ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(12):151-160
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.928.89 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_151

УДАЛЕНИЕ МАГНЕТИТА ИЗ ЦИКЛА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО ГИДРОЦИКЛОНА

А.А. Лавриненко, П.А. Сыса, Д.А. Бушуев

[1] Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия, e-mail: lavrin_a@mail.ru

Аннотация: Для повышения эффективности магнитного обогащения магнетитовых кварцитов предложен новый вариант классификации слива мельницы при помощи магнитного гидроциклона. Целью исследования является изучение возможности применения нового устройства для вывода из цикла измельчения раскрытых магнетитовых зерен с целью снижения их переизмельчения. Магнитный гидроциклон отличается конструкцией магнитной системы, представляющей собой электромагнит с чашеобразным магнитопроводом, обладающим минимальным рассеянием магнитного поля. Магнитная система встроена в гидроциклон таким образом, что гидравлический режим остается прежним и при отключении магнитной системы магнитный гидроциклон работает как обычный. Разгрузка магнитной фракции осуществляется через слив, немагнитной – через песковую насадку. Показаны результаты опытов, полученные на модели магнитного гидроциклона диаметром 50 мм с песковой насадкой диаметром 5 мм. Максимальная магнитная индукция в рабочей зоне магнитного гидроциклона составляет 0,3 Тл. Выявлено перераспределение магнетита из циркулирующей нагрузки мельницы в слив, циркулирующая нагрузка уменьшилась в 2 раза. Изменилась гранулометрическая характеристика циркулирующей нагрузки и содержание железа в ней. Уменьшилась доля магнетита в классе –0,04 мм в цикле доизмельчения. Преимуществами предложенной схемы являются уменьшение на 15,09 доли тонкого класса (–0,044 мм) в сливе, снижение циркулирующей нагрузки в 2 раза, простота конструкции и низкое энергопотребление. Предложенная схема рекомендуется для применения на фабриках обогащения железистых кварцитов и других руд, обладающих выраженными магнитными свойствами, для улучшения качества концентратов и снижения затрат.

Ключевые слова: магнитный гидроциклон, магнитное гидроциклонирование, магнетитовые кварциты, обогащение железорудного сырья, измельчение, циркулирующая нагрузка, крупность магнетита.

Для цитирования: *Лавриненко А. А., Сыса П. А., Бушуев Д. А.* Удаление магнетита из цикла измельчения с помощью магнитного гидроциклона // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 12. – С. 151–160. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_151.

Removal of magnetite from the grinding cycle using a magnetic hydrocyclone

A.A. Lavrinenko, P.A. Sysa, D.A. Bushuev

[1] Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: lavrin_a@mail.ru

Abstract: To increase efficiency of magnetic enrichment of magnetite quartzites, a new version of classification of mill discharge using a magnetic hydrocyclone is proposed. The aim of the

© А.А. Лавриненко, П.А. Сыса, Д.А. Бушуев. 2026.

investigation is to investigate the possibility of using a new device to remove the disclosed magnetite grains from the grinding cycle in order to reduce their re-grinding. The magnetic hydrocyclone is distinguished by the design of the magnetic system, which is an electromagnet with a cup-shaped magnetic circuit with minimal magnetic field scattering. The magnetic system is built into the hydrocyclone in such a way that the hydraulic mode remains the same and when the magnetic system is turned off, the magnetic hydrocyclone works as usual. The magnetic fraction is discharged through a non-magnetic discharge through a sand nozzle. The results of experiments obtained on a model of a magnetic hydrocyclone with a diameter of 50 mm with a sand nozzle with a diameter of 5 mm are shown. Maximum magnetic induction in working zone of magnetic hydrocyclone is 0.3 T. The redistribution of magnetite from the circulating load of the mill to the drain was revealed, the circulating load decreased by 2 times. The granulometric characteristic of the circulating load and the iron content in it have changed. The proportion of magnetite in the –0.04 mm class in the pre-grinding cycle decreased. The advantages of the proposed scheme are a 15.09% reduction in the share of the thin class (–0.044 mm) in the drain, a 2-fold reduction in the circulating load, simplicity of design and low power consumption. The proposed scheme is recommended for use in refineries of ferruginous quartzites and other ores with pronounced magnetic properties to improve the quality of concentrates and reduce costs.

Key words: magnetic hydrocyclone, magnetic hydrocycloning, magnetite quartzites, iron ore raw material processing, grinding, circulating load, magnetite particle size.

For citation: Lavrinenko A. A., Sysa P. A., Bushuev D. A. Removal of magnetite from the grinding cycle using a magnetic hydrocyclone. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(12):151-160. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_151.

Введение

Повышение количества тонковкрапленного железорудного сырья требует совершенствования цепи аппаратов обогатительных фабрик. Конечная крупность концентратов варьируется от 80 до 45 мм [1]. Для достижения такой крупности используются, как правило, три стадии измельчения в замкнутом цикле с последующей классификацией и магнитной сепарацией со стадиальным выделением хвостов. Недостатками представленной схемы являются, во-первых, потери переизмельченного магнетита с хвостами и, во-вторых, — сложность получения высококачественных концентратов. В качестве классификаторов используют гидроциклоны, которые хотя и просты в эксплуатации, но их производительность при сортировке, как правило, низкая, что приводит к рециркуляции значительной части мелких частиц в контуре и, как следствие, к чрезмерному измельчению продукта [2, 3]. Повышение доли железа в концентратах достигается применением тонкого грохочения с последующим доизмельчением надрешетного продукта [4—6], совершенствованием магнитной сепарации, в основном с помощью переменных или вращающихся магнитных полей [7, 8]. Применяются также гравитационные методы, например, винтовая сепарация [9]. Следует отметить, что на эксплуатацию шаровых мельниц приходится до 40% прямых эксплуатационных расходов на горно-обогатительном комбинате [10].

Кардинальное изменение схемы цепи аппаратов существующих фабрик невозможно из-за больших капитальных затрат, поэтому решение проблемы не должно существенно затрагивать цикл измельчения фабрики.

Выходом из создавшегося положения является стадиальный вывод концентрата, который позволяет снизить нагрузку на мельницу, уменьшить переизмельчение рудных минералов и повысить общую эффективность процесса. Для вывода концентрата предлагалось использовать разные способы [11, 12]. Как правило, используемое на последних стадиях тонкое грохочение является стадиальным выводом концентрата, критерием является крупность, так как в тонких классах присутствует меньше сростков с нерудными минералами [4]. Это наиболее распространенный процесс на сегодняшний день. К его недостаткам можно отнести достаточно сложную эксплуатацию грохотов с ячейкой 45 — 50 мкм.

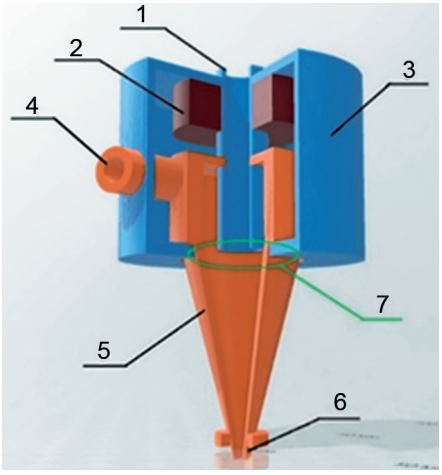
На предприятии «Карельский Окатыш» было предложено сочетание операций тонкого грохочения, доизмельчения и магнитно-гравитационного обогащения [13].

В свое время В.В. Кармазиным был создан и испытан на фабрике Михайловского ГОКА высокоселективный барабанный магнитный сепаратор с вращающейся магнитной системой (ВСПБМ), позволявший выделять магнетитовый концентрат приемлемого качества на питании три стадии магнитной сепарации фабрики. Работа ВСПБМ основана на разрушении магнетитовых флокул бегущим магнитным полем, высвобождении из них зерен пустой породы и получении таким образом высококачественных концентратов. Также В.В. Кармазин указывал, что уже после первой стадии измельчения около трети зерен магнетита находится в свободном состоянии и теоретически может быть выделено в концентрат, что значительно уменьшит потери магнетита с хвостами и снизит затраты на обогащение [14]. Из-за некоторых нерешенных проблем сепаратор так и не был запущен в серийное производство.

Описанные выше меры по улучшению качества концентрата не затрагивают этап измельчения, который является самым затратным; свыше 50% всей электроэнергии, потребляемой фабрикой, расходуется на измельчение. Единственным полезным изменением в этой области является применение мельниц самоизмельчения, дающих на выходе относительно меньшее количество сростков [15]. Самоизмельчение позволяет более эффективно разрушать руду, но имеет и недостатки, например, накопление критического класса крупности [16]. В шаровых мельницах из-за огромной разницы в твердости стали и руды разрушение часто идет в направлении удара, и зона контакта минералов остается неразрушенной.

Именно на стадии измельчения возникают проблемы, обусловленные переизмельчением магнетита. Работу мельницы можно корректировать, меняя загрузку руды и мелющих тел, а также регулировать циклическую нагрузку мельницы, которая в значительной степени влияет на качество слива. Важной является задача отправлять на доизмельчение в мельницу только тот материал, который этого требует (нераскрытую его часть), и выводить из цикла измельчения раскрытый магнетит, которого, как было отмечено выше, может быть до 30% уже на первой стадии измельчения.

Для решения этой задачи идеально подходит разработанный в ИПКОН РАН магнитный гидроциклон новой конструкции (патент РФ № 2748911) (рис. 1) [17]. Магнитный гидроциклон (МГЦ) представляет собой обычный гидроциклон с цилиндрической частью, размещенной соосно внутри магнитной системы в виде перевернутой чаши. При этом сливной патрубок гидроциклона выполнен из магнитопроводящего материала и является частью магнитной системы. В магнитном гидроциклоне



1 – сливной патрубок,
2 – катушка магнитной системы,
3 – магнитный сердечник, 4 – входной патрубок,
5 – корпус гидроциклона, 6 – песковая насадка,
7 – зона извлечения магнитных частиц в слив

Рис. 1. Магнитный гидроциклон в разрезе
Fig. 1. Magnetic hydrocyclone in cross-section

совмещено два процесса: разделение по гидравлической крупности, как в классическом гидроциклоне, и разделение по магнитной восприимчивости, но с некоторым отличием от магнитного сепаратора. Магнитный гидроциклон, в отличие от обычного сепаратора, оказывает довольно существенное гравитационное воздействие на обогащаемый материал, таким образом можно добиться результатов, отличных от магнитных сепараторов традиционной конструкции, которые извлекают из потока пульпы весь магнитный и среднемагнитный продукт. Главным отличием МГЦ является возможность более селективного извлечения магнитных частиц (с более высокой магнитной восприимчивостью) и вывод в хвосты частиц с относительно низкой магнитной восприимчивостью.

Второй важной особенностью магнитного гидроциклона является почти прямая зависимость выхода магнитной фракции от уровня магнитной индукции в системе [18].

Целью работы является повышение эффективности процесса измельчения железорудного сырья за счет изменения качества циркулирующей нагрузки мельницы вследствие вывода из нее магнитной фракции при помощи процесса магнитного гидроциклонирования.

Методика проведения опытов

Задача заключалась в проверке возможности вывода магнетита из циркулирующей нагрузки мельницы. Высокие циркулирующие нагрузки замкнутого цикла измельчения приводят к переизмельчению рудных минералов, что влечет за собой снижение селективности разделения и повышение потерь тонких классов магнетита [19, 20]. Чтобы избежать этого, необходимо убрать из циркулирующей нагрузки свободный магнетит и, таким образом, в большей степени измельчать то, что необходимо — сростки магнетита с пустой породой. Кроме эффекта дораскрытия, существенно снизится циркулирующая нагрузка на мельницу, что позволит сэкономить значительное количество электроэнергии.

Для проверки этой гипотезы была собрана установка, схема которой представлена на рис. 2.

Исходным питанием схемы являлась руда после первой стадии магнитной сепарации крупностью –4 мм с содержанием Fe 42%. После измельчения слив классифицировался на сите 0,63 мм с целью удаления недоизмельченных зерен, которые могли помешать работе магнитного гидроциклона. Подрешетный продукт при помощи лабораторного зумпфа направлялся в магнитный гидроциклон диаметром 50 мм. Магнитная индукция в магнитной системе МГЦ поддерживалась на уровне 0,3 Тл, давление на входе МГЦ 0,3 ати. После проведения сепарации слив (концентрат) удалялся, а пески возвращались в мельницу. Для пов-

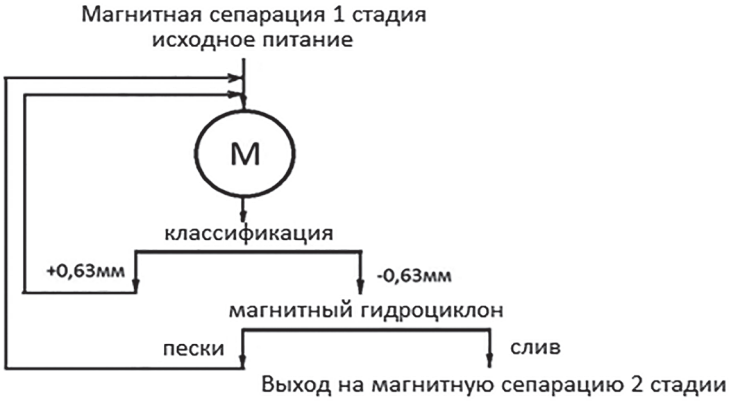


Рис. 2. Схема проведения опытов по классификации слива мельницы при помощи МГЦ
Fig. 2. Scheme for conducting experiments on classifying mill discharge using MGC

торения цикла мельница догружалась свежей рудой до стандартной загрузки. Полученные материалы разделялись по классам крупности, и определялось содержание Fe на рентгенофлуоресцентном анализаторе. Для сравнения результатов тот же цикл был проведен на МГЦ с отключенной магнитной системой, в таком варианте использования магнитный гидроциклон работает, как обычный гидроциклон (ГЦ). Слив гидроциклонов являлся выходом исследуемой части схемы, направляемым на магнитную сепарацию. Была проведена серия опытов с повторяющимися циклами дозагрузки мельницы рудой и магнитного гидроциклонирования с возвращением немагнитного продукта сепарации в мельницу.

Результаты и их обсуждение

Результаты опытов с применением магнитного и обычного гидроциклонов представлены на рис. 3—7.

Схема с магнитным гидроциклоном давала в 1,8 раза больший выход, чем схема с обычным гидроциклоном в качестве классификатора. При этом обычный гидроциклон возвращает в мельницу в 2,1 раза больше материала, чем выводит из цикла, а магнитный гидроциклон выводит в 1,26 раза больше, чем

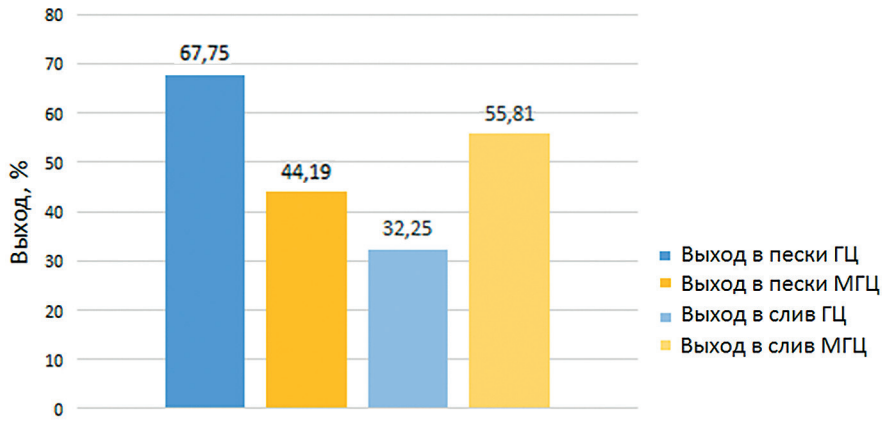


Рис. 3. Сравнение выходов МГЦ и обычного гидроциклона
Fig. 3. Comparison of the yields of the MGC and a conventional hydrocyclone

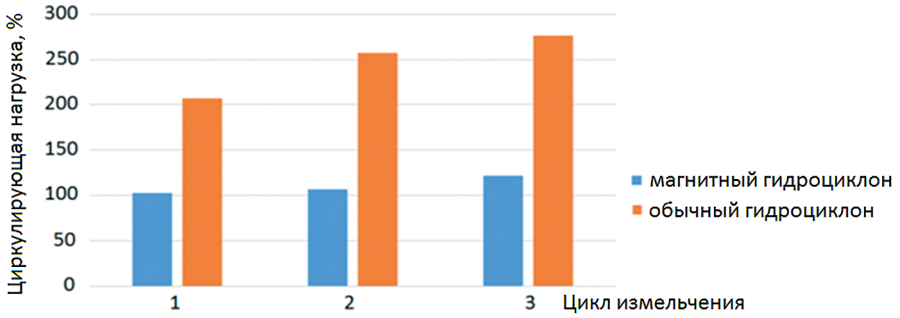


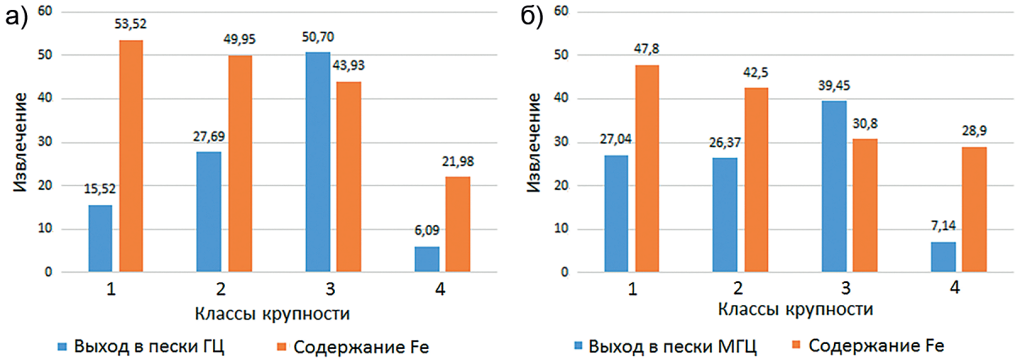
Рис. 4. Сравнение циркулирующей нагрузки мельницы при установке в качестве классификатора магнитного гидроциклона и обычного гидроциклона

Fig. 4. Comparison of circulating mill load for magnetic hydrocyclone and conventional hydrocyclone as classifier

возвращает (см. рис. 3). В случае использования обычного гидроциклона циркулирующая нагрузка заметно росла от опыта к опыту и в целом, как показали расчеты, оказались как минимум в два раза больше, чем циркулирующая нагрузка в схеме с МГЦ (рис. 4). Это объясняется тем, что в руде с содержанием 42% Fe магнетита около 58%, и он в значительной степени удаляется магнитным гидроциклоном из оборота, в то время как в обычном гидроциклоне магнетит, вследствие его большей гидравлической крупности, попадает в пески и направляется обратно в мельницу.

Ситовый анализ слива показал, что схема с магнитным гидроциклоном дает более крупный слив. Особенно это заметно в классе крупности –0,04 мм: доля класса снижается на 15%, и, таким образом, магнитный гидроциклон действительно предотвращает переизмельчение магнетита. В случае применения МГЦ содержание Fe в циркулирующей нагрузке ниже, чем в исходном питании, тогда как при применении обычного гидроциклона содержание Fe в циркулирующей нагрузке было выше и возрастало от опыта к опыту, т.е. магнетит в циркулирующей нагрузке накапливался.

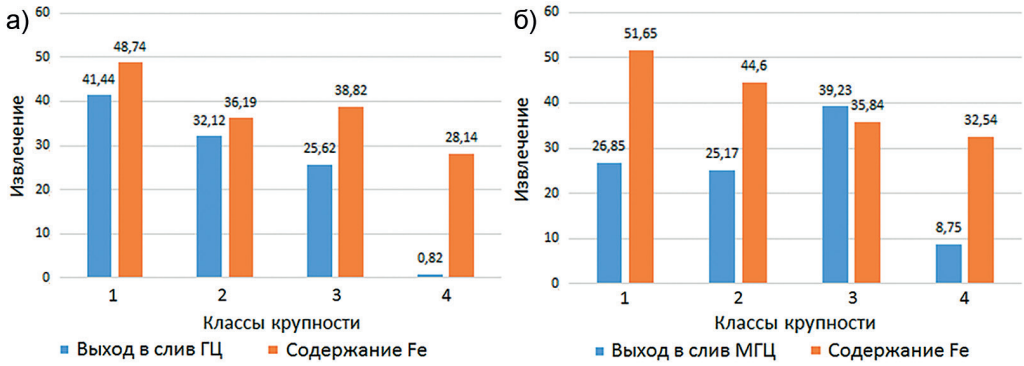
На рис. 5 видно, что при классификации с помощью обычного ГЦ возвращается в мельницу на доизмельчение гораздо более богатый железом материал. Причем наиболее высокое содержание железа находится в тонких классах.



Классы крупности, мм: 1 — –0,04 мм; 2 — +0,04–0,075 мм; 3 — +0,075–0,2 мм, 4 — +0,2 мм

Рис. 5. Выход и содержание Fe в песках по классам крупности обычного ГЦ (а) и МГЦ (б)

Fig. 5. Yield and Fe content in sands by particle size classes for conventional GC (a) and MGCC (b)



Классы крупности: 1 — –0,04 мм, 2 — +0,04–0,075 мм, 3 — +0,075–0,2мм, 4 — +0,2 мм

Рис. 6. Выход и содержание Fe в сливе по классам крупности обычного ГЦ (а) и МГЦ (б)
Fig. 6. Yield and Fe content in the slurry by particle size classes for conventional GC (a) and MGK (b)

Магнитный гидроциклон дает более ровное распределение по содержаниям и выходам. В целом материал, возвращаемый в мельницу магнитным гидроциклоном, содержит на 3,65% меньше железа, чем исходная руда.

На выходе цикла измельчения (в сливе) при использовании МГЦ доля тонкого класса –0,04 мм заметно снижается (на 14,59%), при этом содержание Fe в этом классе увеличивается на 2,91%, доля класса +0,04–0,075 мм снижается на 6,95% с повышением содержания Fe на 8,41% (рис. 6). В случае классификации при помощи МГЦ заметно вырос выход классов 0,075–0,2 мм и +0,2 мм (на 13,61% и 7,93% соответственно).

Готовыми классами можно считать первые два класса, так как именно на крупности менее 0,075 мм достигается разделение рудных и нерудных зерен, и в этих классах содержание железа увеличилось, на основании чего можно сделать вывод, что МГЦ выполняет возложенную на него задачу уменьшить переизмельчение магнетита при лучшем его раскрытии.

На рис. 7 показано, как изменяется содержание железа в операциях исследуемой схемы в случае использования

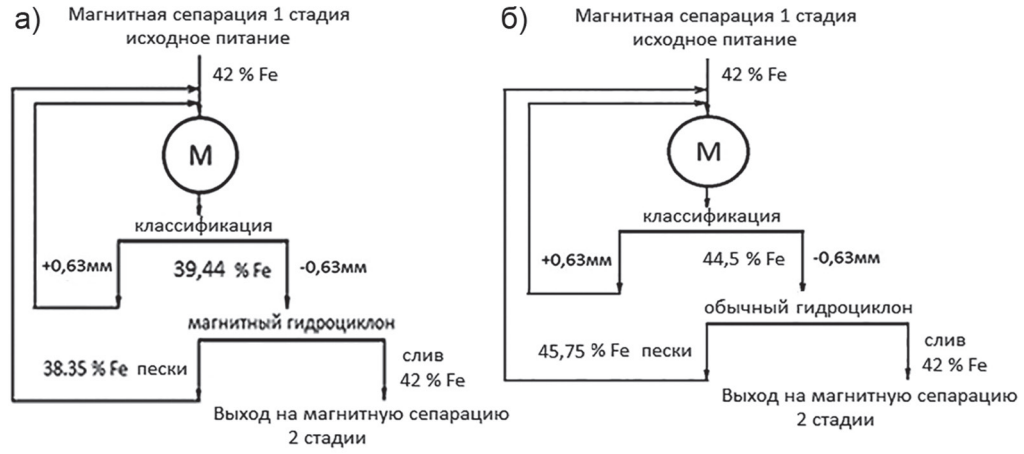


Рис. 7. Схема с магнитным гидроциклоном (а) и с обычным гидроциклоном (б)
Fig. 7. Diagram showing a magnetic hydrocyclone (a) and a conventional hydrocyclone (b)

обычного или магнитного гидроциклонов. При применении обычного гидроциклона содержание железа в мельнице несколько выше исходного за счет добавления возвращаемых песков гидроциклона с повышенным содержанием Fe. В случае применения МГЦ содержание Fe в мельнице на 3,65% ниже, чем в исходной руде, за счет возврата более бедных песков. В итоге измельчению, в случае применения МГЦ в качестве классификатора, подвергается в большей степени более бедная магнетитом часть — сростки.

Заключение

Проведенные опыты показывают, что классификация слива мельницы при помощи магнитного гидроциклона позволяет в значительных пределах управлять процессом подготовки железорудного сырья, перераспределяя магнитную часть измельченного продукта между циркулирующей нагрузкой и выходом. Установка магнитного гидроциклона в качестве классификатора слива мельницы позволяет снизить содержание Fe в циркулирующей нагрузке мельницы на 7,4%. Также использование магнитного гидроциклона позволяет снизить в 2 раза количество возвращаемого в мельницу материала.

В случае применения магнитного гидроциклона улучшается качество измельченного материала в сливе, направляемом на последующую магнитную сепарацию: содержание Fe в классе –0,04 мм увеличивается на 2,91%, а в классе +0,04–0,07 мм на 8,41%.

Снижение содержания железа в циркулирующей нагрузке означает преимущественное измельчение более бедного материала (сростков), что должно положительно отразиться на результатах последующей магнитной сепарации и конечном качестве концентрата, а также на общем извлечении полезного компонента в концентрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сенченко А. Е.*, *Куликов Ю. В.*, *Захаров А. Г.*, *Исмагилов Р. И.* Разработка технологии дообогащения рядового железорудного концентрата для обогатительной фабрики // Горная промышленность. — 2024. — № S5. — С. 158—165. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-158-165.

2. *Bruna Silveira Costa, Maurício Guimarães Bergerman, Homero Delboni Júnior* Comparing the performance of hydrocyclones and high-frequency screens in an industrial grinding circuit: Part I — Size separation assessments // Minerals. 2024, vol. 14, no. 7, article 707. DOI: 10.3390/min14070707.

3. *Allan Suhett Reis, Homero Delboni Jr.* Reducing bypass in hydrocyclones: Part 1 — Preliminary testing and assessments // Minerals. 2026, vol. 16, no. 4, article 375. DOI: 10.3390/min16040375.

4. *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.

5. *Мушкетов А. А.*, *Пелевин А. Е.* Получение высококачественного железного концентрата из магнетитовых кварцитов путем применения двухстадиальной схемы измельчения и тонкого грохочения // Черные металлы. — 2025. — № 2. — С. 4—10. DOI: 10.17580/chm.2025.02.01.

6. *Moraes M. N.*, *Galery R.*, *Mazzinghy D. B.* A review of process models for wet fine classification with high frequency screens // Powder Technology. 2021, vol. 394, pp. 525—532. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.08.078.

7. *Кармазин В. В.* Совершенствование технологии обогащения магнетитовых кварцитов на основе сепараторов с бегущим магнитным полем // Горный журнал. — 2006. — № 6. — С. 108—113.

8. *Пелевин А. Е.* Повышение эффективности обогащения железорудного сырья путем применения сепарации в переменном магнитном поле // Черные металлы. — 2021. — № 5. — С. 4—9. DOI: 10.17580/chm.2021.05.01.

9. *Прокопьев С. А.*, *Прокопьев Е. С.*, *Емельянова К. К.*, *Напольских С. А.* Получение высококачественного магнетит-гематитового железорудного концентрата методом винтовой сепарации // Горный журнал. — 2021. — № 6. — С. 86—90. DOI: 10.17580/gzh.2021.06.07.

10. *Zhifeng Yin, Yuhang Zhang, Huajun Zhu, Hao Ding, Qisheng Wu, Zheyu Zhu, Jiming Song* Optimization and experimental study of iron ore grinding medium parameters using EDEM discrete element software // Materials. 2024, vol. 17, no. 19, article 4726. DOI: 10.3390/ma17194726.

11. *Опалев А. С.*, *Бирюков В. В.*, *Щербаков А. В.* Стадиальное выделение магнетитового концентрата при разработке энергоресурсосберегающей технологии обогащения железистых кварцитов на ОАО «Олкон» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 11. — С. 60—62.

12. *Пелевин А. Е.* Комбинированные схемы для стадиального выделения магнетитового концентрата // Черные металлы. — 2026. — № 3. — С. 4—10. DOI: 10.17580/chm.2026.03.01.

13. *Опалев А. С.*, *Алексеева С. А.* Методическое обоснование выбора оптимальных режимов работы оборудования схемы стадиального вывода концентрата при обогащении железных руд // Записки Горного института. — 2022. — Т. 256. — С. 593—602. DOI: 10.31897/PMI.2022.80.

14. *Кармазин В. В.*, *Андреев В. Г.* Результаты промышленных испытаний сепаратора ВСПБМ-90/100 на ОФ Михайловского ГОКа // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 9. — С. 214—222.

15. *Кармазин В. В.*, *Синельникова Н. Г.* Совершенствование технологии обогащения железосодержащих руд КМА // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № 12. — С. 206—214.

16. *Самуков А. Д.*, *Герасименко С. И.* Моделирование процесса самоизмельчения железосодержащих руд с додрабливанием критических классов крупности // Горный журнал. — 2023. — № 10. — С. 24—29. DOI: 10.17580/gzh.2023.10.03.

17. *Сыса П. А.*, *Лавриненко А. А.*, *Агарков И. И.* Патент РФ № 2748911. Способ извлечения магнитной фракции из потока суспензии и устройство для его осуществления. 2021. Бюл. № 16.

18. *Лавриненко А. А.*, *Сыса П. А.* Прогноз результатов процесса магнитного гидроциклонирования суспензий обогащаемых материалов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2023. — № 4. — С. 142—150. DOI: 10.15372/FTPRPI20230415.

19. *Александрова Т. Н.*, *Чантурия А. В.*, *Кузнецов В. В.* Минералого-технологические особенности и закономерности селективного разрушения железистых кварцитов Михайловского месторождения // Записки Горного института. — 2022. — Т. 256. — С. 517—526. DOI: 10.31897/PMI.2022.58.

20. *Gazaleeva G. I.*, *Mushketov A. Al., Vlasov I. A., Mushketov A. An.*, *Sopina N. A.* Development of magnetic processing circuit for oxidized iron ore after magnetic roasting // Mineral Dressing. 2019, vol. 55, pp. 142—148. DOI: 10.1134/S1062739119015395. ГИАБ

REFERENCES

1. Senchenko A. E., Kulikov Yu. V., Zakharov A. G., Ismagilov R. I. Development of a process to upgrade cobber iron concentrate at an iron ore processing plant. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. S5, pp. 158—165. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-158-165.

2. Bruna Silveira Costa, Maurício Guimarães Bergerman, Homero Delboni Júnior Comparing the performance of hydrocyclones and high-frequency screens in an industrial grinding circuit: Part I — Size separation assessments. *Minerals*. 2024, vol. 14, no. 7, article 707. DOI: 10.3390/min14070707.

3. Allan Suhett Reis, Homero Delboni Jr. Reducing bypass in hydrocyclones: Part 1 — Preliminary testing and assessments. *Minerals*. 2026, vol. 16, no. 4, article 375. DOI: 10.3390/min16040375.

4. Ismagilov R. I., Kozub A. V., Gridasov I. N., Shelepov E. V. Case ыtudy: Advanced solutions applied by JSC Andrei Varichev Mikhailovsky GOK to improve ferruginous quartzite concentration performance. *Russian Mining Industry Journal*. 2020, no. 4, pp. 98—103. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-4-98-103.

5. Musketov A. A., Pelevin A. E. Obtaining high-quality iron concentrate from magnetite quartzites using a two-stage grinding and fine screening scheme. *Chernye Metally*. 2025, no. 2, pp. 4—10. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2025.02.01.

6. Moraes M. N., Galery R., Mazzinghy D. B. A review of process models for wet fine classification with high frequency screens. *Powder Technology*. 2021, vol. 394, pp. 525—532. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.08.078.

7. Karmazin V. V. Improving the technology of enrichment of magnetite quartzites based on separators with a traveling magnetic field. *Gornyi Zhurnal*. 2006, no. 6, pp. 108—113. [In Russ].
8. Pelevin A. E. Increasing the efficiency of iron-ore dressing by separation in an alternative magnetic field. *Chernye Metally*. 2021, no. 5, pp. 4—9. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2021.05.01.
9. Prokopyev S. A., Prokopyev E. S., Yemelyanova K. K., Napolskikh S. A. Obtaining high-quality magnetite-hematite iron ore concentrate by screw separation. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 6, pp. 86—90. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.06.07.
10. Zhifeng Yin, Yuhang Zhang, Huajun Zhu, Hao Ding, Qisheng Wu, Zheyu Zhu, Jiming Song Optimization and experimental study of iron ore grinding medium parameters using EDEM discrete element software. *Materials*. 2024, vol. 17, no. 19, article 4726. DOI: 10.3390/ma17194726.
11. Opalev A. S., Birukov V. V., Scherbakov A. V. Stadial obtaining of the magnetite concentrate during the development of power resource-saving technology of benefication of ferruginous quartzites on JSC «OLCON». *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 11, pp. 60—62. [In Russ].
12. Pelevin A. E. Combined flows for the staged recovery of magnetite concentrate. *Chernye Metally*. 2026, no. 3, pp. 4—10. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2026.03.01.
13. Opalev A. S., Alekseeva S. A. Methodological substantiation of the choice for optimal modes of equipment operation during the stage-wise concentrate removal in iron ores beneficiation. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 593—602. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.80.
14. Karmazin V. V., Andreev V. G. Results of industrial tests of the VPSBM-90/100 separator at the Mikhailovsky GOK processing plant. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2012, no. 9, pp. 214—222. [In Russ].
15. Karmazin V. V., Sinelnikova N. G. Improving the technology of beneficiation of iron-containing ores of the KMA. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2009, no. 12, pp. 206—214. [In Russ].
16. Samukov A. D., Gerasimenko S. I. Modeling the process of self-grinding of iron-containing ores with secondary crushing of critical size classes. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 10, pp. 24—29. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.10.03.
17. Sysa P. A., Lavrinenko A. A., Agarkov I. I. *Patent RU 2748911*. 2021.
18. Lavrinenko A. A., Sysa P. A., Prediction of magnetic hydrocyclonage performance in suspensions. *Journal of Mining Sciences*. 2023, no. 4, pp. 142—150. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20230415.
19. Alexandrova T. N., Chanturia A. V., Kuznetsov V. V. Mineralogical and technological features and patterns of selective disintegration of ferruginous quartzites of the Mikhailovskoye deposit. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 517—526. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.58.
20. Gazaleeva G. I., Mushketov A. Al., Vlasov I. A., Mushketov A. An., Sopina N. A. Development of magnetic processing circuit for oxidized iron ore after magnetic roasting. *Mineral Dressing*. 2019, vol. 55, pp. 142—148. DOI: 10.1134/S1062739119015395.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лавриненко Анатолий Афанасьевич[1] — д-р техн. наук,
зав. лабораторией, e-mail: lavrin_a@mail.ru,
Сыса Павел Анатольевич[1] — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: pavel_syssa@mail.ru,
Бушуев Дмитрий Алексеевич[1] — инженер, e-mail: demonab777@gmail.com,
[1] Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН.
Для контактов: Лавриненко А.А., e-mail: lavrin_a@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Lavrinenko[1], Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, e-mail: lavrin_a@mail.ru,
P.A. Sysa[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: pavel_syssa@mail.ru,
D.A. Bushuev[1], Engineer, e-mail: demonab777@gmail.com,
[1] Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources,
Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.
Corresponding author: A.A. Lavrinenko, e-mail: lavrin_a@mail.ru.

Получена редакцией 24.09.2026; получена после рецензии 26.10.2026; принята к печати 10.11.2026.
Received by the editors 24.09.2026; received after the review 26.10.2026; accepted for printing 10.11.2026.