



УДК 622.341.1

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДООБОГАЩЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТА

Терехин Е.П., Чуева Е.А., Хворостянова В.И.

Филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС» в г. Губкине

Аннотация.

Горнорудная промышленность черной металлургии в России по объему производства металлургического сырья занимает ведущее место в мире и сохранение таких показателей в отрасли в сложившейся экономической ситуации возможно лишь за счет повышения качества железорудного концентрата и снижения его себестоимости. Развитие технологии внедомного производства стали требует наращивания выпуска офлюсованных окатышей и горячебрикетированного железа на железорудных предприятиях КМА, сырьем для которых служит дообогащенный железорудный концентрат с массовой долей железа общего более 69,5%. Цель прикладных исследований заключается в повышении качества магнетитового концентрата путем доработки технологии дообогащения. Основными методами исследований были приняты анализ традиционных технологических схем дообогащения, подбор оборудования в новые схемы цепей аппаратов, анализ результатов полупромышленных исследований аппаратов на горнорудных предприятиях КМА. В работе определены основные направления улучшения магнетитовых концентратов посредством предварительного тонкого грохочения в сочетании с последующим доизмельчением и совершенствованием процесса дешламации перед последней стадией магнитной сепарации. Дообогащение с использованием тонкого грохочения на входе позволяет снизить нагрузку на мельницу (около 80% материала выводится из операции измельчения), а также снизить количество диоксида кремния в продукте, влияющего на качественные характеристики брикетов. Замена дешламаторов МД-9 на гидросепараторы МГС-9 повышает содержание железа в песках на 1-2% при снижении его в хвостах на 2-2,5% без дополнительных текущих затрат на воду, электроэнергию и быстроизнашиваемые детали.



Информация о статье

Поступила:
15 сентября 2023 г.

Рецензирование:
28 октября 2023 г.

Принята к печати:
31 октября 2023 г.

Ключевые слова:

дообогащенный железорудный концентрат, грохот тонкого грохочения, дешламатор, гидросепаратор

Для цитирования: Терехин Е.П., Чуева Е.А., Хворостянова В.И. Совершенствование технологии дообогащения для повышения качества железорудного концентрата // Техника и технология горного дела. – 2023. – №3(23). – С. 82-93. – DOI:10.26730/2618-7434-2023-3-82-93, EDN: SRBKXR

Введение

Горнорудная промышленность черной металлургии в России по объему производства металлургического сырья занимает ведущее место в мире, при этом около 86% всей добываемой в стране железной руды подвергается обогащению. Однако удержать первенство в сложившейся экономической ситуации в отрасли возможно лишь за счет повышения качества железорудного концентрата и снижения его себестоимости [1].

Развитие технологии внедомного производства стали требует наращивания выпуска офлюсованных окатышей и горячебрикетированного железа на железорудных предприятиях



КМА, сырьем для которых служит дообогащенный железорудный концентрат с массовой долей железа общего более 69,5% [2].

Практически на всех железорудных предприятиях России, перерабатывающих железные руды, используют мокрую магнитную сепарацию, простота, освоенность и высокая эффективность которой делают привлекательным ее применение [3,4].

Основными недостатками существующих магнитных схем на железорудных предприятиях КМА являются значительные удельные расходы на производство и высокая массовая доля диоксида кремния в конечном продукте (концентрате) [5].

Кроме того, несмотря на непрерывно увеличивающееся содержание железа в концентратах, основной сдерживающей причиной дальнейшего повышения остается присутствие в нем сростковой фракции [6,7].

Удаление данной фракции 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;
- высокая удельная поверхность микронных частиц кварца после измельчения активизирует адгезионное закрепление их на поверхности более крупных частиц магнетита;
- объединение частиц магнетита в агрегаты в процессе активной магнитной сепарации способствует попутному захвату мелкодисперсных частиц пустой породы и бедных сростков.

Исходя из актуальности увеличения выпуска офлюсованных окатышей для внедомного производства стали, можно определить, что цель прикладных исследований заключается в повышении качества магнетитового концентрата путем доработки технологии дообогащения.

Задачи исследований:

- анализ традиционных технологических схем дообогащения железорудного концентрата на обогатительных фабриках железорудных предприятий КМА;
- изменение схемы цепи аппаратов участка дообогащения для прироста массовой доли железа в магнетитовых концентратах и снижении ее в хвостах;
- анализ результатов полупромышленных исследований аппаратов на горнорудных предприятиях КМА.

Основная цель повышения качества продукции заключается в достижении максимального экономического эффекта от каждой единицы используемых ресурсов. Повышение качества продукции является составной частью увеличения эффективности производства, поэтому экономическая сторона проблемы улучшения качества продукции приобретает с каждым годом все большее значение.

Анализ уровня качества добываемой руды показывает, что, несмотря на вовлечение в промышленную эксплуатацию месторождений бедных руд, качество товарной руды в целом по стране растет вследствие совершенствования методов и организаций рудоподготовки на стадиях добычи и переработки рудного сырья.

В целом производство высококачественного сырья является одним из самых важных участков горно-металлургического производства [9]. Нехватка сырья нужного уровня качества вынуждает потребителей использовать некондиционное сырье, делая отступления от технологии производства, увеличивая расход шихтовых компонентов, что вызывает снижение качества и увеличение стоимости производимой продукции.

Совершенствование магнитной сепарации осуществляется преимущественно в направлении снижения удельных затрат при получении концентрата, однако весьма тонкое измельчение руды приводит к выводу полезного компонента в хвосты обогащения. При увеличении количества перечисток в основных операциях (магнитная сепарация и дешламация) прирост по массовой доле железа в промпродукте уменьшается, а в хвостах увеличивается [10,11]. Существующие технологические схемы обогащения руды на ГОКах железорудного бассейна КМА мало чем отличаются друг от друга и основаны на выделении хвостов в процессе стадийного сепарирования и получения готового концентрата в последней стадии магнитного обогащения. Общее число стадий магнитной сепарации может достигать пяти (Рис. 1).

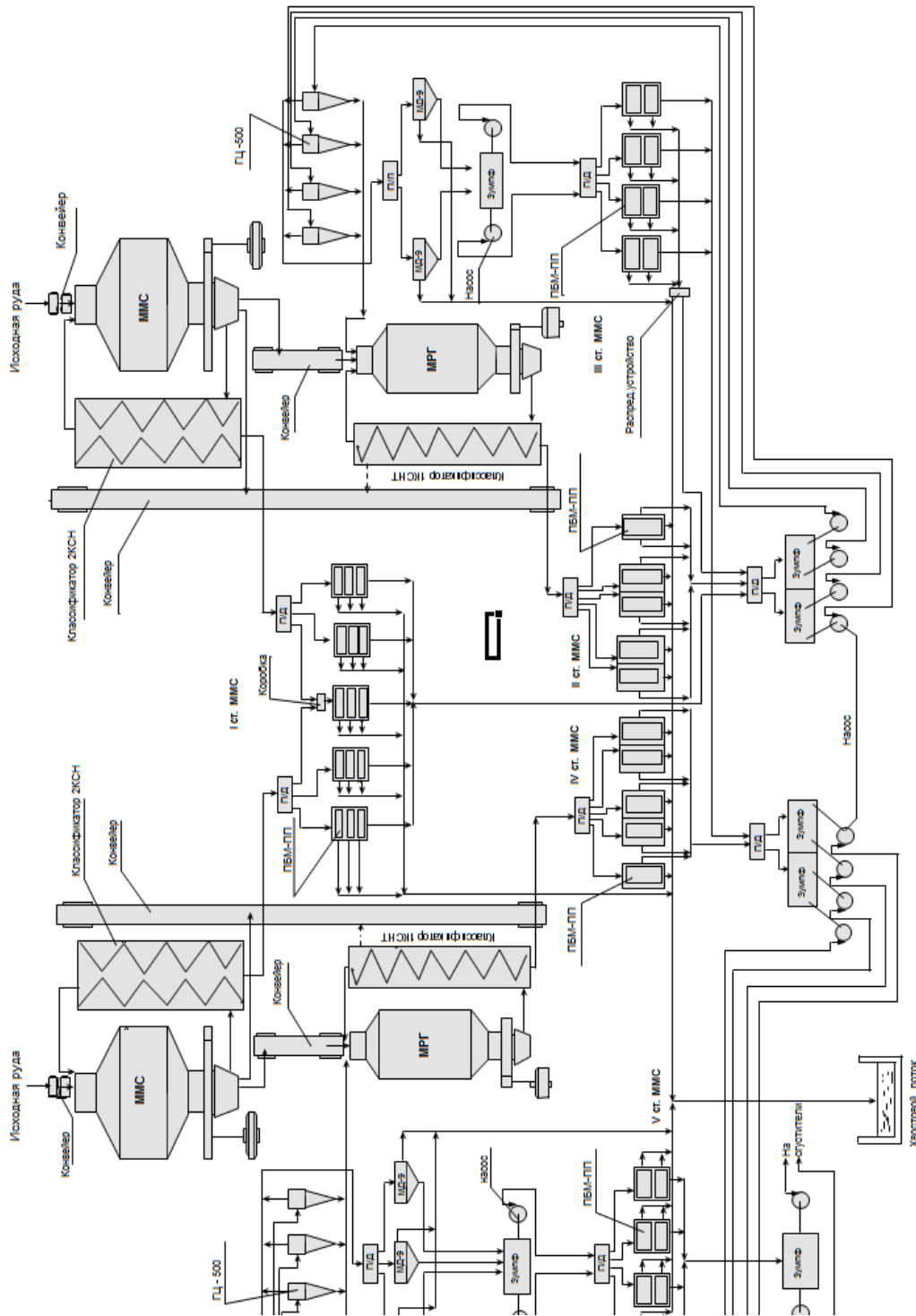


Рис. 1. Типовая схема цепи аппаратов 2:1:1 по производству железорудного концентрата с массовой долей железа < 69,5% по технологии самозмельчения
Fig. 1. Typical circuit diagram of 2:1:1 apparatus for the production of iron ore concentrate with a mass fraction of iron < 69.5% by self-grinding technology

Поиск технического решения

Улучшение магнетитовых концентратов [12-16] может производиться по следующим направлениям:

- тонкое измельчение в сочетании с дешламацией и магнитной сепарацией;
- совершенствование процесса дешламации с целью повышения качества последней стадии магнитной сепарации;
- тонкое грохочение в сочетании с доизмельчением и дообогащением надрешетного продукта.

Первое направление широко используется на участках дообогащения концентрата, а два последних в различных сочетаниях аппаратов в настоящее время обновляют традиционные технологические цепи [17].

На Рис. 2 представлена традиционная схема дообогащения концентрата [14] до массовой доли железа более 69,5%.

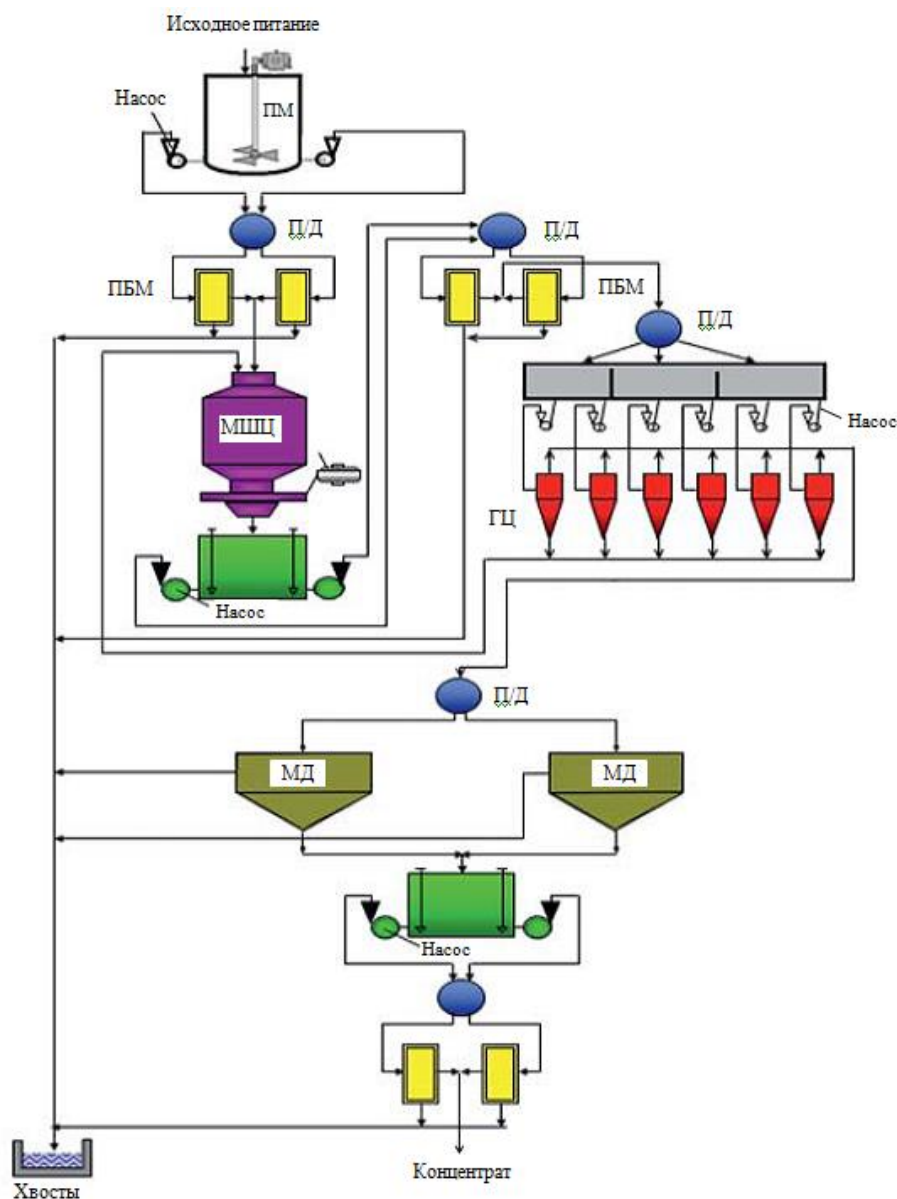


Рис. 2. Традиционная схема дообогащения концентрата до массовой доли железа > 69,5%
Fig. 2. Traditional scheme of additional enrichment of concentrate to a mass part of iron > 69.5%

Из перемешивателя ПМ усредненный концентрат с массовой долей железа менее 69,5% подается шламовыми насосами в пульподелитель П/Д уплотняющей сепарации, затем на сепараторы ПБМ-ПП. Уплотненный концентрат и пески гидроциклонов поступают на доизмельчение до крупности -0,045мм в шаровую мельницу МШЦ с шарами диаметром 40мм. Под действием силы трения и центробежной силы происходит более тонкое и полное раскрытие зерен и сростков. Слив мельницы МШЦ поступает на 1-ю стадию магнитной сепарации. Далее концентрат 1 стадии через пульподелитель подается на классификацию в гидроциклоны ГЦ. Слив гидроциклонов поступает на обесшламливание в магнитный дешлампатор МД, после него пески дешлампатора отправляются на ПБМ-ПП 2-ой стадии магнитной сепарации. Готовый железорудный концентрат с повышенной массовой долей железа общего используется для производства стали из офлюсованных окатышей, являющихся исходным продуктом для получения металлизированных окатышей и горячбрикетированного железа.

Результаты

Второе направление повышения эффективности обогащения магнетитовых железных руд и получения концентрата повышенного качества связано с заменой магнитного дешлампатора МД на магнитный гидросепаратор МГС в цепи обогатительного оборудования перед последней стадией магнитной сепарации [16,18].

Сепаратор МГС отличается от дешлампатора МД наличием дополнительной магнитной системы, установленной в зоне между обечайкой и сливным порогом в виде коротких магнитных балок – «коротышей», при этом при практически одинаковых технологических режимных параметрах машин содержание железа в хвостах сокращается при применении МГС [7].

Схемы магнитных аппаратов МД-9 и МГС-9 представлены на Рис. 3. Аппараты МГС-9 начали массово устанавливать на железорудных предприятиях КМА после проведения полупромышленных исследований. Основным фактором, оказывающим влияние на работу МГС, является плотность песков, то есть показатель плотности среды, в которой происходит осаждение твердых частиц. С увеличением плотности среды (песков в нижней части сепаратора) осаждение частиц замедляется, уровень магнетита в МГС повышается, а более мелкие или легкие, чем магнетит, нерудные шламы выносятся в слив.

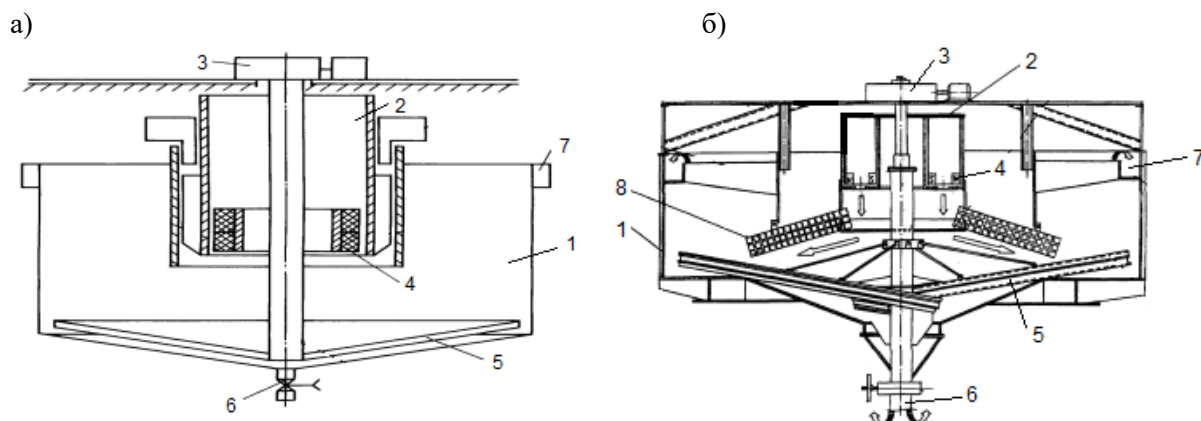


Рис. 3. Конструктивные схемы магнитных аппаратов: а) магнитный дешлампатор МД-9; б) – магнитный гидросепаратор МГС-9: 1 – чан; 2 – загрузочный бак; 3 – привод граблин; 4 – магнитная система; 5 – граблины; 6 – разгрузочное устройство; 7 – желоб сливной; 8 – дополнительная магнитная система

Fig. 3. Constructive schemes of magnetic devices: a) magnetic desliming MD-9; b) – magnetic hydraulic separator MGS-9: 1 – vat; 2 – loading tank; 3 – rake drive; 4 – magnetic system; 5 – rakes; 6 – unloading device; 7 – drain chute; 8 – additional magnetic system

Так как плотность слива (1010-1020 г/л) гораздо меньше плотности песков, скорость осаждения частиц, вытесненных из относительно плотной зоны магнетита в зону шламов,



увеличивается, и степень их выноса в слив определяется уже не столько плотностью и уровнем магнетита, сколько скоростью восходящего потока (Рис. 4, а).

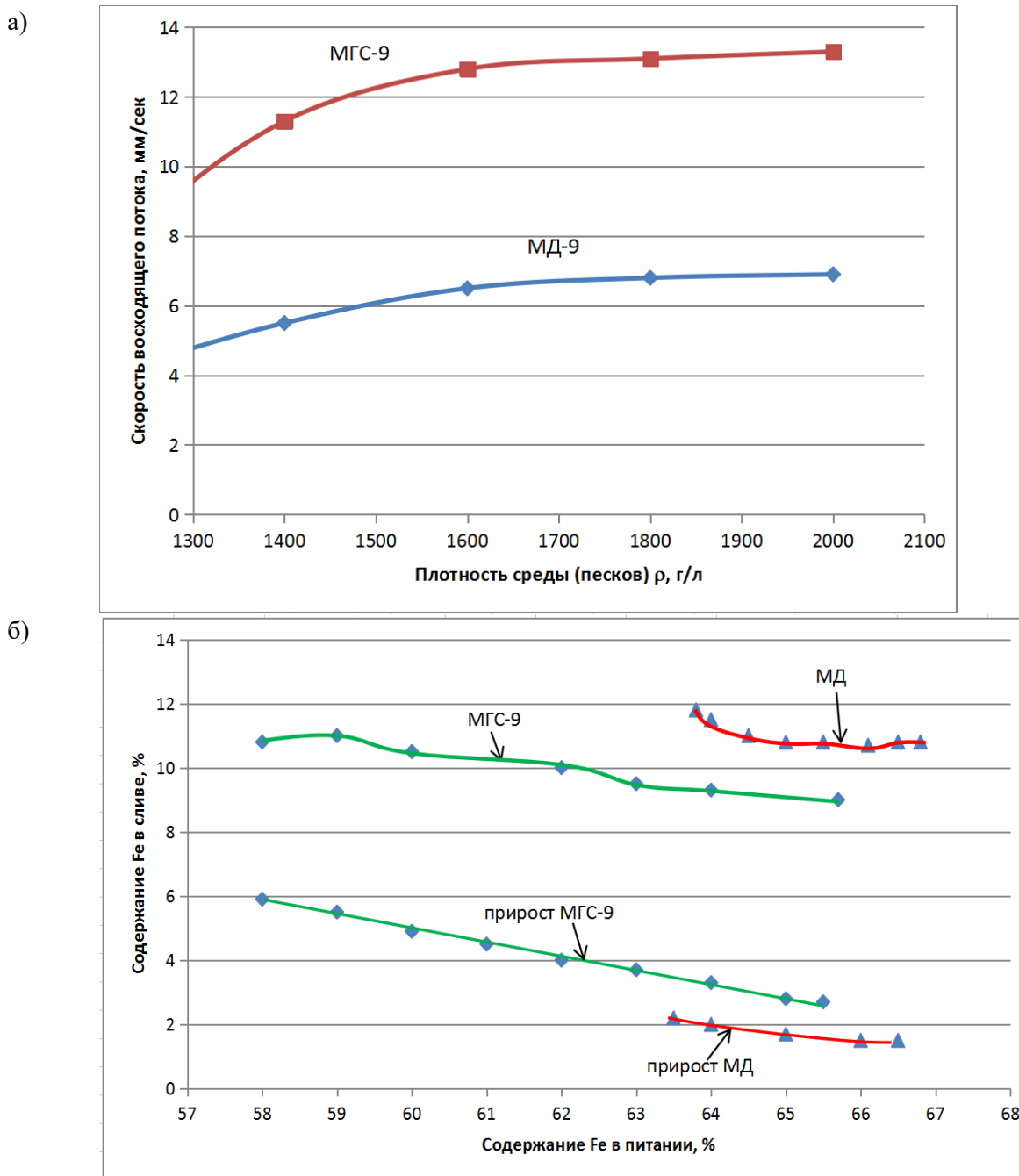


Рис. 4. Сравнение эффективности магнитных аппаратов МД и МГС

а) – зависимость скорости восходящего потока частиц от плотности среды (песков);

б) – зависимость содержания Fe в сливе от содержания Fe в питании.

Fig. 4. Comparison of the efficiency of magnetic devices MD and MGS

a) – the dependence of the velocity of the upward flow of particles on the density of the medium (sand);

b) – the dependence of the Fe content in the drain on the Fe content in the feed.



При прохождении через пространственную магнитную систему частицы магнетита образуют флоккулы, скорость осаждения которых выше скорости восходящего потока, что вызывает их выпадение в осадок (песковый продукт). После того, как восходящий поток пройдет через магнитную систему, в нем остаются преимущественно частицы кварца, гематита, бедные сростки магнетита с кварцем. Их удаление из МГС осуществляется через сливной порог в желоб.

Преимущество МГС заключается в снижении содержания железа в хвостах (на 1,5-3% общего и 2,1-2,3% магнитного) и в высоком приросте содержания Fe в концентрате после операции дообогащения - 0,85-0,88% [19].

Аналогичная картина наблюдается и при использовании МГС в технологии производства рядового концентрата, но снижение содержания железа в хвостах менее выражено (Рис. 4, б).

Для обычного дешламатора МД снижение потерь магнетита в хвостах наблюдается только на грубом питании, в то время как МГС показывает его как при грубом, так и при тонком питании. В последнем случае хвосты МГС имеют наименьшие потери в сравнении с МД.

В то же время переизмельчение рядового концентрата в шаровых мельницах приводит к существенному снижению гидравлической крупности частиц и ухудшению их магнитных свойств, о чем свидетельствует повышение содержания магнитного железа в сливе МГС.

Уменьшение магнитных свойств и гидравлической крупности частиц требует усиления магнитного поля в гидросепараторах МГС, установленных на участке дообогащения. Усиление магнитных систем позволяет (при малых затратах на это мероприятие) избежать эпизодических выбросов богатых хвостов и значительного повышения содержания магнитного железа в сливе МГС при работе на повышенных нагрузках на секцию.

Особенностью МГС является то, что содержание готового класса -45 мкм в песках МГС выше, чем в питании, то есть МГС способствует удалению в слив относительно крупных нерудных классов и бедных сростков, и на последующую магнитную сепарацию поступает более тонкий продукт, чем слив гидроциклонов. Вывод относительно крупных классов в отвальные хвосты с низким содержанием железа в операции дешламации МГС позволяет повысить содержание готового класса в концентрате без переизмельчения всего промпродукта и снизить удельную нагрузку на последующее оборудование.

Третье направление улучшения магнетитовых концентратов за счет внедрения тонкого грохочения на входе в мельницу доизмельчения тоже находит применение на предприятиях [20-22]. На Лебединском горно-обогатительном комбинате в 2016 году в цехе дообогащения № 4 внедрена технология по производству концентрата с массовой долей железа более 69,5% с применением грохотов тонкого грохочения Stack Sizer фирмы Derrick вместо магнитных сепараторов стадии уплотнения [14].

Схема дообогащения концентрата с массовой долей железа более 69,5% после внедрения технологии на ЛГОКе представлена на Рис. 5.

Исходный концентрат каждой секции из перемешивателей направляют на операцию грохочения. Подрешетный продукт, минуя измельчение, поступает на магнитную гидросепарацию, а надрешетный продукт на измельчение в мельницу МШЦ-45х60, слив из которой попадает на магнитную сепарацию I стадии. Магнитная сепарация осуществляется на сепараторах ПБМ-ПП-120×300. Концентрат поступает в технологические зумпфы, откуда насосами подается на классификацию в гидроциклоны ГЦ-250. Пески гидроциклонов возвращаются самотеком в мельницу МШЦ-45×60 на доизмельчение, где объединяются с надрешетным продуктом грохочения. Слив гидроциклонов объединяется с подрешетным продуктом и направляется в магнитные гидросепараторы МГС-9. Слив гидросепарации отправляется в отвальные хвосты, а пески подаются насосами на магнитную сепарацию II стадии, осуществляемую в сепараторах ПБМ-ПП-120×300, где получают конечный концентрат.

При данной схеме около 80% материала выводится из операции измельчения и классификации с помощью операции тонкого грохочения, т.е. нагрузка на измельчительное оборудование снижается.

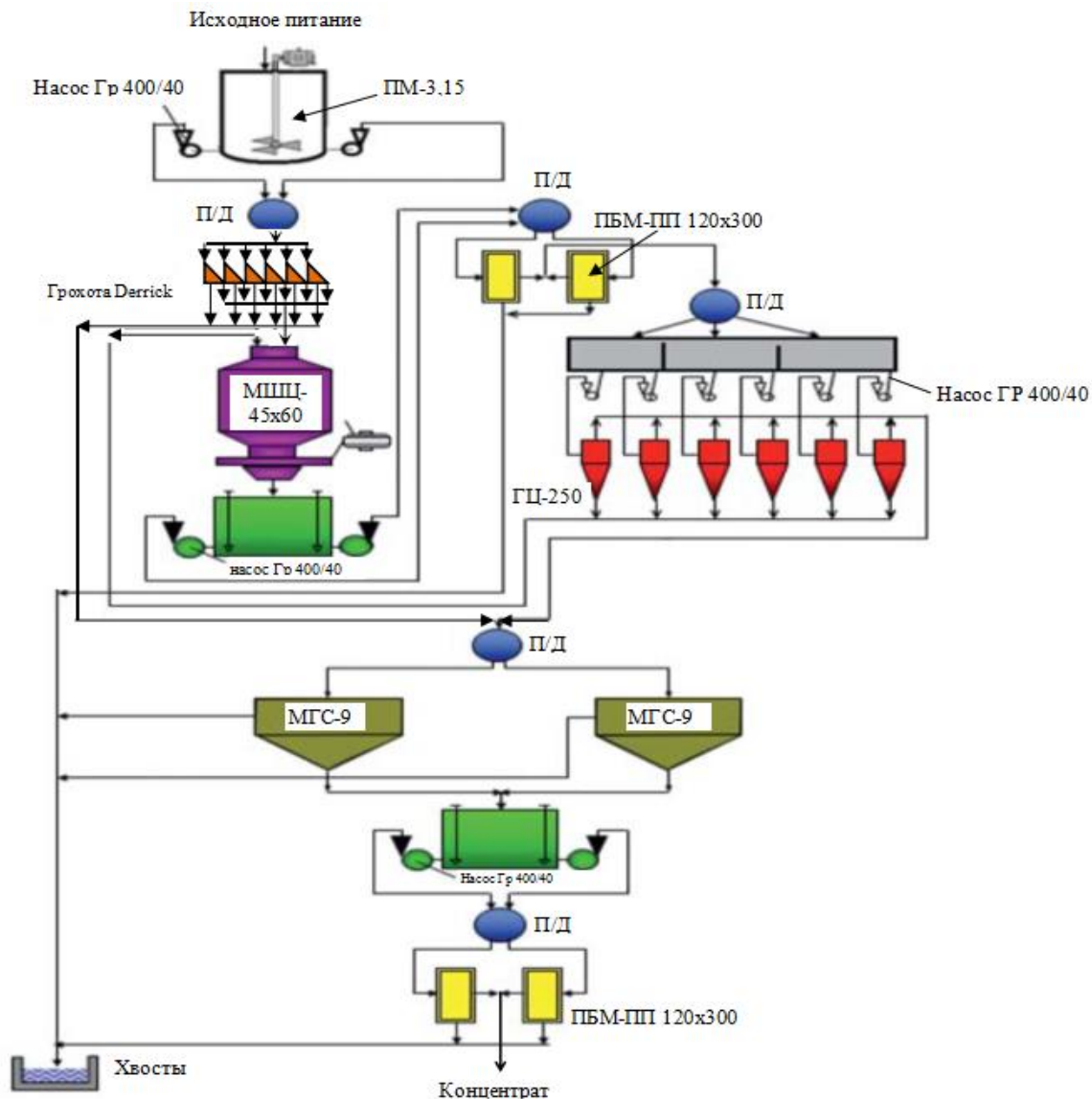


Рис. 5. Схема цепи аппаратов по производству железорудного концентрата с массовой долей железа >69,5% после модернизации

Fig. 5. Circuit diagram of devices for the production of iron ore concentrate with a mass fraction of iron >69.5% after modernization

Заклучение

Изучив теорию и практику, используемую для повышения качества концентратов, можно сделать следующие выводы:

1. Магнитная гидросепарация повышает эффективность процессов магнитной сепарации и дешламации в технологии обогащения. Установка дополнительных магнитных систем в дешламатор улучшает обесшламивание, дает прирост содержания железа в его песках, снижает содержание железа в сливе по сравнению с обычными дешламаторами для всех применяемых типоразмеров и технологических схем.

2. Качественные показатели МГС в сравнении с обычными дешламаторами МД говорят о приросте содержания железа в песках на 1,0 – 2,0% и снижении его в хвостах на 2,0 – 2,5%, а также о выделении более грубых отвальных хвостов.

3. Переоборудование МД-9 в МГС-9 не вносит дополнительных эксплуатационных затрат по расходу воды, электроэнергии и замене быстроизнашиваемых комплектующих элементов.



4. Схема дообогащения с использованием тонкого грохочения на входе позволяет стабилизировать качественные и количественные показатели обогащенного концентрата, снизить нагрузку на мельницу, а также снизить количество диоксида кремния в продукте, который служит одним из основных показателей, определяющих качественные характеристики брикетов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Информация об авторах

Терехин Евгений Петрович, к.т.н., доцент
e-mail: teryekin50@mail.ru

Чуева Елена Алексеевна, старший преподаватель

Хворостянова Валентина Ивановна, ассистент

Филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» в г. Губкине
309186 Белгородская область, г. Губкин, ул. Комсомольская, 16

Список литературы

1. 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.
2. Гзогян С. Р., Щербаков А. В. Повышение качества концентратов АО «Стойленский ГОК» с использованием магнито-гравитационной сепарации // Обогащение руд. 2020. № 6. С. 3-8.
3. Кусков В.Б, Сашук 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. Гзогян Т.Н., Гзогян С.Р., Гришкина Е.В. Изыскание способов глубокого обогащения богатых железных руд Курской магнитной аномалии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. № 2. С. 154-161. DOI: 10.15372/FTPPI.2019.02.17.
5. Пелевин А.Е. Пути повышения эффективности технологии обогащения железорудного сырья // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 2. С. 137–146.
6. Юшина Т.И., Чантурия Е.Л., Думов А.М., Мясков А.В. Современные тенденции в развитии технологий переработки железных руд // Горный журнал. 2021. № 11. С. 10–17. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.10.
7. Опалев А.С., Марчевская В.В. Исследование влияния крупности зерен магнетита на магнитную восприимчивость железорудных концентратов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. № 1. С. 161-167. DOI:10.15372/FTPPI.2023.01.15.
8. Seifelnassr A. A. S., Moslim E. M., Abouzeid A.-Z. M. Effective processing of low-grade iron ore through gravity and magnetic separation technique // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2012. Vol. 48, Iss. 2. P. 567–578.
9. Yu J., Han Y., Li Y., Cao P. Beneficiation of an iron fines by magnetization roasting and magnetic separation // International Journal of Mineral Processing. 2017. V. 168. Iss. 10. P. 102-108. DOI: 10.1016/j.minpro.2017.09.012.
10. Пелевин А.Е. Повышение эффективности обогащения железорудного сырья путем сепарации в переменном магнитном поле // Черные металлы. 2021. № 5. С. 4-9. DOI: 10.17580/chm.2021.05.01.
11. Faris N., Tardio J., Ram R., Bhargava S., Pownceby M.I. Investigation into coal-based magnetizing roasting of an iron-rich rare earth ore and the associated mineralogical transformations // Minerals Engineering. 2017. V. 114. P. 37-49. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.09.007.



12. Опалев А.С. Повышение качества магнетитовых концентратов на основе магнитно – гравитационной сепарации // Горный журнал. 2020. №9. С. 72-76. DOI:10.17580/gzh.2020.09.10.
13. Опалев А.С., Марчевская В.В. Разработка инновационных технологий обогащения полезных ископаемых Арктической зоны // Горная Промышленность. 2023. №1. С. 63-70.
14. Немыкин С.А, Копанев С.Н, Мезенцева Е.В, Окунов С.М. Производство железорудного концентрата с повышенной долей полезного компонента // Горный журнал. 2017. №5. С. 27-31.
15. Опалев А.С., Хохуля 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
16. 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. С.98-103.DOI:10.30686/1609-9192-2020-4-98-103.
17. Rosario P. P. Technical and economic assessment of a non-onventional HPGR circuit // Minerals Engineering, 2017. Vol. 103-104. P. 102–111.
18. Опалев А.С., Карпов И.В., Кривовичев С.В. Повышение эффективности переработки магнетитовых кварцитов в АО "Карельский окатыш" // Горный журнал. 2021. № 11. С. 66-74.DOI: 10.17580/gzh.2021.11.09.
19. Надутый В.П., Челышкина В.В. Особенности работы магнитных гидросепараторов МГС в технологии обогащения железных руд // Збагачення корисних копалин. 2013. №52(93).
20. Ширяев А.А., Нескоромный Е.Н., Мироненко А.И., Самохина С.А., Старых С.С. Применение тонкого грохочения для повышения качества железорудного концентрата на обогатительной фабрике горнообогатительного комплекса «АрселорМиттал Кривой Рог» // Вестник Криворожского национального университета. 2013. № 34 (1). С. 120-123.
21. Albuquerque L.G., Wheeler J.E., Valine S.B. Application of high frequency screens in closing grinding circuits // Revista Escola de Minas. 2009. Vol. 62. № 1.P. 167-173.
22. Markauskas D., Kruggel-Emden H. Coupled DEM-SPH simulations of wet continuous screening // Advanced Powder Technology. 2019. Vol. 30, Iss. 12. P. 2997–3009.

IMPROVEMENT OF ADDITIONAL MINERAL PROCESSING TECHNOLOGY TO INCREASE THE QUALITY OF IRON ORE CONCENTRATE

Evgeny P. Terekhin, Elena A. Chueva, Valentina I. Khvorostyanova

Gubkin branch of the National University of Science and Technology «MISIS»



Article info

Received:
15 September 2023

Revised:
28 October 2023

Accepted:
31 October 2023

Keywords: re-enriched iron ore concentrate, fine screening screen, desliming, hydraulic separator

Abstract.

The mining industry of ferrous metallurgy in Russia takes a leading place in the world in terms of the volume of production of metallurgical raw materials and the preservation of such indicators in the industry in the current economic situation is possible only by improving the quality of iron ore concentrate and reducing its cost. The development of the technology of out-blast furnace steel production requires an increase in the production of fluted pellets and hot-briquetted iron at Kursk Magnetic Anomaly (KMA) iron ore enterprises, the raw material for which is a pre-enriched iron ore concentrate with a mass fraction of total iron more than 69.5%. The purpose of applied research is to improve the quality of magnetite concentrate by refining the technology of ore enrichment. The main research methods were adopted: analysis of traditional technological schemes of additional ore enrichment selection a new processing equipment for apparatus circuits, analysis of the results of semi-industrial research of apparatuses at ore processing enterprises of the KMA. The paper identifies the main directions for improving magnetite ore concentrates by means of preliminary fine screening in combination with subsequent refinement and improvement of the deslamation process before the last stage of magnetic separation procedure. Additional ore enrichment



using fine screening at the inlet allows to reduce the load on the mill (about 80% of the material is removed from the grinding operation), as well as to reduce the amount of silicon dioxide in the product, which affects the quality characteristics of briquettes. Replacing MD-9 deslamators with MGS-9 hydraulic separators increases the iron content in the sands by 1.0 – 2.0% while reducing it in the tailings by 2.0 – 2.5% without additional running costs for water, electricity and fast-wearing parts.

For citation Terekhin E.P., Chueva E.A., Khvorostyanova V.I. (2023) Improvement of additional mineral processing technology to increase the quality of iron ore concentrate, *Journal of mining and geotechnical engineering*, 3(22):82. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-3-82-93, EDN: SRBKXR

References

1. Yushina T. I., Petrov I. M., Avdeev G. I., Valavin V. S. Analiz sovremennogo sostoyaniya dobychi i pererabotki zheleznykh rud i zhelezorudnogo syr'ya v Rossiyskoy Federatsii // Gornyy zhurnal. 2015. № 1. S. 41–47. DOI:10.17580/gzh.2015.01.08.
2. Gzogyan S. R., Shcherbakov A. V. Povyshenie kachestva kontsentratorov AO «Stoylenskiy GOK» s ispol'zovaniem magnito-gravitatsionnoy separatsii // Obogashchenie rud. 2020. № 6. S. 3–8.
3. Kuskov V.B., Sashchuk Yu.M. Sovershenstvovanie tekhnologiy obogashcheniya zheleznykh rud razlichnykh tipov i veshchestvennogo sostava // Gornyy zhurnal. 2016. №2. S. 70–74. DOI:10.17580/gzh.2016.02.14.
4. Gzogyan T.N., Gzogyan S.R., Grishkina E.V. Izyskanie sposobov glubokogo obogashcheniya bogatyykh zheleznykh rud Kurskoy magnitnoy anomalii // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. 2019. № 2. S. 154–161. DOI: 10.15372/FTPRPI.2019.02.17.
5. Pelevin A.E. Puti povysheniya effektivnosti tekhnologii obogashcheniya zhelezorudnogo syr'ya // Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii. 2019. T.75. №2. S.137–146
6. Yushina T.I., Chanturiya E.L., Dumov A.M., Myaskov A.V. Sovremennyye tendentsii v razvitiy tekhnologiy pererabotki zheleznykh rud // Gornyy zhurnal. 2021. № 11. S. 10–17. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.10.
7. Opalev A.S., Marchevskaya V.V. Issledovanie vliyaniya krupnosti zeren magnetita na magnitnyuyu vospriimchivost' zhelezorudnykh kontsentratorov // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. 2023. № 1. S. 161–167. DOI:10.15372/FTPRPI.2023.01.15.
8. Seifelnasser A. A. S., Moslim E. M., Abouzeid A.-Z. M. Effective processing of low-grade iron ore through gravity and magnetic separation technique // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2012. Vol. 48, Iss. 2. P. 567–578.
9. Yu J., Han Y., Li Y., Cao P. Beneficiation of an iron fines by magnetization roasting and magnetic separation // International Journal of Mineral Processing. 2017. V. 168. Iss. 10. P. 102–108
10. Pelevin A.E. Povyshenie effektivnosti obogashcheniya zhelezorudnogo syr'ya putem separatsii v peremennom magnitnom pole // Chernyye metally. 2021. № 5. S. 4–9. DOI: 10.17580/chm.2021.05.01.
11. Faris N., Tardio J., Ram R., Bhargava S., Pownceby M.I. Investigation into coal-based magnetizing roasting of an iron-rich rare earth ore and the associated mineralogical transformations // Minerals Engineering. 2017. V. 114. P. 37–49. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.09.007.
12. Opalev A.S. Povyshenie kachestva magnetitovykh kontsentratorov na osnove magnitno – gravitatsionnoy separatsii // Gornyy zhurnal. 2020. №9. S. 72–76. DOI:10.17580/gzh.2020.09.10.
13. Opalev A.S., Marchevskaya V.V. Razrabotka innovatsionnykh tekhnologiy obogashcheniya poleznykh iskopaemykh Arkticheskoy zony // Gornaya Promyshlennost'. 2023. №1. S. 63–70.
14. Nemykin S.A., Kopanev S.N., Mezentseva E.V., Okunev S.M. Proizvodstvo zhelezorudnogo kontsentrata s povyshennoy doley poleznogo komponenta // Gornyy zhurnal. 2017. №5. S. 27–31.
15. Opalev A.S., Khokhulya M.S., Fomin A.V., Karpov I.V. Sozdanie innovatsionnykh tekhnologiy proizvodstva vysokokachestvennogo zhelezorudnogo kontsentrata na predpriyatiyakh Severo-Zapada Rossii // Gornyy zhurnal. 2019. №6. S. 56–61. DOI: 10.17580/gzh.2019.06.07
16. Ismagilov R.I., Kozub A.V., Gridasov I.N., Shelepov E.V. Sovremennyye napravleniya povysheniya effektivnosti pererabotki zhelezistykh kvartsitov na primere AO "Mikhaylovskiy GOK im. A.V. Varicheva" // Gornaya promyshlennost'. 2020. № 4. S.98–103. DOI:10.30686/1609-9192-2020-4-98-103.
17. Rosario P. P. Technical and economic assessment of a non-ventional HPGR circuit // Minerals Engineering. 2017. Vol. 103–104. P. 102–111.
18. Opalev A.S., Karpov I.V., Krivovichev S.V. Povyshenie effektivnosti pererabotki magnetitovykh kvartsitov v AO "Karel'skiy okatysh" // Gornyy zhurnal. 2021. № 11. S. 66–74. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.09.
19. Nadutyy V.P., Chelyshkina V.V. Osobennosti raboty magnitnykh gidroseparatorov MGS v tekhnologii obogashcheniya zheleznykh rud // Zbagachennyya korisnikh kopolin. 2013. №52(93).



20. Shiryayev A.A., Neskoromnyy E.N., Mironenko A.I., Samokhina S.A., Starykh S.S. Primenenie tonkogo grokhocheniya dlya povysheniya kachestva zhelezorudnogo kontsentrata na obogatitel'noy fabrike gornoobogatitel'nogo kompleksa «ArselorMittal Krivoy Rog» // Vestnik Krivorozhskogo natsional'nogo universiteta. 2013. № 34 (1). S. 120-123.
21. Albuquerque L.G., Wheeler J.E., Valine S.B. Application of high frequency screens in closing grinding circuits // Revista Escola de Minas. 2009. Vol. 62. № 1.P. 167-173.
22. Markauskas D., Kruggel-Emden H. Coupled DEM-SPH simulations of wet continuous screening // Advanced Powder Technology. 2019. Vol. 30, Iss. 12. P. 2997–3009.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Information about the authors

Evgeny P. Terekhin, PhD (Tech.), Associate professor
e-mail: teryekin50@mail.ru

Elena A. Chueva, Senior Lecturer

Valentina I. Khvorostyanina, Assistant

Gubkin branch of the National University of Science and Technology «MISIS»,
16 Komsomolskaya str., Gubkin city, Belgorod region, 309186, Russian Federation

