

ОЧИСТКА ГЛИНОЗЕМСОДЕРЖАЩИХ СМЕТОВ МЕТОДАМИ СУХОЙ ВОЗДУШНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

© 2021 г. А.Е. Бурдонов¹, В.В. Барахтенко¹, Е.В. Зелинская¹, Л.В. Гавриленко²

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ), г. Иркутск, Россия

² ООО «Объединенная компания «РУСАЛ Инженерно-технологический центр»
(ООО «РУСАЛ ИТЦ»), г. Красноярск, Россия

Статья поступила в редакцию 18.08.20 г., доработана 09.10.20 г., подписана в печать 20.10.20 г.

Аннотация: Рассмотрены вопросы образования и переработки отходов на предприятиях алюминиевого производства. На основе анализа литературных источников и практических данных определены причины образования металлургических отходов на территории РФ. Проанализированы исследования, ведущиеся в научных организациях. Установлено, что для переработки отходов перспективен глиноземсодержащий смет, образующийся в процессе производства алюминиевого сырья на электролизерах с самообжигающимися анодами при различных технологических операциях. Глиноземсодержащий смет представляет собой отходы сложного переменного состава, сметаемые в цехах электролиза. Выявлено, что глиноземсодержащий смет состоит из криолита (Na_3AlF_6), хиолита ($\text{Al}_3\text{F}_{14}\text{Na}_5$), корунда (Al_2O_3), сидерита (FeCO_3), пирита (FeS_2), кварца (SiO_2), полевого шпата ($(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})\text{AlSi}_2\text{O}_8$), углеродистого вещества и техногенной фазы состава $(\text{NaF}) \cdot 1,5\text{CaF}_2 \cdot \text{AlF}_3$. Интерес к их переработке состоит в том, что в них содержится значительное количество ценных компонентов (Na_3AlF_6 , Al_2O_3 , AlF_3), извлечение которых и повторное использование в получении алюминия могут способствовать снижению себестоимости единицы продукции. Проблемой является наличие в смете компонентов (SiO_2 , Fe_2O_3), которые при попадании в электролит оказывают негативное влияние на процесс электролиза. Результаты изучения химического состава монофракций позволили сделать вывод, что исключение темной (серовато-черной) массы, в которой содержание примесей (SiO_2 , Fe_2O_3) максимально, позволит в значительной степени решить поставленную задачу исследования. На основании выдвинутой гипотезы представлены результаты проведения воздушной классификации смесей фракций 0–10 и 0–5 мм в каскадно-гравитационном (КГ) и центробежном (КЦ) классификаторах. По результатам выполненных исследований рекомендуется применять в схеме обогащения глиноземсодержащего смеса алюминиевого производства воздушную классификацию в КГ смеса фракции 0–10 мм.

Ключевые слова: производство алюминия, техногенное сырье, глиноземсодержащий смет, химический состав, примеси, очистка, минералогические исследования, электролиз, воздушная классификация.

Бурдонов А.Е. — канд. техн. наук, доцент кафедры «Обогащение полезных ископаемых и охрана окружающей среды» им. С.Б. Леонова, ИРНИТУ (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83). E-mail: slimbul@inbox.ru.

Барахтенко В.В. — канд. техн. наук, доцент кафедры «Обогащение полезных ископаемых и охрана окружающей среды» им. С.Б. Леонова, ИРНИТУ. E-mail: antivsyu@inbox.ru.

Зелинская Е.В. — докт. техн. наук, проф. кафедры «Обогащение полезных ископаемых и охрана окружающей среды» им. С.Б. Леонова, ИРНИТУ. E-mail: zelinskaelena@mail.ru.

Гавриленко Л.В. — канд. техн. наук, менеджер ООО «РУСАЛ ИТЦ» (660067, г. Красноярск, ул. Пограничников, 37/1). E-mail: Lyudmila.Gavrilenko@rusal.com.

Для цитирования: Бурдонов А.Е., Барахтенко В.В., Зелинская Е.В., Гавриленко Л.В. Очистка глиноземсодержащих смесей методами сухой воздушной классификации. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27. № 3. С. 73–84.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-73-84.

Purification of alumina-containing sweepings by dry air classification methods

A.E. Burdonov¹, V.V. Barakhtenko¹, E.V. Zelinskaya¹, L.V. Gavrilenko²

¹ Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Irkutsk, Russia

² LLC «Engineering and Technology Center RUSAL», Krasnoyarsk, Russia

Received 18.08.2020, revised 09.10.2020, accepted for publication 20.10.2020

Abstract: The article deals with the formation and processing of waste at aluminum production plants. Based on the analysis of literary sources and practical data, the reasons for the formation of metallurgical waste in the territory of the Russian Federation are established. The analysis of research conducted in scientific organizations is presented. It was found that one of the most promising for waste processing is alumina-con-

taining sweepings formed during the production of liquid aluminum in Soderberg cells during various process operations. Alumina-containing sweepings are waste of complex variable composition swept away in electrolysis shops. It was found that alumina-containing sweepings consist of cryolite (Na_3AlF_6), chiolite ($\text{Al}_3\text{F}_{14}\text{Na}_5$), corundum (Al_2O_3), siderite (FeCO_3), pyrite (FeS_2), quartz (SiO_2), feldspar ($(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})\text{AlSi}_2\text{O}_8$), carbonaceous matter and $(\text{NaF}) \cdot 1,5\text{CaF}_2 \cdot \text{AlF}_3$ technogenic phase. Their processing is of interest due to the fact that they contain a significant amount of valuable components (Na_3AlF_6 , Al_2O_3 , AlF_3) that can be extracted and reused in aluminum production to reduce the cost per unit. The problem is that sweepings contain components (SiO_2 , Fe_2O_3), which have a negative effect on the electrolysis process when in contact with electrolyte. The data obtained when studying the chemical composition of monofractions made it possible to conclude that the exclusion of the dark (grayish-black mass) with the maximum content of impurities (SiO_2 , Fe_2O_3) will substantially solve the stated problem of the study. Based on the hypothesis put forward, the paper presents the results of 0–10 mm and 0–5 mm sweepings air classification in cascade-gravity and centrifugal classifiers. Based on the studies conducted, we recommend using 0–10 mm sweepings air classification in the cascade gravity classifier in the processing flow of alumina-containing sweepings of aluminum production.

Keywords: aluminum production, technogenic raw materials, alumina-containing sweepings, chemical composition, impurities, purification, mineralogical research, electrolysis, air classification.

Burdonov A.E. — Cand. Sci. (Eng.), associate prof. of the Department of mineral processing and environmental protection of the Irkutsk National Research Technical University (INRTU) (664074, Russia, Irkutsk, Lermontov str., 83).
E-mail: slimbul@inbox.ru.

Barakhtenko V.V. — Cand. Sci. (Eng.), associate prof. of the Department of mineral processing and environmental protection, INRTU.
E-mail: antivsy@inbox.ru.

Zelinskaya E.V. — Dr. Sci. (Eng.), prof. of the Department of mineral processing and environmental protection, INRTU.
E-mail: zelinskayelena@mail.ru.

Gavrilenko L.V. — Cand. Sci. (Eng.), manager of the LLC «Engineering and Technology Center RUSAL» (660067, Russia, Krasnoyarsk, Pogranichnikov str., 37/1). E-mail: Lyudmila.Gavrilenko@rusal.com.

For citation: Burdonov A.E., Barakhtenko V.V., Zelinskaya E.V., Gavrilenko L.V. Purification of alumina-containing sweepings by dry air classification methods. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. Vol. 27. No. 3. P. 73–84 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-73-84.

Введение

Практически в любой сфере народного хозяйства неизбежны образование отходов и их воздействие на объекты окружающей среды [1]. Одним из показательных примеров является горно-металлургическая отрасль. В работе [2] наглядно представлено как влияет деятельность предприятия данной сферы на окружающую среду.

Одним из наиболее перспективных с точки зрения вторичного использования источником образования отходов является металлургическая индустрия, в частности алюминиевая промышленность, что подтверждается большим количеством научных исследований в данной области [3, 4]. Отходы производства алюминия содержат как вредные вещества и соединения, которые негативно воздействуют на объекты окружающей среды, так и полезные, которые в последующем можно использовать, например, в производстве бетонов [5], композитных вяжущих [6], силикатных изделий [7] и непосредственно вторичного алюминия [8], что повышает актуальность их рециклинга. Однако из анализа литературы следует заключение о том, что сегодня переработка отходов алюминиевого производства, являясь актуальным научным направлением, развита недостаточно и представлена отдельными разрозненными исследованиями и разработками [9, 10].

Столкнувшись с проблемами и задачами, порождаемыми современной конкурентной средой, предприятия приходят к выводу, что управлять нужно не только производственными процессами, но и тем, что следует за ними. При введении понятия «экологическая репутация» появилась конкуренция среди предприятий в отношении не только качества и количества получаемой продукции, но и результатов деятельности по утилизации и переработке отходов. В этой борьбе выигрывают те из них, которые смогли наряду с достижением высоких производственных показателей организовать эффективную переработку отходов.

Над решением вопроса переработки отходов алюминиевого производства работает огромное количество организаций во всем мире: в Китае [11], России [12], Норвегии [13] и других странах. Однако в настоящее время перерабатывается лишь около 10 % представляющих наибольшую ценность и технологически доступных для переработки отходов. Остальные многотоннажные отходы, будучи опасными для объектов окружающей среды, складываются в шламо- и хвостохранилищах, отвалах и т.д.

Основной причиной образования большого количества техногенных отходов на предприятиях

по производству первичного алюминия является применение технологии электролиза криолит-глиноземного расплава с установкой ванн с самообжигающимся анодом — анодом Содерберга. На большинстве предприятий по получению алюминия используются электролизеры с предварительно обожженными анодами [14, 15]. Предприятия оснащены «сухой» системой очистки отходящих технологических газов. Наряду с более высокими технико-экономическими показателями, при такой организации процесс характеризуется большей экологической безопасностью производства ввиду отсутствия выбросов углеводородов, отходов флотационной переработки снимаемой угольной пены (хвостов флотации) и растворов «мокрой» газоочистки (шламов газоочистки). Значительно снижается и количество такого вида образующихся отходов (благодаря применению автоматической подачи сырья и фторсолей), как механическая смесь глинозема и оборотного (вторичного) электролита, называемая «сметками» или «сметом», которая просыпается на «нулевые» отметки корпусов электролиза при загрузке в ванны.

С 2016 г. в ИРНТУ [16], СФУ [17] и на предприятиях группы РУСАЛ [16, 17] ведутся исследования по переработке глиноземсодержащего смета. Смет — это отходы сложного переменного состава, сметаемые в цехах электролиза. Смет образуется в процессе производства алюминиевого сырца на электролизерах с самообжигающимися анодами в ходе технологических операций, при поточно-регламентированных обработках и корректировке химического состава электролита, на операциях, производимых дизельной и напольно-рельсовой техникой. В результате происходит просыпание глинозема и фтористых солей сквозь вентиляционные решетки (рифленки) аэрационных каналов корпуса электролиза, неплотности в элементах конструкции оборудования, механизмов и моторизованной техники, а технологическим сырьем засыпается часть ошиновки и отметки ± 0 (подвальное помещение с опорными тумбами и колоннами, на которые устанавливаются электролизеры).

В процессе сбора смета мелкодисперсные частицы ценного глинозема оказываются смешанными с различными материалами (кусками асфальта и бетона, застывшими выплесками металла и т.п.), что делает невозможным его возврат в технологический процесс.

Интерес к переработке глиноземсодержащих сметов состоит в том, что в них содержится значительное количество ценных компонентов (Na_3AlF_6 , Al_2O_3 , AlF_3), извлечение которых и повторное использование в получении алюминия могут способствовать снижению себестоимости единицы продукции. Однако в состав смета помимо ценных компонентов входят железо- и кремнийсодержащие соединения, которые при их попадании в электролит оказывают негативное влияние на процесс электролиза.

Влияние кремния на показатели качества алюминиевого сплава можно рассматривать с двух сторон. Так, с увеличением содержания кремния коэффициент термического расширения сплава, как и его плотность, уменьшается. Установлено [18], что регламентированное содержание кремния повышает износостойкость алюминиевого сплава, что часто делает отливки из алюминиево-кремниевых сплавов привлекательной заменой изделиям из других (не алюминиевых) сплавов. С другой стороны, показано [19], что с увеличением содержания кремния время затвердевания возрастает и снижается температура жидкости, что влияет на экономические показатели работы предприятия.

Железо и его оксиды, в принципе, являются главной и наиболее опасной примесью в большинстве промышленных литейных и деформированных алюминиевых сплавов. Подробный обзор о влиянии железа на свойства алюминиевых сплавов и показатели процесса электролиза представлен в работе [20].

Можно сделать вывод, что контроль качества используемого глиноземсодержащего смета, а именно регулирование загрязняющих примесей (Si, Fe), позволит не только повысить экономические показатели производства за счет вовлечения в технологический процесс значительного его количества, но и снизить негативное воздействие на объекты окружающей среды.

Объект исследования

Объектом исследования являлся глиноземсодержащий смет с электролизеров предприятия ПАО «РУСАЛ Братск» (рис. 1). На основании предварительных исследований установлены его гранулометрический и минералогический составы, а также физико-механические и оптические свойства.



Рис. 1. Общий вид глиноземсодержащего смета

Fig. 1. General view of the alumina-containing sweepings

Определено, что образец глиноземсодержащего смета состоит из криолита (Na_3AlF_6), хиолита ($\text{Al}_3\text{F}_{14}\text{Na}_5$), корунда (Al_2O_3), сидерита (FeCO_3), пирита (FeS_2), кварца (SiO_2), полевого шпата ($(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})\text{AlSi}_2\text{O}_8$), углеродистого вещества и техногенной фазы состава $(\text{NaF}) \cdot 1,5\text{CaF}_2 \cdot \text{AlF}_3$. Отличаются пробы только по соотношению минералов. Достоверно выявить количественное соотношение минералов в каждой пробе не представлялось возможным из-за неоднородности материала и наличия во всех фракциях в разном количестве рентгеноаморфной фазы.

Данные, полученные при исследовании химического состава монофракций, позволяют сделать вывод, что исключение темной (серовато-черной) массы, в которой содержание примесей максимально, позволит в значительной степени решить поставленную задачу исследования.

С целью предотвращения образования жидкообразных отходов и повышения экономических показателей переработки материала было принято решение об использовании исключительно сухих методов разделения продуктов. Анализ полученных предварительных результатов проведенных исследований показал, что для возврата максимального количества глиноземсодержащего смета в технологический процесс необходимо применение операций додробливания продукта, а также сухих гравитационных или специальных методов для удаления примесей.

Цель данной работы — определение возможности возврата в технологию криолит-глиноземного материала, а именно глиноземсодержащих сметов, образующихся при эксплуатации электролизеров алюминиевого производства.

В процессе работы проведены эксперименты по центробежно-ударному дроблению и измельчению, воздушной классификации материала раз-

личных фракций в каскадно-гравитационном и центробежном классификаторах. Выполнен анализ полученных продуктов переработки.

Проведены эксперименты по классификации дробленого в центробежно-ударной дробилке и измельченного смета от производства алюминия для оценки возможности снижения содержаний железа и кремния.

Основные задачи исследования:

- определение гранулометрического состава исходного материала;
- дробление материала до крупности менее 5 мм;
- воздушная классификация материала в каскадно-гравитационном классификаторе (КГ);
- анализ гранулометрического и химического составов продуктов КГ;
- воздушная классификация мелкого продукта классификации КГ в центробежном классификаторе (КЦ);
- определение гранулометрического и химического составов продуктов КЦ.

Характеристика исходного материала

Материалом для проведения исследований служила проба смета общей массой 250 кг. Крупность исходного материала составляла 0–70 мм. Смет представлял собой мелкодисперсный порошок серого цвета (основную часть материала, 39,4 %, составлял класс $-0,16$ мм) с включениями кусков металлического алюминия и шлака крупностью до 70 мм. Влажность исходного материала составляла 1,6 %, насыпная плотность — $1,38 \text{ т/м}^3$. Подробные данные по гранулометрическому составу приведены в табл. 1 и 2, химический состав — в табл. 3, результаты аналитических исследований — в табл. 4.

Таблица 1. Гранулометрический состав исходного материала крупностью 0–70 мм

Table 1. Granulometric composition of the 0–70 mm initial material

Сито с ячейкой, мм	Остатки на ситах %	
	Частные	Полные
40,0	17,0	17,0
20,0	9,1	26,0
15,0	4,4	30,5
12,5	2,8	33,3
10,0	3,2	36,5
7,5	2,9	39,4
5,0	4,0	43,4
Дно	56,3	100

Таблица 2. Гранулометрический состав исходного материала фракции 0–5 мм

Table 2. Granulometric composition of the 0–5 mm fraction initial material

Сито с ячейкой, мм	Остатки на ситах %	
	Частные	Полные
2,5	9,0	9,0
1,25	8,8	17,8
0,63	6,2	24,0
0,315	3,1	27,1
0,16	3,3	30,4
Дно	69,6	100

Таблица 3. Химический состав исходного алюминиевого смета по классам крупности

Table 3. Chemical composition of initial aluminum sweepings by size classes

Класс крупности, мм	Выход металлического алюминия +0,071 мм, %	Содержание, мас. %									
		Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	SiO ₂	S	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	ПМПП
+20	6,3	40,7	35,1	3,72	3,34	0,12	9,90	0,89	0,49	0,09	5,45
10–20	7,8	42,6	35,6	2,10	4,54	0,10	9,49	0,28	0,59	0,03	4,46
5–10	8,2	38,9	31,8	1,93	7,79	0,36	9,27	1,23	0,58	0,12	7,43
2,5–5,0	11,1	39,1	31,0	1,58	7,87	0,38	9,11	1,81	0,54	0,14	7,87
1,25–2,5	9,0	40,4	31,5	1,49	6,23	0,38	8,87	1,85	0,53	0,11	8,10
0,63–1,25	8,0	41,8	32,3	1,50	4,80	0,35	8,86	2,03	0,52	0,09	7,23
0,315–0,63	8,0	40,3	28,2	1,74	6,91	0,50	8,14	3,12	0,53	0,11	9,56
0,16–0,315	0,0	62,9	10,6	1,93	7,00	0,52	3,18	2,23	0,27	0,09	10,4
0–0,16	0,0	86,4	3,1	2,42	0,53	0,25	0,48	0,25	0,06	0,01	6,02

Примечание. ПМПП – потеря массы после прокаливании.

Таблица 4. Результаты аналитических исследований пробы смета

Table 4. Results of sweeping sample analytical studies

Класс крупности, мм	Содержание элементов, мас. %						
	Al	Ca	Fe	Mg	K	Na	Si
+5	15,9	4,13	0,159	0,238	0,352	23,3	0,88
–5 + 2,5	16,7	4,3	0,104	0,241	0,356	24,2	0,481
–2,5 + 1,25	15,8	4,03	0,401	0,28	0,4	23,4	0,141
–1,25 + 0,63	18,5	3,86	0,474	0,277	0,36	22,5	1,31
–0,63 + 0,315	16,4	3,95	0,75	0,338	0,373	22,0	1,96
–0,315 + 0,16	45,3	0,88	0,207	0,095	0,133	2,63	0,52
–0,16	48,6	0,69	0,133	0,099	0,121	1,62	0,323

Примечание. Элементы Mn, P, Ti, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn имеют следовые концентрации.

Методика проведения эксперимента

В работе использовались щековая дробилка (ЩД), центробежно-ударная дробилка ДЦ-0,36 (с металлической отбойной плитой), грохот инер-

ционный (ГИЛ), каскадно-гравитационный классификатор (КГ), комплекс измельчительный КИ-0,36 с центробежным классификатором. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 2.

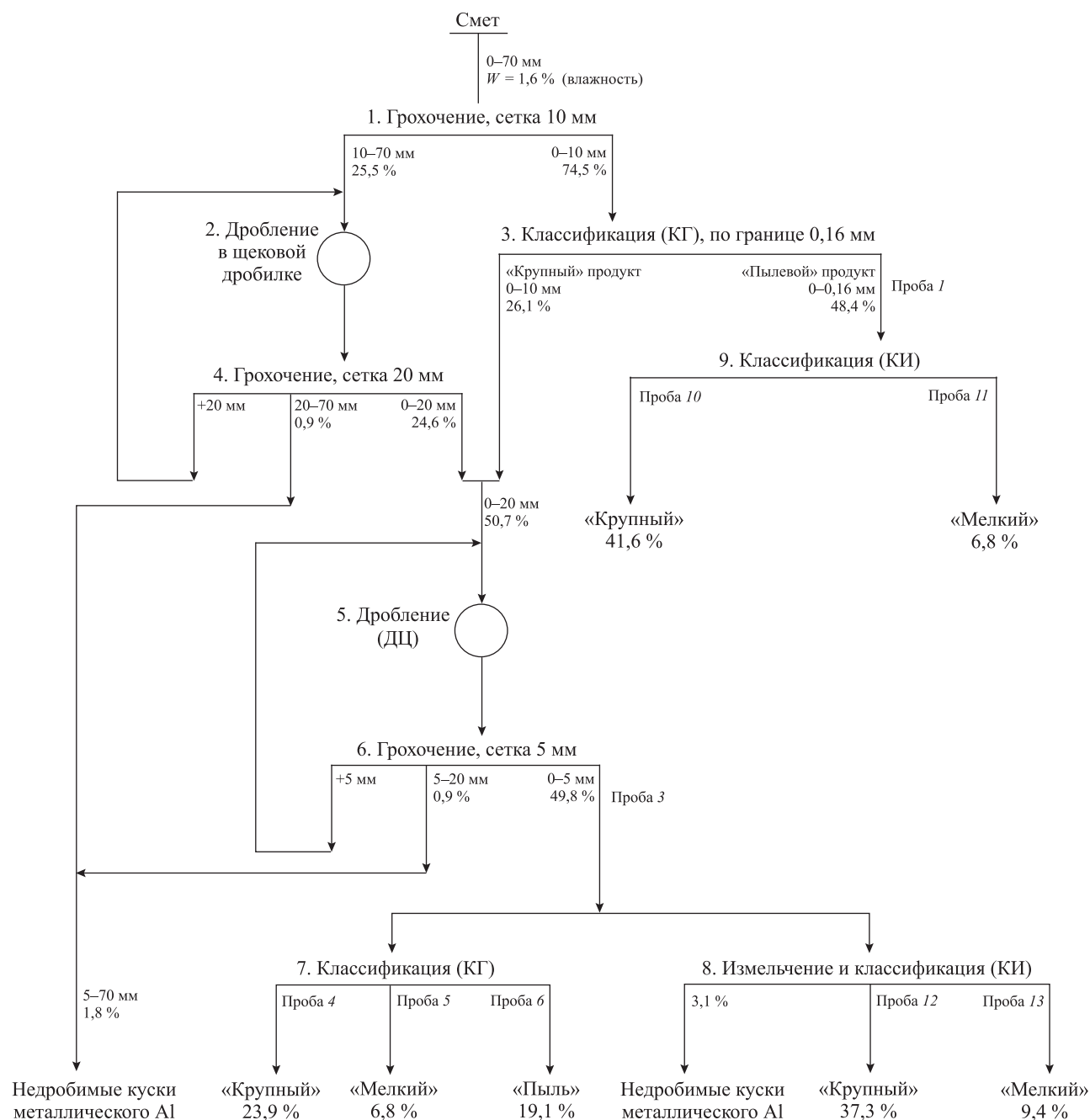


Рис. 2. Схема проведения эксперимента

Номера проб 2, 7–9 в дальнейшем не рассматривались ввиду отсутствия выходного продукта, при этом нумерация остальных проб осталась без изменений

Fig. 2. Experiment setup

Sample numbers 2, 7–9 were not considered further due to the absence of an output product, but the numbering of the rest samples remained unchanged

Исходный материал был рассеян на грохоте с размером ячейки сетки 10 мм. Надрешетный продукт грохочения фракции 10—70 мм дробился в щековой дробилке, работающей в цикле с грохотом с размером ячейки сетки 20 мм. После дробления на сетке грохота остались недробимые куски металлического алюминия.

В каскадно-гравитационных классификаторах КГ применен способ разделения сыпучих материалов в воздушном потоке по размеру или плотности. В процессе работы классифицирующих комплексов КГ возможно получение двух («крупный» и «мелкий» + «пыль») или трех («крупный», «мелкий» и «пыль») готовых продуктов.

Подрешетный продукт грохочения фракции 0—10 мм был расклассифицирован в каскадно-гравитационном классификаторе по границе 0,16 мм. «Крупный» продукт классификации объединялся с материалом фракции 0—20 мм, полученной после щековой дробилки. «Мелкий» продукт классификации повторно классифицировался в центробежном классификаторе (операция 9 на схеме). При классификации в комплексе КИ получены также «крупный» и «мелкий» продукты.

Объединенный материал фракции 0—20 мм дробился на центробежно-ударной дробилке в цикле с грохотом с размером ячейки 5 мм. Полученная фракция 0—5 мм была разделена на две идентичные части: одна была расклассифицирована в КГ с получением «крупного», «мелкого» и «пылевого» продуктов классификации, а другая — измельчена и расклассифицирована в комплексе КИ-0,36 с выходом «крупного» и «мелкого» продуктов классификации. Крупные частицы металлического алюминия выпали в камере измельчения и образовали отдельный продукт. Выходы продуктов и маркировка полученных проб приведены на схеме (см. рис. 2).

Исходный продукт поступает в загрузочный бункер классификатора и подается в шахту I, где в восходящем воздушном потоке происходит его первичная классификация — отделение крупных частиц, которые осаждаются и выгружаются через затвор в нижней части шахты. Более мелкие фракции потоком воздуха выносятся в шахту II, где осуществляются два этапа классификации. При этом средний продукт разгружается через затвор шахты II, а мелкий продукт вместе с воздухом выносится через верхний патрубок классификатора в систему осаждения и аспирации.

Режим работы классификатора КГ регулирует-

ся расходом воздуха, подаваемым транспортным вентилятором в шахты I и II, а также расходом вторичного воздуха.

При классификации смета фракции 0—10 мм в каскадно-гравитационном классификаторе КГ (операция 3 на схеме) был подобран такой режим его работы, при котором разделение данного материала осуществляется по границе 0,16 мм. Выделение «мелкого класса» в отдельный поток позволяет повысить эффективность обогащения оставшейся крупнукусковой части смета. Разделение исходного смета по границе 0,16 мм целесообразно проводить путем воздушной классификации, так как эффективность разделения в классификаторе КГ по данной границе будет выше, чем при грохочении.

Результаты химического анализа проб 10 и 11 показали, что при классификации в КГ меньшее количество примесей (в пересчете на SiO_2 и Fe_2O_3) содержится в «мелком» продукте классификации, поэтому при классификации в КГ дробленого материала фракции 0—5 мм (проба 3) режим работы классификатора не менялся.

Основным параметром работы центробежно-ударной дробилки ДЦ является скорость вращения ускорителя, от которой зависят скорость выброса материала в камеру дробления и, следовательно, его кинетическая энергия. Скорость вращения ускорителя дробилки, в зависимости от поставленной задачи, подбирается таким образом, чтобы обеспечить максимальный выход требуемого класса крупности при однократном прохождении материала через дробилку.

Дробление смета в дробилке ДЦ проводилось при скорости вращения ускорителя 70 м/с. При дроблении смета до фракции 0—5 мм циклическая нагрузка на дробилку составила 1,1.

Измельчительный комплекс КИ с центробежным классификатором предназначен для классификации измельченных тонкодисперсных порошков и материалов по крупности или плотности (при однородности частиц). Процесс классификации обеспечивается исключительно воздушными потоками и ускорением частиц, основанным на принципе воздушно-динамической классификации: разделении частиц согласно их способности к снижению заданной скорости в результате взаимодействия с аэродинамическим потоком.

Исходный продукт через загрузочную воронку подается на разделительный конус и распределяется по каналам ускорителя. Получив необходи-

мую окружающую скорость, материал поступает в камеру измельчения, где измельчается за счет удара о футеровочные поверхности и взаимосоударения частиц.

В камере дробления воздушным потоком производится первичная классификация материала — отделение недоизмельченных частиц для возврата в мельницу. Измельченный продукт выносится потоком воздуха во встроенный воздушной классификатор мельницы, где осуществляется процесс тонкого разделения полученного материала: выделенные недоизмельченные частицы возвращаются на доизмельчение в камеру дробления.

Крупность измельчения материала регулируется скоростью вращения ускорителя мельницы и изменением расхода основного и вторичного воздуха.

В улитке классификатора с помощью вращения разгонного ротора и двух входящих потоков воздуха создается двухфазный воздушный поток. Исходный материал поступает в классификатор с основным воздушным потоком через входной патрубок в виде пылевоздушной смеси.

В образованном ротором динамическом потоке крупные частицы под действием центробежной силы выводятся на периферию. Достигнув внутренней поверхности улитки, частицы тормозятся и опускаются под действием силы тяжести в кольцевую полость цилиндрической части корпуса, а затем в сборник КЦ, откуда выгружаются с помощью шлюзового питателя.

Частицы размером меньше граничной крупности увлекаются потоком воздуха вовнутрь ротора. Вторичный воздушный поток, поступающий в классификатор через патрубок, препятствует попаданию мелких частиц материала на стенки улитки и также способствует их выносу вовнутрь ротора.

Мелкие частицы выносятся из классификатора через выходной патрубок в верхней части ротора и направляются на циклонирование для осаждения и разгрузки.

Граничная крупность разделения продуктов регулируется с помощью частоты вращения разгонного ротора и изменения величин основного и вторичного воздушных потоков.

На основании перераспределения примесей кремния и железа в «крупный» продукт классификации (операция 3 на схеме), при классификации материала пробы 1 был выбран режим,

позволяющий выделить из материала тонкодисперсные частицы крупностью менее 40 мкм. Классификация материала пробы 1 (операция 9 на схеме) проводилась при частоте вращения разгонного ротора 2000 об/мин, максимальном расходе основного воздуха и 50 %-ном расходе вторичного воздушного потока. При классификации удалось снизить долю SiO_2 в «пылевом» продукте классификации до 0,9 мас.%. Массовая доля Fe_2O_3 при этом осталась на том же уровне.

Измельчение и классификация дробленого смета фракции 0—5 мм (проба 3, операция 8 на схеме) осуществлялись при скорости вращения ускорителя мельницы 70 м/с и частоте вращения разгонного ротора классификатора 2000 об/мин при максимальном расходе основного воздуха и 50 %-ном расходе вторичного воздушного потока.

Результаты эксперимента

При дроблении материала часть металлического алюминия выделилась в виде недробимых кусков фракций +20 мм и +5 мм. Суммарный выход данного продукта составил 1,8 %.

Оставшаяся часть металлического алюминия при классификации материала фракции 0—5 мм в каскадно-гравитационном классификаторе (КГ) перешла в «крупный» продукт (операция 7).

При измельчении и классификации материала фракции 0—5 мм в комплексе КИ пластичные частицы металлического алюминия не разрушались и выделялись в нижней части камеры комплекса КИ в отдельный продукт (операция 8). Фракция металлического алюминия выделялась вручную. Таким образом, при измельчении и классификации данного материала в промышленном комплексе КИ могут быть получены три отдельных продукта.

Гранулометрические составы продуктов переработки, определенные с помощью ситового анализа, представлены в табл. 5.

Пробы полученных продуктов переработки были измельчены в виброистирателе до крупности <0,071 мм для установления химического состава рентгенофлуоресцентным методом. В процессе подготовки проб из них были удалены частицы металлического алюминия, не прошедшие через сито с размером ячейки 0,071 мм. Количество удаленных частиц алюминия при подготовке проб и результаты химического анализа приведены в табл. 6, баланс продуктов переработки — в табл. 7.

Таблица 5. Гранулометрические составы продуктов переработки

Table 5. Granulometric compositions of processing products

Номер пробы	Описание пробы	Остатки на ситах	Остатки на ситах с ячейкой, мм, %					
			2,5	1, 25	0,63	0,315	0,16	Дно
1	Пылевой продукт классификации в КГ	Частные	0,0	0,0	0,0	0,1	1,9	97,9
		Полные	0,0	0,0	0,0	0,1	2,1	100,0
3	Фракция 0–5 мм после ДЦ	Частные	5,7	9,4	17,3	17,7	14,9	35,0
		Полные	5,7	15,1	32,4	50,1	65,0	100,0
4	Крупный продукт классификации в КГ	Частные	14,5	25,2	34,1	25,5	0,6	0,2
		Полные	14,5	39,7	73,7	99,3	99,8	100,0
5	Мелкий продукт классификации в КГ	Частные	0,1	0,0	4,0	43,2	50,2	2,5
		Полные	0,1	0,1	4,1	47,3	97,5	100,0
6	Пылевой продукт классификации в КГ	Частные	0,0	0,0	0,0	0,3	12,7	87,0
		Полные	0,0	0,0	0,0	0,3	13,0	100,0

Таблица 6. Результаты химического анализа продуктов переработки

Table 6. Results of processing products chemical analysis

Номер пробы	Выход металлического алюминия +0,071 мм, %	Содержание, мас. %									
		Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	SiO ₂	S	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	ПМПП
1	0,0	82,8	3,29	2,64	2,48	0,30	0,58	0,30	0,07	0,02	7,00
3	2,4	42,5	32,3	1,80	5,45	0,22	8,86	1,16	0,52	0,07	6,34
4	7,0	39,5	34,5	1,69	6,88	0,19	9,0	1,4	0,60	0,10	5,63
5	1,3	40,2	33,2	1,65	5,93	0,28	9,16	1,29	0,55	0,08	7,16
6	0,0	46,5	32,4	1,85	3,25	0,20	8,69	0,89	0,46	0,03	5,46
10	0,0	42,6	30,7	1,69	3,06	0,24	8,97	0,3	0,50	0,12	6,31
11	0,0	85,6	3,17	2,45	0,92	0,29	0,67	0,24	0,06	0,02	6,11
12	0,0	41,6	27,02	1,50	8,7	0,28	8,35	1,18	0,49	0,10	9,60
13	0,0	80,7	4,16	1,76	3,1	0,34	1,73	0,7	0,10	0,07	7,07
Примечание. ПМПП – потеря массы после прокаливания.											

Заключение

Проведена воздушная классификация смета производства алюминия фракций 0–10 мм и 0–5 мм в каскадно-гравитационном и центробежном классификаторах.

Анализ полученных результатов показал, что оксиды кремния и железа неравномерно распределены по классам крупности в исходном алюминиевом смете. Так, меньшее содержание примесей (в пересчете на SiO₂ – 2,48 % и Fe₂O₃ – 0,3 %) присутствует в материале крупностью <0,16 мм (пылевой

Таблица 7. Распределение SiO_2 и Fe_2O_3 по продуктам переработкиTable 7. Distribution of SiO_2 and Fe_2O_3 by processing products

Номер пробы	Продукт	Выход продукта, %	Доля, мас. %		Извлечение, %	
			SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
Измельчение и классификация (КИ)						
1	Фракция 0—10 мм	100,0	2,48	0,3	100,0	100,0
	Итого:	100,0	2,48	0,3	100,0	100,0
10	Крупный	86,0	3,06	0,3	95,3	90,2
11	Пылевой	14,0	0,92	0,24	4,7	9,8
	Итого:	100,0	2,7	0,3	100,0	100,0
Классификация (КГ)						
3	Фракция 0—5 мм	100,0	5,45	1,16	100,0	100,0
	Итого:	100,0	5,45	1,16	100,0	100,0
4	Крупный	47,9	6,88	1,4	61,5	56,4
5	Мелкий	13,7	5,93	1,29	15,2	14,9
6	Пылевой	38,4	3,25	0,89	23,3	28,7
	Итого:	100,0	5,5	1,2	100,0	100,0
Измельчение и классификация (КИ)						
3	Фракция 0—5 мм	100,0	5,45	1,16	100,0	100,0
	Итого:	100,0	5,45	1,16	100,0	100,0
12	Крупный	79,9	8,7	1,18	95,4	87,0
13	Мелкий	20,1	3,1	0,7	4,6	13,0
	Итого:	100,0	5,7	1,1	100,0	100,0
Примечание. Итоговой расчет массовой доли рассчитывался по формуле $\omega = (\gamma_1\beta_1 + \gamma_2\beta_2)/100$, где γ — выход продукта, β — содержание ценного компонента.						

продукт, проба 1), выделенном при классификации в КГ фракции 0–10 мм из исходного смета. Выход данного продукта составил 48,4 %.

При последующей классификации пылевого продукта в центробежно-ударном классификаторе был получен мелкий продукт классификации с массовой долей SiO_2 — 0,92 % и Fe_2O_3 — 0,24 %. Выход данного материала составил только 6,8 %.

При классификации объединенного материала пробы 3, содержащей в пересчете на оксиды 5,45 % SiO_2 и 1,16 % Fe_2O_3 , в каскадно-гравитационном классификаторе не удалось существенно снизить содержание примесей. Самый бедный по содержанию кремния и железа пылевой продукт класси-

фикации включал 3,25 % SiO_2 и 0,89 % Fe_2O_3 . При измельчении и классификации материала пробы 3 в комплексе КИ выделено 9,4 % материала в мелкий продукт, который содержит 1,3 % SiO_2 и 0,7 % Fe_2O_3 .

На основании выполненных исследований рекомендуется применять в схеме обогащения смета алюминиевого производства воздушную классификацию в КГ смета фракции 0–10 мм.

Фракцию –0,16 мм рекомендуется вводить в технологический процесс получения алюминия путем разубоживания первичным глиноземом до регламентируемых значений.

По результатам предварительных исследований установлены контрастные характеристики

глиноземсодержащего смета, что позволяет направлять крупную фракцию, полученную в процессе гравитационного обогащения, на последующую переработку, а именно фотометрическую сепарацию.

Таким образом, можно утверждать, что применение сухой воздушной классификации не позволяет в полной мере достичь поставленной цели, а может являться одной из стадий переработки глиноземсодержащего смета.

Работа выполнена при поддержке гранта
Президента Российской Федерации
№ МК-1739.2020.5.

Acknowledgments: The research was supported by Grant
№ МК1739.2020.5 of the President
of the Russian Federation.

Литература/References

1. Barcelos D.A., Pontes F.V.M., Da Silva F.A.N.G., Castro D.C., Dos Anjos N.O.A., Castilhos Z.C. Gold mining tailing: Environmental availability of metals and human health risk assessment. *J. Hazard. Mater.* 2020. Vol. 397. Art. 122721. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122721>.
2. Ling Q., Dong F., Yang G., Han Y., Nie X., Zhang W., Zong M. Spatial distribution and environmental risk assessment of heavy metals identified in soil of a decommissioned uranium mining area. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 2020. Vol. 26. No. 5. P. 1149—1163. <https://doi.org/10.1080/10807039.2019.1630601>.
3. Huan S., Wang Y., Peng J., Di Y., Li B., Zhang L. Recovery of aluminum from waste aluminum alloy by low-temperature molten salt electrolysis. *Miner. Eng.* 2020. Vol. 154. Art. 154.106386. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106386>.
4. Samara F., Attia N., Khamis M., Ali M.H., Alam I. Is acid treatment of secondary aluminum waste products prior to storage and disposal a viable option? *Environ. Nanotechnol. Monitor. Manag.* 2020. Vol. 14. Art. 100322 <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100322>.
5. Alzubaidi R. Recycling of aluminum byproduct waste in concrete production. *Jordan J. Civ. Eng. Irbid: Jordan Univ Sci. Technol.*, 2017. Vol. 11. No. 1. P. 15—29.
6. Bazhirov N.S., Dauletiyarov M.S., Bazhirov T.S., Serikbayev B.E., Bazhirova K.N. Research of waste of aluminum production as the raw components in technology of composite cementing materials. *News Nat. Acad. Sci. Rep. Kazakh. Ser. Geol. Techn. Sci.* 2018. Vol. 1. No. 427. P. 93—98.
7. Mandal A.K., Verma H.R., Sinha O.P. Utilization of aluminum plant's waste for production of insulation bricks. *J. Clean. Product.* 2017. Vol. 162. P. 949—957. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.080>.
8. Xu S., Yang X.-H., Tang S.-S., Liu J. Liquid metal activated hydrogen production from waste aluminum for power supply and its life cycle assessment. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2019. Vol. 44. No. 33. P. 17505—17514. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.176>.
9. Guo Y., Yu Y., Ren H., Xu L. Scenario-based DEA assessment of energy-saving technological combinations in aluminum industry. *J. Clean. Product.* 2020. Vol. 260. Art. 260.121010. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121010>.
10. Burdonov A.E., Zelinskaya E.V. Complex technology development for processing secondary raw materials of aluminum production for use in the electrolysis process. In: *Proc. 29-th Intern. Mineral Processing Congress IMPC-2018* (Moscow, Russia, 17—21 Sept. 2018). Canada: Canad. Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2019. P. 3028—3035.
11. Lu T.-T., Li R.-B., Zhao H.-L., Xie M.-Z., Liu F.-Q. Numerical simulation of electro-thermal coupling process for spent cathode carbon block from aluminum electrolysis cell. *Gongcheng Kexue Xuebao (Chin. J. Eng.)*. 2020. Vol. 42. No. 6. P. 731—738. <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.06.10.002>.
12. Ржечицкий Э.П., Кондратьев В.В., Карлина А.И., Шахрай С.Г. Получение фтористого алюминия из отходов алюминиевого производства. *Цвет. металлы*. 2016. No. 4 (880). С. 23—26. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.04.04>.
13. Rzhchitskiy E.P., Kondratev V.V., Karlina A.I., Shakh-ray S.G. Aluminium fluoride obtaining from aluminium production wastes. *Tsvetnye Metally*. 2016. No. 4. P. 23—26 (In Russ.).
14. Castelli A.F., Elsidio C., Scaccabarozzi R., Nord L.O., Martelli E. Optimization of organic rankine cycles for waste heat recovery from aluminum production plants. *Front. Energy Res.* 2019. Vol. 7. June. Art. 44. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00044>.
15. Tang Y., Li Y., Shi Y., Wang Q., Yuan X., Zuo J. Environmental and economic impacts assessment of prebaked anode production process: A case study in Shandong Province, China. *J. Clean. Product.* 2018. Vol. 196. P. 1657—1668. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.121>.
16. Gao S., Xue J., Lang G., Liu R., Bao C., Wang Z., Zhang F. Experimental study on preparation of prebake anodes with high sulfur petroleum coke desulfurized at high

- temperatures. *Miner. Met. Mater. Ser.* 2019. P. 1301—1309. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_160.
16. Бурдонов А.Е., Зелинская Е.В., Гавриленко Л.В., Гавриленко А.А. Изучение вещественного состава глинозем-содержащего материала алюминиевых электролизеров для использования в технологии первичного алюминия. *Цвет. металлы*. 2018. No. 3. С. 32—38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>.
Burdonov A.E., Zelinskaya E.V., Gavrilenko L.V., Gavrilenko A.A. Investigation of substantial composition of alumina-bearing material of aluminium electrolyzers for usage in primary aluminium technology. *Tsvetnye Metally*. 2018. No. 3. P. 32—38 (In Russ.).
17. Васюнина Н.В., Дубова И.В., Белоусов С.В., Шарыпов Н.А. Рециклинг сметок электролизного производства алюминия. *Обогащение руд*. 2019. No. 2. С. 39—44. <https://doi.org/10.17580/or.2019.02.07>.
Vasyunina N.V., Dubova I.V., Belousov S.V., Sharypov N.A. Recycling of electrolytic aluminum production sweepings. *Obogashchenie Rud*. 2019. No. 2. P. 39—44 (In Russ.).
18. Dou Y.-H., Liu Y., Liu Y.-B., Xia Q.-B. Effect of Si content on friction-wear properties of high-silicon aluminum alloys fabricated by mechanical alloying and hot pressing. *Fenmo Yejin Cailiao Kexue yu Gongcheng (Mater. Sci. Eng. Powder Metall.)*. 2013. Vol. 18. No. 5. P. 669—674.
19. Mehdi H. Effect of silicon content on the mechanical properties of aluminum alloy. *Int. Res. J. Eng. Technol.* 2015. Vol. 2. P. 1326—1330.
20. Zhang L., Gao J., Damoah L.N.W. Removal of iron from aluminum: A review. *Miner. Process. Extract. Metall. Rev.* 2012. Vol. 33. No. 2. P. 99—157. <https://doi.org/10.1080/08827508.2010.542211>.