

Металлургия чёрных, цветных и редких металлов

Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals

Научная статья
УДК 669.712
DOI: 10.14529/met220403

ВЛИЯНИЕ МОДУЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКА НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ ГЛИНОЗЕМА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ НЕФЕЛИНОВЫХ РУД

А.В. Александров¹, modif@list.ru

Н.В. Немчинова², ninavn@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

¹ ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр», обособленное предприятие в г. Ачинске, Ачинск, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Переработка щелочных алюмосиликатов (как альтернатива бокситовым рудам) обеспечивает отечественным глиноземом российские алюминиевые заводы до 41 %. На Ачинском глиноземном заводе производят глинозем щелочным способом спекания нефелиновой шихты. Для получения хорошо растворимых в водных и щелочных растворах алюминатов натрия и калия, а также малорастворимого двухкальциевого силиката используется шихта, состоящая из нефелина и известняка, белого шлама (от обескремнивания алюминатного раствора) и оборотной воды (из расчета получения жидкотекучей пульпы). Дозировка сырьевых компонентов осуществляется для получения определенных молярных соотношений содержания CaO к SiO₂ (известкового модуля), а также молярных соотношений содержания (Na,K)₂O к Al₂O₃ (щелочного модуля). Шихта подается во вращающуюся печь (длиной 185 м и диаметром 5 м) и спекается при нагревании до температуры 1250–1300 °С. По опыту работы предприятия отмечаются периоды со снижением извлечения Al₂O₃ из-за повышения содержания соединений серы и железа в спеке. Для определения оптимального химического состава спека с учетом наличия данных примесных соединений в нем были проведены исследования по спеканию нефелиновых шихт с различными модульными характеристиками: M_{изв} = 1,90–1,93 ед., M_{щел} = 1,06–1,08 ед. (первый вариант); M_{изв} = 1,90–1,93 ед. и M_{щел Fe,S} (щелочной модуль с учетом наличия в спеке примесей железа и серы) = 0,87–0,91 ед. (второй вариант). В результате проведенных исследований было установлено, что для получения оптимального химического состава спека необходимо выдерживать щелочной модуль (с учетом наличия примесей железа и серы) равным 0,89 ед., а известковый модуль – равным 1,92 ед. При данных условиях можно достичь извлечения глинозема 84 % при нормальном технологическом режиме работы печей спекания.

Ключевые слова: производство глинозема, спекание, вращающаяся печь, нефелиновый спек, выщелачивание спека, щелочной модуль, известковый модуль

Для цитирования: Александров А.В., Немчинова Н.В. Влияние модульных характеристик спека на извлечение глинозема при переработке нефелиновых руд // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т. 22, № 4. С. 21–30. DOI: 10.14529/met220403

IMPACT OF MODULAR SINTER CHARACTERISTICS ON THE EXTRACTION OF ALUMINA WHEN PROCESSING NEPHELINE ORES

A.V. Aleksandrov¹, modif@list.ru

N.V. Nemchinova², ninavn@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

¹ LLC "RUSAL Engineering and Technology Center", separate enterprise in Achinsk, Achinsk, Russia

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Processing alkaline aluminosilicates (as an alternative to bauxite ores) provides Russian aluminum smelters with domestic alumina up to 41 %. The Achinsk Alumina Plant manufactures alumina by alkaline sintering of nepheline charge. To obtain very water- and alkaline-soluble sodium and potassium aluminates and low-soluble dicalcium silicate, a charge is used, consisting of nepheline, limestone, white sludge (from the aluminate solution desiliconization) and recycle water (to obtain fluid pulp). The raw materials are dosed to obtain certain CaO : SiO₂ (lime module) and (Na,K)₂O : Al₂O₃ (alkaline module) molar ratios. The charge is fed to a rotary kiln (185 m long and 5 m in diameter) and sintered when heated to 1250–1300 °C. According to the plant's practice, periods occur when the Al₂O₃ extraction reduces due to an increase in the content of sulfur and iron compounds in the sinter. To define the sinter's optimal chemical composition considering these impurities, sintering of nepheline charges with different modular characteristics has been studied: M_{lime} = 1.90–1.93 units, M_{alk} = 1.06–1.08 units (first option); M_{lime} = 1.90–1.93 units, and M_{alk Fe,S} (alkaline module, considering iron and sulfur impurities in the sinter) = 0.87–0.91 units (second option). The study results show that to obtain the sinter's optimal chemical composition, the alkaline module (considering iron and sulfur impurities) and the lime module should be maintained at 0.89 and 1.92 units, respectively. Such conditions allow for achieving an 84 % alumina recovery under normal operating modes of sintering kilns.

Keywords: alumina production, sintering, rotary kiln, nepheline speck, leaching of speck, alkaline module, lime module

For citation: Aleksandrov A.V., Nemchinova N.V. Impact of modular sinter characteristics on the extraction of alumina when processing nepheline ores. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2022;22(4):21–30. (In Russ.) DOI: 10.14529/met220403

Введение

Мировая алюминиевая промышленность занимает передовые позиции по производству первичного алюминия и изделий из него. Конкурентоспособность данной отрасли цветной металлургии во многом определяется обеспеченностью качественным основным сырьем – глиноземом [1–4]. Для российских предприятий, производящих первичный алюминий, глинозем производят из бокситов и нефелинов [5–7]. В последние годы проводятся многочисленные исследования по расширению сырьевой базы отечественного глинозема за счет вовлечения техногенных отходов и некондиционного сырья [8–10].

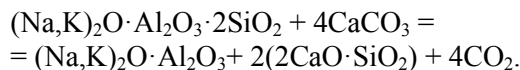
Россия в течение последних 15 лет испытывает устойчивый дефицит в глиноземном сырье. Поэтому ежегодно для нужд алюминиевой промышленности в страну импортируется до 3 млн т глинозема, что требует ре-

ализации на внешнем рынке значительного количества первичного алюминия. Россия располагает огромными запасами нефелина как в виде отходов обогащения апатит-нефелиновой руды Кольского полуострова, так и разведанными запасами в Сибири. Наша страна имеет приоритет в данной технологии и опыт переработки нефелинового сырья двух крупнейших месторождений – в Мурманской области и Красноярском крае [11, 12].

Переработка щелочных алюмосиликатов (как альтернатива бокситовым рудам) обеспечивает до 41 % отечественным глиноземом российские алюминиевые заводы [13]. И в нашей стране, учитывая более высокие затраты энергоресурсов, чем при переработке бокситов, а также низкое качество сырья, перспективы наращивания производства глинозема из нефелинов без дополнительных инвестиций проблематичны.

Получение глинозема спеканием нефелинов

Как известно, способ спекания нефелинов состоит в переводе оксида алюминия, содержащегося в нефелине, в алюминаты натрия и калия с общей формулой $(\text{Na,K})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, хорошо растворимые в водных и щелочных растворах, и связывании оксида кремния в малорастворимый двухкальциевый силикат $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S) [6]. Шихта для спекания состоит из нефелина и известняка, белого шлама от обескремнивания алюминатного раствора и оборотной воды из расчета получения жидкотекучей пульпы с влажностью 28–31 %. Шихта подается во вращающуюся печь длиной 185 м и диаметром 5 м (рис. 1) и спекается при нагревании до температуры 1250–1300 °С, которая обеспечивает взаимодействие компонентов по реакции:



По данным электронной микроскопии (с использованием электронного микроскопа JEOL JIB-Z450, Япония) и рентгенодифракционного анализа, выполненного на дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker, Германия), установлено, что промышленный спек (АО «РУСАЛ Ачинск») состоит из агрегированных частиц, состав которых отвечает α' -, β -модификациям двухкальциевого силиката и алюминату натрия (табл. 1, рис. 2). Сканирующая электронная микроскопия на растровом электронном микроскопе с ионной пушкой JEOL JIB-Z450, съемка проводилась во вторичных электронах.

На рис. 3 представлена микроструктура аншлифа образца спека (анализ также выполнен с помощью растрового электронного

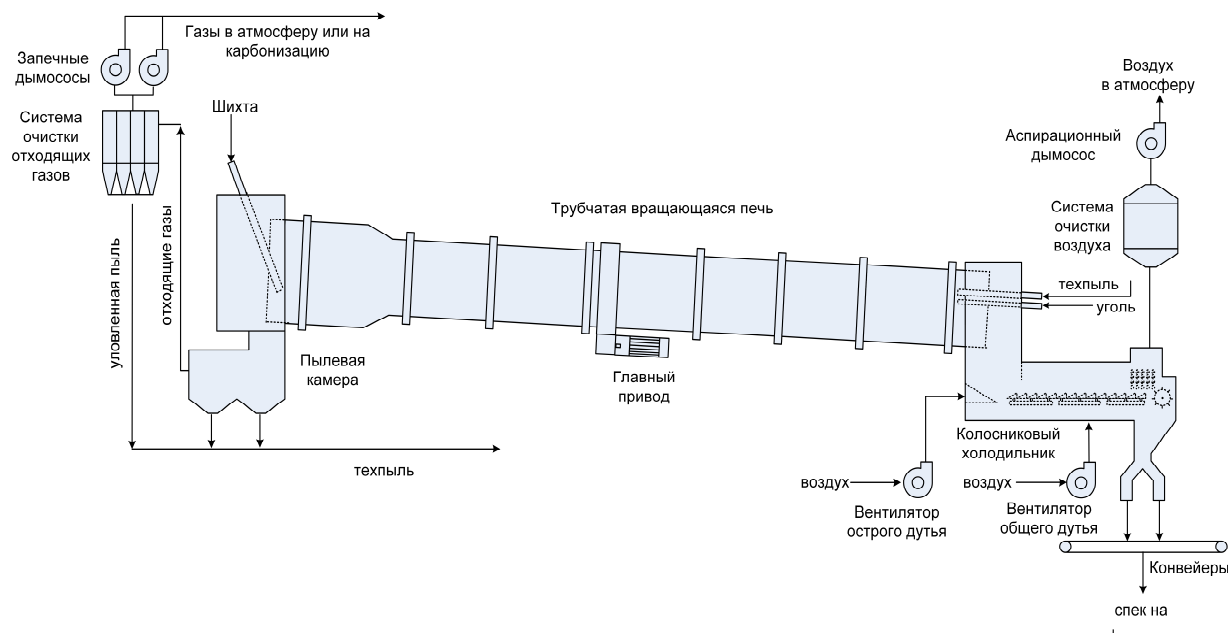


Рис. 1. Печь для спекания шихты
Fig. 1. Furnace for batch sintering

Фазовый состав нефелинового спека
Phase composition of nepheline sinter

Таблица 1

Table 1

Содержание, % масс.				
Основной состав (> 45)	Заметное количество (25–45)	Незначительное количество (15–25)	Мало (5–15)	Следы (< 5)
$\beta\text{-C}_2\text{S}$ – 41 $\alpha'\text{-C}_2\text{S}$ – 10	–	NA*	NAS ₂	CA, NCS (NCAS ₂), CMS, твердые растворы типа NA–NF

*NA – алюминат натрия $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; NAS₂ – карнегиит $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$; CA – алюминаты кальция $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; NCS (NCAS₂) – натрокальциевые силикаты $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$; CMS – кальциймагниево-силикаты $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$; NF – феррит натрия $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

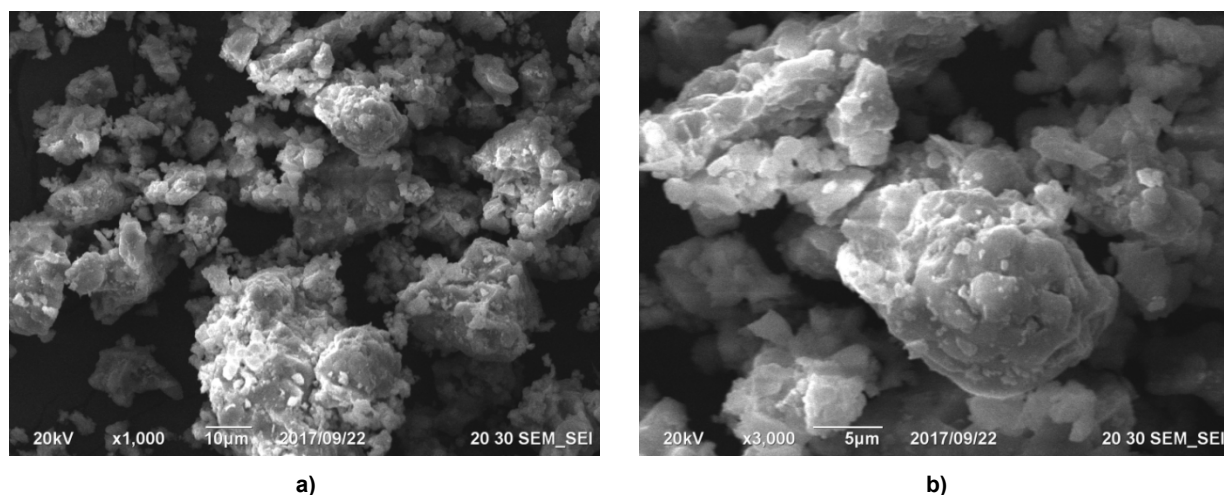


Рис. 2. Общий вид образца нефелинового спека: а – увеличение 1000×; б – увеличение 3000×
Fig. 2. General view of a sample of nepheline cake: a – magnification 1000×, b – magnification 3000×

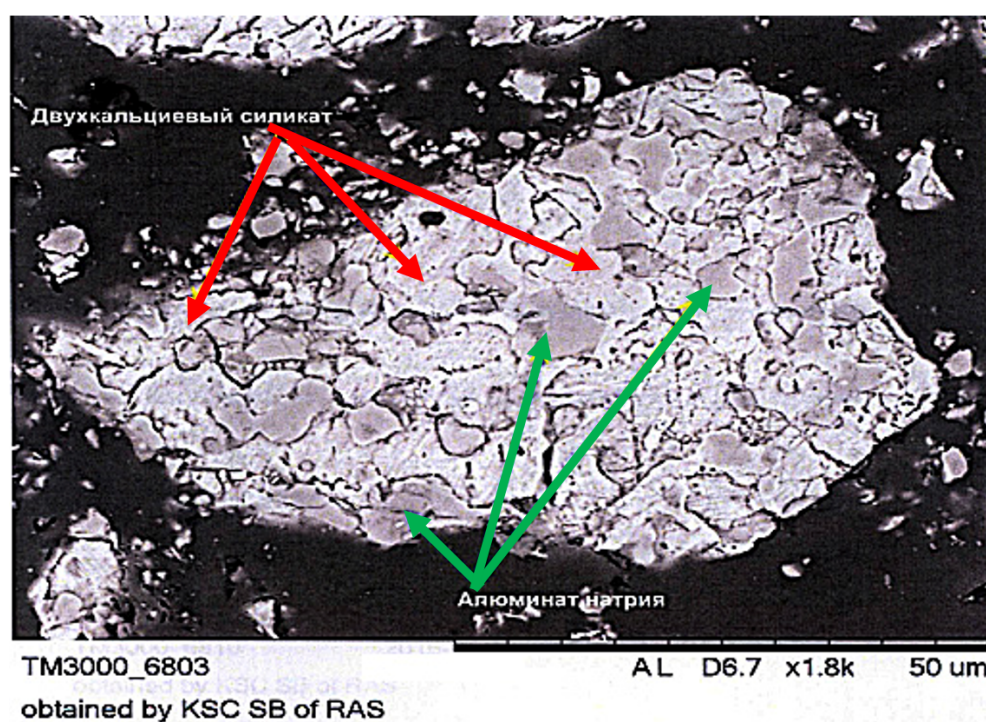


Рис. 3. Изображение аншлифа измельченного спека
Fig. 3. Image of a polished section of a crushed sinter

микроскопа JEOL JIB-Z450), на которой видно, что включения алюмината натрия (темного цвета) находятся в структуре C_2S (частицы светло-серого цвета).

В качестве топлива в печах используют тонкоизмельченный уголь. Печные отходящие газы после системы газоочистки используются для карбонизации раствора, а избыток их выбрасывают в атмосферу. Спек охлаждается до температуры 160 °С в колосниковых холодильниках, затем его выщелачивают оборотным раствором, полученным смешением

содощелочного раствора (получаемого при декомпозиции) и крепкой промывкой от промывки шлама. Комплексный подход к переработке нефелинов позволяет извлекать ряд сопутствующих продуктов: соду, поташ, сульфат калия, хлорид калия, галлий, цемент [5, 14].

Постановка задачи

Одним из важнейших вопросов в технологии получения глинозема по щелочному способу спекания является подбор оптимального химического состава шихты для обеспе-

чения устойчивого режима работы печей и получения спека, отвечающего по качеству нормативным требованиям [5, 14].

В настоящее время на АО «РУСАЛ Ачинск» используются следующие модульные характеристики спека: известковый модуль ($M_{\text{изв}} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$), равный 1,91–1,93 ед., и

щелочной модуль ($M_{\text{щел}} = \frac{\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3}$), рав-

ный 1,07–1,08 ед. При этом извлечение глинозема ($E_{\text{Al}_2\text{O}_3}$) находится на уровне 81,5 %. По опыту работы предприятия отмечаются периоды со снижением $E_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ и извлечения щелочей ($E_{\text{R}_2\text{O}}$) на 1–2 %, которые связаны с повышением содержания соединений серы и железа в спеке.

Известно, что из-за наличия соединений серы и железа во входящем сырье (известняк, нефелиновая руда) и угольном топливе и при недостатке щелочей могут образовываться алюминаты кальция, соединения типа геленита и анортита, снижающие показатели извлечения ценных компонентов в раствор выщелачивания.

С целью определения оптимального химического состава спека с учетом наличия

железа и серы были проведены 2 серии лабораторных опытов по спеканию нефелиновых шихт с различными модульными характеристиками спека:

первый вариант:

$M_{\text{изв}} = 1,90\text{--}1,93$ ед. и $M_{\text{щел}} = 1,06\text{--}1,08$ ед.;

второй вариант:

$M_{\text{изв}} = 1,90\text{--}1,93$ ед. и щелочной модуль с учетом наличия в спеке примесей железа и серы

($M_{\text{щелFe,S}} = \frac{\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SO}_3}$) – 0,87–0,91 ед.

Данный показатель носит название «полный» щелочной модуль.

Для приближения к промышленным условиям исследования проводились с учетом постоянной степени оплавления спека. Крупность частиц исходных компонентов шихты составляла 0,08 мм. Спекание шихт проводили в лабораторной электропечи марки СНОЛ (Россия) в диапазоне температур 1200–1300 °С со скоростью подъема температуры 10 °С/мин. Охлаждение спеков производили одновременно с печью до температуры 200 °С, а далее до комнатной температуры в эксикаторе. При изменении модулей корректировка температуры спекания производилась на основе данных, представленных на рис. 4, 5.

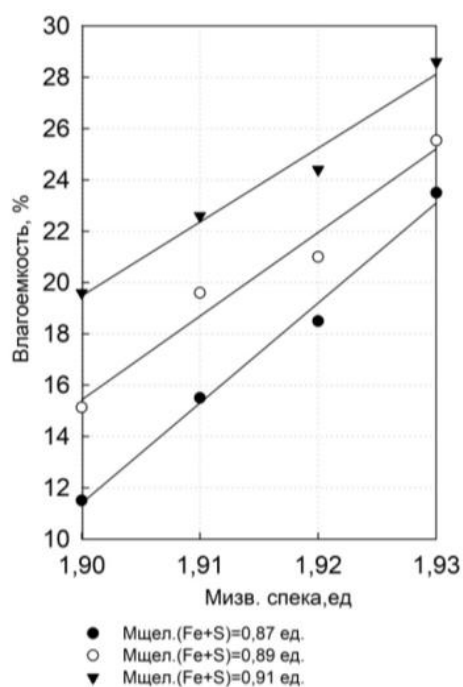


Рис. 4. Зависимость влагоемкости спека от состава спека при температуре спекания 1250 °С
Fig. 4. Dependence of the sinter moisture capacity on the composition of the sinter at a sintering temperature of 1250 °С

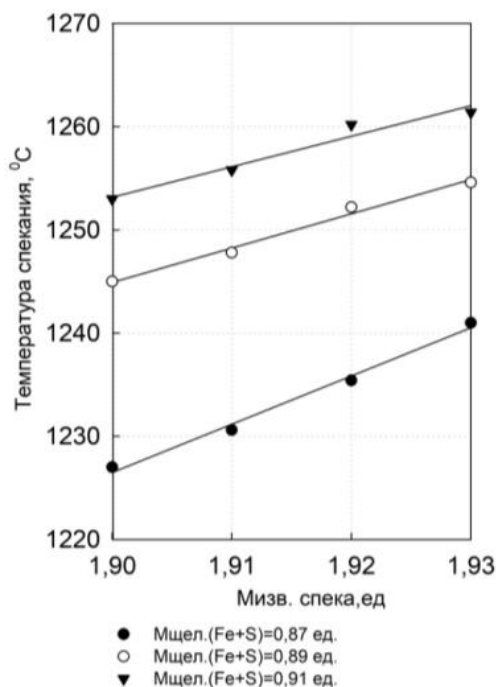


Рис. 5. Зависимость температуры спекания от состава спека
Fig. 5. Dependence of the sintering temperature on the composition of the sinter

Для оценки химического $E_{Al_2O_3}$ производили выщелачивание спеков по используемым методикам: стандартное и технологическое. В табл. 2, 3 приведены химические составы исходных материалов и полученных спеков.

Результаты по изменению $E_{Al_2O_3}$ при технологическом выщелачивании спека в зависимости от величины модулей при одинаковой степени оплавления спека приведены на рис. 6.

Из приведенных данных следует, что в интервале изменения $M_{щел Fe,S}$ спека от 0,87 до 0,91 ед. технологическое $E_{Al_2O_3}$ увеличивается с повышением величины $M_{щел Fe,S}$. Величина $M_{изв}$, при которой отмечается максимальный выход глинозема, зависит от $M_{щел Fe,S}$. При величине $M_{изв}$ ниже 1,92 ед. во всех опытах наблюдается снижение $E_{Al_2O_3}$. Результаты $E_{Al_2O_3}$ при выщелачивании спека, рассчитанного на связывание серы и железа, показывают прирост данного показателя в среднем на 1,5 %.

Полученные зависимости подтверждаются результатами технологического выщелачивания промышленных спеков после их выдержки при температурах 1275–1285 °С (рис. 7).

Как показывает практика, увеличение содержания свободной щелочи в жидкой фазе шихты приводит к интенсификации процессов зарастания цепных зон печей прокаливания. Поэтому при существующей технологии спекания повышение $M_{щел Fe,S}$ спека выше 0,91 ед., несмотря на рост $E_{Al_2O_3}$, не представляется возможным в связи с нарушением режима работы зоны сушки.

Сравнительные результаты по $E_{Al_2O_3}$ при стандартном и технологическом выщелачивании лабораторных спеков приведены на рис. 8. Из полученных данных следует, что при $M_{изв}$ выше 1,92 ед. (при всех значениях $M_{щел Fe,S}$) спека отмечается разница в значениях извлечения глинозема, полученного при стандартном и технологическом выщелачивании. Данный факт может быть связан с наличием в спеке кальциевых алюминатов и, возможно,

Химический состав исходных материалов
Chemical composition of raw materials

Таблица 2

Table 2

Наименование	Содержание основных компонентов, %										
	ППП*	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	Прочие
Нефелиновая руда	3,92	40,55	9,22	1,78	4,46	25,85	10,53	2,54	0,42	0,16	0,57
Известняк	42,5	1,35	53,46	0,83	0,48	0,59	–	–	0,5	0,09	0,20
Сода	43,4	–	–	–	–	–	56,6	–	–	–	0

*ППП – потери при прокаливании.

Химический состав спеков
Chemical composition of cakes

Таблица 3

Table 3

Навеска шихты	Содержание основных компонентов, %												
	ППП	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	$M_{изв}$	$M_{щел Fe,S}$	Проч.
1	0,91	24,26	43,10	1,31	3,33	15,25	8,12	2,52	0,86	0,05	1,90	0,87	0,30
2	0,86	24,16	42,97	1,30	3,17	15,46	8,28	2,64	0,80	0,05	1,90	0,89	0,30
3	0,79	24,11	42,85	1,20	3,10	15,72	8,55	2,61	0,73	0,04	1,90	0,91	0,29
4	0,98	24,18	43,09	1,29	3,34	15,22	8,10	2,55	0,90	0,04	1,91	0,87	0,30
5	0,98	24,13	43,08	1,27	3,21	15,31	8,23	2,63	0,81	0,04	1,91	0,89	0,30
6	0,95	24,03	42,92	1,22	3,07	15,57	8,46	2,68	0,77	0,05	1,91	0,91	0,28
7	1,01	24,01	43,07	1,29	3,26	15,29	8,20	2,55	0,99	0,05	1,92	0,87	0,30
8	0,99	24,01	43,09	1,27	3,20	15,37	8,28	2,60	0,84	0,05	1,92	0,89	0,30
9	0,89	23,95	42,97	1,20	3,07	15,66	8,51	2,66	0,76	0,05	1,92	0,91	0,28
10	0,99	24,05	43,29	1,32	3,36	15,07	8,08	2,52	0,94	0,05	1,93	0,87	0,33
11	0,99	23,95	43,18	1,27	3,21	15,35	8,31	2,55	0,84	0,04	1,93	0,89	0,30
12	0,95	23,96	43,15	1,18	3,08	15,50	8,52	2,55	0,79	0,05	1,93	0,91	0,27

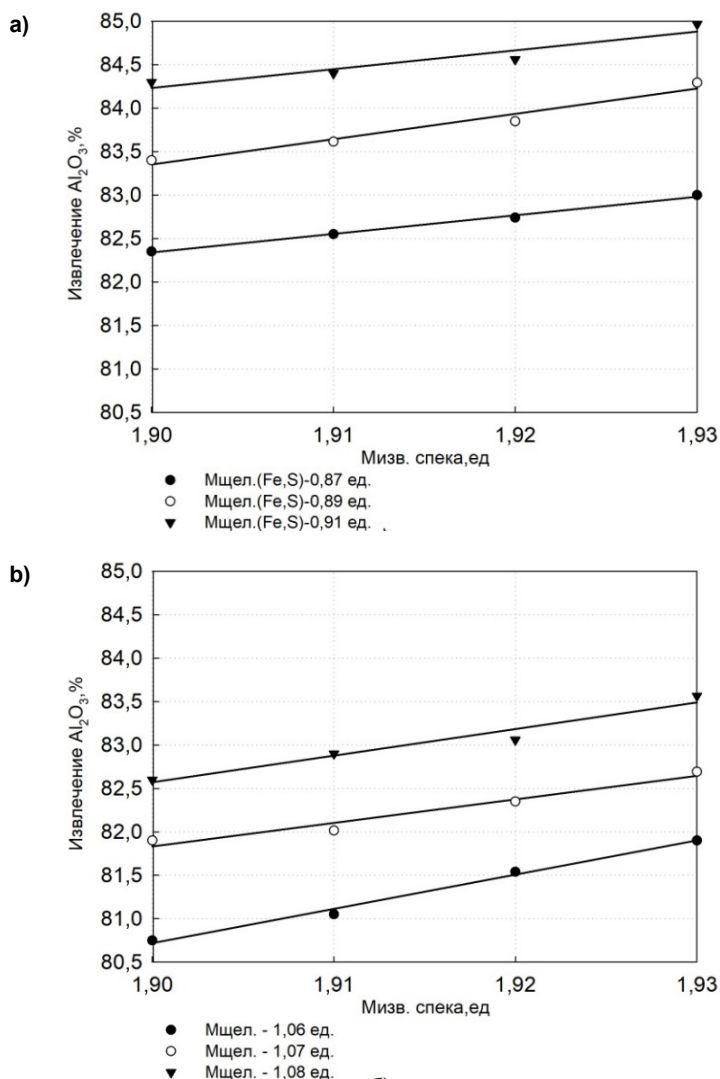


Рис. 6. Зависимость извлечения Al_2O_3 из спека при технологическом выщелачивании от модулей спека для: а – $M_{щел. Fe,S}$; б – $M_{щел}$
 Fig. 6. Dependence of extraction of Al_2O_3 from sinter at technological leaching from sinter modules for: а – $M_{alk Fe,S}$; б – M_{lime}

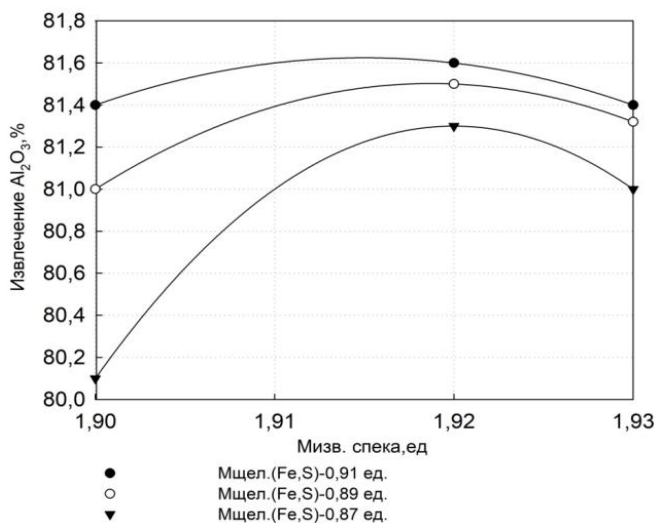


Рис. 7. Зависимость технологического извлечения Al_2O_3 от модулей спека
 Fig. 7. Dependence of technological recovery of Al_2O_3 on sinter modules

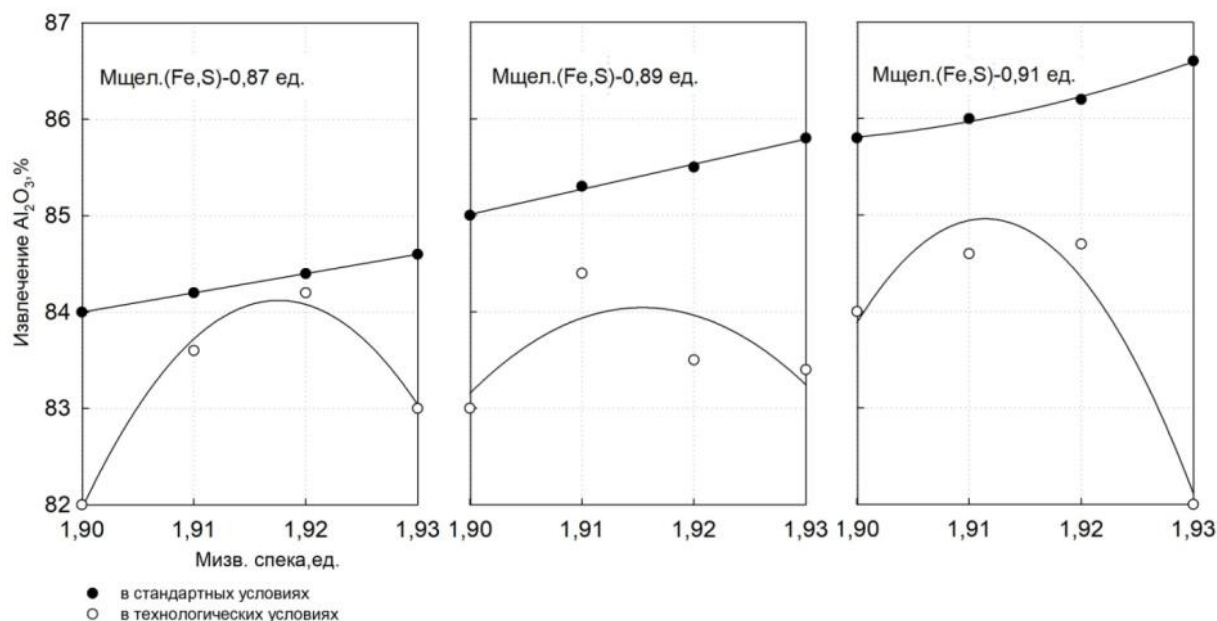


Рис. 8. Зависимость извлечения Al_2O_3 при стандартном и технологическом выщелачивании от модулей спека при одинаковой степени оплавления
Fig. 8. Dependence of Al_2O_3 extraction during standard and technological leaching on sinter modules at the same degree of fusion

свободной извести. Из-за наличия данных соединений происходит образование трудноотмываемых и труднофильтруемых шламов, что приводит к ухудшению технико-экономических показателей при гидрохимической переработке спека [5]. Со снижением $M_{изв}$ спека ниже 1,92 ед. возможно образование натрокальциевых силикатов типа $mR_2O \cdot nCaO \cdot pSiO_2$. Это приводит к уменьшению выпуска содопродуктов, являющихся обязательной продукцией при производстве Al_2O_3 методом спекания [15].

Заключение

Проблема увеличения объемов производимого российского глинозема для алюми-

ниевых заводов стоит достаточно остро. В связи с этим ведутся исследования по увеличению извлечения целевого продукта на отечественных предприятиях, производящих глинозем.

В результате проведенных исследований было установлено, что с учетом условий работы печей спекания при переработке нефелинов и дальнейших гидрохимических переделов спек имеет оптимальный состав при щелочном модуле с учетом наличия в спеке примесей железа и серы, равном 0,89 ед., и известковом модуле, равном 1,92 ед. При данных условиях можно достичь извлечения глинозема 84 % при нормальном технологическом режиме работы печей спекания.

Список литературы

1. Grjotheim K., Kvande H. Introduction to aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1993. 260 p.
2. Wang Xing Li. Alumina production theory & technology. Changsha: Central South University, 2010. 411 p.
3. Evans K. The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue // Journal of Sustainable Metallurgy. 2016. Vol. 2, iss. 4. P. 316–331. DOI: 10.1007/s40831-016-0060-x
4. Nemchinova N.V., Lazko A.Yu. How the Chemistry of Raw Materials Affects Aluminum Produced in Cells with Prebaked Anodes // Materials Science Forum. 2022. Vol. 1052. P. 209–213. DOI: 10.4028/p-5hz514
5. Арлюк Б.И., Лайнер Ю.А. Комплексная переработка щелочного алюминийсодержащего сырья. М.: Metallurgy, 1994. 384 с.

6. Производство глинозема / А.И. Лайнер, Н.И. Еремин, Ю.А. Лайнер, И.З. Певзнер. М.: Металлургия, 1978. 344 с.
7. Loginova I.V. Investigation into the question of complex processing of bauxites of the Srednetimanskoe deposit // *Journal of Non-Ferrous Metals*. 2013. Vol. 54, no. 2. P. 143–147.
8. Sizyakov V.M., Bazhin V.Y., Sizyakova E.V. Feasibility study of the use of nepheline-limestone charges instead of bauxite // *Metallurgist*. 2016. Vol. 11, no. 59. P. 1135–1141. DOI: 10.1007/s11015-016-0228-4
9. Улучшение качества спека известняково-нефелиновой шихты путем ввода в нее гипсоангидритового техногенного сырья / И.И. Шепелев, Н.В. Головных, Сахачев А.Ю. и др. // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т. 22, № 5. С. 225–239. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-5-225-239
10. Pyrometallurgical treatment of a nepheline charge using additives of natural and technogenic origin / V.Y. Bazhin, V.N. Brichkin, V.M. Sizyakov, M.V. Cherkasova // *Metallurgist*. 2017. Vol. 61, iss. 1-2. P. 147–154. DOI: 10.1007/s11015-017-0468-y
11. Килин Ю.А., Косолапов А.И. Повышение качества руды на Кия-Шалтырском нефелиновом карьере // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2003. № 1. С. 178–179.
12. Сизяков В.М. Состояние, проблемы и перспективы развития способа комплексной переработки нефелинов // *Записки Горного института*. 2006. Т. 169. С. 16–23.
13. Александров А.В., Немчинова Н.В. Расчет ожидаемой экономической эффективности производства алюминия за счет увеличения применения глинозема отечественного производства // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24, № 2. С. 408–420. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-2-408-420
14. Сизяков В.М., Корнеев В.И., Андреев А.А. Повышение качества глинозема и попутной продукции при переработке нефелинов. М.: Металлургия, 1986. 115 с.
15. Горбачев С.Н., Александров А.В., Жбанова В.А. Особенности производства кальцинированной соды на ОАО «РУСАЛ Ачинск» // *Проблемы качества сырьевых материалов для предприятий стекольной промышленности: материалы междунар. конф. (г. Москва, 19 апр. 2012 г.)*. М., 2012. С. 10–14.

References

1. Grjotheim K., Kvande H. *Introduction to aluminium electrolysis*. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1993. 260 p.
2. Wang Xing Li. *Alumina production theory & technology*. Changsha: Central South University, 2010. 411 p.
3. Evans K. The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016;2(4):316–331. DOI: 10.1007/s40831-016-0060-x
4. Nemchinova N.V., Lazko A.Yu. How the Chemistry of Raw Materials Affects Aluminum Produced in Cells with Prebaked Anodes. *Materials Science Forum*. 2022;1052:209–213. DOI: 10.4028/p-5hz514
5. Arlyuk B.I., Linder Yu.A. *Kompleksnaya pererabotka shchelochnogo alyuminiysoderzhashchego syr'ya* [Complex processing of alkaline aluminum-containing raw materials]. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1994. 384 p. (In Russ.)
6. Linder A.I., Eremin N.I., Linder Yu.A., Pevzner I.Z. *Proizvodstvo glinozema* [Alumina production]. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1978. 344 p. (In Russ.)
7. Loginova I.V. Investigation into the question of complex processing of bauxites of the Srednetimanskoe deposit. *Journal of Non-Ferrous Metals*. 2013;54(2):143–147.
8. Sizyakov V.M., Bazhin V.Y., Sizyakova E.V. Feasibility study of the use of nepheline-limestone charges instead of bauxite. *Metallurgist*. 2016;11(59):1135–1141. DOI: 10.1007/s11015-016-0228-4
9. Shepelev I.I., Golovnykh N.V., Sakhachev A.Yu., Zhyzhaev A.M., Kotlyagin A.G. Improving limestone-nepheline charge sinter quality by gypsum anhydrate technogenic raw material introduction. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(5):225–239. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-5-225-239

10. Bazhin V.Y., Brichkin V.N., Sizyakov V.M., Cherkasova M.V. Pyrometallurgical treatment of a nepheline charge using additives of natural and technogenic origin. *Metallurgist*. 2017;61(1-2):147–154. DOI: 10.1007/s11015-017-0468-y
11. Kilin Yu.A., Kosolapov A.I. [Improving the quality of ore at the Kiya-Shaltyr nepheline quarry]. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2003;1:178–179. (In Russ.)
12. Sizyakov V.M. [State, problems and prospects for the development of a method for the complex processing of nephelines]. *Zapiski Gornogo instituta*. 2006;169:16–23. (In Russ.)
13. Aleksandrov A.V., Nemchinova N.V. Calculation of the expected economic efficiency of aluminium production by increasing the use of domestic alumina. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):408–420. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2020-2-408-420
14. Sizyakov V.M., Korneev V.I., Andreev V.V. *Povysheniye kachestva glinozema i poputnoy produktii pri pererabotke nefelinov* [Improving the quality of alumina and by-products in the processing of nephelines]. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1986. 115 p. (In Russ.)
15. Gorbachev S.N., Aleksandrov A.V., Zhanova V.A. [Features of the production of soda ash at JSC “RUSAL Achinsk”]. In: *Proceedings of the Intern. Conf. Problemy kachestva syr'yevykh materialov dlya predpriyatiy stekol'noy promyshlennosti: materialy mezhdunarodnoy konferentsii (Moscow, 19 aprelya 2012 g.)*; 2012. P. 10–14. (In Russ.)

Информация об авторах

Александр Александр Валерьевич, канд. техн. наук, директор департамента по технологии и техническому развитию глиноземного производства, ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр», обособленное предприятие в г. Ачинске, Ачинск, Россия; modif@list.ru.

Немчинова Нина Владимировна, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой металлургии цветных металлов, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия; ninavn@yandex.ru.

Information about the authors

Aleksandr V. Aleksandrov, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Department for Technology and Technical Development of Alumina Production, LLC “RUSAL Engineering and Technology Center”, separate enterprise in Achinsk, Achinsk, Russia; modif@list.ru.

Nina V. Nemchinova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia; ninavn@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 19.07.2022

The article was submitted 19.07.2022