

Waste Disposal. Apatity : Kolskiy nauchnyi tsentr RAN, 1999. pp. 182–190.
 19. Lavrinenko A. A., Shrader E. A., Kharchikov A. N., Kunilova I. V. Apatite flotation from brazilite-apatite-magnetite ore. *Journal of Mining Science*. 2013. Vol. 49, No. 5. pp. 811–818.
 20. Gershenko A. Sh., Ulezko A. A., Aleynikov N. A., Efimova N. S. Complex enrichment of apatite-nepheline ore of Partomchorrsk deposit. *Complex enrichment of phosphorus-containing raw materials*. Apatity, 1977. pp. 39–44.
 21. Baranov V. F. Final tailings thickening and disposal systems (world practice review). *Obogashchenie Rud*. 2009. No. 3. pp. 43–48.

22. Golovanov V. G., Petrovskiy A. A., Brylyakov Yu. E. Introduction of recycling water supply at apatite-nepheline processing plant 2. *Gornyi Zhurnal*. 1999. No. 9. pp. 48–50.
 23. Gandurina L. V. Wastewater treatment by synthetic flocculants. Moscow : DAR/VODGEO, 2007. 198 p.
 24. Ikonnikova K. V., Ikonnikova L. F., Minakova T. S., Sarkisov Yu. S. Theory and practice of pH metering-based determination of acid-base surface properties of solids : Teaching aid. Tomsk : Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2011. 85 p.
 25. Ishankhodzhaeva M. M., Mkhitarian E. L. Physical chemistry. Polyelectrolytes. Saint-Petersburg : SPbGTURP, 2015. 40 p.

УДК 622.341.1:622.7

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МАГНЕТИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ НА ОСНОВЕ МАГНИТНО-ГРАВИТАЦИОННОЙ СЕПАРАЦИИ



А. С. ОПАЛЕВ,
 зам. директора по научной работе, канд. техн. наук,
 opalev@goi.kolasc.net.ru

Горный институт Кольского научного центра РАН,
 Апатиты, Россия

Введение

Эффективная работа железорудных предприятий в условиях мировой конкуренции и растущих требований экологической безопасности требует от производителей не только поиска направлений снижения затрат на производство конечной продукции, но и диктует необходимость перехода от выпуска рядовых железорудных концентратов (ЖРК) с содержанием $Fe_{\text{общ}}$ 66–68,5 %, необходимых для доменного производства, к производству высококачественных концентратов (ВКК) с содержанием 69,5–70,5 % железа и 2,5 % SiO_2 для прямого получения металла. При этом повышение качества продукции необходимо осуществлять на фоне общего снижения качества добываемых руд при существенном повышении себестоимости их добычи. Основным решением проблемы повышения качества производимых ЖРК является внедрение рациональных энергосберегающих технологических схем обогащения с использованием мирового опыта эксплуатации современного высокоэффективного технологического оборудования [1–3].

Существующие технологические схемы магнитного обогащения железистых кварцитов на большинстве ГОКов построены по принципу стадийного выделения хвостов и получения готового концентрата в последней стадии обогащения, при этом общее число стадий может достигать 4–5. Главным недостатком таких схем является нерациональное использование энергии измельчающего оборудования, поскольку при данной организации

Рассмотрены проблемы повышения качества железорудных концентратов на предприятиях отрасли по переработке железистых кварцитов. Обозначены два пути решения проблемы: традиционный, связанный с дораскрытием рудной фазы путем применения сверхтонкого измельчения, ультратонкого грохочения и обратной флотации, и инновационный, основанный на стадийном выводе высококачественного концентрата с использованием магнитно-гравитационной сепарации. Проанализированы некоторые аспекты внедрения инновационной технологии получения высококачественного концентрата с содержанием $Fe_{\text{общ}}$ не менее 70 %, а также приведены основные этапы промышленного освоения магнитно-гравитационной сепарации на предприятиях отрасли.

Ключевые слова: железистые кварциты, магнетит, концентрат, сродсток, магнитно-гравитационная сепарация, стадийный вывод, инновационная технология, сепаратор МГС-2.0, промышленное освоение.

DOI: 10.17580/gzh.2020.09.10

массопотоков магнетитсодержащий промпродукт последовательно проходит через все стадии измельчения. При совместном измельчении частиц магнетита и его сродстков с породообразующими минералами энергия измельчения распределяется пропорционально содержанию этих фракций в измельчаемом материале, что приводит к низкой степени раскрытия сродстков и существенному переизмельчению магнетита. Следствием нерационального использования энергии измельчения являются высокие потери тонких фракций магнетита с отвальными хвостами и низкое качество концентрата из-за разубоживания его нераскрытыми сродсками. Таким образом, решение проблемы повышения качества ЖРК, производимых из железистых кварцитов, требует не только совершенствования технологических схем обогащения в части повышения эффективности рудоподготовительных операций – измельчения и классификации, но и поиска высоко-селективных методов отделения раскрытой рудной фазы от ее сродстков с кварцем и силикатами.

Анализ причин низкого качества производимых железорудных концентратов

В России основными горно-обогатительными предприятиями по переработке магнетитовых и магнетит-гематитовых кварцитов являются: АО «Стойленский ГОК» (ПАО «НЛМК»); АО «Лебединский ГОК» и ПАО «Михайловский ГОК» (ООО УК «Металлоинвест»); АО «Комбинат КМАруда» (ООО УК «Промышленно-металлургический холдинг»), расположенные в центрально-европейской части страны, и предприятия северо-запада – АО «Карельский окатыш» и АО «Олкон» (ПАО «Северсталь») [4]. При этом качество производимого на этих предприятиях ЖРК только на АО «Лебединский ГОК» (за счет использования пяти стадий измельчения, в том числе мельниц самоизмельчения) и АО «Карельский окатыш» при переработке легкообогатимых руд (ЛОР) достигает приемлемого уровня (массовая доля железа общего 69,5–70 %), на остальных оно существенно ниже. Как уже отмечалось выше, основная причина низкого качества ЖРК – присутствие в нем сростковой фракции, удаление которой магнитной сепарацией затруднено по следующим причинам:

- магнитная сепарация не обеспечивает эффективного разделения частиц магнетита и их сростков с порообразующими минералами из-за низкой контрастности их магнитных свойств;
- жесткое магнитное агрегирование частиц магнетита в сильном магнитном поле рабочей зоны сепаратора приводит к механическому захвату бедных сростков и частиц пустой породы;
- высокая физико-механическая активация поверхности микронных частиц кварца после измельчения обуславливает адгезионное закрепление их на поверхности частиц магнетита.

Предшествующими исследованиями доказано, что разрушение железистых кварцитов под действием только сжимающих усилий приведет к образованию «трудных» для разделения сростков. Исследование границ срастания контактирующих минералов (магнетит-кварц-силикатов) показали, что их разрушение происходит не по границе спайности, а непосредственно по минералу из-за повышенной прочности минералов на границе их срастания вследствие диффузионного смешения минералов в зоне межфазного контакта [5, 6].

В настоящее время вовлекаемые в переработку железистые кварциты 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 обеспечивается при крупности менее 96 % класса –0,05 мм. Минералогический анализ ЖРК различных предприятий, выполненный Е. Д. Рухленко, показал, что практически во всех классах крупности независимо от вкрапленности магнетита присутствуют достаточно бедные сростки. На **рис. 1** и **2** представлены микрофотографии сростков различной крупности ЖРК АО «Стойленский ГОК», свидетельствующие о наличии сростков даже в классе крупности –0,044 мм, где они должны отсутствовать. Таким образом, наличие сростковой фракции в товарных концентратах свидетельствует о неэффективности

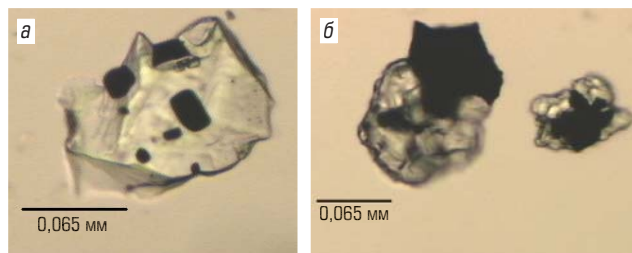


Рис. 1. Нераскрытый магнетит в материале крупностью –0,10+0,045 мм:

а – пылевидные включения магнетита; *б* – бинарные сростки магнетита с сопутствующими минералами

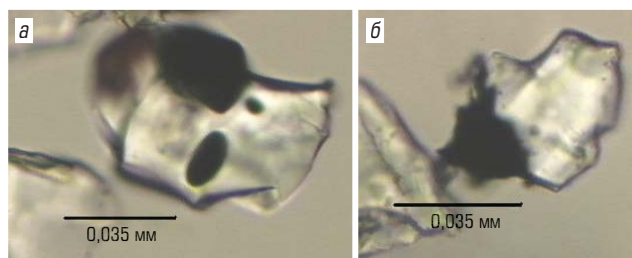


Рис. 2. Нераскрытый магнетит в материале крупностью –0,045 мм (иммерсия):

а – крупные включения магнетита в кварце; *б* – бинарный сросток магнетита с кварцем

существующих технологических схем, построенных по принципу стадийного вывода хвостов с получением готового концентрата в последней стадии обогащения, и является главной причиной низкого качества ЖРК.

Пути решения проблемы повышения качества ЖРК

В последние годы на предприятиях по переработке железистых кварцитов активно искали пути повышения качества производимых ЖРК, в том числе с возможностью приобретения высокоэффективного импортного оборудования. Мировой опыт показал, что наиболее интересным и перспективным направлением работ в данной области является использование операции тонкого вибрационного грохочения в циклах измельчения вместо традиционно применяемой классификации в гидроциклонах. Очевидно, что разделение материала по крупности на сите более эффективно, чем его разделение в гидроциклонах, поскольку в них распределение частиц по продуктам классификации происходит по крупности, плотности и носит вероятностный характер. Операция же тонкого грохочения позволяет концентрировать в подрешетном продукте преимущественно раскрытый материал, а надрешетный продукт представлен нераскрытой рудной смесью, при измельчении которой в отдельном цикле резко повышается степень раскрытия, что предопределяет уменьшение циркуляционной нагрузки в цикле измельчения-классификации [7]. Такой подход к модернизации технологии производства железорудных концентратов уже

широко применяют практически на всех основных ГОКах страны по аналогии с зарубежными предприятиями [8]. Однако получение ВКК применением только тонкого грохочения и последующей стандартной магнитной сепарации подрешетного продукта весьма затруднительно, поскольку магнитная сепарация, осуществляемая в фабричных условиях на серийных сепараторах, позволяет выделить в хвосты только немагнитные зерна пустой породы, а вся рудная смесь (зерна магнетита, богатые и бедные сростки) переходит в магнитный продукт. Таким образом, ключевым моментом является поиск эффективных способов и оборудования для высокоселективного разделения минеральных частиц с близкими физическими свойствами.

На сегодняшний день в практике переработки железистых кварцитов сложились два подхода в получении ВКК.

Традиционное направление – повышение качества на основе применения сверхтонкого измельчения для дораскрытия сростков с использованием высокоэффективного измельчающего оборудования, тонкого грохочения с ультрамалыми размерами ячеек просеивающей поверхности, колонной флотации, керамических фильтров в операции обезвоживания. В мировой практике для различных руд применяют дообогащение готового концентрата с использованием мельниц сверхтонкого измельчения (вертикальные мельницы с перемешиваемой мелющей средой Vertimill компании Metso Minerals) [9], работающих в замкнутом цикле с классифицирующими аппаратами; тонкого вибрационного грохочения (Stack Sizer™ компании Derrick Corporation) [10]; обратной катионной флотации кварца с получением высококачественного железного концентрата в виде камерного продукта в колонной флотационной машине (Setco компании Outotec) [11].

В России внедрение традиционного направления повышения качества ЖРК осуществляется на АО «Стойленский ГОК», где строится фабрика дообогащения, оснащаемая вертикальными мельницами с перемешиваемой средой, тонкими вибрационными грохотами и магнитными сепараторами импортного производства. При этом планируется повысить качество ЖРК с 66,5 до 68,5 % массовой доли $Fe_{\text{общ}}$.

С августа 2019 г. начато строительство корпуса дообогащения на АО «Михайловский ГОК», где с помощью мельниц Metso Minerals Vertimill VTM-4500, грохотов Stack Sizer 8STK, гидроциклонов, магнитных сепараторов, колонных флотомашин Setco и керамических фильтров к 2022 г. планируется освоить выпуск 8,8 млн т ВКК с содержанием $Fe_{\text{общ}}$ 70 % и SiO_2 2,5 % [12].

Однако строительство фабрик дообогащения требует огромных капитальных затрат, при этом производимые ВКК будут характеризоваться высокой себестоимостью из-за значительных эксплуатационных затрат на сверхтонкое измельчение и флотацию, что может лишить предприятия конкурентных преимуществ на рынке железорудной продукции. Кроме того, сверхтонкое измельчение магнетита приведет к значительным его потерям из-за снижения магнитных свойств микронных частиц, обусловленного механохимическими преобразованиями структуры магнетита и переходом его в α -гематит, и создаст проблемы с фильтрацией, что скажется на технологических показателях работы предприятия в целом.

Инновационное направление – повышение технологических показателей обогащения на основе рационального использования энергии измельчающей среды при раскрытии сростковой фракции в отдельном цикле измельчения путем реализации известного принципа стадийного вывода готового концентрата. Инновационный путь совершенствования технологических схем получения ВКК за счет стадийного вывода готового концентрата обеспечивает существенное ресурсо- и энергосбережение, позволяет уменьшить фронт измельчения и производить более грубый концентрат высокого качества, обеспечивает большую эффективность сгущения и фильтрации. Основная задача данного направления – выбор эффективных способов и оборудования для селективного разделения раскрытых рудных зерен и их сростков.

В этом направлении большой интерес вызывают работы по использованию винтовой сепарации для стадийного вывода ВКК [13]. Показано, что применение опытной установки винтовой сепарации (ОУВС-750 производства ООО «Спирит») в условиях АО «Стойленский ГОК» позволяет уже из исходной дробленой руды (после валковой дробилки высокого давления) получать магнетитовый концентрат с содержанием железа общего более 70 %. Также данный метод позволяет выводить ВКК после первой стадии обогащения, при этом получаемые промпродукты могут быть направлены на доизмельчение в последующие стадии обогащения.

Многолетними исследованиями ученых Горного института КНЦ РАН показано, что применение магнитно-гравитационного разделения в технологии получения ЖРК в комбинации с тонким грохочением позволяет уже на начальных стадиях обогащения выводить из процесса готовый концентрат требуемого качества [14]. Высокая эффективность разделения в процессе магнитно-гравитационной сепарации обеспечивается комплексностью воздействия физических сил на частицы разделяемого материала, с одной стороны, и высокой чувствительностью процесса к изменению соотношения магнитной и гидродинамической сил – с другой. Использование данного принципа разделения для отделения раскрытой рудной фазы от сростковой фракции в отдельный продукт обеспечивает возможность получения готового концентрата на любой стадии технологического процесса, в отличие от серийно выпускаемых магнитных сепараторов. Наличие центробежно восходящего водного потока в сочетании с однородным магнитным полем, вектор индукции которого параллелен потоку, позволяет рассматривать агрегированную ферросуспензию как «объемное сито» с управляемой гидродинамикой потоков, регулируемой интенсивностью магнитного взаимодействия между структурообразующими магнитными частицами [15]. Именно интенсивность магнитного взаимодействия между раскрытыми частицами магнетита, обусловленная силами потокосцепления, определяет вероятность попадания данного сорта сростков в сформированные агрегаты или их извлечение в магнитный продукт. Очевидно, в зависимости от содержания магнетита в сростке меняется его магнитная восприимчивость, варьирует и вероятность его попадания в тот или иной продукт разделения, предопределяя возможность

регулирования качества концентрата. Интенсивность центробежно восходящего потока воды регулирует скорость движения сростков в межагрегатном пространстве (поровых каналах) оживенной ферросуспензии и за счет сдвиговых напряжений способствует эффективному удалению сростков из сформированных агрегатов. Механизм разделения тонкоизмельченных минеральных частиц хорошо согласуется с теорией магнитно-стабилизированных оживенных слоев (magnetic stabilization of fluidized beds – MSFB) [16–18], согласно которой эффективность разделения будет зависеть именно от соотношения магнитных и гидродинамических сил, определяющего комплексность воздействия физических сил на ферросуспензии и возможность регулирования технологических показателей разделения, что является основой для разработки автоматизированных систем управления процессом.

Совершенствование инновационной технологии получения ВКК

Разработанная инновационная технология получения ВКК из магнетит-гематитовых руд Заимандровской группы месторождений (г. Оленегорск, Мурманская обл.) в настоящее время успешно внедряется на дробильно-обогащительной фабрике АО «Олкон», где реализована технологическая схема с выводом готового концентрата из первой и второй стадий обогащения на основе применения тонкого грохочения и магнитно-гравитационной сепарации. Технологические показатели работы такой схемы хорошо согласуются с расчетными данными, приведенными в статье [19]. Продолжаются работы по оптимизации параметров работы данной технологической схемы с целью получения ВКК с содержанием железа более 70 %. Опыт эксплуатации новой технологии на ДОФ АО «Олкон» показал, что эффективность магнитно-гравитационной сепарации достигает более 80 % за счет высокого прироста содержания железа в концентрате (22–24 %) и низкого содержания железа магнитного в сливном продукте (не более 2,5 %, что близко к отвальным хвостам), при этом получаемый концентрат характеризуется более грубой гранулометрической характеристикой (на 8–10 % грубее по содержанию расчетного класса крупности –0,071 мм). Экономическая оценка эффективности внедрения технологии стадийного вывода готового концентрата предполагает получение АО «Олкон» 12–15 млн руб. в год за счет снижения общефабричных затрат из-за вывода части оборудования из эксплуатации; основной же экономический эффект от повышения качества ЖРК до уровня 70 % содержания $Fe_{\text{общ}}$ ожидается в доменном переделе ПАО «Северсталь»: по предварительной оценке, он составит от 150 до 200 млн руб. в год в зависимости от объемов переработки. Данное обстоятельство стало основой для изучения принципиальной возможности использования данной технологии на других предприятиях отрасли. Для этого были проведены лабораторные исследования по эффективности обогащения дробленой руды и промпродуктов технологических схем различных предприятий, перерабатывающих железистые кварциты.

Тестовые исследования по изучению эффективности стадийного вывода, включавшие в себя операции классификации

и измельчения, магнитной сепарации, тонкого грохочения и магнитно-гравитационной сепарации, были выполнены на дробленой руде АО «Карельский окатыш» и АО «Стойленский ГОК». Полученные результаты подтвердили возможность получения ЖРК с содержанием железа не менее 70 %, при этом за счет использования только двух стадий измельчения (вместо трех по действующей технологии) был получен концентрат высокого качества с более грубым гранулометрическим составом. Кроме того, эффективность измельчения руд с высокими прочностными свойствами в валковых дробилках высокого давления [20] и опыт использования их в технологии обогащения на АО «Стойленский ГОК» позволяют усовершенствовать данную технологию путем вывода готового концентрата непосредственно из дробленой руды за счет применения мультинаклонных грохотов большой производительности [21]. Получение грубозернистых ВКК позволяет существенно повысить эффективность операций сгущения и обезвоживания концентрата и отказаться от применения фильтров с керамическими фильтрующими элементами. При этом необходимое значение удельной поверхности продукта для последующего процесса окомкования может быть достигнуто использованием роллер-прессов. Также были проведены исследования по изучению обогатимости различных продуктов технологических схем обогащения предприятий АО «ССГПО» (Казахстан), АО «Южный ГОК» (Украина) и АО «Лебединский ГОК». Их результаты также подтвердили возможность значительного повышения качества магнетитовых концентратов, но для разработки эффективных технологий стадийного вывода требуется проведение дополнительных исследований.

Стапы промышленного освоения магнитно-гравитационных сепараторов

Для реализации магнитно-гравитационной сепарации в промышленных условиях разработана конструкция сепаратора МГС-2.0, оснащенного системой автоматического управления разгрузкой концентрата, выполненной на современной элементной базе. Благодаря наличию этой системы в сепараторе поддерживается гидродинамический режим течения ферромагнитной суспензии, необходимый для оптимизации массопотоков разделяемого материала внутри сепарационного объема аппарата. Технические характеристики сепаратора представлены ниже.

<i>Крупность разделяемого материала, мм, не более</i>	<i>0,2</i>
<i>Производительность по твердому, т/ч</i>	<i>25–60</i>
<i>Содержание твердого в питании, %</i>	<i>15–70</i>
<i>Напряженность магнитного поля по оси корпуса в центральной части соленоидной катушки, кА/м (эрстед), не менее:</i>	
<i>при токе 7 А</i>	<i>5,3 (42)</i>
<i>при токе 15 А</i>	<i>7,2 (90)</i>
<i>Давление промывной воды, МПа</i>	<i>0,2–0,4</i>
<i>Расход промывной воды, м³/ч, не более</i>	<i>200</i>
<i>Диаметр корпуса, мм</i>	<i>1914</i>
<i>Высота цилиндрической части корпуса, мм</i>	<i>2000</i>
<i>Мощность, потребляемая сепаратором, кВт, не более</i>	<i>7</i>



Рис. 3. Получение ВКК с использованием сепараторов МГС-2.0 на АО «Олкон» (а) и АО «Карельский окатыш» (б)

Габаритные размеры, мм, не более:

высота	4240
длина	2410
ширина	2410
Масса, кг, не более	2500

Конструкцию сепаратора МГС-2.0 постоянно модернизируют для улучшения эксплуатационных и эргономических характеристик, ведут исследования по разработке автоматизированной системы стабилизации качества выпускаемого концентрата. Все права на изготовление, реализацию и сервисное обслуживание в России, других странах СНГ и Евразийского Союза переданы компании ООО «Гормашсервис» (г. Москва).

В настоящее время сепараторы МГС-2.0 внедрены на АО «Олкон» (20 ед.) в схеме стадийного вывода ВКК в первой и второй стадиях обогащения, при этом третья стадия обогащения выведена из технологической схемы, что создает резерв по производительности дробильно-обогатительной фабрики


(рис. 3, а). Также идет оснащение сепараторами МГС-2.0 ДОФ АО «Карельский окатыш» (48 ед.) в цикле получения ВКК (см. рис. 3, б). Проведены промышленные испытания опытных партий МГС-2.0 на АО «Стойленский ГОК» и АО «ССГПО» (Казахстан), подтвердившие высокую эффективность работы сепараторов по повышению качества выпускаемых магнетитовых концентратов.

Заключение

Модернизация существующей технологии обогащения железистых кварцитов с целью повышения качества выпускаемой продукции может быть осуществлена путем стадийного вывода магнетитового концентрата за счет применения комбинации высокоэффективной операции тонкого вибрационного грохочения и высокоселективного метода магнитно-гравитационной сепарации. Реализация данного подхода позволит не только повысить качество выпускаемых железорудных концентратов до уровня содержания в них железа общего 70 % и выше, но и существенно снизить энерго- и ресурсопотребление на их производство.

Библиографический список

1. Патковская Н. А., Тасина Т. И. Модернизация технологии обогащения железосодержащих руд Северо-Запада России // Обогащение руд. 2011. № 1. С. 6–10.
2. Lu L. Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2015. – 631 p.
3. Кусков В. Б., Сишук Ю. М. Совершенствование технологий обогащения железных руд различных типов и вещественного состава // Горный журнал. 2016. № 2. С. 70–74. DOI: 10.17580/gzh.2016.02.14
4. Юшина Т. И., Петров И. М., Авдеев Г. И., Валавин В. С. Анализ современного состояния добычи и переработки железных руд и железорудного сырья в Российской Федерации // Горный журнал. 2015. № 1. С. 41–47. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.08
5. Берсенева И. С., Ганин Д. Р., Дружков В. Г., Панычев А. А. Закономерности концентрации химических элементов в минералах агломератов из магнетитового концентрата Михайловского месторождения // Черные металлы. 2018. № 12. С. 15–19.
6. Гзоян Т. Н., Мельникова Н. Д. Влияние микротвердости основных минералов железистых кварцитов на технологические свойства // ФТПРПИ. 2001. № 3. С. 112–122.

7. Вайсберг Л. А., Коровников А. Н. Тонкое грохочение как альтернатива гидравлической классификации по крупности // Обогащение руд. 2004. № 3. С. 23–34.
8. Пелевин А. Е., Лазебная М. В. Применение грохотов «Деррик» в замкнутом цикле измельчения на обогатительной фабрике ОАО «Комбинат КМАруда» // Обогащение руд. 2009. № 2. С. 4–8.
9. Смирнов Ю. А. Технологии измельчения с перемешиванием рабочей среды // Горная промышленность. 2014. № 6(118). С. 56.
10. Makinde O. A., Ramatsetse B. I., Mpofo K. Review of vibrating screen development trends: Linking the past and the future in mining machinery industries // International Journal of Mineral Processing. 2015. Vol. 145. P. 17–22.
11. Игнатова Т. В., Шелепов Э. В. Особенности процесса колонной флотации для железных руд сложного вещественного состава Михайловского месторождения // ГИАБ. 2011. № 4. С. 241–245.
12. Исмагилов Р. И., Голеньков Д. Н., Шелепов Э. В., Игнатова Т. В. Современные пути повышения эффективности переработки неокисленных железистых кварцитов // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения-2019) : матер. междунар. совещания. – Иркутск : ОО «Репроцентр А1», 2019. С. 134–136.
13. Иванова К. К., Прокопьев С. А., Прокопьев Е. С., Турецкая Н. Ю. Получение высококачественного железорудного концентрата методом винтовой сепарации // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения-2019) : матер. междунар. совещания. – Иркутск : ОО «Репроцентр А1», 2019. С. 243–246.
14. Усачев П. А. Получение высококачественных железных концентратов на обогатительной фабрике ОАО «Лебединский ГОК» // Горный журнал. 2000. № 3. С. 41–44.
15. Опалев А. С., Бирюков В. В., Буренина И. В. К механизму селективного разделения магнетитсодержащих продуктов в магнитно-стабилизированном ожигенном слое магнитно гравитационного сепаратора // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2013. № 3. С. 37–48.
16. Busciglio A., Vella G., Micale G., Brandani S. Modeling of Magnetic-Field-Assisted Fluidization: Model Development and CFD Simulation of Magnetically Stabilized Fluidized Beds // KONA Powder and Particle Journal. 2015. Vol. 32. P. 217–226.
17. Espin M. J., Quintanilla M. A. S., Valverde J. M. Magnetic stabilization of fluidized beds: Effect of magnetic field orientation // Chemical Engineering Journal. 2017. Vol. 313. P. 1335–1345.
18. Qianhong Zhu, Hongzhong Li, Qingshan Zhu, Qingshan Huang. Modeling of segregation in magnetized fluidized bed with binary mixture of Geldart-B magnetizable and nonmagnetizable particles // Chinese Journal of Chemical Engineering. 2018. Vol. 26. Iss. 6. P. 1412–1422.
19. Опалев А. С., Хошуля М. С., Фомин А. В., Карпов И. В. Создание инновационных технологий производства высококачественного железорудного концентрата на предприятиях северо-запада России // Горный журнал. 2019. № 6. С. 56–61. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.07
20. Федотов П. К. Межчастичное разрушение руды. – М. : ОО «Геоинформмарк», 2011. – 136 с.
21. Harder J. Trends in the Crushing of Mineral Ores // Mineral Processing. 2016. No. 5. P. 21–26. 

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 9, pp. 72–77
DOI: 10.17580/gzh.2020.09.10

Improving quality of magnetite concentrates based on magnetic–gravity separation

Information about author

A. S. Opalev¹, Deputy Director of Science, Candidate of Engineering Sciences, opalevas@rambler.ru

¹Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract

The paper addresses improvement of quality of iron ore concentrates produced from ferruginous quartzites to the level of Fe_{total} content of at least 70% suitable for direct reduction of iron. The article analyzes the main causes for the low quality of iron ore in the mining industry, which hinder the widespread introduction of nonblast furnace metallurgy processes. Two ways of solving this problem are considered: traditional superfine grinding in vertical mills for deep beneficiation of magnetite ores with magnetic separation, ultrafine screening and reverse flotation in column machines and dewatering with ceramic filters; innovative approach based on the rational use of grinding energy in ore preparation processes by implementing the principle of stage-wise output of the final concentrate using fine screening and magnetic–gravity separation. The research results on the development of an innovative technology for processing ferruginous quartzites by magnetic–gravity separation to produce high-quality magnetite concentrates with a total mass fraction of iron of at least 70% are presented. The data on the main stages of commercial-scale magnetic–gravity separation on industrial separator MGS-2.0 equipped with modern automation system at ferruginous quartzites processing plants in the northwest of Russia are presented.

Keywords: ferruginous quartzites, magnetite, concentrate, intergrowth, magnetic–gravity separation, stage-wise output, innovative technology, separator MGS-2.0, commercial-scale development.

References

1. 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.
2. Lu L. Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. Cambridge : Woodhead Publishing, 2015. 631 p.
3. Kuskov V. B., Sishchuk Yu. M. Improvement of beneficiation technologies for iron ore of various type and material constitution. *Gornyy Zhurnal.* 2016. No. 2. pp. 70–74. DOI: 10.17580/gzh.2016.02.14
4. Yushina T. I., Petrov I. M., Avdeev G. I., Valavin V. S. Analysis of state-of-the-art in iron ore mining and processing in the Russian Federation. *Gornyy Zhurnal.* 2015. No. 1. pp. 41–47. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.08
5. Bersenev I. S., Ganin D. R., Druzhkov V. G., Panychev A. A. Regularities of the concentration of chemical elements in the minerals of agglomerates from the magnetite concentrate of the Mikhailovskoe deposit. *Chernye Metally.* 2018. No. 12. pp. 15–19.

6. Gzogyan T. N., Melnikova N. D. Influence exerted by microhardness of basic minerals of ferruginous quartzites on the technological properties. *Journal of Mining Science.* 2001. Vol. 37, Iss. 3. pp. 330–340.
7. Vaisberg L. A., Korovnikov A. N. Fine screening as an alternative to hydraulic size classification. *Obogashchenie Rud.* 2004. No. 3. pp. 23–34.
8. Pelevin A. Ye., Lazebnaya M. V. Application of Derric screens in locked grinding circuit at the «KMAruda» Mining Complex concentrating plant. *Obogashchenie Rud.* 2009. No. 2. pp. 4–8.
9. Smirnov Yu. A. Technologies of milling with mixing of actuation medium. *Gornaya promyshlennost.* 2014. No. 6(118). p. 56.
10. Makinde O. A., Ramatsetse B. I., Mpofo K. Review of vibrating screen development trends: Linking the past and the future in mining machinery industries. *International Journal of Mineral Processing.* 2015. Vol. 145. pp. 17–22.
11. Ignatova T. V., Shelepov E. V. Column flotation of complex ferruginous ore of the Mikhailovskoe deposit. *GIAB.* 2011. No. 4. pp. 241–245.
12. Ismagilov R. I., Golencov D. N., Shelepov E. V., Ignatova T. V. Modern ways of enhancing efficiency of unoxidized quartzite processing. *Problems and Prospects of Efficient Mineral Processing in the 21st Century (Plaksin's Lectures-2019) : International Conference Proceedings.* Irkutsk : Reprotsentr A1, 2019. pp. 134–136.
13. Ivanova K. K., Prokopev S. A., Prokopev E. S., Turtskaya N. Yu. High-quality iron concentrate production by screw separation. *Problems and Prospects of Efficient Mineral Processing in the 21st Century (Plaksin's Lectures-2019) : International Conference Proceedings.* Irkutsk : Reprotsentr A1, 2019. pp. 243–246.
14. Usachev P. A. Production of high-quality ferrous concentrates at the concentration plant of Lebedinskii mining and concentration integration works. *Gornyy Zhurnal.* 2000. No. 3. pp. 41–44.
15. Opalev A. S., Biryukov V. V., Burenina I. V. The mechanism for the selective separation of magnetite products in magnetic stabilize fluidized bed gravity separator. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta.* 2013. No. 3. pp. 37–48.
16. Busciglio A., Vella G., Micale G., Brandani S. Modeling of Magnetic-Field-Assisted Fluidization: Model Development and CFD Simulation of Magnetically Stabilized Fluidized Beds. *KONA Powder and Particle Journal.* 2015. Vol. 32. pp. 217–226.
17. Espin M. J., Quintanilla M. A. S., Valverde J. M. Magnetic stabilization of fluidized beds: Effect of magnetic field orientation. *Chemical Engineering Journal.* 2017. Vol. 313. pp. 1335–1345.
18. Qianhong Zhu, Hongzhong Li, Qingshan Zhu, Qingshan Huang. Modeling of segregation in magnetized fluidized bed with binary mixture of Geldart-B magnetizable and nonmagnetizable particles. *Chinese Journal of Chemical Engineering.* 2018. Vol. 26, Iss. 6. pp. 1412–1422.
19. Opalev A. S., Khokhulya M. S., Fomin A. V., Karpov I. V. Creation of innovative technologies for production of high-quality iron concentrate production in the North West of Russia. *Gornyy Zhurnal.* 2019. No. 6. pp. 56–61. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.07
20. Fedotov P. K. Interparticle destruction of ore. Moscow : Geoinformmark LLC, 2011. 136 p.
21. Harder J. Trends in the Crushing of Mineral Ores. *Mineral Processing.* 2016. No. 5. pp. 21–26.