УДК 622.341:622.7

СОЗДАНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ

А. С. ОПАЛЕВ, *зам. директора по научной работе, канд. техн. наук*
М. С. ХОХУЛЯ, *ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук, mike@goi.kolasc.net.ru*
А. В. ФОМИН, *младший научный сотрудник*
И. В. КАРПОВ, *ведущий технолог*

Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

На основе испытаний в промышленных условиях пилотного образца магнитно-гравитационного сепаратора предложена технология выделения высококачественного магнетитового концентрата, содержащего порядка 70 % $Fe_{общ}$. Показана возможность получения гематитового концентрата из хвостов основной магнитной сепарации методом винтовой сепарации, который может быть рекомендован на обогатительном производстве АО «Олкон» взамен процесса отсадки.

Ключевые слова: *магнетит, гематит, кварц, руда, измельчение, классификация, магнитно-гравитационная сепарация, винтовая сепарация, концентрат, промпродукт, хвосты.*

DOI: *10.17580/gzh.2019.06.07*

Введение

Современное развитие горно-металлургического комплекса России в значительной мере характеризуется вовлечением в переработку минерального сырья с низким содержанием полезных компонентов, тонкой вкрапленностью рудных минералов, близкими физическими и физико-химическими свойствами, что затрудняет получение качественных концентратов [1, 2].

Разрабатываемые и проектируемые к освоению месторождения магнетитовых и магнетит-гематитовых железистых кварцитов России характеризуются разнообразием типов, вещественного состава, различным содержанием железа и, как следствие, технологиями их подготовки к металлургическому переделу. Основными показателями эффективности технологий получения товарного железорудного концентрата являются: степень извлечения из него железа, затраты электроэнергии, мелющих тел и других расходных материалов [3].

В последнее время повышаются требования к качеству железорудных концентратов как по технологическим показателям, так и по экологическим критериям. Следует отметить, что российская машиностроительная база по производству промышленного магнитообогатительного оборудования, в сравнении с развитыми зарубежными странами, не приспособлена к выпуску оборудования для решения поставленных задач.

Существующие технологии переработки тонковкрапленных магнетитовых руд базируются на стадиальном выводе из процесса хвостов после каждой стадии измельчения и магнитной сепарации с получением готового концентрата в последней стадии обогащения. Традиционные барабанные магнитные сепараторы не обеспечивают при этом селективного разделения частиц магнетита и его сростков с породными минералами, что приводит к снижению качества концентрата и увеличению последующих затрат на металлургический передел, затрудняет переход на внедоменный процесс получения металлургической продукции [4].

Данное обстоятельство приобретает актуальное значение при создании новых подходов к разработке высокоэффективных и экологически безопасных технологий переработки железных руд, которые будут отвечать современным требованиям снижения удельных затрат на производство товарной продукции при одновременном повышении ее качества и максимально возможном извлечении в нее железа.

Содержание в руде отдельных месторождений слабомагнитного гематита, например в железистых кварцитах Заимандровского района (Оленегорское месторождение), которые перерабатываются на отдельных секциях дробильно-обогатительной фабрики (ДОФ) АО «Олкон», приводит к необходимости использования гравитационных процессов обогащения с целью повышения комплексности использования добываемого сырья.

Применение малоэффективной для мелкозернистого материала (крупностью менее 1 мм) процесса отсадки обусловливает значительные потери минерала, особенно с его тонкими классами, и снижает извлечения $Fe_{общ}$ в концентрат, которое не превышает 30–35 % (от питания цикла гравитационного обогащения) [5].

На отечественных обогатительных предприятиях отсутствуют эффективные технологии обогащения окисленных железных руд, содержащих в своем составе в качестве основного ценного минерала гематит. В отдельных случаях разработаны технологические решения, когда тонкие фракции гематита выделяются флотацией [6].

В мировой практике по извлечению тонкозернистого гематита (менее 0,8–1 мм) наибольшее распространение получили гравитационные методы обогащения с использованием винтовых сепараторов. Данную технологию широко применяют на железорудных фабриках Канады. Для богатых тонковкрапленных гематитовых и магнетитовых руд преимущественное распространение получила флотация и высокоинтенсивная магнитная сепарация [7–10]. В последние годы изучена возможность применения технологии винтовой сепарации при обогащении железных руд в России [11].

Основной целью работы, представленной в данной статье, является проверка и подтверждение результатов лабораторных исследований при проведении промышленных испытаний на ДОФ АО «Олкон» и ДОФ АО «Карельский окатыш» опытного образца магнитно-гравитационного сепаратора МГС-0,5 в цикле получения железорудных концентратов с содержанием не менее 69,5–70,5 % $Fe_{общ}$ в различных стадиях магнитного обогащения.

Учитывая особенности вещественного состава и крупность хвостов основной магнитной сепарации [12], для Оленегорского

ГОКа рекомендовано применение гравитационного обогащения в потоках малой толщины; технологическая схема предусматривает применение двух стадий винтовой сепарации. Последующая доводка чернового гематитового концентрата винтовой сепарации осуществляется на концентрационном столе (или в операции перечистной винтовой сепарации).

Результаты промышленных испытаний магнитно-гравитационной сепарации в АО «Олкон» и АО «Карельский окатыш»

В настоящее время вовлекаемые в переработку железистые кварциты, как одна из разновидностей железосодержащих руд, характеризуются низким, не более 25 %, содержанием общего железа и различной вкрапленностью минералов. Раскрытие рудных и породных минералов относительно фракции менее 0,071 мм составляет для руд группы месторождений Заимандровского района 45–70 %, а магнетитовые кварциты Костомукшского месторождения более тонковкрапленные, поэтому раскрытие минералов происходит при крупности менее 96 % класса –0,05 мм [13].

Железистые кварциты группы месторождений Заимандровского района перерабатываются на ДОФ по двум технологическим схемам: магнитной и магнитно-гравитационной. Получение магнетитового концентрата достигается применением двухстадиальной схемы измельчения и магнитной сепарации (с участком дообогащения), а гравитационного гематитового концентрата – из хвостов основной магнитной сепарации методом отсадки. Основой для повышения качества получаемого магнетитового концентрата являлась задача совершенствования работы классифицирующего оборудования с использованием операции тонкого грохочения в циклах «измельчение – классификация».

Широкое распространение процесс тонкого грохочения в технологических схемах обогащения железных руд получил благодаря созданию высокочастотных грохотов корпорации Derrick, обеспечивающих высокую эффективность разделения по классам крупности от 0,3 до 0,063 мм по сравнению с гидроциклонами, что позволяет применять их часто на различных участках технологической схемы обогащения. С использованием грохотов Derrick операция тонкого грохочения внедрена и на ДОФ АО «Олкон», что обеспечило экономию электроэнергии за счет уменьшения фронта измельчения сокращением числа мельниц II стадии измельчения с двух до одной и повышение качества выпускаемого концентрата (с 65,7 до 67,5 % массовой доли общего железа).

Однако получение готового железорудного концентрата в каждой стадии обогащения с применением только тонкого грохочения и последующей магнитной сепарации подрешетного продукта весьма затруднительно. Это обусловлено тем, что магнитная сепарация позволяет выделять в хвосты только немагнитные зерна пустой породы, а вся рудная смесь (зерна магнетита, богатые и бедные сростки) переходит в магнитный продукт [5].

Современные достижения в области физики твердого тела, теории электричества и магнетизма и тенденция к развитию новых подходов к процессу обогащения железосодержащих руд позволяют применять сочетание магнитных и гравитационных методов разделения минеральных частиц в одном аппарате. Действие таких аппаратов с комбинированными физическими полями основано на способности частиц ферромагнетика изменять свою локальную концентрацию и сохранять высокую подвижность суспензии под воздействием совокупности магнитной и гравитационной сил.

В Горном институте КНЦ РАН разработана конструкция магнитно-гравитационного сепаратора (МГ-сепаратора) на основе управления магнитным агрегированием при воздействии на суспензию из ферромагнитных частиц магнитным полем низкой напряженности и центробежно-восходящим водным потоком. Промышленные испытания пилотного магнитно-гравитационного сепаратора МГС-0,5 проводили на обогатительных фабриках АО «Олкон» и АО «Карельский окатыш» (**рис. 1**).

Основными регулируемыми параметрами, определяющими эффективность работы МГС-0,5, являются напряженность магнитного поля, скорость восходящего водного потока и содержание твердого в разгрузке сепаратора. Промышленные испытания вели на подрешетном продукте грохота Derrick с различными вариантами размеров ячеек просеивающих поверхностей грохочения. В ходе испытаний предложенная технология была опробована на основных типах рудной шихты, поступающей на обогатительную фабрику, в том числе и на рудах с повышенным содержанием силикатов (месторождение им. XV лет Октября) и сульфидов (Комсомольское месторождение). Из проб МГ-сепарации с содержанием $Fe_{общ}$ 45–51 % был выделен концентрат с содержанием выше 71 % $Fe_{общ}$ (**табл. 1**). Прирост по повышению качества концентрата составил в среднем 19–25 %. Содержание магнитного железа в сливе МГ-сепаратора соответствует технологическим хвостам участка дообогащения.

По результатам применения технологии МГ-сепарации в полупромышленных условиях применительно к АО «Олкон» можно сделать следующие основные выводы:

- оптимальная крупность питания составляет 0,125–0,165 мм, что достигается установкой соответствующих панелей на грохоты Derrick;

Рис. 1. Общий вид сепаратора МГС-0,5

Таблица 1. Технологические показатели МГ-сепарации

Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		$Fe_{общ}$	$Fe_{маг}$	$Fe_{общ}$	$Fe_{маг}$
Проба № 1					
Слив	41,5	9,42	2,82	8,6	2,8
Концентрат	58,5	71,63	68,4	91,4	97,2
Питание	100,0	45,78	41,15	100,0	100,0
Проба № 2					
Слив	33,3	7,5	2,23	5,0	1,7
Концентрат	66,7	71,21	66,36	95,0	98,3
Питание	100,0	49,98	44,99	100,0	100,0
Проба № 3					
Слив	31,8	7,08	2,44	4,4	1,7
Концентрат	68,2	71,73	67,34	95,6	98,3
Питание	100,0	51,18	46,71	100,0	100,0

• после I стадии измельчения достигается получение высококачественного магнетитового концентрата со средним содержанием $Fe_{общ}$ порядка 70 %;

• в цикле дообогащения также возможно получение высококачественного концентрата, но при этом существенно увеличиваются потери магнитного железа с хвостами по сравнению с обогащением чернового концентрата после I стадии измельчения.

По результатам проведенных испытаний МГ-сепарации и данных опробований продуктов технологической секции предложена качественно-количественная технологическая схема обогащения (**рис. 2**).

Промышленные испытания пилотного магнитно-гравитационного сепаратора МГС-0,5 на ДОФ АО «Карельский окатыш» проводили с целью изучения возможности получения высококачественного магнетитового концентрата из труднообогатимых сортов руд Костомукшского месторождения как альтернативного процесса обратной катионной флотации с использованием аминосодержащих реагентов.

Исходным питанием МГ-сепарации служил готовый концентрат, полученный из дешламированных сливов предварительной и контрольной классификации в гидроциклонах и подрешетного продукта тонкого грохочения с содержаниями $Fe_{общ}$ 68,55 % и SiO_2 4,67 %. Результаты минералогического анализа (**табл. 2**) свидетельствуют о весьма тонкой вкрапленности магнетита, раскрытие которого достигается в классах крупности менее –0,025 мм.

В ходе промышленных испытаний достигнуты результаты, показавшие возможность получения высококачественного концентрата ($Fe_{общ.}$ порядка 70 % и SiO_2 ниже 3,05 %). При этом сливы МГ-сепарации характеризуются высоким содержанием в них массовой доли железа (от 51 до 60 %), что позволяет рассматривать их как промпродуктовый материал, который необходимо возвращать в процесс обогащения с созданием циркуляционных нагрузок по тонкому магнетиту.

Гранулометрический анализ сливов МГ-сепарации (**рис. 3**) показал, что высокое содержание железа связано с наличием большого количества тонкого магнетита крупностью менее 0,028 мм, присутствие которого указывает на высокую степень переизмельчения магнетитового концентрата.

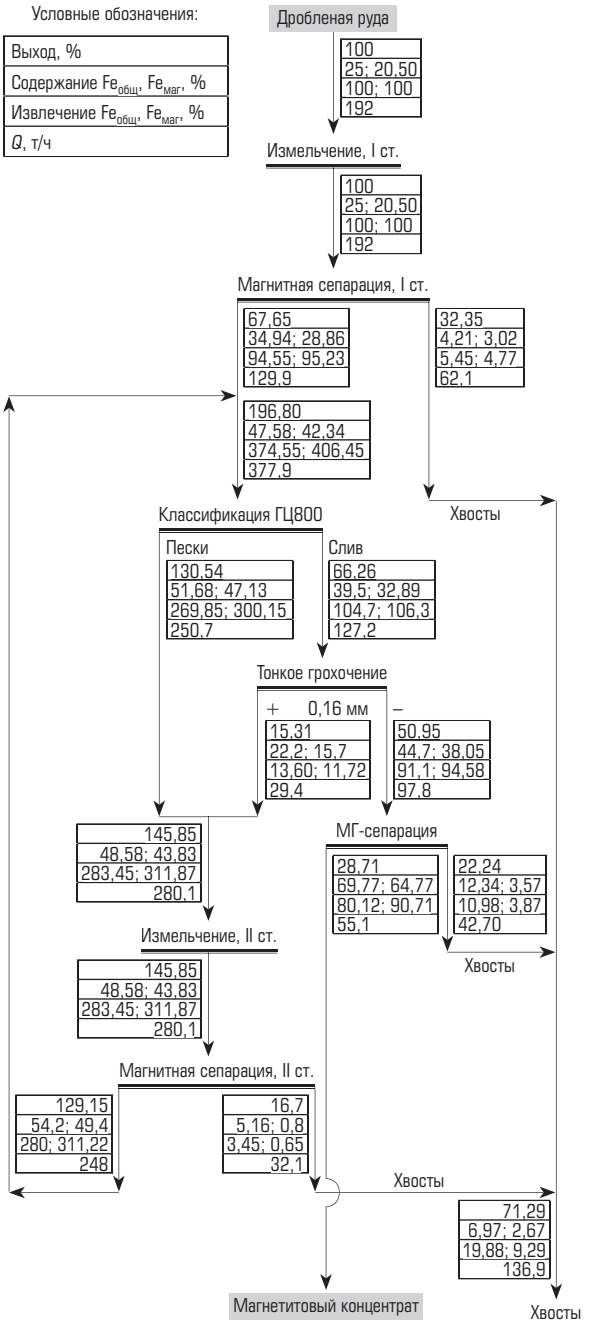

Рис. 2. Рекомендуемая качественно-количественная схема получения высококачественного магнетитового концентрата на ДОФ АО «Олкон» (экспериментальная секция)

Вместе с тем результаты испытаний подтвердили альтернативность МГ-сепарации флотационному дообогащению и то, что при сопоставимости получаемых технологических показателей она становится предпочтительным способом повышения качества при дальнейшем ее внедрении в технологию переработки труднообогатимого сырья.

Гравитационно-магнитная технология получения гематитового концентрата

Присутствие в железистых кварцитах отдельных месторождений Заимандровского района (Оленегорское, Кировогорское)

Таблица 2. Раскрытие магнетита в питании МГ-сепарации

Класс крупности, мм	Выход	Содержание, % (отн.)	
		Раскрытый	В сростках
+0,071	1,40	<80	>20
–0,071+0,045	9,21	<85	>15
–0,045+0,025	26,10	97	3
–0,025	63,29	99	1
Итого	100,0	96	4

некоторого количества гематита, обладающего слабой магнитной восприимчивостью, приводит к необходимости использования в технологической схеме ДОФ АО «Олкон» гравитационного цикла переработки хвостов основной магнитной сепарации (ОМС), основанного на использовании процесса отсадки.

Однако данная технология не обеспечивает получение высоких технологических показателей, что отражается на низком, не превышающем 35 %, извлечении гематитового железа в концентрат. Разделение материала в диафрагмовых отсадочных машинах протекает в условиях, когда тонкие частицы гематита, преимущественно крупностью –0,2 мм, вместе с породными минералами выносятся в верхние слои суспензии и теряются с хвостами отсадки. Данное обстоятельство вызывает необходимость совершенствования гравитационной технологии получения гематитового концентрата, основанной на использовании аппаратов, позволяющих проводить эффективное разделение мелких фракций обогащаемого материала. Современное развитие технологии обогащения мелкозернистых гематитовых руд подтверждают высокое распространение технологии обогащения, основанной на применении винтовых сепараторов [10–12].

С целью совершенствования существующей технологии переработки промпродукта ОМС был изучен его вещественный состав. Исходя из гранулометрической характеристики хвостов ОМС, их химического и минерального составов следует, что выход фракции –0,315 мм составляет около 70 %, в которой распределено почти 80 % массовой доли железа (**рис. 4**). Рост содержания $Fe_{общ}$ в отдельных фракциях происходит с уменьшением крупности материала, достигая 12 % в классе –0,071 мм (см. рис. 4, *а*).

Среднее содержание гематита в пробе составляет 10,4 %. Магнетит присутствует в пробе в незначительных количествах – не более 0,2 %. Наибольшая доля среди нерудных минералов принадлежит кварцу (около 50 %), заметная – полевым шпатам (микроклин, альбит), амфиболам и пироксенам (более 17 %). Второстепенные минералы – слюды, эпидот и гранат (см. рис. 4, *б*).

Учитывая особенности вещественного состава хвостов основной магнитной сепарации и преимущественное содержание гематита в мелкозернистой фракции (менее 0,6 мм), рекомендовано использование двух стадий винтовой сепарации, что позволяет вывести в голове процесса отвальный продукт и повысить полноту извлечения гематита в общий концентрат.

На **рис. 5** представлена качественно-количественная схема переработки хвостов ОМС, по которой из хвостов магнитной сепарации получен гематитовый концентрат с содержанием $Fe_{общ}$ 59 % и $Fe_{гем}$ 56,9 % при извлечении 55,3 и 74,8 % соответственно.

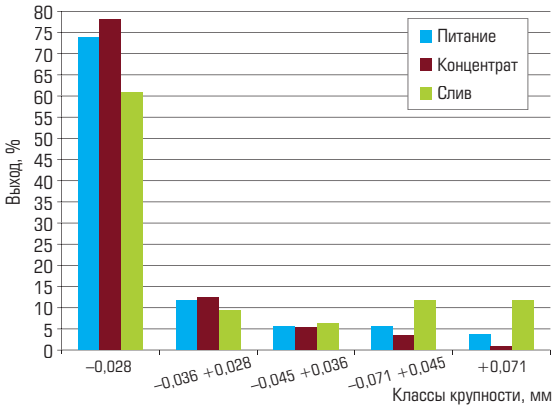

Рис. 3. Распределение классов крупности в исходном питании, концентрате и сливе МГ-сепарации

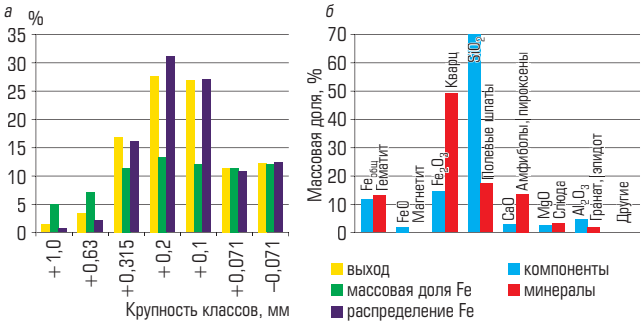

Рис. 4. Характеристика вещественного состава хвостов основной магнитной сепарации:
а – гранулометрическая характеристика; *б* – химический и минеральный состав

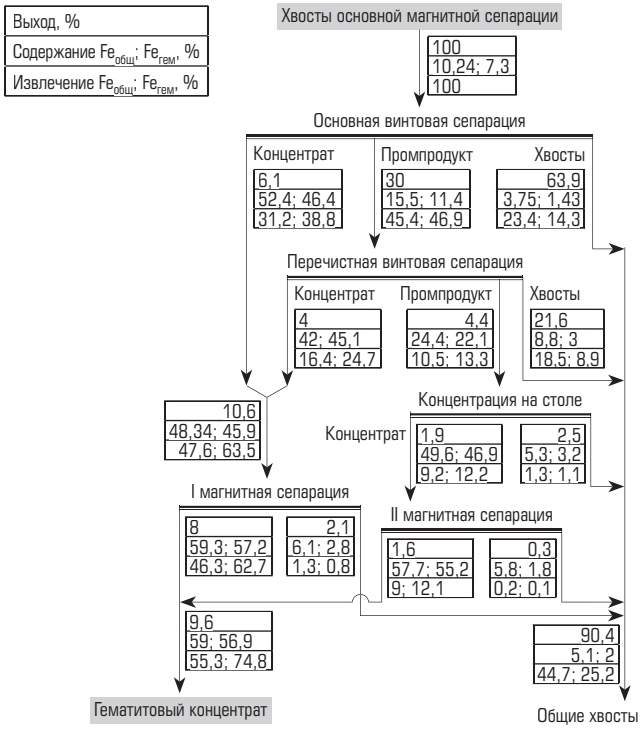

Рис. 5. Технологическая схема получения гематитового концентрата из хвостов основной магнитной сепарации

Заключение

На основании результатов выполненных промышленных испытаний по определению эффективности применения магнитно-гравитационной сепарации в АО «Олкон» и АО «Карельский окатыш» разработаны технологические схемы получения высококачественной железорудной продукции, содержащей 69,5–70,5 % $Fe_{общ}$. Рекомендуемые технологии переработки железистых кварцитов базируются на применении магнитно-гравитационной сепарации, обеспечивающей стадиальный вывод готовых высококачественных концентратов. В качестве аппарата непрерывного действия при проведении тестовых промышленных испытаний использовали созданную в институте конструкцию пилотного образца магнитно-гравитационного сепаратора МГС-0,5.

Определены численные величины управляющих параметров процесса магнитно-гравитационной сепарации, к которым относятся: напряженность магнитного поля, скорость центробежно-восходящего потока воды в объеме рабочего пространства сепаратора и плотность твердого в получаемом магнетитовом концентрате.

Проведены опробования операции винтовой сепарации в цикле получения гематитового концентрата на ДОФ АО «Олкон». Установлено, что, в отличие от существующего в данном переделе процесса отсадки, применение двухстадиальной винтовой сепарации позволяет вывести в голове схемы отвальные хвосты и повысить полноту извлечения тонких фракций гематита в общий концентрат. Последующая доводка чернового гематитового концентрата осуществлялась концентрацией на столе и высокоинтенсивной магнитной сепарацией, что обеспечило выделение концентрата с содержанием около 57 % $Fe_{гем}$ при извлечении более 55 % $Fe_{общ}$ и 75 % $Fe_{гем}$. Эти показатели по извлечению превосходят на 20–25 % извлечение, существующее с использованием отсадки.

Намечены мероприятия по проверке полученных данных при проведении испытаний на промышленном гравитационном оборудовании.

Библиографический список

1. *Чантурия В. А.* Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения // Горный журнал. 2015. № 7. С. 29–37. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.05
2. *Yushina T. I., Krylov I. O., Valavin V. S., Toan V. V.* Old iron-bearing waste treatment technology // Eurasian Mining. 2018. No. 1. P. 16–21. DOI: 10.17580/em.2018.01.04
3. *Пирогов Б. И.* Технологическая минералогия железных руд. – Л. : Наука, 1988. – 304 с.
4. *Юшина Т. И., Крылов И. О., Валавин В. С., Дунаева В. Н.* Вещественный состав и особенности обогащения и подготовки бедных и труднообогатимых железных руд с целью их использования в бездоменных технологиях получения чугуна «Ромелт» // Горный журнал. 2015. № 12. С. 14–20. DOI: 10.17580/gzh.2015.12.03
5. *Хохуля М. С., Опалев А. С., Рухленко Е. Д., Фомин А. В.* Получение магнетит-гематитового концентрата из железистых кварцитов и складированных отходов их обогащения на основе минералого-технологических исследований // ГИАБ. 2017. № 4. С. 259–271.
6. *Поперечникова О. Ю., Шумская Е. Н., Нагаева С. П.* Полупромышленные испытания флотационной технологии получения гематитового концентрата из окисленных железистых кварцитов // Горный журнал. 2014. № 11. С. 40–43.
7. *Lu Liming*. Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2015. – 641 p.
8. *Sadeghi M., Bazin C., Devin P.-O., Lavoie F., Hodouin D., Renaud M.* Control of spiral concentrators for the concentration of iron ore // Proceedings of the XXVIII International Mineral Processing Congress. – Quebec, 2016. Vol. 7. P. 4534–4545.
9. *Wanzhong Yin, Jizhen Wang, Longhua Xu.* N Reagents in the Reverse Flotation of Carbonate-Containing Iron Ores // Proceedings of the 11th International Congress for Applied Mineralogy. – Cham : Springer International Publishing, 2015. P. 459–470.
10. *Buro Y. A., Schadrac Ibrango, Cassoff J., Bélanger L., Giroux É.* et al. NI 43–101. Technical report on the feasibility study on labmag taconite project : final report / New Millennium Iron Corp., 2014. URL: http://www.nmliron.com/data/document/en-CA/2013–007-NI-43–101-LabMag-FINAL.pdf (дата обращения: 19.04.2019).
11. *Прокопьев С. А., Пелевин А. Е., Напольских С. А., Гельбинг Р. А.* Стадиальное выделение магнетитового концентрата с использованием винтовой сепарации // Обогащение руд. 2018. № 4. С. 28–33. DOI: 10.17580/or.2018.04.06
12. *Опалев А. С., Хохуля М. С., Кучер Е. В. Щербаков А. В.* Модернизация техники и технологии переработки рудного и техногенного железосодержащего сырья для повышения полноты извлечения ценных компонентов и качества выпускаемой продукции // Современные инновационные технологии в горном деле и при первичной переработке минерального сырья : матер. междунар. науч.-практ. конф. – М., 2018. С. 187–194.
13. *Патковская Н. А., Тасина Т. И.* Модернизация технологии обогащения железосодержащих руд Северо-Запада России // Обогащение руд. 2011. № 1. С. 6–10. ГЖ

«GORNYI ZHURNAL», 2019, № 6, pp. 56–61
DOI: 10.17580/gzh.2019.06.07

Creation of innovative technologies for production of high-quality iron concentrate production in the North West of Russia

Information about authors
A. S. Opalev[1], Deputy Director of Scientific Work, Candidate of Engineering Sciences
M. S. Khokhulya[1], Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences, mike@goi.kolasc.net.ru
A. V. Fomin[1], Junior Researcher
I. V. Karpov[1], Leading Technologist
[1]Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract
The authors review the available domestic technologies of iron processing with concentrate production at the final stage of dressing. These technologies fail to ensure the required quality of the concentrate by the iron mass fraction. Hematite concentrate production with jigging at processing plant of Olkon is discussed, and proposals are put forward for increased recovery of hematite from tailings of rougher magnetic separation by gravity concentration in thin flows (helical separation, table concentration). The paper describes the results of industrial tests on development of a technology for producing high-quality magnetite concentrates with content of $Fe_{tot.}$ 69.5–70.5% at the dressing plants of Olkon and Karelsky Okatysh. It is shown that Olkon can obtain high-quality concentrates after the first grinding stage by the magnetic–gravity separation (MG-separation) from the undersize product of fine vibrating screening containing 45–52% Fe_{total}. Karelsky Okatysh applies MG-separation as a finishing operation of the prepared concentrate, as an alternative to the flotation re-concentration process, which makes it possible to obtain high-quality concentrates from refractory ore grades of the Kostomuksha deposit. To achieve the objectives, a pilot sample of a magnetic gravity separator MGS-0.5 was used. Based on the results of industrial tests, the authors propose an energy-saving processing technology ferruginous quartzites at Olkon and a process circuit for refractory ore at Karelsky Okatysh. In the gravitational cycle of hematite concentration at the processing plant of Olkon, it is recommended to replace inefficient jigging operation by the two-stage helical separation circuit, including tailings, rougher rough hematite concentrate, final table concentration and and high-intensity magnetic separation. Produced by the developed technology, the hematite concentrate contains about 57% of the mass fraction of hematite iron at recovery of 55% of Fe_{total} and 75% Fe_{hem}, which is 20–55% higher than concentration with jigging.

Keywords: magnetite, hematite, quartz, ore, grinding, classification, magnetic–gravity separation, helical separation, concentrate, middlings, tailings.

References

1. Chanturia V. A. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 7. pp. 29–37. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.05
2. Yushina T. I., Krylov I. O., Valavin V. S., Toan V. V. Old iron-bearing waste treatment technology. *Eurasian Mining*. 2018. No. 1. pp. 16–21. DOI: 10.17580/em.2018.01.04
3. Pirogov B. I. Technological mineralogy and iron ore. Leningrad : Nauka, 1988. 304 p.

4. Yushina T. I., Krylov I. O., Valavin V. S., Dunaeva V. N. Material constitution and features of low-grade and rebellious iron ore in processing and preparation for ROMELT direct iron ore smelting reduction process. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 12. pp. 14–20. DOI: 10.17580/gzh.2015.12.03
5. Khokhulya M. S., Opalev A. S., Rukhlenko E. D., Fomin A. V. Production of magnetite-hematite concentrate from ferruginous quartzites and warehoused tailings based on mineralogy and technology studies. *GIAB*. 2017. No. 4. pp. 259–271.
6. Poperechnikova O. Yu., Shumskaya E. N., Nagaeva S. P. Semi-industrial researches of flotation technology of hematite concentrate obtaining from oxidized ferruginous quartzites. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 11. pp. 40–43.
7. Lu Liming. Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. Cambridge : Woodhead Publishing, 2015. 641 p.
8. Sadeghi M., Bazin C., Devin P.-O., Lavoie F., Hodouin D., Renaud M. Control of spiral concentrators for the concentration of iron ore. *Proceedings of the XXVIII International Mineral Processing Congress*. Quebec, 2016. Vol. 7. pp. 4534–4545.
9. Wanzhong Yin, Jizhen Wang, Longhua Xu. N Reagents in the Reverse Flotation of Carbonate-Containing Iron Ores. *Proceedings of the 11th International Congress for Applied Mineralogy*. Cham : Springer International Publishing, 2015. pp. 459–470.
10. Buro Y. A., Schadrac Ibrango, Cassoff J., Bélanger L., Giroux É. et al. NI 43–101. Technical report on the feasibility study on labmag taconite project : final report. New Millennium Iron Corp., 2014. Available at: http://www.nmliron.com/data/document/en-CA/2013–007-NI-43–101-LabMag-FINAL.pdf (accessed: 19.04.2019).
11. Prokopyev S. A., Pelevin A. E., Napolskikh S. A., Gelbing R. A. Staged screw separation of magnetite concentrate. *Obogashchenie Rud*. 2018. No. 4. pp. 28–33. DOI: 10.17580/or.2018.04.06
12. Opalev A. S., Khokhulya M. S., Kucher E. V., Shcherbakov A. V. Upgrading of processing technology for ore and iron-containing waste towards complete extraction of valuable components and higher quality production. *Modern Innovative Technologies in Mineral Mining and Processing : International Scientific–Practical Conference Proceedings.* Moscow, 2018. pp. 187–194.
13. *Patkovskaya N. A., Tasina T. I.* The Russia North-West Region iron-containing ores processing technology improvement. *Obogashchenie Rud*. 2011. No. 1. pp. 6–10.

УДК 622.7:622.349.3

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ РЕДКОМЕТАЛЛЬНОГО СЫРЬЯ КОЛЬСКОГО ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА*

Е. В. ГРОМОВ[1], *ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук, evgromov@goi.kolasc.net.ru*
А. Л. БИЛИН[2], *ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук*
Г. В. МИТРОФАНОВА[2], *зав. лабораторией, канд. техн. наук*
С. П. ОСТАПЕНКО[2], *старший научный сотрудник, канд. техн. наук*

[1] *Мурманский арктический государственный университет, Апатиты, Россия*
[2] *Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия*

Разработана инновационная технология горно-обогатительного производства, позволяющая повысить эффективность использования многокомпонентных руд Ловозерского и Хибинского массивов.

Ключевые слова: *редкоземельное и редкометалльное сырье, добыча и переработка рудного и техногенного сырья, моделирование, топология технологических схем, сточные воды, очистка, отходы рудообогащения, консервация.*

DOI: *10.17580/gzh.2019.06.08*

Введение

Редкометалльное сырье является стратегически важным георесурсом, определяющим экономическую и национальную безопасность промышленно развитых стран. Устойчивый спрос на редкие металлы (в особенности редкоземельные элементы – РЗЭ), востребованные в высокотехнологичных и наукоемких отраслях промышленности, определяет актуальность исследований по созданию инновационных технологий их добычи и переработки в соответствии с требованиями энерго и ресурсосбережения, экологической и промышленной безопасности [1, 2].

В этом плане интерес к сырьевой базе Кольского полуострова определяется удобством транспортно-географического положения и инфраструктурной обеспеченностью, разведанными запасами редких металлов (РМ) в лопарите (Ta, Nb, Sr, РЗЭ) и эвдиалите (Zr, Y) Ловозерского массива, запасами попутных компонентов (Sr, РЗЭ, Ga, Rb, Cs, Nb) в Хибинских апатит-нефелиновых рудах, составляющих бóльшую часть отраслевых балансов РМ.

Под руководством академика Н. Н. Мельникова в 2014–2018 гг. в Горном институте КНЦ РАН в рамках проекта Российского научного фонда выполнены комплексные междисциплинарные исследования, направленные на разработку новых технологий добычи и глубокой переработки редкометалльного сырья Кольского горнопромышленного комплекса (ГПК), позволяющих снизить техногенную нагрузку на природную среду в соответствии с экологической стратегией развития горной отрасли.

Выработка инновационных технологических решений базируется на современных информационных технологиях и обеспечивает получение новых знаний на основе моделирования объектов и процессов горного производства, управления этими процессами, выявления новых зависимостей и закономерностей [3].

Объектом настоящего исследования является редкометалльное сырье Кольского ГПК, сосредоточенное в лопаритовых рудах Ловозерского массива и апатит-нефелиновых рудах Хибинского массива.

Разработке научных основ комплексного решения задач освоения месторождений твердых полезных ископаемых посвящены труды Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. И. Агошкова, Н. Н. Мельникова, Д. Р. Каплунова, К. Н. Трубецкого и др. Важное значение при этом имеют фундаментальные исследования по обогащению многокомпонентного сырья, изложенные в работах В. А. Чантурия, Л. А. Вайсберга и др. [4].

*В работе принимал участие В. В. Бирюков, научный сотрудник Горного института КНЦ РАН, Апатиты, Россия.