

Современные направления повышения эффективности переработки железистых кварцитов на примере АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева»

Р.И. Исмагилов¹✉, А.В. Козуб², И.Н. Гридасов², Э.В. Шелепов²

¹ ООО УК «Металлоинвест», г. Москва, Российская Федерация

² АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», г. Железногорск, Российская Федерация

✉pr@metalloinvest.com

Резюме: Качество магнетитового концентрата в значительной мере определяет технико-экономические показатели металлургического производства и, соответственно, конкурентоспособность производителя на рынке сбыта продукции. В статье на примере АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», перерабатывающего труднообогатимые руды железистых кварцитов с массовой долей железа общего 38,8% и железа магнитного 20,1%, представлены результаты комплекса технологических исследований в лабораторных и опытно-промышленных условиях по разработке эффективной технологической схемы обогащения с получением высококачественного железорудного концентрата. По существующей технологии в 2019 г. на Михайловском ГОКе получали концентрат с содержанием $Fe_{\text{общ.}}$ 65,1% и SiO_2 8,6% при достигнутом извлечении 98%. Ежегодное производство концентрата около 17 млн т в год. При этом качество получаемых из данного концентрата окатышей составляло 63,1% железа общего. Эффективным способом повышения качества черновых магнетитовых концентратов является их тонкое грохочение с использованием грохотов Derrick. Проведен комплекс минералого-технологических, технологических и предпроектных исследований, изучен мировой и отечественный опыт применения грохотов мокрого тонкого грохочения Derrick, испытаны 4 принципиальные схемы обогащения, проведено более 100 опробований. На основе полученных результатов предложена технологическая схема обогащения железистых кварцитов на обогатительной фабрике АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» и доводки концентрата, которая позволяет сохранить текущие объемы производства магнетитового концентрата при значительном повышении в нем содержания железа – до 69,3–70% и существенном снижении содержания кремнезема – до 2,6–3,6%. Производство такого концентрата позволит поднять качество железорудных окатышей, значительно повысить конкурентоспособность продукции и выйти на новые рынки ее сбыта.

Ключевые слова: железистые кварциты, схемы обогащения, тонкое мокрое грохочение, грохоты Derrick Stack Sizer 5STK, высококачественный магнетитовый концентрат

Благодарности: В работе принимал активное участие Д.Н. Голеньков.

Для цитирования: Исмагилов Р.И., Козуб А.В., Гридасов И.Н., Шелепов Э.В. Современные направления повышения эффективности переработки железистых кварцитов на примере АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева». *Горная промышленность*. 2020;(4):98–103. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-4-98-103.

Case Study: Advanced Solutions Applied by JSC Andrei Varichev Mikhailovsky GOK to Improve Ferruginous Quartzite Concentration Performance

R.I. Ismagilov¹✉, A.V. Kozub², I.N. Gridasov², E.V. Sheleпов²

¹ MC Metalloinvest LLC, Moscow, Russian Federation

² Andrei Varichev Mikhailovsky GOK, Zheleznogorsk, Russian Federation

✉pr@metalloinvest.com

Abstract: Steelmaking performance and competitive ability in the market is greatly determined by quality of magnetite concentrate used as a burden material. This case study explores outcomes of comprehensive process research both lab scale and pilot scale aimed at elaborating of effective process flowchart to enable production of high-grade concentrate from low-grade 38,8% Fe_{total} and 20,1% $Fe_{\text{magn.}}$ ferruginous quartzite carried out in Andrei Varichev Mikhailovsky GOK. Existing process enables Andrei Varichev Mikhailovsky GOK to produce 65,1% Fe_{total} 8,6% SiO_2 concentrate at 98% recovery with 17 mtpa output capacity. Use of the concentrate as pelletizing feed enables production of 63,1% Fe_{total} pellets. Application of Derrick sizers for concentrate fine screening has proven efficiency in upgrading raw magnetite concentrate. Comprehensive study included complete pre-engineering mineral and process research, analysis of global and domestic experience in Derrick fine wet screening solutions application, testing of four different concentrating flowcharts and over 100 sample tests. Ferruginous quartzite concentration and magnetite concentrate upgrade flowsheet has been designed for implementation in Andrei Varichev Mikhailovsky GOK's Concentrator plant as a result. The

proposed solution enables significant improvement in concentrate grade, i.e. to 69,3–70% Fe_{total} uplift and to 2,6–3,6% SiO_2 reduction while maintaining magnetite concentrate output performance. Improvement in pellet quality, competitive capacity gain and access to new market outlets will be enabled by launch of such higher-grade concentrate production.

Keywords: Ferruginous quartzites, concentration flowcharts, fine wet screening, Derrick Stack Sizer 5STK, high-grade magnetite concentrate

Acknowledgements: D.N. Golenkov took an active part in the work.

For citation: Ismagilov R.I., Kozub A.V., Gridasov I.N., Shelepov E.V. Case Study: Advanced Solutions Applied by JSC Andrei Varichev Mikhailovsky GOK to Improve Ferruginous Quartzite Concentration Performance. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2020;(4):98–103. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2020-4-98-103.

Введение

Михайловское месторождение является уникальным по запасам бедных труднообогатимых железных руд – неокисленных железистых кварцитов: запасы 10,5 млрд т при массовой доле железа общего в исходной руде 38,8%, железа магнитного 20,1%. В настоящее время Михайловский ГОК перерабатывает 48–50 млн т руды в год с получением железорудного концентрата.

В сравнении с рудами других предприятий отрасли неокисленные железистые кварциты Михайловского месторождения обладают одними из самых высоких прочностных свойств, очень высокой абразивностью и крепостью, характеризуются тонко- и мелкокристаллической структурой с существенным развитием сложных форм срастания рудных (магнетит, гематит) и нерудных (кварц, карбонаты, силикаты) зерен, низкой раскрываемостью рудных минералов и относятся к труднообогатимым и трудноизмельчаемым рудам. Массовая доля зерен магнетита крупностью –30 мкм достигает 45% от общего содержания минерала в руде и для его раскрытия перед обогащением требуется тонкое измельчение руд до крупности –0,044 мкм. Кроме того, железистые кварциты различных участков Михайловского месторождения характеризуются значительными различиями в вещественном составе,

изменчивостью минеральных разновидностей, многообразием текстурно-структурных особенностей, неравномерной тонкой вкрапленностью рудных и нерудных минералов. Все эти факторы определяют особо сложные условия их переработки.

Текущая технологическая схема обогащения предусматривает получение концентрата по схеме, включающей трехстадийное шаровое измельчение в замкнутом цикле с классификацией, 3 стадии мокрой магнитной сепарации в барабанных сепараторах и две стадии дещлакации (рис. 1). На первой стадии измельчения используются спиральные классификаторы, а на второй и третьей стадиях – гидrocиклоны.

По существующей технологии 2019 г. на Михайловском ГОКе получали концентрат с содержанием $Fe_{общ.} = 65,1\%$ и $SiO_2 = 8,6\%$ при достигнутом извлечении 98%. Ежегодное производство концентрата около 17 млн т в год. При этом качество получаемых из данного концентрата окатышей составляло 63,1% железа общего. Современные мировые требования к качеству производимой железорудной продукции, в частности, железорудным окатышам, постоянно растут. Так, если обратиться к основным критериям качества железорудных окатышей, таким как содержание железа общего, содержание диоксида кремния, прочность

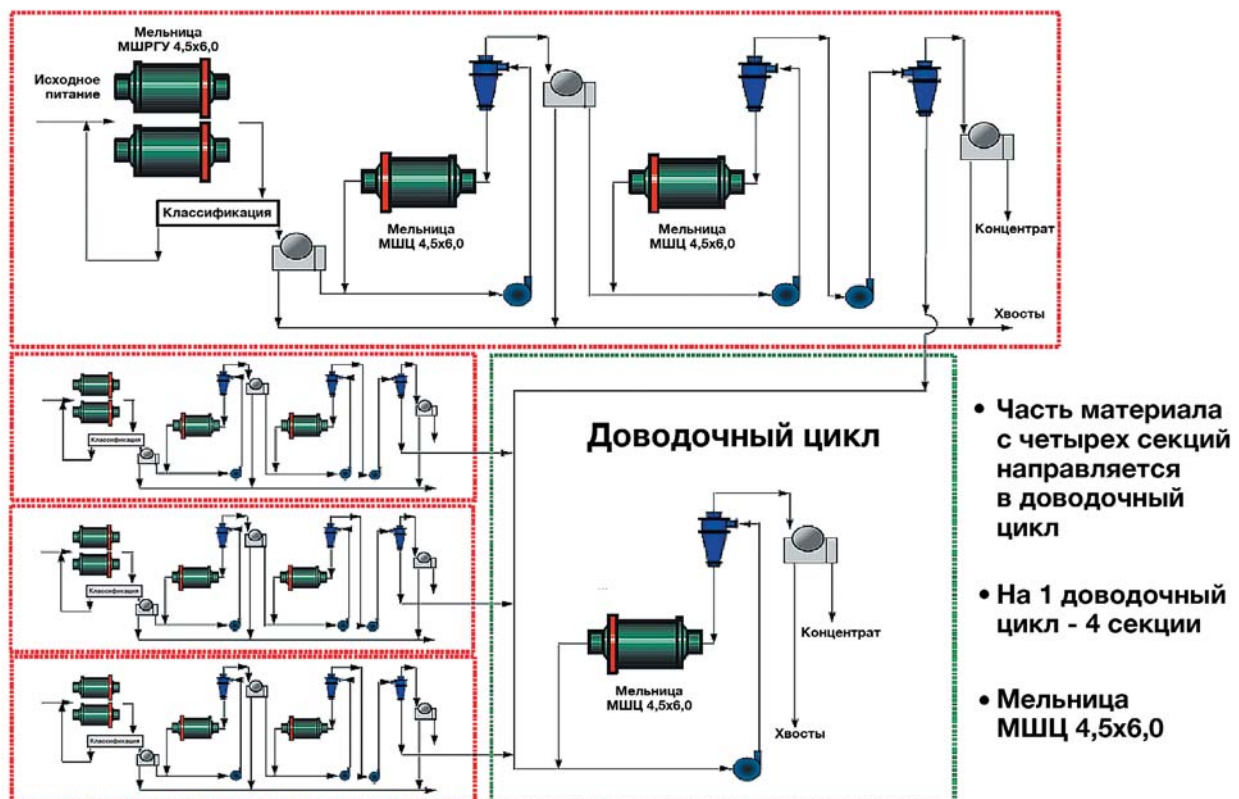


Рис. 1
Технологическая схема до внедрения технологии тонкого мокрого грохочения

Fig. 1
Technological diagram before the introduction of the fine wet screening technology



на сжатие, то увидим, что требования крупнейших в мире производителей высоколегированной стали, таких как Германия, Япония, Польша, Словакия и других составляют от 64 до 65% по содержанию железа общего и не более 2,5 – 2,8% по содержанию диоксида кремния. При этом во всем мире предприятия и компании по переработке железорудного сырья активно ищут пути повышения качества своей продукции¹[1–3]. Соответственно, повышение качества железорудного концентрата является актуальной задачей.

Материалы и методы

Одно из направлений повышения качества продукции и эффективности производства – совершенствование технологических схем за счет внедрения нового современного оборудования [3–6].

На Михайловском ГОКе – это прежде всего совершенствование схем измельчения – классификации, ввиду весьма низкой раскрываемости руд, обусловленной особенностями их вещественного состава, текстурой и структурой. Для получения высококачественных концентратов необходимо как можно полнее раскрыть составляющие руду минералы, тогда как при измельчении железистых кварцитов Михайловского месторождения даже до крупности –0,044 мм наблюдается большое количество сложных сростков магнетита с кварцем, переходящих в концентрат магнитного обогащения и снижающих его качество. В то же время различие в механических свойствах магнетита и кварца приводит к тому, что при тонком измельчении магнетит переизмельчается, переходит в шламы, не поддающиеся обогащению, и теряется с хвостами. Вывод тонких классов крупности по мере их образования при измельчении руды дает возможность получить более раскрытый по магнетиту материал, снизить циркулирующую нагрузку в циклах измельчения – классификации и потери металла с хвостами [4–10].

Эффективным способом повышения качества черновых магнетитовых концентратов является их тонкое

грохочение [11–26]. Этот способ нашел широкое распространение и внедрен на ряде зарубежных и отечественных предприятий. Специалисты АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» и ООО УК «МЕТАЛЛОИНВЕСТ» изучили и оценили целесообразность, возможность и необходимость установки на комбинате грохотов Derrick Stack Sizer 5STK, в результате чего приняли решение о кардинальной модернизации существующей технологической схемы обогащения железистых кварцитов, позволяющей значительно повысить качество концентрата.

Разработка технологической схемы осуществлялась с учетом результатов детального изучения физико-механических свойств, минерального и гранулометрического состава исходной руды и промпродуктов по стадиям обогащения, а также большого комплекса исследований работы дробильно-обогащительного комплекса с применением операции тонкого мокрого грохочения. Изучение и оптимизация параметров тонкого мокрого грохочения проводились комплексом методов с использованием современной аналитической и приборной базы.

Моделирование операции тонкого грохочения магнетитового концентрата в лабораторных условиях позволило определить выход надрешетного/подрешетного продуктов грохочения, их качество и распределение в них железа в различных условиях работы оборудования при различной крупности материала (исходной крупности и с доизмельчением). Анализ полученных результатов позволил заключить, что с применением тонкого мокрого грохочения возможно стадийное выделение концентратов, однако потребуются изменения в действующей технологической схеме обогащения железистых кварцитов [13–16; 20; 21; 23–26].

Результаты лабораторных исследований с 2017 г. прошли проверку в опытно-промышленных условиях на одной из секций обогащательной фабрики. Целью испытаний были определение технологических показателей обогащения по схеме, предусматривающей использование мокрого тонкого грохочения, и выбор оптимальной технологической схемы обогащения. В ходе испытаний испытаны 4 принципиальные схемы и проведено более 100 опробований.

Наиболее перспективной оказалась схема, позволяющая избежать циркуляционных нагрузок в узлах измельчения

¹ Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (ИТС 25-2017). Добыча и обогащение железных руд. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Бюро НДТ, 2017; Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (ИТС 26-2017). Производство чугуна, стали и ферросплавов. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Бюро НДТ, 2017.

Таблица 1
Качественно-количественные показатели концентрата при различных просеивающих поверхностях

Наименование продукта	Массовая доля Fe _{общ.} , %	Массовая доля SiO ₂ , %	Массовая доля класса –44 мкм, %	Нагрузка по исходной руде, т/ч	Размер ячейки сита грохота, мкм
Конечный концентрат (среднее значение)	68,2	4,71	94,7	419	53
Конечный концентрат (среднее значение)	67,0	6,27	90,1	411	63–53
Конечный концентрат (среднее значение)	66,5	6,82	89,0	413,5	63

Table 1
Qualitative and quantitative characteristics of the concentrate at different screening media

и классификации и по стадиям обогащения. Испытания схемы были начаты с определения оптимальных условий работы грохотов на различных просеивающих поверхностях. Результаты показали, что при тонком грохочении песков дешламации второго приема на эффективность классификации незначительное влияние оказывает снижение частоты колебаний, тогда как снижение плотности питания способствует увеличению эффективности. При этом плотность питания оказывает влияние на эффективность классификации, имея тенденцию к увеличению эффективности при снижении плотности питания.

Для определения качественно-количественных показателей работы секции и получаемых показателей по узлу мельницы были проведены сквозные опробования продуктов обогащения при работе секции на плановых и повышенных нагрузках по исходной рудной шихте с установкой в операцию тонкого мокрого грохочения трех видов сит (0,063, 0,063/0,053, 0,053 мм). В итоге установлена возможность увеличения нагрузок по секции по исходной рудной шихте на 6–7% выше плановых. В зависимости от размера отверстий просеивающих сит, массовая доля железа в конечном концентрате достигла 68,7% для сит 53 мкм, 67,8% для сочетания сит 63/53 мкм, 66,9% для сит 63 мкм. В табл. 1 приведены средние значения качественно-количественных показателей при различных просеивающих поверхностях.

Таким образом, в процессе тонкого мокрого грохочения происходит не только разделение материала по крупности, но и его обогащение. Этот эффект связан с различными механическими свойствами магнетита и кварца и с существенными различиями в их твердости и хрупкости. Тонкие раскрытые зерна и богатые сростки магнетита концентрируются в подрешетном продукте тонкого мокрого грохочения, а более крупные ввиду более трудной измельчаемости частицы кварца концентрируются в надрешетном продукте тонкого грохочения.

Полученные результаты

Анализ результатов испытаний позволил сделать вывод, что для внедрения технологии тонкого грохочения на четырех технологических секциях потребуются установка на каждой из них по пять грохотов Derrick Stack Sizer 5STK с просеивающими поверхностями 63/53 мкм, двух грохотов Derrick Stack Sizer 5STK с просеивающими поверхностями 75 мкм для предварительного обогащения надрешетного продукта перед узлом доизмельчения, прокладка трубопроводных трасс для подачи соответствующих продуктов на измельчение/обогащение, а также для изменения потоков готового концентрата с целью разделения его по качеству.



Уточняющие промышленные испытания процесса тонкого мокрого грохочения при переработке труднообогатимой руды, детальное изучение продуктов тонкого грохочения, полученных в период испытаний, масштабные, многократные технологические исследования по флотационному обогащению в лаборатории АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» (МГОК) позволили получить надежные данные для успешной реализации данного проекта.

Была разработана программа модернизации действующего производства по переработке железистых кварцитов Михайловского месторождения в два этапа.

Первый этап – отработка новой технологии в рамках существующего производства.

Второй этап – полномасштабное внедрение новой технологии на МГОК.

Первый этап включал в себя внедрение технологии тонкого грохочения на 4 секциях существующей обогатительной фабрики с установкой на каждой секции по пять грохотов Derrick Stack Sizer 5 STK. Невозможность тиражирования схемы на остальных секциях связана с отсутствием свободных площадей для установки грохотов на существующей обогатительной фабрике, а также с отсутствием мельниц доизмельчения. На сегодняшний день первый этап находится в процессе успешной реализации. По итогам реализации первого этапа в 2020 г. планируется производство 3,7 млн т в год концентрата с содержанием Fe_{общ.} не менее 67% и SiO₂ не более 6,3% с сохранением извлечения на уровне 98%.

Второй этап реализации проекта предусматривает строительство корпуса дообогащения концентрата с применением современного высокоэффективного оборудования, включая сепараторы, грохоты, мельницы, гидроциклоны, флотационные установки, керамические фильтры и вспомогательное оборудование.

Совместно с институтом НИиПИ «ТОМС» выполнена большая работа по предпроектным исследованиям для реализации второго этапа, по результатам которой предложены 3 различных варианта переработки рядового концентрата в корпусе дообогащения.

По итогам реализации второго этапа в 2022 г. планируется выпуск новой продукции (весь объем концентрата) с содержанием в концентрате железа общего – 69,3–70%, кремнезема – 2,6–3,6%.

Выводы

На основе проведенного широкого комплекса минералогического-технологических и технологических исследований, изучения и анализа опыта работы грохотов Derrick пред-

ложена технологическая схема обогащения неокисленных железистых кварцитов на обогатительной фабрике АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» и доводки магнетитового концентрата.

Предложенная технологическая схема позволяет сохранить текущие объемы производства магнетитового концентрата при значительном повышении в нем содержания железа и существенном снижении содержания кремнезема.

Такой концентрат позволит поднять качество железорудных окатышей, увеличив содержание железа в них до уровня 67,57% при снижении содержания SiO₂ до 2,7%, что позволит значительно повысить конкурентоспособность продукции и выйти на новые рынки.

Список литературы

1. Варичев А.В., Кретов С.И., Кузин В.Ф. *Крупномасштабное производство железорудной продукции в Российской Федерации*. М.: Горная книга; 2010. Режим доступа: <http://www.gornaya-kniga.ru/catalog/1598>
2. Юсфин Ю.С., Малышева Т.Я., Плотников С.В. Критерии качества железорудных окатышей из концентратов руд магнетитовых кварцитов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2009;(5):7–10.
3. Авдохин В.М., Губин С.Л. Современное состояние и основные направления развития процессов глубокого обогащения железных руд. *Горный журнал*. 2007;(2):58–64. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/738/article/10328/>
4. Lakshmanan V.I., Roy R., Ramachandran R. (eds) *Innovative Process Development in Metallurgical Industry*. Springer; 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-21599-0.
5. Wills B.A., Napier-Munn T. *Wills' Mineral Processing Technology*. Elsevier; 2006.
6. Collinao E., Davila P., Irarrazabal R., de Carvalho R., Tavares M. Continuous improvement in SAG mill liner design using new technologies. In: *XXVII International Mineral Processing Congress, 2014, Chapter 8. Comminution processes*, pp. 104–118.
7. Rosa A.C., de Oliveira P.S., Donda J.D. Comparing ball and vertical mills performance: An industrial case study. In: *XXVII International Mineral Processing Congress, 2014, Chapter 8. Comminution processes*, pp. 44–52.
8. Jankovic A., Valery W., Sönmez B., Oliveira R. Effect of circulating load and classification efficiency on HPGR and ball mill capacity. In: *XXVII International Mineral Processing Congress, 2014, Chapter 9. Energy efficiency in comminution*, pp. 2–14.
9. Вайсберг Л.А., Коровников А.Н. Тонкое грохочение как альтернатива гидравлической классификации по крупности. *Обогащение руд*. 2004;(3):23–34. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/1119/article/18800/>
10. Веннер Дж., Тране Н., Лемс В.Ю. Опыт применения вибрационных грохотов корпорации «DERRICK» при обогащении железных руд. *Горный журнал*. 2002;(3):60–64.
11. Немыкин С.А., Копанев С.Н., Мезенцева Е.В. Окунев С.М. Производство железорудного концентрата с повышенной долей полезного компонента. *Горный журнал*. 2017;(5):27–31. DOI: 10.17580/gzh.2017.05.05.
12. Jahani M., Farzanegan A., Noaparast M. Investigation of screening performance of banana screens using LIGGGHTS DEM solver. *Powder Technology*. 2015;283:32–47. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.05.016.
13. Wang G., Tong X. Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. *Mining Science and Technology*. 2011;21(3):451–455. DOI: 10.1016/j.mstc.2011.05.026.
14. Dyr T., Wodzinski P. Model particle velocity on a vibrating surface. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2002;(35):147–157.
15. Hailin D., Chusheng L., Yuemin Z., Lala Z. Influence of vibration mode on the screening process. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2013;23(1):95–98. DOI: 10.1016/j.ijmst.2013.01.014
16. Пелевин А.Е., Лазебная М.В. Применение грохотов «Деррик» в замкнутом цикле измельчения на обогатительной фабрике ОАО «Комбинат КМАруда». *Обогащение руд*. 2009;(2):4–8. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/564/article/6369/>
17. Пелевин А.Е., Сытых Н.А. Эффективность разделения по крупности в вибрационном гидравлическом грохоте. *Известия вузов. Горный журнал*. 2010;(6):85–90. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16812261>
18. Пелевин А.Е. Сепарационная характеристика грохота. *Обогащение руд*. 2011;(2):45–48. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/506/article/5086/>
19. Пелевин А.Е. Технология обогащения магнетитовых руд и пути повышения качества железных концентратов. *Известия вузов. Горный журнал*. 2011;(4):20–28. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16802562>
20. Пелевин А.Е. Тонкое грохочение и его место в технологии обогащения железных руд. *Известия вузов. Горный журнал*. 2011;(4):110–117. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16802578>
21. Пелевин А.Е. *Научные основы процесса тонкого гидравлического грохочения и разработка новых схем обогащения магнетитовых руд: автореф. дис. ... д-ра техн. наук*. Екатеринбург; 2011. Режим доступа: <https://www.disserscat.com/content/nauchnye-osnovy-protsesta-tonkogo-gidravlicheskogo-vibratsionnogo-grokhocheniya-i-razrabotka>
22. Пелевин А.Е. Пути повышения эффективности технологии обогащения железорудного сырья. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019;75(2):137–146. DOI: 10.32339/0135-5910-2019-2-137-146.
23. Авдохин В.М., Губин С.Л. Основные направления развития процессов глубокого обогащения железных руд. В: Чантурия В.А. (ред.) *Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья*. М.: Руда и металлы; 2008. С. 164–179.
24. Патковская Н.А., Тасина Т.И. Модернизация технологии обогащения железосодержащих руд Северо-Запада России. *Обогащение руд*. 2011;(1):6–10. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/461/article/4149/>
25. Дюбченко В.А., Патковская Н.А., Тасина Т.И. Перспективы повышения качества железорудного концентрата ОАО «Карельский окатыш». *Обогащение руд*. 2012;(6):7–12. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/981/article/15498/>
26. Опалев А.С., Щербаков А.В. Разработка и внедрение инновационной энергосберегающей технологии обогащения железистых кварцитов на АО «ОЛЖОН». В: Овчинникова Т.Ю. (ред.) *Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья: VI Уральский горнопромышленный форум: материалы науч.-техн. конф., Екатеринбург, 2–4 дек. 2015 г.* Екатеринбург: УГТУ; 2015. С. 125–132.

References

1. Varichev A.V., Kretov S.I., Kuzin V.F. *Large-Scale Production of Iron Ore Products in the Russian Federation*.
2. Yusfin Y.S., Malysheva T.Y., Plotnikov S.V. Quality of iron-ore pellets made from magnetite-quartzite concentrates. *Steel in Translation*. 2009;39(5):375–378.
3. Avdokhin V.M., Gubin S.L. Up-to-date state and main directions of development of the processes of deep concentration of iron ores. *Gornyi zhurnal*. 2007;(2):58–64. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/738/article/10328/> (In Russ.)
4. Lakshmanan V.I., Roy R., Ramachandran R. (eds) *Innovative Process Development in Metallurgical Industry*. Springer; 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-21599-0.
5. Wills B.A., Napier-Munn T. *Wills' Mineral Processing Technology*. Elsevier; 2006.
6. Collinao E., Davila P., Irrarrazabal R., de Carvalho R., Tavares M. Continuous improvement in SAG mill liner design using new technologies. In: *XXVII International Mineral Processing Congress*, 2014, Chapter 8. Comminution processes, pp. 104–118.
7. Rosa A.C., de Oliveira P.S., Donda J.D. Comparing ball and vertical mills performance: An industrial case study. In: *XXVII International Mineral Processing Congress*, 2014, Chapter 8. Comminution processes, pp. 44–52.
8. Jankovic A., Valery W., Sönmez B., Oliveira R. Effect of circulating load and classification efficiency on HPGR and ball mill capacity. In: *XXVII International Mineral Processing Congress*, 2014, Chapter 9. Energy efficiency in comminution, pp. 2–14.
9. Vaisberg L.A., Korovnikov A.N. Fine screening as an alternative to hydraulic size classification. *Obogashchenie Rud*. 2004;(3):23–34. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1119/article/18800/> (In Russ.)
10. Venner Dzh., Trane N., Lems V.Yu. Experience of Using DERRICK Vibrating Screens in Iron Ore Processing. *Gornyi zhurnal*. 2002;(3):60–64. (In Russ.)
11. Nemykin S.A., Kopanev S.N., Mezentseva E.V., Okunev S.M. Iron concentrate production with the increased content of useful component. *Gornyi zhurnal*. 2017;(5):27–31. DOI: 10.17580/gzh.2017.05.05. (In Russ.)
12. Jahani M., Farzanegan A., Noaparast M. Investigation of screening performance of banana screens using LIGGGHTS DEM solver. *Powder Technology*. 2015;283:32–47. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.05.016.
13. Wang G., Tong X. Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. *Mining Science and Technology*. 2011;21(3):451–455. DOI: 10.1016/j.mstc.2011.05.026.
14. Dyr T., Wodzinski P. Model particle velocity on a vibrating surface. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2002;(35):147–157.
15. Hailin D., Chusheng L., Yüemin Z., Lala Z. Influence of vibration mode on the screening process. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2013;23(1):95–98. DOI: 10.1016/j.ijmst.2013.01.014
16. Pelevin A.Ye., Lazebnaya M.V. Application of «Derric» screens in locked grinding circuit at the «KMaruda» Mining Complex concentrating plant. *Obogashchenie Rud*. 2009;(2):4–8. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/564/article/6369/> (In Russ.)
17. Pelevin A.E., Sytykh N.A. Efficiency of Size Classification Using a Vibrating Hydraulic Screen. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2010;(6):85–90. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16812261> (In Russ.)
18. Pelevin A.Ye. Screen separation characteristic. *Obogashchenie Rud*. 2011;(2):45–48. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/507/article/5098/> (In Russ.)
19. Pelevin A.E. Technology of enrichment of magnetite ore and ways to improve the quality of iron concentrates. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2011;(4):20–28. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16802562> (In Russ.)
20. Pelevin A.E. Fine screening and its place in the technology of iron ores dressing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2011;(4):110–117. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16802578> (In Russ.)
21. Pelevin A.E. *Scientific Principles of Fine Wet Vibrating Screening Process and Development of New Magnetite Ore Processing Schemes: doctoral thesis abstract*. Ekaterinburg; 2011. Available at: <https://www.disscat.com/content/nauchnye-osnovy-protsesta-tonkogogidravlicheskogo-vibratsionnogo-grokhocheniya-i-razrabotka>
22. Pelevin A.E. Ways of efficiency increasing of iron ore raw materials concentration technology. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2019;75(2):137–146. (In Russ.) DOI: 10.32339/0135-5910-2019-2-137-146.
23. Avdokhin V.M., Gubin S.L. Main Trends in Development of Deep Iron Ore Concentration Processes. In: Chanturiya V. A. (ed.) *The progressive technologies of the complex mineral raw materials processing*. Moscow: Ruda i metally; 2008, pp. 164–179. (In Russ.)
24. Patkovskaya N.A., Tasina T.I. The Russia North-West Region iron-containing ores processing technology improvement. *Obogashchenie Rud*. 2011;(1):6–10. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/461/article/4149/> (In Russ.)
25. Dyubchenko V.A., Patkovskaya N.A., Tasina T.I. Prospects of iron ore concentrate grade increase at OAO «Karelsky Okatysh». *Obogashchenie Rud*. 2012;(6):7–12. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/981/article/15498/> (In Russ.)
26. Opalev A.S., Shcherbakov A.V. Development and Introduction of Innovative Energy-saving Technology for Ferruginous Quartzite Concentration at JSC «OLKON». In: Ovchinnikova T.Yu. (ed.) *Innovative Processing Technologies for Mineral and Man-Made Raw Materials: VI Urals Mining Industrial Forum: Proceedings of Scientific and Technological Conference, Ekaterinburg, December 2–4, 2015*. Ekaterinburg: Ural State Mining University; 2015, pp. 125–132. (In Russ.)

Информация об авторах

Исмагилов Ринат Иршатович – директор департамента горнорудного производства, ООО УК «Металлоинвест», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: pr@metalloinvest.com.

Козуб Александр Васильевич – главный инженер, АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», г. Железногорск, Российская Федерация.

Гридасов Игорь Николаевич – начальник управления технического контроля, АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», г. Железногорск, Российская Федерация.

Шелепов Эдуард Владимирович – начальник методико-исследовательского центра АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», г. Железногорск, Российская Федерация.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.06.2020

Поступила после рецензирования: 29.06.2020

Принята к публикации: 21.07.2020

Information about the author

Rinat I. Ismagilov – Chief Mining Department Officer, MC Metalloinvest LLC, Moscow, Russian Federation; e-mail: pr@metalloinvest.com.

Aleksander V. Kozub – Chief Engineer, Andrei Varichev Mikhailovsky GOK, Zheleznogorsk, Russian Federation.

Igor N. Gridasov – Chief Quality Assurance Department Officer, Andrei Varichev Mikhailovsky GOK, Zheleznogorsk, Russian Federation.

Eduard V. Shelepov – Chief Methodological Research Centre Officer, Andrei Varichev Mikhailovsky GOK, Zheleznogorsk, Russian Federation.

Article info:

Received: 15.06.2020

Revised: 29.06.2020

Accepted: 21.07.2020