vilmis A.L., Drobadenko V.P., Dyachenko E.N., Nekoz K.S., Skripka A.A., Shalaeva A.A. Experimental Study of the Classification of White Fused Alumina Fractions by Electrostatic Separation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 15-21. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-15-21>

Введение

Белый корунд (α - Al_2O_3) является одним из ключевых абразивных материалов, широко применяемых в металлообработке, производстве керамики и высокопрочных композитов [1]. Важнейшей характеристикой, определяющей его эксплуатационные свойства, является гранулометрический состав, который напрямую влияет на такие параметры, как насыпная плотность, абразивная способность и однородность структуры [2]. Традиционные методы классификации (просеивание, воздушная сепарация) не всегда обеспечивают требуемую точность разделения, особенно для тонких фракций ($-0,3+0,1$ мм), что обусловлено высокой адгезией частиц и их склонностью к агрегации [3].

Электростатическая сепарация представляет собой перспективный метод разделения минеральных частиц, основанный на различиях в их электропроводности, диэлектрической проницаемости и способности к трибоэлектризации [4]. Физическая суть процесса электросепарации – разделение частиц в электрическом поле по величине и знаку заряда, созданного на частицах в зависимости от электрических свойств и размеров. В отличие от механических способов, этот метод позволяет эффективно разделять частицы с близкими размерами, но разными физико-химическими свойствами, что особенно актуально для корундовых порошков [5]. Однако его применение

для классификации белого корунда изучено недостаточно, особенно в контексте влияния параметров процесса (напряжённость поля, влажность, скорость подачи материала) на эффективность разделения [6].

Целью данной работы является исследование возможности классификации порошка белого электрокорунда на лабораторном электростатическом сепараторе по фракциям, отличающимся насыпной плотностью.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выбор режимов электростатической сепарации, обеспечивающих возможность классификации исследуемых материалов по фракциям, отличающимся насыпной плотностью.
2. Проведение лабораторных испытаний сепарации при выбранных режимах на двух материалах: материалы белого электрокорунда зернистости F60 и F120.
3. Определение массового выхода, насыпной плотности и гранулометрического состава фракций после сепарации.
4. Анализ результатов исследований.

Материалы и методы исследования

Классификация материалов по насыпной плотности позволяет лучше управлять сырьевыми потоками, минимизировать отходы и повышать выход ценных продук-

тов, поэтому были изучены условия процесса электрической сепарации белого электрокорунда для получения материалов с меньшей насыпной плотностью относительно насыпной плотности исходного материала.

В качестве исходного сырья использовали продукты размола белого электрокорунда зернистости F60 (класс крупности $-0,3+0,25$ мм) и F120 (класс крупности $-0,125+0,106$ мм) (стандарт FEPA).

При определении насыпной плотности материалов руководствовались ГОСТ 28924-91 «Методы определения физических и физико-механических свойств». Пределы (\pm) допускаемых значений погрешности измерений насыпной плотности при доверительной вероятности $=0,95$ не должны превышать $0,02$ г/см³. Метод измерения насыпной плотности основан на свободном насыпании материала через соответствующую воронку в мерный цилиндр определенного объема до полного заполнения и определения массы материала в цилиндре с последующим расчетом величины.

Вместимость цилиндра с округлением до третьей значащей цифры вычисляли по формуле

$$V = \frac{m_0}{\rho_{H_2O}}, \quad (1)$$

где V – вместимость цилиндра, см³; m_0 – масса воды, г ($m_0 = m_2 - m_1$, где m_1 – масса цилиндра, высушенного и взвешенного вместе со стеклянной пластинкой, г; m_2 – масса цилиндра вместе с водой и стеклянной пластинкой, г); ρ_{H_2O} – плотность воды, г/см³, при температуре определения, °С (температура определения 23°С, плотность воды 0,9975 г/см³). За вместимость цилиндра приняли среднее арифметическое значение, полученное по результатам трех измерений: $V = 196$ мл.

Насыпную (объемную) плотность X_2 вычисляли по формуле

$$X_2 = \frac{m}{V}, \quad (2)$$

где m – масса материала в мерном цилиндре, г; V – объем цилиндра, см³.

За окончательный результат принимаем среднее арифметическое значение трех параллельных определений. Разница результатов параллельных определений (dg) не должна превышать $0,02$ г/см³. При получении результатов более допускаемых значений размаха проводили повторное определение, при этом результаты повторного определения считали окончательными.

Полученные результаты и их обсуждение

Для белого корунда фракции F120 (класс крупности $-0,125+0,106$ мм) было проведено 9 экспериментов с измененными условиями: изменялись показатели тока с 0,01 до 0,12 мА, напряжение варьировалось от 12 до 25 кВ, скорость вращения барабанов составляла от 90 до 200 об/мин, эксперимент осу-

ществлялся как без нагрева, так и с нагревом до 80°С, также было изменено положение электродов.

Эксперимент №1 был проведен при следующих условиях: ток 0,12 мА; напряжение 24 кВ; скорость вращения барабана 180 об/мин; нагрев до 85°С; положение электродов: 10, 40, 70°; высота 6 см (рис. 1, табл. 1).

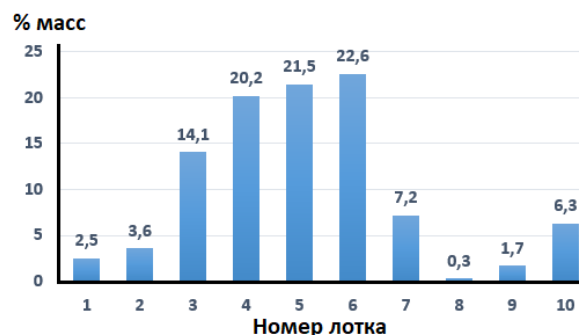


Рис. 1. Результаты сепарации (эксперимент №1)
Fig. 1. Separation results (experiment No. 1)

Таблица 1. Результаты определения насыпной плотности (эксперимент №1)
Table 1. Results of bulk density determination (experiment No. 1)

Наименование пробы	Масса пробы, г	Насыпная плотность, г/см ³	Средняя насыпная плотность, г/см ³
Исходная проба	325,10	1,66	1,66
	325,67	1,66	
	325,65	1,66	
Лоток 3	328,80	1,68	1,68
	328,33	1,68	
	328,70	1,68	
Лоток 4	329,26	1,68	1,68
	328,20	1,67	
	329,30	1,68	
Лоток 5	331,51	1,69	1,68
	329,17	1,68	
	329,91	1,68	
Лоток 6	329,61	1,68	1,69
	331,48	1,69	
	331,82	1,69	
Лотки 1-3	322,10	1,64	1,64
	322,23	1,64	
	322,41	1,64	
Лотки 1-4	327,72	1,67	1,67
	327,59	1,67	
	327,69	1,67	
Лотки 1-5	328,96	1,68	1,68
	328,65	1,68	
	328,97	1,68	
Лотки 8-10	313,05	1,60	1,59
	311,95	1,59	
	312,21	1,59	
Лотки 6-10	326,97	1,67	1,67
	326,27	1,66	
	326,55	1,67	

Потери материала в процессе сепарации составили 55,37 г (1,4%). Насыпная плотность была измерена

для следующих продуктов: исходный материал; материал лотка 3; материал лотка 4; материал лотка 5.

После процесса электростатической сепарации наблюдается уменьшение насыпной плотности (относительно насыпной плотности исходного материала) при соединении материалов из лотков 1-3 и 8-10.

При этом наименьшие значения насыпной плотности были получены в результате эксперимента №2 со следующими условиями: ток 0,07 мА; напряжение 25 кВ; скорость вращения барабана 158 об/мин, без нагрева; положение электродов: 30, 55, 70°; высота 8 см. Полученные значения после сепарации и результаты определения насыпной плотности приведены на рис. 2 и в табл. 2.

Потери материала в процессе сепарации составили 121,34 г (4,07%).

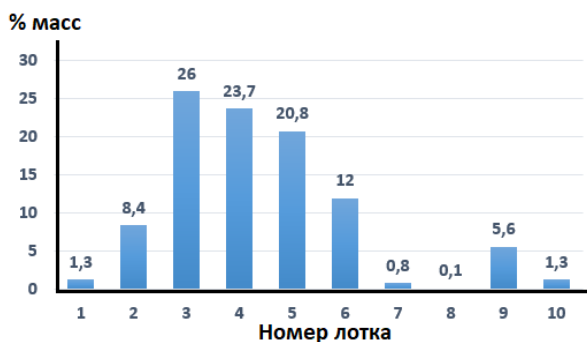


Рис. 2. Результаты сепарации (эксперимент №2)
Fig. 2. Separation result (experiment No. 2)

Таблица 2. Результаты определения насыпной плотности (эксперимент №2)
Table 2. Results of bulk density determination (experiment No. 2)

Наименование пробы	Масса пробы, г	Насыпная плотность, г/см ³	Средняя насыпная плотность, г/см ³
Лоток 3	336,48	1,72	1,72
	336,51	1,72	
	336,34	1,72	
Лоток 4	336,25	1,72	1,72
	336,80	1,72	
	336,11	1,72	
Лоток 6	311,19	1,59	1,59
	310,00	1,58	
	312,00	1,59	
Лотки 6-10	310,87	1,59	1,59
	312,00	1,59	
	310,94	1,59	
Лотки 5-10	318,84	1,63	1,63
	317,96	1,62	
	318,90	1,63	

Насыпная плотность была измерена для следующих продуктов: материал лотка 3; материал лотка 4; материал лотка 5; материал лотка 6. Насыпная плотность материалов остальных лотков не определялась ввиду недостаточного объема материала (ГОСТ 28924-91).

После процесса электростатической сепарации наблюдается значительное уменьшение насыпной плотности в лотке 6. Для увеличения массы фракции с меньшей насыпной плотностью нами были смешаны фракции из лотков 6-10, насыпная плотность смешанного материала сопоставима с насыпной плотностью материала из лотка 6. Масса материалов из лотков 6-10 равна 591,62 г, что составляет 19,9% от массы исходной пробы. При добавлении к смешанному материалу фракции лотка 5 насыпная плотность увеличилась.

Для белого корунда фракции F60 (класс крупности -0,3+0,25 мм) было проведено 6 экспериментов с различными условиями: изменение скорости вращения барабана, высоты подъема и углов наклона электродов), наименьшие значения насыпной плотности (1,75 г/см³ при насыпной плотности исходного материала 1,80 г/см³) для фракции F60 (класс крупности -0,3+0,25 мм) были получены в результате эксперимента №3 при следующих условиях (рис. 3, табл. 3): ток 0,07 мА; напряжение 22 кВ; скорость вращения барабана 150 об/мин; без нагрева; положение электродов: 30, 55, 75°; высота 8 см.

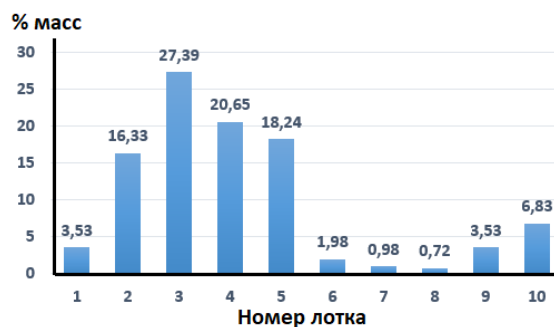


Рис. 3. Результаты сепарации (эксперимент №3)
Fig. 3. Separation results (experiment No. 3)

Таблица 3. Результаты определения насыпной плотности (эксперимент №3)
Table 3. Results of bulk density determination (experiment No. 3)

Наименование пробы	Масса пробы, г	Насыпная плотность, г/см ³	Средняя насыпная плотность, г/см ³
Лоток 2	347,70	1,77	1,77
	347,92	1,78	
	347,83	1,77	
Лоток 3	363,72	1,86	1,85
	362,78	1,85	
	362,98	1,85	
Лоток 4	359,45	1,83	1,83
	359,45	1,83	
	359,18	1,83	
Лоток 5	358,51	1,83	1,83
	357,19	1,82	
	357,74	1,83	
Лотки 6-10	342,74	1,75	1,75
	342,53	1,75	
	342,50	1,75	

Потери материала в процессе сепарации составили 110,0 г (2,82%).

Насыпная плотность была измерена для следующих продуктов: материал лотка 2; материал лотка 3; материал лотка 4; материал лотка 5.

После процесса электростатической сепарации наблюдается уменьшение насыпной плотности при смешении материалов лотков 6-10 относительно насыпной плотности исходного материала. Но масса материалов лотков 6-10 равна 525,27 г, что составляет 14% от массы исходного материала (низкий выход фракции с меньшей насыпной плотностью).

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о нецелесообразности применения процесса электрической сепарации для получения фракции с насыпной плотностью меньше насыпной плотности исходного материала для фракции F60 (класс крупности -0,3+0,25 мм).

Подытоживая исследования, необходимо отметить, что различные марки электрокорунда, от F4 (фракция 4750–5600 мкм) до F220 (фракция 5–75 мкм), определяются только их фракционным составом. В настоящее время отечественная промышленность предъявляет требования не только к фракционному составу, но и к насыпной плотности электрокорунда. Вне зависимости от марки и фракционного состава насыпная плотность различных марок электрокорунда варьируется в пределах от 1,58 до 1,82 г/см³. При этом если разделить фракции по размеру частиц методом ситового анализа не представляет трудности, то чёткий контроль насыпной плотности удаётся регулировать только методами электростатической сепарации. Физическая суть разделения исходной пробы порошкового материала на фракции по насыпной плотности в процессе электростатической сепарации заключается в более тонкой сепарации по размерам частиц, приводя к более плотноупакованной структуре насыпного материала. Морфологические свойства порошков после электростатической сепарации на различных лотках требуют дальнейшего детального изучения. Настоящая работа представляет результаты исследований глубокого тонкого фракционирования электрокорунда по насыпной плотности методом электромагнитной сепарации.

Впервые удалось найти режимы для фракционирования электрокорунда марки F60 и F120 и провести разделение партии на два продукта с плотностью 1,66 и 1,82 г/см³ (табл. 4).

Экспериментально определённые параметры значений тока, напряжения, скорости вращения барабана, углов положения электродов, высоты электродов

позволяют использовать полученные на лабораторном сепараторе данные для тонкой настройки промышленного оборудования на предприятиях-производителях белого электрокорунда.

Заключение

Классификация материалов по насыпной плотности играет ключевую роль в современном производстве, поскольку позволяет не только оптимизировать эксплуатационные характеристики конечной продукции, но и существенно повысить экономическую эффективность технологических процессов. Как отмечают исследования, данный подход обеспечивает: улучшение качества продукции за счет получения фракций с заданными физическими свойствами, что особенно важно для абразивных материалов и керамических композитов, снижение производственных затрат за счет минимизации потерь сырья (до 15–20%), оптимизации логистики и хранения материалов и сокращения энергопотребления на последующих стадиях переработки.

В ходе исследования экспериментально подтверждена целесообразность применения электростатической сепарации для классификации белого корунда фракции F120 (-0,125+0,106 мм). Оптимальные параметры процесса: напряжение 25 кВ; ток 0,07 мА; скорость вращения барабана 158 об/мин: конфигурация электродов 30, 55, 70° на высоте 8 см. Достигнуто снижение насыпной плотности с 1,72 до 1,59 г/см³ при выходе целевой фракции 19,9% (лотки 6–10). Результаты согласуются с данными исследований [7], где подчеркивается роль напряжения и геометрии электродов в эффективности разделения.

Были получены ограничения метода для белого корунда фракции F60 из-за невысоких показателей: минимальное снижение насыпной плотности (1,80 → 1,75 г/см³), низкий выход целевой фракции (14%). Это обусловлено крупностью частиц, снижающей их подвижность в электростатическом поле, что подтверждается работами [7], где отмечается зависимость эффективности сепарации от granulометрического состава.

Критическими параметрами процесса электростатической сепарации стали напряжение (значения выше 20 кВ улучшают разделение, но требуют контроля для избегания пробоя) и влажность – отсутствие нагрева (как в наших экспериментах) минимизирует агрегацию частиц, что критично для тонких фракций [8].

Таблица 4. Режимы фракционирования на электростатическом сепараторе

Table 4. Fractionation modes on an electrostatic separator

Эксперимент	Ток, мА	Напряжение, кВ	Скорость барабана, об/мин	Положение электродов, град	Высота, см	Средняя плотность 90% фракции, г/см ³
1	0,12	25	180	10, 40, 70	6	1,66
2	0,07	25	158	30, 55, 70	8	1,67
3	0,07	22	150	30, 55, 70	8	1,82

Также отметим, для белого электрокорунда фракции F120 внедрение электросепарации в производство позволяет снизить отходы (4,07% потерь) и повысить однородность продукта.

Перспективным является изучение гибридных методов (например, трибоэлектризация + аэросепарация) для фракций крупнее 0,25 мм, а также оптимизация параметров для промышленных масштабов [9, 10].

В условиях ужесточающейся международной конкуренции и глобализации производственных цепочек внедрение таких инновационных методов классификации становится стратегической необходимостью. Как показывают исследования, предприятия, использующие современные технологии сепарации, демонстрируют на 25–30% более высокие показатели рентабельности по сравнению с традиционными подходами.

Список источников

1. Кузьмин В.И., Кармазин В.В. Современные технологии производства белого корунда // Огнеупоры и техническая керамика. 2020. № 5. С. 34–40. DOI: 10.17073/1683-4518-2020-5-34-40.
2. Medles K., Tilmatine A., Dascalescu L. Optimization of electrostatic separation process for granular materials using response surface methodology // IEEE Transactions on Industry Applications. 2019, vol. 55, pp. 3071–3078. DOI: 10.1109/TIA.2019.2899263.
3. Zhou Y., Zhang H., Wang Y. Experimental study on the electrostatic beneficiation of white fused alumina // Powder Technology. 2023, vol. 415, pp. 118167. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118167.
4. Иванов А.А., Петров В.Г. Электростатическая сепарация минеральных частиц: теория и практика // Обогащение руд. 2021. № 3. С. 45–50. DOI: 10.17580/or.2021.03.07.
5. Кузнецова Е.Д., Малышев О.Н. Электростатическое разделение частиц корунда в зависимости от их гранулометрического состава // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 5. С. 78–85. eLibrary.ru.
6. Fedorov D.E., Vlasov A.A. Применение комбинированных методов сепарации для повышения качества белого корунда // Химическая технология. 2023. № 2. С. 55–62. DOI: 10.31044/1684-5811-2023-24-2-55-62.
7. Иванов А.А., Петров В.Г. Электростатическая сепарация минеральных частиц: теория и практика // Обогащение руд. 2021. № 3. С. 45–50. DOI: 10.17580/or.2021.03.07
8. Electrostatic beneficiation of white fused alumina / Zhou Y. et al. // Powder Technol. 2023, vol. 415, 118167. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118167
9. Кузьмин В.И., Кармазин В.В. Современные технологии производства корунда // Огнеупоры и техническая керамика. 2020. № 5. С. 34–40. DOI: 10.17073/1683-4518-2020-5-34-40
10. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых : учебник : в 2 т. 4-е изд., стер. Москва: Горная книга, 2018. Том 1 : Обогачительные процессы. 2018. 420 с. ISBN 978-5-98672-473-7.

References

1. Kuzmin V.I., Karamzin V.V. Modern technologies for white fused alumina production. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Technical Ceramics]. 2020;(5):34-40. DOI: 10.17073/1683-4518-2020-5-34-40. (In Russ.)
2. Medles K., Tilmatine A., Dascalescu L. Optimization of electrostatic separation process for granular materials using response surface methodology. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019;55:3071-3078. DOI: 10.1109/TIA.2019.2899263.
3. Zhou Y., Zhang H., Wang Y. Experimental study on the electrostatic beneficiation of white fused alumina. *Powder Technology*. 2023;415. Article 118167. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118167.
4. Ivanov A.A., Petrov V.G. Electrostatic separation of mineral particles: Theory and practice. *Obogashchenie rud* [Mineral Processing]. 2021;(3):45-50. DOI: 10.17580/or.2021.03.07. (In Russ.)
5. Kuznetsova E.D., Malyshev O.N. Electrostatic separation of corundum particles depending on their granulometric composition. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2020;(5):78-85. Available at: eLibrary.ru (In Russ.)
6. Fedorov D.E., Vlasov A.A. Application of combined separation methods for improving white fused alumina quality. *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical Technology]. 2023;(2):55-62. DOI: 10.31044/1684-5811-2023-24-2-55-62. (In Russ.)
7. Ivanov A.A., Petrov V.G. Electrostatic separation of mineral particles: Theory and practice. *Obogashchenie rud* [Mineral Processing]. 2021;(3):45-50. DOI: 10.17580/or.2021.03.07. (In Russ.)
8. Zhou Y., Zhang H., Wang Y. Electrostatic beneficiation of white fused alumina. *Powder Technology*. 2023;415. Article 118167. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.118167.
9. Kuzmin V.I., Karamzin V.V. Modern technologies for corundum production. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Technical Ceramics]. 2020;(5):34-40. DOI: 10.17073/1683-4518-2020-5-34-40. (In Russ.)
10. Avdokhin V.M. *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopaemykh: uchebnik* [Fundamentals of mineral processing: textbook]. In 2 volumes, 4th ed. Moscow : Gornaya kniga, 2018. Vol. 1. 420 p. ISBN 978-5-98672-473-7. (In Russ.)

Поступила 19.05.2025; принята к публикации 31.05.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 19/05/2025; revised 31/05/2025; published 31/03/2026

Вильмис Александр Леонидович – доктор технических наук, заведующий кафедрой геотехнологических способов и физических процессов горного производства, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), Москва, Россия.
Email: vilmisal@mgru.ru. ORCID 0009-0002-4057-0967

Дьяченко Елена Николаевна – кандидат химических наук, доцент,
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ),
Москва, Россия.

Email: dyachenkoen@mgri.ru. ORCID 0009-0004-5372-0244

Дробаденко Валерий Павлович – профессор, доктор технических наук,
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ),
Москва, Россия.

Email: drobadenkovp@mgri.ru

Некоз Ксения Сергеевна – кандидат технических наук, доцент,
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ),
Москва, Россия.

Email: nekozksy@mail.ru.

Скрипка Анри Анривич – ведущий специалист департамента науки и технологий,
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ),
Москва, Россия.

Email: skripkaaa@mgri.ru

Шалаева Анастасия Александровна – студент, делопроизводитель на кафедре геотехнологических
способов и физических процессов горного производства,
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ),
Москва, Россия.

Email: anastasiashalaeva08@yandex.ru ORCID 0000-0002-8891-7686

Alexander L. Vilmis – DrSc (Eng.), Head of the Department of Geotechnological Methods
and Physical Processes of Mining,

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.

Email: vilmisal@mgri.ru. ORCID 0009-0002-4057-0967

Elena N. Dyachenko – PhD (Eng.), Associate Professor,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.

Email: dyachenkoen@mgri.ru. ORCID 0009-0004-5372-0244

Valery P. Drobadenko – DrSc (Eng.), Professor,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.

Email: drobadenkovp@mgri.ru

Kseniya S. Nekoz – PhD (Eng.), Associate Professor,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.

Email: nekozksy@mail.ru

Anri A. Scripka – Leading Specialist of the Department of Science and Technology,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.

Email: skripkaaa@mgri.ru

Anastasia A. Shalaeva – Student, chief clerk at the Department of Geotechnological Methods
and Physical Processes of Mining,

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.

Email: anastasiashalaeva08@yandex.ru ORCID 0000-0002-8891-7686