УДК 622.341:
622.765.
063.5

М.С. Хохуля, А.С. Опалев, Е.Д. Рухленко, А.В. Фомин

ПОЛУЧЕНИЕ МАГНЕТИТ-ГЕМАТИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА ИЗ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ И СКЛАДИРОВАННЫХ ОТХОДОВ ИХ ОБОГАЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

Рассмотрены минералого-технологические особенности железистых кварцитов месторождений Заимандровского района и складированных отходов от их обогащения. Выявлен различный характер срастания в пробах рудных минералов с кварцем и другими минералами в различных фракциях материала с определением содержания в них доли свободных зерен магнетита и гематита. Разработана технология стадиального выделения магнетитового концентрата из железистых кварцитов, перерабатываемых АО «Олкон», включающая рудоподготовку исходного материала, магнитную сепарацию, а также совместное использование магнитно-гравитационной сепарации и тонкого грохочения. Для получения дополнительных объемов гематитового концентрата и уменьшения техногенной нагрузки на природную среду обоснована необходимость введения гравитационно-магнитного цикла обогащения складированных отходов хвостохранилища. Комбинированная технология обеспечивает получение коллективного магнетит-гематитового концентрата, содержащего около 66% массовой доли железа при сквозном извлечении 84,4% $Fe_{общ}$.

Ключевые слова: железистые кварциты, складированные отходы, магнитно-гравитационная сепарация, гравитационное обогащение, сростки, магнетит, гематит, кварц, концентрат, хвосты.

Анализ работы крупнейших ГОКов России, перерабатывающих железистые кварциты, показал, что они заметно уступают зарубежным аналогам по эффективности используемой технологии, удельным энергозатратам, качеству товарной

* Работа выполнена в рамках госзадания 0232-2014-0023.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 259–271.
© 2017. М.С. Хохуля, А.С. Опалев, Е.Д. Рухленко, А.В. Фомин.

продукции и в целом по экономическим результатам их деятельности [1].

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 85–90%, Ковдорского месторождения – 55%. Магнетитовые кварциты Костомукшского месторождения более тонко вкрапленные, поэтому раскрытие минералов обеспечивается при крупности 95% класса – 0,05 мм [2].

Различные по вещественному составу железистые кварциты группы месторождений Заимандровского района перерабатываются по двум технологическим схемам: получение магнетитового концентрата происходит с использованием двухстадиальной схемы измельчения и магнитной сепарации (с участком дообогащения), а гравитационное выделение гематитового концентрата из промпродукта основной магнитной сепарации осуществляется на основе применения отсадки.

На месторождениях выделены два основных природных типа руд: магнетитовые и гематит-магнетитовые. Наиболее разведаны магнетитовые руды, запасы которых составляют порядка 75% от общих запасов руд месторождений. К гематит-магнетитовому типу отнесены руды с содержанием железа гематитового более 25% от суммы магнетитового и гематитового железа.

Минералого-технологическим изучением двух проб руды – богатой и бедной со средним содержанием массовой доли железа соответственно 28,63 и 25,48% установлено, что основным рудным минералом в пробах является магнетит, содержание которого составляет 35,5 и 27,0%. Основная масса магнетита тесно срастается с кварцем; границы весьма неровные, с бухтами и заливами одного минерала в другой. В более крупных (0,1–0,2 мм) агрегатах присутствуют включения кварца, осложняющие раскрытие рудного минерала.

На рис. 1 приведен средний минеральный состав богатой и бедной руды, поступающей в промышленную переработку.

Гематит – второй по важности минерал железа, определяющий ценность руды. По содержанию в бедной руде он более чем в 7 раз уступает магнетиту (3,5%) и почти в 24 раза – 1,5% в богатой пробе. Его зерна имеют темно-светло-серый цвет и неправильные изометричные или идиоморфные (изометричные,

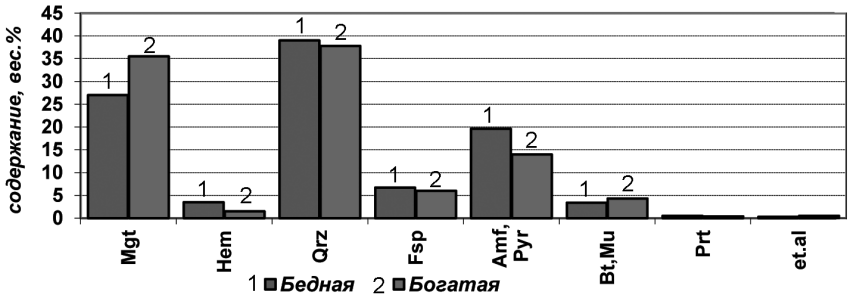

Рис. 1. Минеральный состав богатой и бедной руды: Mgt – магнетит; Hem – гематит; Qrz – кварц; Fsp – полевые шпаты; Amf – амфиболы; Pyr – пироксены; Bt – биотит; Mu – мусковит; Prt – пирит; et.al. – прочие минералы

шестисторонние, вытянутые разрезы), в зависимости от того, с какими минералами он связан. Так, гематит, ассоциирующий с магнетитом, редко бывает идиоморфным.

Породообразующие минералы представлены кварцем (до 40%), амфиболами (14–20%) с примесью пироксенов, полевыми шпатами (до 6,7%), слюдами (3–4%) в виде флогопита и биотита. Среди амфиболов диагностированы минералы группы тремолита-актинолита и куммингтонита-грюнерита. Из акцессорных присутствуют гранат и сульфиды, которые представлены пирротином (0,5%). В состав «прочие» вошли единичные зерна хлорита, граната, эпидота, кальцита.

На рис. 2 в качестве примера представлены микрофотографии, характеризующие особенности минерального состава железистых кварцитов Заимандровского района, связанные со сростками магнетита с кварцем и другими включениями. Для

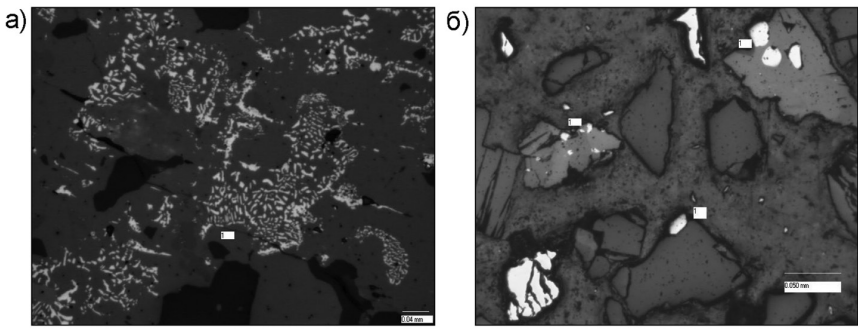

Рис. 2. Особенности характера срастания магнетита с кварцем и другими включениями: микрографическая структура срастания магнетита с кварцем (а); характер включений магнетита во фракции -0,1+0,05 мм (б)

магнетита характерны эмульсионные и мирмекитоподобные срастания с кварцем и силикатами, микропросечки по спайности в слюдах и амфиболах. Размер эмульсионных и микрографических включений магнетита составляет 1–3 мк (рис. 2, *а*). В выделенной фракции руды крупностью -0,1+0,05 мм около 3–7% магнетита присутствуют в виде закрытых или частично открытых включений в силикатах размером 2–20 мк (рис. 2, *б*).

Существующие технологии обогащения железистых кварцитов основаны на принципе стадиального измельчения и магнитной сепарации с выводом хвостов после каждой стадии уменьшения крупности продукта. Измельчение и классификация руды осуществляется в замкнутом цикле с классификацией и магнитной сепарацией, что не позволяет своевременно выделять из технологического процесса готового по крупности рудного материала по мере его образования и добиться необходимой степени раскрытия рудной фазы. Кроме того, высокие циркуляционные нагрузки замкнутого цикла измельчения приводят к переизмельчению рудных минералов и, соответственно, их потерям с тонкими классами.

Одним из путей повышения энергоэффективности технологических схем обогащения железистых кварцитов является стадиальное выделение готового концентрата по мере его образования и раскрытия рудных минералов, что достигается совершенствованием работы классифицирующего оборудования за счет применения операции тонкого грохочения в циклах измельчение-классификация.

Ее применение, как способа разделения материала по крупности, для повышения качества железорудного концентрата обеспечивает получение более высоких технологических показателей обогащения за счет исключения попадания крупных породных зерен и крупных сростков в тонкие фракции, в отличие от использования гидроциклонов [3, 4].

В настоящее время данная операция с использованием грохотов StackSizerTM (модель 2S648-1STK) фирмы «Derrick Corporation» внедрена и на дробильно-обогатительной фабрике (ДОФ) АО «Олкон». Это обеспечило получение как значительной экономии электроэнергии за счет уменьшения фронта измельчения сокращением числа мельниц второй стадии измельчения с двух до одной, а также повышения качества выпускаемого концентрата (с 65,7 до 66.5% массовой доли железа).

Однако получение готового железорудного концентрата в каждой стадии обогащения с применением только тонкого гро-

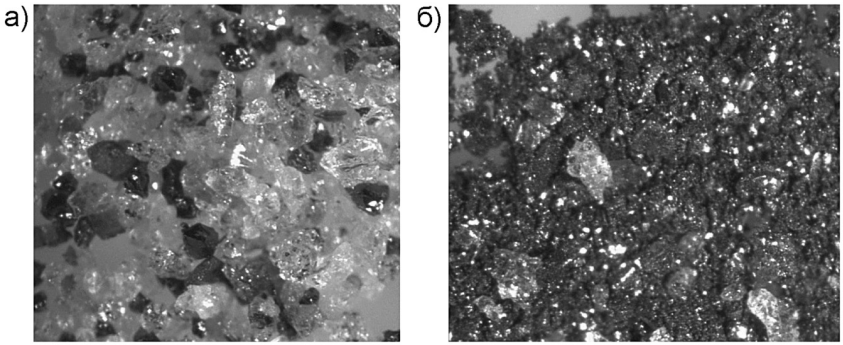

Рис. 3. Микрофотографии: руда после I стадии измельчения в стержневой мельнице (а); готовый железорудный концентрат (б)

хочения и последующей магнитной сепарации подрешетного продукта является весьма затруднительным. 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.

На рис. 3 представлены микрофотографии измельченной руды и готового концентрата, иллюстрирующие попадание бедных сростков из исходной измельченной руды в концентрат через весь процесс обогащения, снижающих его качество.

Проведенный анализ эффективности работы грохотов «Derrick», установленных в технологических секциях ДОФ АО «Олкон», показал, что подрешетный продукт тонкого грохочения содержит совместно с раскрытыми зернами магнетита также и тонкозернистые сростковые фракции, исключая попадание в него крупных легких бедных зерен и крупных сростков, в отличие от использования гидроциклонов [5, 6].

Для повышения эффективности раскрытия сростковых фракций подготовленный материал селективно необходимо выводить из циркуляционного цикла схемы рудоподготовки. Введение в предлагаемую схему (рис. 4) операции магнитно-гравитационной сепарации в комбинации с тонким грохочением позволяет уже после начальных стадий обогащения выделять из процесса обогащения готовые магнетитовые концентраты [7, 8], поскольку в них находится значительная часть свободных зерен магнетита и богатых сростков.

Высокая эффективность разделения в магнитно-гравитационных аппаратах обеспечивается комплексностью воздействия

физических сил на частицы разделяемого материала и высокой чувствительностью процесса к изменению соотношения магнитной и гидродинамической сил.

Формирующийся при этом промпродукт в виде надрешетного продукта операций тонкого грохочения и слива магнитно-гравитационной сепарации, содержащий преимущественно сростки рудного и породообразующего минералов, является питанием последующей стадии обогащения технологической схемы переработки железистых кварцитов. Использование закономерностей магнитного взаимодействия частиц в слое ферромагнитной суспензии, являющейся разделительной средой в рабочем пространстве магнитно-гравитационного аппарата,

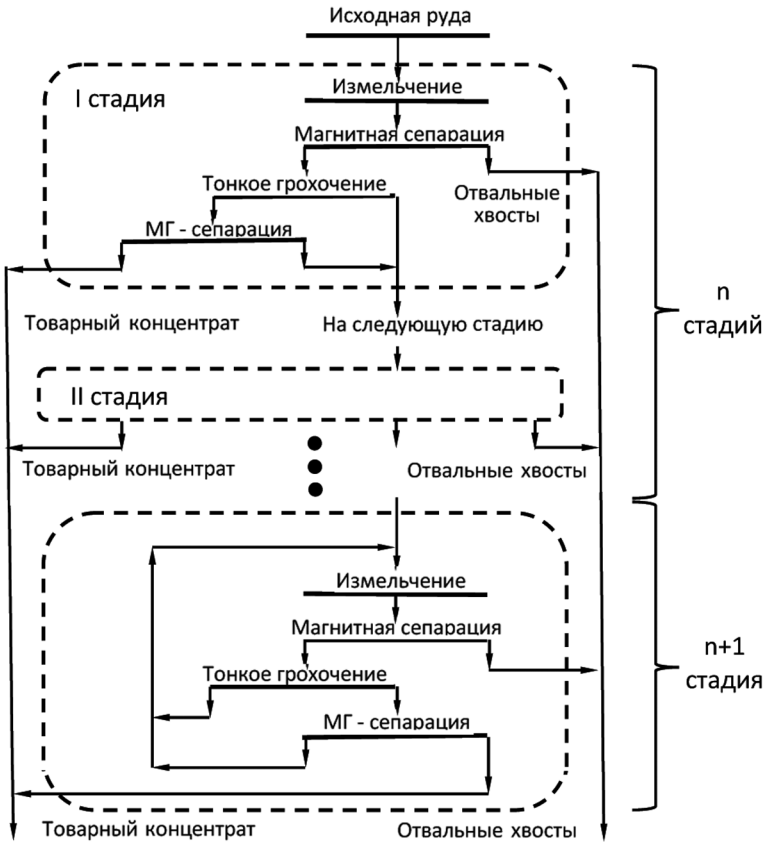

Рис. 4. Предлагаемая многостадиальная технологическая схема переработки железистых кварцитов

позволяет управлять качеством получаемого в каждой стадии готового концентрата с привлечением соответствующего комплекта технических средств автоматизации.

Результатом длительной деятельности дробильно-обогатительной фабрики АО «Олкон» явилось сформированное хвостохранилище техногенных отходов, количество которых за более чем 65-летний период работы предприятия составило около 480 млн т.

Несовершенство существующей технологии в гравитационном цикле схемы переработки промпродукта основной магнитной сепарации, включающем использование диафрагмовых отсадочных машин, приводит к значительным потерям железа, связанного с отвальными хвостами отсадки, направляемых в хвостохранилище, где также сосредоточен материал хвостов, сформированный из немагнитных фракций магнитной сепарации.

Для обоснования разрабатываемых технологических и технических решений совершенствования схемы были проведены исследования по получению дополнительных объемов железорудного концентрата переработкой складированных хвостов обогащения.

Исходя из гранулометрической характеристики хвостов, их химического и минерального составов следует, что выход фракции -0,315 мм составляет около 50%, в которой распределено почти 65% общего железа (рис. 5). С уменьшением крупности материала увеличение содержания $Fe_{общ.}$ в узких фракциях возрастает, максимально достигая почти 15% в классе -0,1+0,071 мм (рис. 5, *а*).

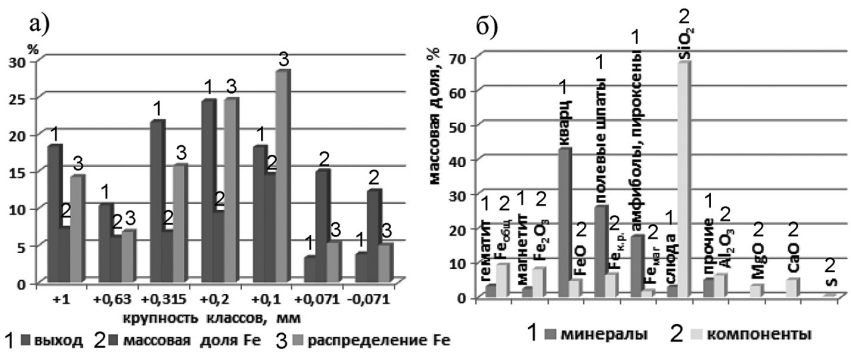

Рис. 5. Характеристика вещественного состава складированных отходов обогащения: гранулометрическая характеристика (а); химический и минеральный составы (б)

Основными рудными минералами в пробе хвостов являются гематит и магнетит, их среднее содержание составляет соответственно 3,2 и 2,4%. Породообразующие минералы представлены кварцем – 42,8%, полевыми шпатами – 26,1%, амфиболами ряда актинолит-тремолит и роговой обманки и пироксенами (суммарно 17,5%), слюдами ряда биотит-флогопит и мусковита – 3%. В графу «прочие» вошли: кальцит (3,0%), сульфиды (0,8%), гранат (0,6%), эпидот (0,3%) (рис. 5, *б*). Рудные минералы находятся в сростках с породообразующими.

Данные по содержанию раскрытых зерен основных рудных минералов и их сростков в пробе складированных хвостов приведены в таблице.

Магнетит и гематит в пробе присутствуют в виде сростков, включений и свободных зерен, заметно отличаясь друг от друга по содержанию тех и других. Около 40% всего магнетита находится в свободном виде, тогда как доля раскрытого гематита составляет не менее 70%. Это связано с высокой степенью извлечения магнетита, особенно в крупных классах, и неполным извлечением гематита по всем классам крупности.

В материале крупнее 0,63 мм весь магнетит находится в сростках, тогда как гематит в этих классах примерно на 30% представлен свободными зернами (таблица). Во фракции крупностью -0,63+0,315 мм появляются свободные зерна магнетита, на долю которых приходится около 20%, при этом количество

Содержание раскрытых рудных минералов и их сростков в пробе складированных хвостов обогащения

Классы, мм	Выход, %	Содержание раскрытых рудных минералов и их сростков,%			
		магнетит		гематит	
		в сростках	свободный	в сростках	свободный
+1,6	11,5	100,0	0,0	100,0	0,0
-1,6+1,0	6,8	100,0	0,0	70,0	30,0
-1,0+0,63	10,4	100,0	0,0	40,0	60,0
-0,63+0,315	21,6	80,0	20,0	20,0	80,0
-0,315+0,2	24,4	40,0	60,0	10,0	90,0
-0,2+0,1	18,2	10,0	90,0	5,0	95,0
-0,1+0,071	3,3	5,0	95,0	5,0	95,0
-0,071	3,8	1,0	99,0	1,0	99,0
Итого:	100,0	58,0	42,0	28,0	72,0

свободных зерен гематита в ней составляет уже 80%. В хвостах крупностью менее 0,315 мм рудные минералы находятся преимущественно в виде раскрытой фазы. Для магнетита доля раскрытых зерен составляет около 85–90%, а гематита – не менее 93–95%.

Рудные минералы находятся в срастании, чаще всего, с кварцем, амфиболами, пироксенами, слюдами и гранатом, в меньшей степени – друг с другом. Следует отметить, что на долю сростков приходится около 50–60%, остальная же часть приходится на многочисленные вкрапления рудных минералов в кварце и темноцветных минералах с разной степенью занимаемого объема.

Для магнетита в материале крупнее 0,315 мм характерно малое количество сростков, «средних» и «богатых» по магнетиту (доля рудного составляет от 50 до 90% от объема зерна) и многочисленные включения (рис. 6, *а*). Включения магнетита по степени занимаемого объема классифицируются как средние (15–35%) и редкие (3–7%). Для гематита в материале крупнее 0,315 мм характерны, в основном, «средние» и «богатые» сростки и в меньшей степени – средние и редкие включения в кварце и темноцветных минералах (рис. 6, *б*).

Сростки и включения рудных минералов прослеживаются вплоть до класса -0,071+0,045 мм, при этом сростки характеризуются как бедные и средние по рудному минералу и единичные по частоте встречаемости, а включения по наполненности объема зерна – редкие (3–7%, иногда до 10%) и единичные (<1–2%).

Учитывая выявленные особенности вещественного состава, включающие текстуру, структуру и минеральный состав складированных хвостов обогащения АО «Олкон», раскрываемость

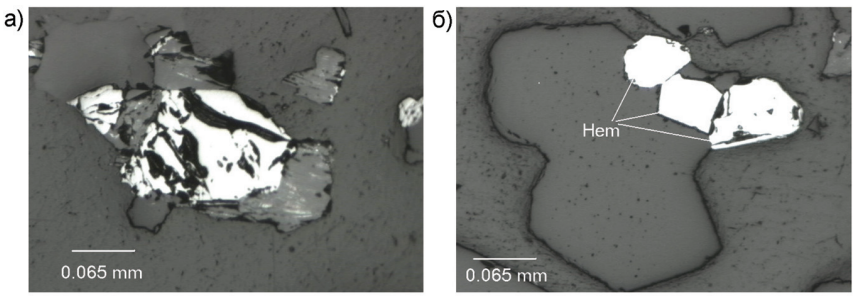

Рис. 6. Богатые сростки магнетита (а) и средние сростки гематита (б) в материале крупностью -0,2 мм

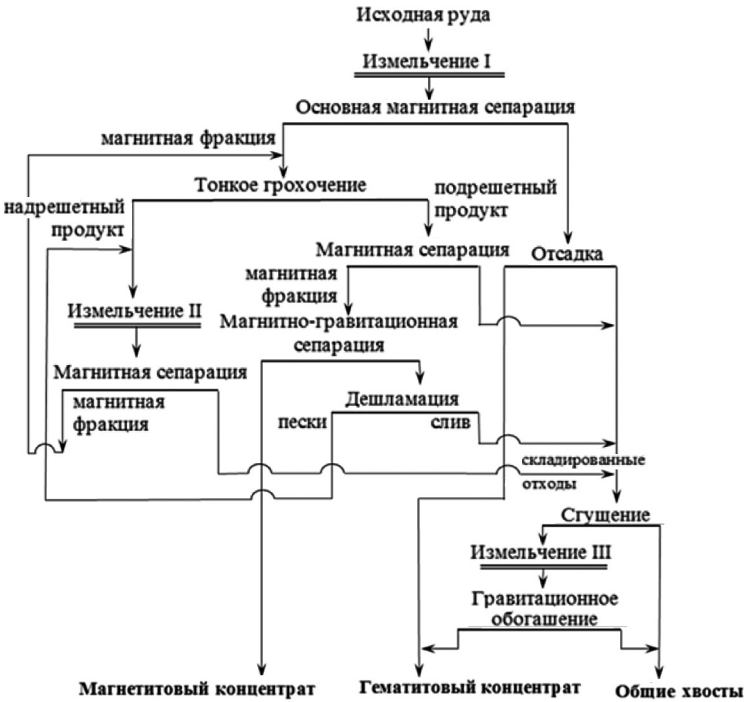

Рис. 7. Рекомендуемая схема получения коллективного концентрата из железистых кварцитов и складированных хвостов обогащения

рудных минералов – магнетита и гематита, преобладающее содержание гематита, высокую контрастность ценных и породообразующих минералов по плотностным и магнитным свойствам, обоснована комбинированная гравитационно-магнитная технология их обогащения [2, 9, 10].

Разработанная технология предусматривает в голове процесса дезинтеграцию хвостов в шаровой мельнице для уменьшения их крупности и увеличения степени раскрытия рудных минералов из различного вида сростков, разделение подготовленного материала в потоках малой толщины с использованием винтовой сепарации и последующей перечисткой ее чернового концентрата на концентрационном столе. Дообогащение промпродукта винтовой сепарации после его доизмельчения осуществлялось концентрацией на столе с последующей доводкой концентрата стола магнитной сепарацией.

Использование гравитационно-магнитного цикла обогащения складированных отходов, содержащих 9,3% $Fe_{общ.}$, обеспе-

чивает выделение коллективного концентрата содержанием до 62% массовой доли железа при извлечении около 45%.

В дальнейшем гематитовый концентрат объединялся с магнетитовым концентратом магнитной сепарации, в результате чего получен суммарный коллективный концентрат, выход которого составил 35,1% при содержании в нем 66,1% $Fe_{общ}$ и извлечении 84,4%.

Массовая доля железа в общих хвостах составляет 5,4%, потери с которыми достигают 15,6% $Fe_{общ}$

Разработанная технологическая схема получения коллективного концентрата из железистых кварцитов (рис. 7) позволяет повысить эффективность как процесса мокрой магнитной сепарации за счет повышения технологических показателей получения магнетитового концентрата, так и гравитационно-магнитной переработки складированных отходов обогащения.

Таким образом, на основании минералого-технологических исследований экспериментально подтверждена ресурсосберегающая технология извлечения магнетита и гематита из железистых кварцитов месторождений Заимандровского района и складированных отходов обогащения АО «Олкон», основанная на комбинированном сочетании гравитационного и магнитного принципов разделения минералов, что обеспечивает получение дополнительных объемов железного концентрата.

На основании выполненных исследований получено решение о выдаче патента [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баранов В.Ф.*, *Патковская Н.А.*, *Тасина Т.И.* Современные тенденции в технологии переработки магнетитовых железных руд. Основные направления // Обогащение руд. – 2013. – № 3. – С. 10–17.

2. *Патковская Н.А.*, *Тасина Т.И.* Модернизация технологии обогащения железосодержащих руд Северо-Запада России // Обогащение руд. – 2011. – № 1. – С. 6–10.

3. *Сухорученков А.И.*, *Стаханов В.В.*, *Зайцев Г.В.* Тонкое грохочение – высокоэффективный метод повышения технологических показателей обогащения тонковкрапленных магнетитовых руд // Горный журнал. – 2001. – № 4. – С. 48–50.

4. *Дюбченко В.А.*, *Патковская Т.И.*, *Тасина Т.И.*, *Кузнецов А.Ю.*, *Турьянский Б.В.* Вклад ЗАО «Механобр инжиниринг» в стратегию развития производственного комплекса ОАО «Карельский окатыш» // Обогащение руд. – 2010. – № 1. – С. 36–40.

5. *Опалев А.С.*, *Хохуля М.С.*, *Бирюков В.В.* Энерго-ресурсосберегающая технология получения магнетит-гематитового концентрата из железистых кварцитов группы месторождений Заимандровского района // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2014. – № 2. – С. 67–73.

6. *Хохуля М. С.*, *Опалев А. С.*, *Бирюков В. В.*, *Щербаков А. В.* Разработка малоотходной технологии извлечения полезных компонентов из железистых кварцитов группы месторождений Заимандровского района / Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли – формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов: сборник докладов. – СПб.: Реноме, 2014. – С. 244–249.

7. *Усачев П. А.*, *Опалев А. С.* Магнитно-гравитационное обогащение руд. – Апатиты: изд. КНЦ РАН, 1993. – 92 с.

8. *Усачев П. А.* Получение высококачественных железных концентратов на обогатительной фабрике ОАО «Лебединский ГОК» // Горный журнал. – 2000. – № 3. – С. 41–44.

9. *Чантурия В. А.*, *Гзогян Т. Н.*, *Прокопьев С. А.*, *Гельбинг Р. А.* Перспективы применения гравитационных методов в схемах обогащения железных руд / Материалы международного совещания «Современные методы комплексной переработки руд и нетрадиционного минерального сырья», ч. 1. – Апатиты, 2007. – С. 182–185.

10. *Патковская Н. А.*, *Курова М. Д.*, *Смирнова Л. В.*, *Сладкович Л. М.* Внедрение винтовых сепараторов на Оленегорском горно-обогатительном комбинате // Обогащение руд. – 1975. – № 5. – С. 18–23.

11. *Скороходов В. Ф.*, *Хохуля М. С.*, *Опалев А. С.*, *Сытник М. В.*, *Бирюков В. В.* Патент РФ № 2533792, 04.12.2012. Способ получения коллективного концентрата из железистых кварцитов. 2014. Бюл. № 32. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Хохуля Михаил Степанович[1] – кандидат технических наук, зав. лабораторией, e-mail: mike@goi.kolasc.net.ru,
Опалев Александр Сергеевич[1] – кандидат технических наук, и.о. зам. директора по научной работе,
Рухленко Елена Дмитриевна[1] – ведущий технолог,
Фомин Александр Владимирович[1] – младший научный сотрудник,
[1] Горный институт КНЦ РАН, e-mail: root@goi.kolasc.net.ru.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 4, pp. 259–271.

UDC 622.341: 622.765. 063.5

M.S. Khokhulya, A.S. Opalev, E.D. Rukhlenko, A.V. Fomin

PRODUCTION OF MAGNETITE–HEMATITE CONCENTRATE FROM FERRUGINOUS QUARTZITES AND WAREHOUSED TAILINGS BASED ON MINERALOGY AND TECHNOLOGY STUDIES

The mineralogical and technological characteristics of ferruginous quartzite from deposits of Zaimandrovskii district and the stored tailings produced during its processing were investigated. Different character of intergrowths with quartz and other minerals was revealed in samples of ore minerals in different fractions of the material, with the content of liberated grains of magnetite and hematite defined. The technology discharging magnetite concentrate at different stages of ferruginous quartzite processing at JSC «Olcon» and including ore

preparation, magnetic separation, combined magneto-gravity separation, fine screening was developed. To produce additional amounts of hematite concentrate and reduce the anthropogenic impact on the environment the necessity of introduction of gravity-magnetic cycle of separation of stored tailings was substantiated. Combined technology produces a collective magnetite-hematite concentrate containing about 66% of iron mass fraction with 84.4% recovery of Fe_{total}.

Key words: ferruginous quartzites, stored tailings, magneto-gravity separation, gravity separation, intergrowths, magnetite, hematite, quartz, concentrate, tailings.

AUTHORS

Khokhulya M.S.[1], Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory, e-mail: mike@goi.kolasc.net.ru,
Opalev A.S.[1], Candidate of Technical Sciences,
Deputy Director for Scientific Work,
Ruhlenko E.D.[1], Leading Technologist,
Fomin A.V.[1], Junior Researcher,
[1] Mining Institute of Kola Scientific Centre
of Russian Academy of Sciences,
84209, Apatity, Russia, e-mail: root@goi.kolasc.net.ru.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study has been supported under Governmental Contract No. 023220140023.

REFERENCES

1. Baranov V. F., Patkovskaya N. A., Tasina T. I. *Obogashchenie rud*. 2013, no 3, pp. 10–17.

2. Patkovskaya N. A., Tasina T. I. *Obogashchenie rud*. 2011, no 1, pp. 6–10.

3. Sukhoruchenkov A. I., Stakhanov V. V., Zaytsev G. V. *Gornyy zhurnal*. 2001, no 4, pp. 48–50.

4. Dyubchenko V. A., Patkovskaya T. I., Tasina T. I., Kuznetsov A. Yu., Tur'yanskiy B. V. *Obogashchenie rud*. 2010, no 1, pp. 36–40.

5. Opalev A. S., Khokhulya M. S., Biryukov V. V. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2014, no 2, pp. 67–73.

6. Khokhulya M. S., Opalev A. S., Biryukov V. V., Shcherbakov A. V. *Ekologicheskaya strategiya razvitiya gornodobyvayushchey otrasli formirovanie novogo mirovozzreniya v osvoenii prirodnykh resursov*: sbornik dokladov (Environmental strategy for mining industry based on a new outlook for resource development: Collection of reports), Saint-Petersburg, Renome, 2014, pp. 244–249.

7. Usachev P. A., Opalev A. S. *Magnitno-gravitatsionnoe obogashchenie rud* (Magnetic–gravity treatment of ore), Apatity, izd. KNTs RAN, 1993, 92 p.

8. Usachev P. A. *Gornyy zhurnal*. 2000, no 3, pp. 41–44.

9. Chanturiya V. A., Gzogyan T. N., Prokop'ev S. A., Gel'bing R. A. *Materialy mezhdunarodnogo soveshchaniya «Sovremennye metody kompleksnoy pererabotki rud i netraditsionnogo mineral'nogo syr'ya»*, ch. 1 (Modern Methods of Integrated Processing of Ore and Nonconventional Mineral Raw Material: International Conference Proceedings, part 1), Apatity, 2007, pp. 182–185.

10. Patkovskaya N. A., Kurova M. D., Smirnova L. V., Sladkovich L. M. *Obogashchenie rud*. 1975, no 5, pp. 18–23.

11. Skorokhodov V. F., Khokhulya M. S., Opalev A. S., Sytnik M. V., Biryukov V. V. *Patent RU 2533792*, 04.12.2012.