

УДК 622.7

**РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ
НЕФЕЛИНОВОГО КОНЦЕНТРАТА ИЗ ВЫСОКОКРЕМНИСТОГО СЫРЬЯ**

В. В. Марчевская, Т. Н. Мухина

*Горный институт Кольского научного центра РАН,
E-mail: v.marchevskaya@ksc.ru, ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Представлены результаты лабораторных исследований по разработке рациональной технологии получения нефелинового концентрата из высококремнистого нефелинсодержащего сырья, являющейся импортозамещающим небокситовым сырьем для алюминиевой промышленности России и других стран с ограниченными запасами высококачественных бокситов или их полным отсутствием. Усовершенствованная технологическая схема обеспечивает получение нефелинового концентрата, удовлетворяющего требованиям дальнейшей переработки методом спекания с известью и содержащего не менее 26.4 % глинозема, не более 2.3 % железа общего с извлечением глинозема не менее 90 % при значениях кремниевого модуля 0.6 и щелочного модуля 0.5.

Глинозем, нефелинсодержащие породы, шламы, магнитная сепарация, флотация, нефелиновый концентрат, магнитно-флотационная технология

DOI: 10.15372/FTPRPI20220411

Алюминий — важнейший металл современной индустрии, используемый в строительной, автомобильной, энергетической, авиационной, пищевой, космической отраслях промышленности, в кораблестроении и электронной технике. Он в 3 раза легче железа, прочен, пластичен, немагнитен, хороший проводник электрического тока, способен образовывать сплавы практически со всеми металлами. Алюминий, благодаря своим универсальным свойствам, по масштабам производства и потребления занимает второе место среди металлов после сплавов железа. Его производство в мире увеличивается вследствие непрерывно растущего спроса на него. По данным международной организации International Aluminium Institute, объединяющей крупные компании-производители алюминия, мировое производство алюминия в 2021 г. увеличилось по сравнению с показателями 2020 г. на 3 % [1–3].

Основное сырье для алюминиевой промышленности в мире — бокситы, содержащие 30–60 % глинозема с кремниевым модулем (соотношением Al_2O_3 и SiO_2 по массе) выше 6, из которых получают глинозем по наиболее простому и экономичному способу Байера. Ограниченность запасов высококачественных бокситов в отдельных странах привела к необходимости использования для получения алюминия также других видов сырья. В России из бокситов получают около 60 % глинозема, остальные 40 % производят из нефелинсодержащих пород и концентратов [1, 4–9].

Россия — единственная в мире страна, использующая нефелиновые породы в качестве сырья для алюминиевой промышленности. Кроме России, нефелинсодержащие породы, главным образом нефелиновые сиениты, распространены в Норвегии, Канаде, Китае, США, Германии, в странах Азии, Африки и Южной Америки. В мировой практике они используются не в качестве сырья для производства глинозема, а для получения керамики и стекла после предварительного обогащения. В странах с ограниченными запасами высококачественных бокситов или их полным отсутствием растет интерес к вовлечению в производство глинозема алюмосиликатов, в первую очередь нефелин- и каолинсодержащих [10–19].

По сравнению с бокситами нефелиновые породы беднее глиноземом, содержание которого в них составляет 20–30 %. Однако наличие щелочей позволяет получать из них, наряду с глиноземом, соду, поташ, портландцемент высоких марок. При комплексной переработке нефелинового сырья и эффективной реализации всех полученных продуктов глинозем, выработанный из нефелинов, может конкурировать по себестоимости с произведенным из бокситов. Оценка нефелиновых пород в качестве комплексного сырья проводится с учетом двух показателей: щелочного модуля (молекулярного отношения $K_2O + Na_2O / Al_2O_3$) и кремниевого модуля (отношения Al_2O_3 / SiO_2). Наиболее рентабельна переработка нефелиновых пород со щелочным модулем более 0.5 и кремниевым не менее 0.3. Дополнительно накладывается ограничение по содержанию окиси железа (не более 5 %).

В настоящее время в России работают два комбината по производству глинозема из нефелинсодержащего сырья — Пикалевский и Ачинский. Глинозем производится по технологии переработки нефелинового сырья методом спекания с известняком с получением кальцинированной соды и других продуктов, поташа, цемента [5–9, 20–23].

Цель настоящей работы — разработка ресурсосберегающей технологии выделения нефелинового концентрата из высококремнистого нефелинсодержащего сырья одного из месторождений Кузнецкого Алатау для производства из него глинозема. Пониженное содержание глинозема Al_2O_3 22.5 % и высокое содержание окислов железа Fe_2O_3 10.9 % в этих породах, представленных полевошпатовыми ийолитами и ийолит-уртитами, обуславливает возможность их переработки по технологии спекания только после предварительного обогащения [20, 24].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования выполнены на материале технологической пробы массой ~ 400 кг. Исходное сырье доводилось до крупности – 1.6 мм при последовательном дроблении в лабораторных щековой (ДМЦ 80 × 150) и валковой (ДГ 200 × 125) дробилках с соблюдением стадийности дробления и предварительного отсева класса готовой продукции. Измельчение руды осуществлялось в шаровой мельнице в условиях Т : Ж : Ш = 1 : 0.5 : 12.

Флотация темноцветных железосодержащих минералов (обратная флотация нефелина) выполнялась в лабораторных машинах DENVER-12 с объемом камеры 1500 мл. Плотность питания составляла 35 %, температура флотационной пульпы 15–18 °С, навеска исходной руды 750 г. Магнитная сепарация проводилась на барабанных сепараторах для мокрого обогащения руд со слабым полем модели 237 СЭ и на высокоинтенсивном сепараторе модели CF-5MM (фирмы “Eriez”). Химический состав руд по основным компонентам (оксидам алюминия, натрия, калия, кальция, кремния, железу общему) определялся атомно-абсорбционным, фотокolorиметрическим и рентгеноспектральными методами. Для количественного элементного

анализа применялись атомно-абсорбционные спектрофотометры КВАНТ-2А, фотоколориметры КФК-2, UNICO 1200 (США), рентгенофлуоресцентный спектрометр последовательного действия ARL Advant'X (Швейцария) с программным обеспечением OXSAS v.1.4. Количественный минеральный состав апатит-нефелиновых руд и продуктов их обогащения определялся по данным рентгенофазового анализа с использованием порошкового рентгеновского дифрактометра D2 PHASER (Bruker AXS GmbH, Германия), обработка дифрактограмм проводилась с помощью программного обеспечения Diffrac.suite v.4.1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Минеральный состав нефелинсодержащих пород технологической пробы по данным рентгенофазового анализа представлен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Минеральный состав нефелинсодержащих пород

Минерал	Содержание, % мас.
Нефелин	23.39
Плагиоклазы	21.18
в т. ч. анортит	14.30
Цеолиты	14.56
в т. ч. анальцим	11.07
Канкринит	5.23
Каолинит	1.50
Кальцит	2.51
Клинохлор	1.14
Фторapatит	1.43
Пироксены	17.79
Магнетит	2.08
Магнетит титанистый	0.74
Титанит	0.99
Ильменит	0.31
Слюды	6.63
Гетит	0.52
Итого	100.00
Итого главных алюмосиликатов	55.49

Ниже приведен химический состав нефелинсодержащих пород по основным компонентам, %:

$\text{Al}_2\text{O}_{3\text{общ}}$	$\text{Fe}_{\text{общ}}$	K_2O	Na_2O	CaO	SiO_2	TiO_2
22.45	6.22	1.62	8.89	7.74	43.52	0.98

Плагиоклазы в породах представлены анортитом и альбитом, цеолиты — анальцимом и натролитом, пироксены — авгитом-Ті, эгирином-АІ и эгирином-Са, слюды — мусковитом, иллитом и вермикулитом. Главные алюмосиликаты с высоким содержанием глинозема, кроме нефелина (33 % Al_2O_3), представлены основным плагиоклазом анортитом (36 % Al_2O_3), цеолитом анальцимом (23 % Al_2O_3), канкринитом и каолинитом (29 % Al_2O_3), являющихся сырьем

для получения глинозема [18, 25]. Положительный фактор — достаточно большое содержание в анортите окислов кальция и самое низкое из известных плагиоклазов содержание кремнезема. Кроме того, заметное присутствие в породах канкринита и кальцита повышает полезный компонент оксид кальция.

При исследовании кинетики измельчения установлено, что повышенное количество сростков лейкократовых алюмосодержащих минералов (на уровне 8–10 %) характерно для материала крупностью +0.16 мм. Доля сростков в измельченной породе при выходе класса +0.16 мм от 13 % и ниже меняется незначительно, поэтому такая крупность измельчения оптимальна для использования в исследованиях обогатимости нефелиносодержащих пород магнитными и флотационными методами.

Присутствие в материале, поступающем на обогащение флотационным или магнитными методами, тонких частиц (шлавов) негативно влияет на процесс разделения. Так, при флотации руд жирнокислотными собирателями присутствие в пульпе шлавов может существенно снижать технологические показатели или вовсе нарушать технологический процесс. Поэтому в цикле получения нефелинового концентрата перед нефелиновой флотацией применялось обесшламливание.

По результатам анализа шлавов, содержащихся в измельченной породе при глубине обесшламливания 25–35 мкм, выявлено, что выделенная из пород шламовая фракция при ее выходе 20–25 % обогащена глиноземом по отношению к исходной породе на 7 %, а содержание железа общего понижено в 2 раза. Это позволяет присоединить ее к основному концентрату, полученному из обесшламленных пород. При разработке технологических схем обогащения выбрана средняя глубина обесшламливания 30 мкм.

При изучении обогатимости близких по составу нефелиновых пород установлено, что наиболее высокие технологические показатели достигаются при использовании комбинированной магнитно-флотационной схемы, включающей операцию обесшламливания измельченной породы, магнитную сепарацию в слабом поле, флотацию материала немагнитной фракции. Нефелиновый концентрат — совокупный продукт, состоящий из выделенных шлавов и флотационного концентрата [26]. В связи с более высоким содержанием в исходных породах магнетита обесшламливание рационально проводить после магнитной сепарации в слабом поле для снижения содержания железа в шламах, являющихся составной частью объединенного концентрата.

Согласно результатам серии опытов, реагенты-собиратели Flotisor 7268 (смесь жирных кислот фирмы “Clariant”) и собирательная смесь на основе сырого и дистиллированного таловых масел с добавлением реагента Phospholan PE-65 фирмы “Akzo Nobel” близки по эффективности, но использование собирательной смеси обеспечивает получение более качественного флотационного концентрата по содержанию полезного и вредного компонента. Дальнейшие исследования проводились с собирательной смесью, в составе которой всего 15–20 % импортного реагента Phospholan PE-65. В качестве депрессора нефелина и полевых шпатов во всех экспериментах применялся кремнефтористый натрий, в качестве вспенивателя — реагент Montanol 800 фирмы “Clariant” (7 г/т руды). Флотация осуществлялась в слабокислой среде при pH 6.3–6.6.

По схеме, включающей измельчение пород до 13 % класса + 0.16 мм, операцию магнитной сепарации в слабом поле на барабанном сепараторе (индукция магнитного поля 0.1 Тл), обесшламливание материала немагнитной фракции по зерну 30 мкм, основную и контрольную флотацию темноцветных минералов, получен концентрат, состоящий из флотационного концентрата — камерного продукта контрольной флотации темноцветных минералов и шламов, с выходом 68.5 %, содержащий 2.0 % железа общего и 26.9 % глинозема при его извлечении 80.0 %.

С целью повышения полноты извлечения алюминийсодержащих минералов в концентрат с учетом минералого-технологических свойств пород, содержащих большое количество железосодержащих минералов, выполнены исследования по усовершенствованию базовой технологической схемы в двух вариантах. В первом в базовую схему введены две перечистные операции пенных продуктов основной и контрольной флотации темноцветных минералов. Сравнительные показатели обогащения нефелиновых пород с использованием данной технологической схемы и базовой приведены в табл. 2. Выход концентрата, состоящего из камерного продукта контрольной флотации, камерного продукта второй перечистки и шламов, увеличился на 4.9 %, а извлечение глинозема в концентрат повысилось на 5.0 %.

ТАБЛИЦА 2. Сравнительные показатели обогащения нефелинсодержащих пород с использованием новой технологической схемы с введением перечистных операций и базовой магнитно-флотационной, %

Продукт	Выход	Содержание		Извлечение	
		Al ₂ O ₃ общ	Fe _{общ}	Al ₂ O ₃ общ	Fe _{общ}
Базовая технологическая схема					
Концентрат	68.45	26.93	1.96	80.03	21.85
Шламы	27.72	24.60	3.54	29.60	16.00
Камерный продукт контрольной флотации	40.73	28.52	0.88	50.43	5.86
Хвосты	31.55	14.59	15.18	19.97	78.15
Магнитная фракция сепарации в слабом поле	5.80	6.52	45.97	1.64	43.48
Пенный продукт флотации	25.75	16.40	8.25	18.33	34.67
Итого	100.00	23.04	6.13	100.00	100.00
Технологическая схема с двумя перечистками пенного продукта					
Концентрат	73.31	26.68	2.13	85.27	25.23
Шламы	27.72	24.60	3.54	29.73	15.85
Камерный продукт контрольной флотации	40.73	28.52	0.88	50.65	5.80
Камерный продукт 2-й перечистки	4.86	23.10	4.55	4.90	3.58
Хвосты	26.68	12.66	17.33	14.73	74.77
Магнитная фракция сепарации в слабом поле	5.80	6.52	45.97	1.65	43.09
Пенный продукт 1-й перечистки	19.84	14.11	9.48	12.20	30.41
Пенный продукт 2-й перечистки	1.05	19.23	7.45	0.88	1.26
Итого	100.00	22.94	6.18	100.00	100.00

Во втором варианте в базовую схему введены перечистная операция пенных продуктов основной и контрольной флотации темноцветных минералов и магнитная сепарация в сильном поле камерного продукта перечистки.

Усовершенствованная технологическая схема включает: измельчение пород до 13 % класса + 0.16 мм, операцию магнитной сепарации в слабом поле на барабанном сепараторе (индукция магнитного поля 0.1 Тл), обесшламливание материала немагнитной фракции по зерну 30 мкм, основную и контрольную флотацию темноцветных минералов, перемывочную флотацию темноцветных минералов, магнитную сепарацию камерного продукта перемывки в сильном поле на высокоинтенсивном сепараторе мокрого разделения.

Выбор оптимальных режимов магнитной сепарации в сильном поле на высокоинтенсивном сепараторе мокрого разделения модели выполнялся на материале продукта перемывочной флотации темноцветных минералов в количестве 3 кг. Магнитная индукция изменялась от 1 до 2 Тл. Содержание глинозема в немагнитной фракции и его извлечение в зависимости от магнитной индукции приведены на рис. 1а, зависимость содержания железа и глинозема в суммарном концентрате, состоящем из камерного продукта контрольной флотации темноцветных минералов, немагнитной фракции камерного продукта перемывки и шламов, и извлечения глинозема в концентрат от магнитной индукции — на рис. 1б.

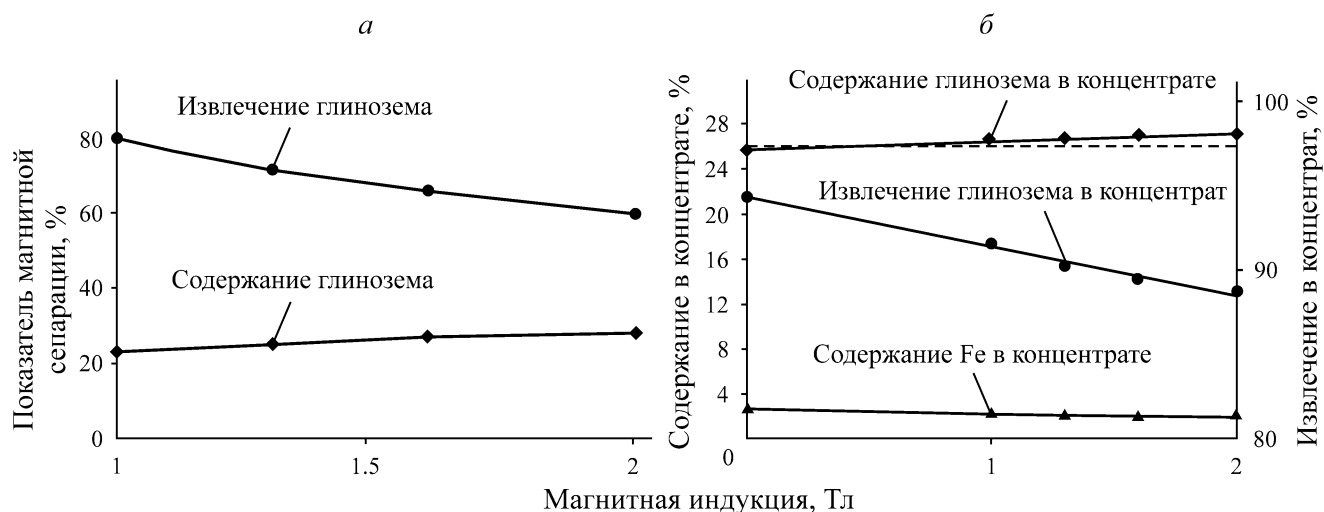


Рис. 1. Зависимость содержания глинозема и его извлечения в немагнитную фракцию от магнитной индукции (а), содержания глинозема и железа в суммарном концентрате, извлечения глинозема от магнитной индукции (б)

Содержание глинозема в суммарном концентрате, включающем камерный продукт контрольной флотации темноцветных минералов, немагнитную фракцию камерного продукта перемывки и шламы, при всех значениях магнитной индукции от 1 до 2 Тл превышает требуемое граничное значение 26 %, а содержание вредной примеси железа менее 3 %. Выход суммарного концентрата и извлечение в него глинозема изменяются от 79.6 до 75.4 % и от 91.5 до 88.7 % соответственно. Наиболее высокий выход суммарного концентрата и извлечение в него глинозема (> 90 %) получены при сепарации с магнитной индукцией 1.0 и 1.3 Тл, причем более качественный концентрат наблюдался при магнитной индукции 1.3 Тл (табл. 3). С увеличением магнитной индукции до 1.6 и 2.0 Тл содержание глинозема в суммарном концентрате повышалось до 27 %, содержание железа снижалось незначительно, а выход концентрата и извлечение в него глинозема уменьшилось на 1.2 и 0.8 % соответственно.

ТАБЛИЦА 3. Сравнительные показатели обогащения нефелинсодержащих пород с использованием новой технологической схемы с введением магнитной сепарации перечистой операции и базовой магнитно-флотационной, %

Продукт	Выход	Содержание		Извлечение	
		Al ₂ O ₃ общ	Fe _{общ}	Al ₂ O ₃ общ	Fe _{общ}
Базовая технологическая схема					
Концентрат	68.45	26.93	1.96	80.03	21.85
шламы	27.72	24.60	3.54	29.60	16.00
камерный продукт контрольной флотации	40.73	28.52	0.88	50.43	5.86
Хвосты	31.55	14.59	15.18	19.97	78.15
магнитная фракция сепарации в слабом поле	5.80	6.52	45.97	1.64	43.48
пенный продукт контрольной флотации	25.75	16.40	8.25	18.33	34.67
Итого	100.00	23.04	6.13	100.00	100.00
Технологическая схема с магнитной сепарацией перечистки пенного продукта (B = 1.0 Тл)					
Концентрат	79.63	26.40	2.24	91.51	28.99
шламы	27.72	24.60	3.54	29.69	15.91
камерный продукт контрольной флотации	40.73	28.52	0.88	50.58	5.82
немагнитная фракция камерного продукта перечистки	11.18	23.10	4.00	11.24	7.25
Хвосты	20.37	9.57	21.48	8.49	71.01
магнитная фракция сепарации в слабом поле	5.80	6.52	45.97	1.65	43.25
пенный продукт перечистки	9.76	9.45	12.76	4.01	20.20
магнитная фракция камерного продукта перечистки	4.82	13.50	9.67	2.83	7.56
Итого	100.00	22.97	6.16	100.00	100.00
Технологическая схема с магнитной сепарацией перечистки пенного продукта (B = 1.3 Тл)					
Концентрат	77.79	26.69	2.04	90.35	25.89
шламы	27.72	24.60	3.54	29.67	16.00
камерный продукт контрольной флотации	40.73	28.52	0.88	50.55	5.86
немагнитная фракция камерного продукта перечистки	9.34	24.90	2.65	10.12	4.04
Хвосты	22.20	9.99	20.45	9.65	74.11
магнитная фракция сепарации в слабом поле	5.80	6.52	45.97	1.64	43.49
пенный продукт перечистки	9.76	9.45	12.76	4.01	20.31
магнитная фракция камерного продукта перечистки	6.65	13.80	9.50	3.99	10.31
Итого	100.00	22.98	6.13	100.00	100.00

Химический состав концентрата по основным компонентам при магнитной индукции 1.3 Тл приведен в табл. 4, минеральный состав — в табл. 5. Окончательный выбор величины индукции высокоинтенсивной сепарации должен быть определен по результатам опытно-промышленных испытаний в непрерывном процессе.

ТАБЛИЦА 4. Химический состав концентрата, полученного по усовершенствованной магнитно-флотационной технологии, основные компоненты, %

Продукт	Выход	Содержание компонентов					
		Al ₂ O ₃	Fe _{общ}	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	SiO ₂
Суммарный концентрат	77.79	26.69	2.04	10.67	1.88	4.62	45.17
в т. ч. шламы	27.72	24.60	3.54	9.96	1.69	6.03	43.36
Камерный продукт контрольной флотации	40.73	28.52	0.88	11.27	2.00	3.56	46.28
Немагнитная фракция камерного продукта перечистки	9.34	24.90	2.65	10.20	1.89	5.07	45.69

ТАБЛИЦА 5. Минеральный состав концентрата, полученного по усовершенствованной магнитно-флотационной технологии

Минерал	Содержание, % мас.
Нефелин	26.25
Плагиоклазы	22.53
в т. ч. анортит	18.00
Цеоциты	24.22
в т. ч. анальцит	19.78
Канкринит	6.56
Каолинит	0.53
Кальцит	0.54
Клинохлор	1.45
Фторопатит	1.05
Пироксены	8.70
Магнетит	0.56
Магнетит-Ti	0.50
Титанит	0.11
Ильменит	1.78
Слюды	4.47
Гетит	0.78
Итого	100.00
Итого главных алюмосиликатов	71.12

Из сравнения табл. 2 и 3 следует, что второй вариант усовершенствования базовой магнитно-флотационной схемы предпочтительнее. По сравнению с базовыми показателями выход суммарного концентрата увеличился в среднем на 10 %, извлечение глинозема в концентрат повысилось на 11 %, т. е. в 2 раза больше, чем по схеме первого варианта. Усовершенствованная магнитно-флотационная технология получения нефелинового концентрата по варианту 2 из высококремнистого нефелинсодержащего сырья приведена на рис. 2.

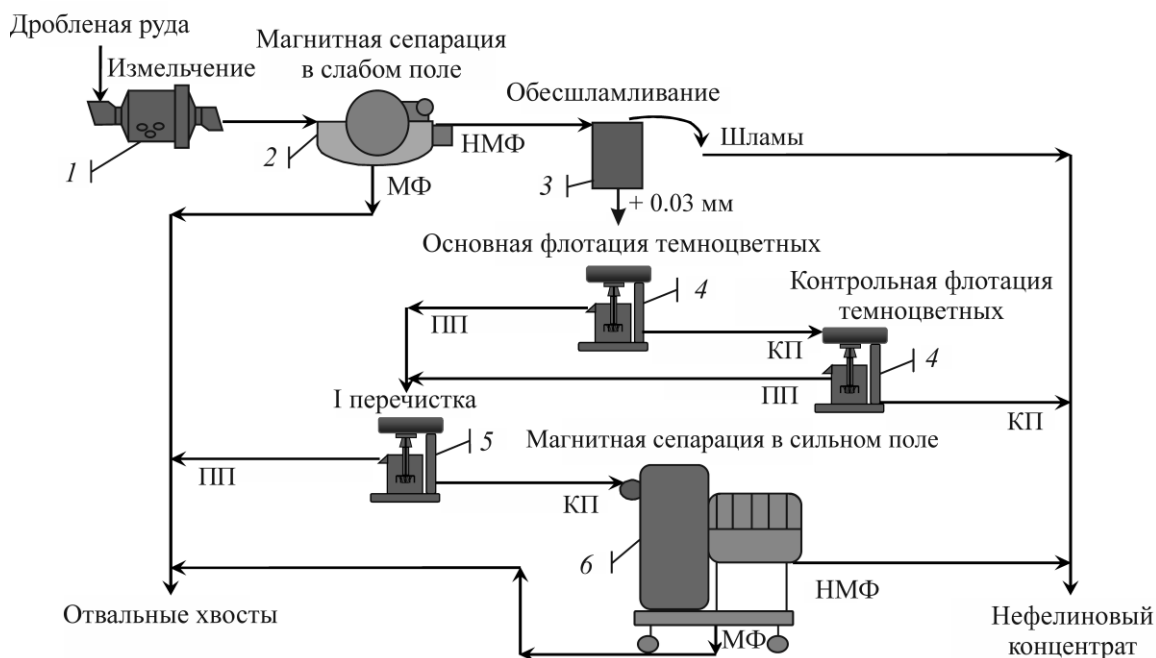


Рис. 2. Схема цепи аппаратов магнитно-флотационной технологии обогащения высококремнистых нефелинсодержащих пород: 1 — мельница шаровая; 2 — сепаратор магнитный слабого поля; 3 — дешламатор; 4, 5 — флотомшины; 6 — высокоинтенсивный магнитный сепаратор мокрого разделения; ПП, КП — пенный и камерный продукты; МФ, НМФ — магнитная и немагнитная фракции

Технологическая схема (рис. 2) обеспечивает получение из нефелинсодержащего сырья нефелинового концентрата, удовлетворяющего требованиям дальнейшей переработки, содержащего не менее 26.4 % глинозема, не более 2.3 % железа общего с извлечением глинозема не менее 90 % при кремниевом модуле 0.6 (> 0.5) и щелочном модуле 0.5 (> 0.3) выше граничных.

ВЫВОДЫ

Разработана усовершенствованная ресурсосберегающая магнитно-флотационная технология получения нефелинового концентрата из высококремнистого нефелинсодержащего сырья. Она включает в себя измельчение нефелинсодержащих пород до 13 % класса + 0.16 мм, операцию магнитной сепарации в слабом поле, обесшламливание материала немагнитной фракции по зерну 30 мкм, основную и контрольную флотацию темноцветных минералов, перечистную флотацию темноцветных минералов, магнитную сепарацию камерного продукта перечистки в сильном поле на высокоинтенсивном сепараторе мокрого разделения. Технология позволяет получать нефелиновый концентрат, состоящий из камерного продукта контрольной флотации, немагнитной фракции камерного продукта перечистки и шламов, удовлетворяющий требованиям дальнейшей переработки, содержащий не менее 26.4 % глинозема, не более 2.3 % железа общего, с кремниевым модулем 0.6, с щелочным модулем 0.5, при извлечении глинозема не менее 90 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алюминиевая промышленность России.** URL: <http://newsruss.ru/doc> (дата обращения 28.04.2022 г.).
2. **Обзор рынка алюминия.** URL: www.metalinfo.ru (дата обращения 28.04.2022 г.).
3. **Мировое производство алюминия в 2021 г.** URL: www.metallplace.ru (дата обращения 28.04.2022 г.).
4. **Meyer F. M.** Availability of bauxite reserves, Nat. Resour. Res., 2004, Vol. 13. — P. 161–172.
5. **Методические рекомендации** по применению классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Алюминиевые руды. — М.: ФГУ ГКЗ, 2007. — 36 с.
6. **Рахманов М. Л., Ежова О. С.** Добыча алюминиевого сырья // Энцикл. технологий. — С. 129–162. URL: <http://www.eipc.center/docs.yandex.ru> (дата обращения 28.04.2022 г.).
7. **Рахманов М. Л., Ежова О. С.** Производство алюминия // Энцикл. технологий. — С. 346–381. URL: <http://www.eipc.center/docs.yandex.ru> (дата обращения 28.04.2022 г.).
8. **Rimkevich V. S., Malovitskii Y. N., Bogidaev S. A., et al.** Effective technologies for complex processing of non-bauxite ores, Russ. J. Non-ferrous Metals, 2008, Vol. 49. — P. 97–103.
9. **Сизяков В. М., Сизякова Е. В.** Перспективы развития комплексной переработки Кольских нефелиновых концентратов // ГИАБ. — 2015. — № S1-4. — С. 126–145.
10. **Harben P. W.** World distribution of industrial mineral deposits, The Industrial Minerals Handbook, London, 1995. — 306 p.
11. **Karlsen T. A.** Nordic minerals review Norway, Industrial Minerals, 1998, Vol. 374. — P. 76–81.
12. **Taylor G. H.** Nepheline syenite, Am. Ceram. Soc. Bul., 1990, Vol. 69, No. 5. — P. 872–873.
13. **Ibrahim S. S., Mohamed H. A., and Boulos T. R.** Dry magnetic separation of nepheline syenite ores, Physicoch. Problems of Miner. Proc., 2002, Vol. 36. — P. 173–183.
14. **Abdel-Zaher M. Abouzeid and Abdel-Tawab A. Negm.** Characterization and beneficiation of an Egyptian nepheline syenite ore, Int. J. Mineralogy, 2014. — P. 1–9.

15. **Burat F., Kangal O., and Onal G.** An alternative mineral in the glass and ceramic industry: Nepheline syenite, *Miner. Eng.*, 2006, Vol. 19, Issue 4. — P. 370–371.
16. **Jorjani E. and Amirhosseini M.** Alumina production process from nepheline ore in Razgah (Iran), *Miner. Proc. Technol.*, 2007. — P. 111–115.
17. **Abouzeid A. M. and Negm A. A.** Characterization and beneficiation of an Egyptian nepheline syenite ore, *Int. J. Mineralogy*, 2014. — P. 1–9.
18. **Элдиб Амр Басьюни Саад.** Комплексная переработка низкосортного алюминийсодержащего сырья Египта с получением металлургического глинозема и попутной продукции: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2021. — 22 с.
19. **Садыралиева У. Ж.** Разработка комплексной технологии переработки нефелиновых сиенитов месторождения Сандык: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Бишкек, 2019. — 23 с.
20. **Нефелиновые породы** — комплексное алюминиевое сырье / С. Я. Данциг, Е. Д. Андреева, В. В. Пивоваров и др. — М.: Недра, 1988. — 190 с.
21. **Китлер И. Н., Лайнер Ю. А.** Нефелины — комплексное сырье алюминиевой промышленности. — М.: Металлургия, 1962. — 237 с.
22. **Смирнов М. Н., Сизяков В. М.** Комплексная переработка нефелиновых руд с получением глинозема, соды, поташа и цемента // Нефелиновое сырье. — М.: Наука, 1978. — С. 163–167.
23. **Сизяков В. М., Насыров Г. З.** Эффективные способы комплексной переработки небокситового алюминиевого сырья на глинозем и попутные продукты // Обогащение руд. — 2003. — № 3. — С. 31–36.
24. **Сердюк С. С.** Минерально-сырьевая база цветных, благородных и редких металлов Центральной Сибири и приоритеты ее развития // Цв. металлы. — 2014. — С. 16–32.
25. **Юсупов Т. С., Шумская Л. Г.** Новая концепция производства алюминия и его соединений из нетрадиционного алюмосиликатного сырья // ФТПРПИ. — 2009. — № 2. — С. 96–100.
26. **Мухина Т. Н., Марчевская В. В., Виноградов С. А., Голубцов А. В.** Разработка технологии получения концентрата для производства глинозема из высококремнистого нефелинового сырья // Обогащение руд. — 2016. — № 3. — С. 22–28.

Поступила в редакцию 18/V 2022

После доработки 20/VI 2022

Принята к публикации 30/VI 2022