ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12-2):125-136
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.928.89 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_125

ОБОГАЩЕНИЕ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ МАГНЕТИТОВЫХ КВАРЦИТОВ С ПОМОЩЬЮ НОВОГО МАГНИТНОГО ГИДРОЦИКЛОНА

А.А. Лавриненко[1], П.А. Сыса[1]

[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 продуктов переработки магнетитовых кварцитов предложен новый вариант магнитного гидроциклона. Целью исследования является изучение возможности применения нового устройства для получения магнетитовых концентратов повышенного качества из рядовых железорудных концентратов за одну стадию сепарации, а также для доизвлечения магнитного продукта из хвостов обогащения. Его отличием является конструкция магнитной системы, представляющая собой электромагнит с чашеобразным магнитопроводом, обладающим минимальным рассеянием магнитного поля. Магнитная система концентрирует магнитное поле в области соединения цилиндрической и конической частей корпуса. Разгрузка магнитной фракции осуществляется через слив с потоком очищенной воды. Показаны результаты опытов, полученные на модели магнитного гидроциклона диаметром 30 мм и углом конусности 20°, с песковой насадкой диаметром 5 мм. Максимальная магнитная индукция в рабочей зоне магнитного гидроциклона составляет 0,2 Тл. Выявлено повышение качества продукта более чем на 2%, с извлечением железа в концентрат 85–88% при его содержании в исходном продукте 65%. Проверена возможность доизвлечения магнетита из хвостов обогащения железорудной фабрики. С помощью многостадиальной перечистки получены продукты с содержанием железа до 55%. Преимуществами магнитного гидроциклона являются высокая удельная производительность, простота конструкции и низкое энергопотребление. Устройство рекомендуется для применения в схемах обогащения железистых кварцитов и других руд, обладающих выраженными магнитными свойствами и малой крупностью ценного компонента, а также для решения задач, не реализуемых при помощи барабанных сепараторов.

Ключевые слова: магнитный гидроциклон, магнитное гидроциклонирование, магнетитовые кварциты, обогащение железорудного сырья, селективность разделения, магнитная сила, центробежная сила, содержание железа.

Для цитирования: *Лавриненко А. А., Сыса П. А.* Обогащение продуктов переработки магнетитовых кварцитов с помощью нового магнитного гидроциклона // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-2. – С. 125–136. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_125.

Beneficiation of magnetite quartzite processing products using new magnetic hydrocyclone

A.A. Lavrinenko[1], **P.A. Sysa**[1]

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

Abstract: For the enhanced efficiency of magnetic separation of magnetic quartzite processing products, a new variant of a magnetic hydrocyclone is proposed. The goal of the research is the analysis of usability of the new machine in production of higher quality magnetite concentrate from rough iron ore concentrates in one separation stage, and in additional recovery of a magnetic product from processing tailings. The feature of the machine is the design of the magnetic system representing an electromagnet with a bowl-shaped magnetic circuit with the minimal magnetic leakage. The magnetic system concentrates the magnetic field in the zone of connection of the cylindrical and conical parts of the body. The magnetic fraction is let out with the treated water flow through the discharge. The article describes the test results obtained on the model of the magnetic hydrocyclone with the diameter of 30 mm and cone angle of 20 deg, and with the apex diameter of 5 mm. The maximal magnetic induction in the active zone of the magnetic hydrocyclone is 0.2 T. The product quality grows by more than 2%, with the iron recovery of 85–88% at its content of 65% in the initial product. Additional recovery of magnetite from tailings of an iron ore concentration factory is also tested. The multistage recleaning allowed products with the iron content up to 55%. The advantages of the magnetic hydrocyclone are the high specific productivity, simple structure and low energy consumption. The machine is recommended for the use in the processing circuits of ferruginous quartzite and other ore types which possess pronounced magnetic properties and small size of a valuable component, and for solving problems unsolvable using drum separators.

Key words: magnetic hydrocyclone, magnetic hydrocyclonage, magnetite quartzite, iron ore processing, separation selectivity, magnetic force, centrifugal force, iron content.

For citation: Lavrinenko A. A., Sysa P. A. Beneficiation of magnetite quartzite processing products using new magnetic hydrocyclone. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-2):125-136. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_125.

Введение

В настоящее время актуальной проблемой является снижение качества железорудного сырья, поступающего на обогатительные фабрики [1]. Основной причиной, сдерживающей повышение качества железорудных концентратов выше 65% Fe магнитными методами, является присутствие в исходном сырье сростков магнетита с нерудными минералами [2, 3]. Постоянно уменьшающаяся вкрапленность магнетита в руде требует более тонкого измельчения (до –44 мкм, в некоторых случаях и менее) [4, 5]. При такой крупности перерабатываемого материала начинается снижение магнитной восприимчивости магнетита, что отрицательно сказывается на результатах магнитной сепарации [6, 7]. Также возрастают ошламованность продуктов переработки и связанные с этим трудности. Частицы малой крупности менее подвижны, и для разделения магнитным методом суспензии рудных и нерудных минералов необходимо прикладывать большие ускорения,

чтобы получить заметный эффект. Предприятия, сохраняющие традиционную схему «мельница — классификатор — дешламатор — магнитный сепаратор», получают основной прирост содержания Fe в концентрате на первых двух стадиях обогащения, далее приходится прибегать к иным методам повышения качества: тонкое грохочение [8], флотация [9—11], так как магнитная сепарация не дает существенного прироста качества после достижения содержания 65% Fe [12]. Высокие циркуляционные нагрузки замкнутого цикла измельчения приводят к переизмельчению рудных минералов и низкой степени раскрытия сростков, что влечет за собой снижение селективности разделения и повышение потерь тонких классов магнетита. [13, 14]. Низкая эффективность последних стадий обогащения связана с большим количеством сростков магнетит/кварц и повышенным образованием флокул, в результате которого немагнитные включения механически переносятся в концентрат [15, 16]. Применяемый в промышленности барабанный магнитный сепаратор обладает рядом преимуществ: он прост в эксплуатации, надежен, экономичен, позволяет получить очень высокое извлечение магнитной фракции, но селективность его сравнительно невысокая Попытки повысить селективность путем снижения магнитной индукции приводят к существенному снижению извлечения при незначительном приросте качества концентрата [16]. Хорошие результаты дает магнито-гравитационная сепарация, но для этого процесса необходимо большое количество относительно чистой воды [17, 18].

Сложившаяся ситуация требует совершенствования и поиска новых методов обогащения. Одним из них является новый метод магнитного гидроциклонирования; на устройство для его осуществления авторами получен патент РФ № 2748911 [19]. Магнитный гидроциклон (МГЦ), в отличие от обычного сепаратора, совмещает в себе довольно существенное гравитационное и магнитное воздействия на обогащаемый материал, таким образом можно добиться результатов, отличных от магнитных сепараторов традиционной конструкции, где в качестве силы, противодействующей магнитной, выступает в основном сила тяжести и воздействие потока пульпы. В магнитном гидроциклоне, предложенном авторами, совмещены два процесса: разделение по гидравлической крупности, как в классическом гидроциклоне, и разделение по магнитной восприимчивости, но с некоторым отличием от магнитного сепаратора. В указанном устройстве магнитная фракция концентрировалась магнитной системой под крышкой гидроциклона и удалялась в слив через щелевые отверстия в сливном патрубке [20]. Такой способ вывода концентрата наряду с преимуществами, такими как возможность размещения сверхпроводящей магнитной системы, имеет и недостатки, например, вероятность забивания разгрузочных щелевых отверстий и их преждевременный износ абразивным обогащаемым материалом.

Основным отличием процесса магнитного гидроциклонирования от используемых в настоящее время барабанных сепараторов является высокая скорость движения обогащаемого потока, создающая высокий уровень диссипативных сил, противопоставляемых извлекающей магнитной силе. Быстро вращающийся поток пульпы создает существенное гидравлическое сопротивление движению магнитных частиц, поэтому частицы с малой магнитной восприимчивостью (сростки кварц-магнетит) имеют небольшую вероятность попадания в концентрат.

В результате можно обогащать продукты с большим исходным количест-

вом сростков, что на обычных сепараторах получается неэффективно.

Целью исследования является изучение возможности применения нового магнитного гидроциклона для получения магнетитовых концентратов повышенного качества из рядовых железорудных концентратов за одну стадию сепарации, а также для доизвлечения магнитного продукта из хвостов обогащения.

Основная задача заключается в практическом обосновании технологических параметров нового магнитного гидроциклона, обеспечивающих эффективную сепарацию железорудного сырья.

Методика проведения опытов

Исследования проводились с применением нового магнитного гидроциклона, лишенного недостатков предыдущих конструкций.

Устройство магнитного гидроциклона показано на рис. 1. Он состоит из следующих основных частей: *1* — сливной патрубок, *2* — катушка магнитной системы, *3* — сердечник магнитной системы, *4* — питающий патрубок, *5* — корпус гидроциклона, *6* — песковая насадка. Цифрой *7* обозначена область, в которой происходит магнитная сепарация.

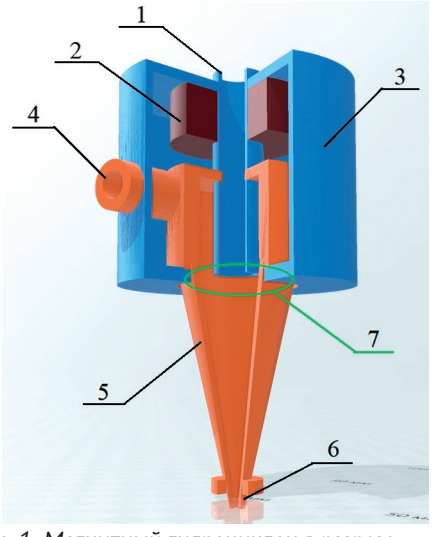

Рис. 1. Магнитный гидроциклон в разрезе
Fig. 1. Magnetic hydrocyclone in section

Основным отличием конструкции является магнитная система с чашеобразным магнитопроводом, концентрирующая магнитное поле в области соединения цилиндрической и конической частей корпуса, который выполнен из немагнитного материала. Таким образом, к минимуму сведено рассеяние магнитного поля и, соответственно, уменьшен расход электроэнергии и нагрев обмоток до уровня, обеспечивающего длительную непрерывную работу. Сливной патрубок в новом магнитном гидроциклоне является одновременно частью магнитной системы. Перенос области магнитной сепарации из-под крышки магнитного гидроциклона в предыдущей конструкции [19] в область стыка позволил отказаться от разгрузочных отверстий в сливном патрубке, которые забивались магнитными флокулами при превышении критического значения магнитной индукции. Благодаря новому конструктивному решению возросла техническая и технологическая надежность устройства. При этом разгрузка концентрата осуществляется с высокой эффективностью.

Исходное питание подается при помощи шламового насоса через питающий патрубок *4*, концентрат выводится через сливной патрубок *1*, а хвосты сепарации удаляются через песковую насадку *6*.

При этом магнитному разделению предшествует процесс классификации частиц по гидравлической крупности внутри магнитного гидроциклона. Предварительно классифицированный материал повышает эффективность магнитной сепарации, в результате чего вероятность попадания нерудных и слабомагнитных частиц в концентрат значительно снижается.

Процесс магнитного обогащения протекает следующим образом. Материал в виде суспензии с соотношением твердой и жидкой фаз 1/10 — 1/5 подается шламовым насосом с производительностью 600 л/ч в МГЦ диаметром 30 мм с углом конусности 20° и песковой насадкой диаметром 5 мм, которая выбрана на основании предварительных опытов. Внутри гидроциклона действуют центробежная сила и центростремительная магнитная сила, создаваемая магнитной системой. Частицы с высокой магнитной восприимчивостью преодолевают сопротивление турбулентного потока и центробежной силы и удаляются через слив в концентрат, а слабомагнитные частицы прижимаются к стенкам и уходят в пески. Исходный продукт поступает через входной патрубок под давлением 0,1 — 0,3 ати и начинает вращательное движение в цилиндрической части гидроциклона. В результате под действием центробежной силы происходит классификация частиц потока на более крупную часть в пристеночной области и более тонкую в приосевой области. На уровне перехода цилиндрической части в коническую сформировавшийся вращающийся поток попадает в зону максимального воздействия магнитного поля. Под действием магнитной силы магнитные частицы перемещаются в приосевую область и, двигаясь по спирали, попадают в центральный вихревой поток, выносящий их в слив. Остальные частицы продолжают свое движение в конусной части гидроциклона, постепенно прижимаясь к стенкам центробежной силой, и извлекаются через песковую насадку.

Лабораторные испытания проводились на рядовом магнитном концентрате крупностью 80,5% класса –0,074 мм и содержанием Fe 65%. Для испытания МГЦ на худшем по качеству материале были использованы промежуточные хвосты обогатительной фабрики, содержащие 37,5% Fe и имеющие 95% класса крупностью –0,44 мкм. Исходный материал содержит мелкие свободные зерна магнетита, сростки магнетита с кварцем, гематитом, свободный гематит, сростки кварца с гематитом, кварц, мусковит, сидерит, карбонаты, силикаты.

Магнитная система гидроциклона была подключена к лабораторному источнику тока, максимальный ток составил 1,3 А, максимальная магнитная индукция 0,2 Тл. Процесс магнитной сепарации осуществлялся в непрерывном режиме.

Результаты и их обсуждение

Сначала осуществлялась подача промпродукта с содержанием Fe 65% и устанавливался режим работы в замкнутом цикле. При подаче питания на магнитную систему наблюдалась резкая смена цвета продуктов сепарации: слив темнел, а пески, наоборот, светлели. Результаты сепарации показаны на рис. 2 и 3.

Процесс обогащения в данном типе магнитного гидроциклона отличается тем, что при нулевой индукции поток, идущий через слив, несет тонкие фракции исходного материала, классифицированные по гидравлической крупности (более крупные и тяжелые уходят в пески). По мере нарастания магнитной индукции к этому потоку начинает добавляться магнетит: сначала наиболее чистые и крупные зерна, далее вовлекаются зерна меньшего размера, и так почти до полного извлечения магнетита в восходящий поток. Дальнейшее повышение магнитной индукции приводит к перемещению в слив материала, имеющего меньшую магнитную восприимчивость (сростки магнетит-кварц), и, таким образом, извлечение продолжает расти, а качество начинает падать (рис. 2 и 3). Такая последовательность извлечения обусловлена различием подвижности ча-

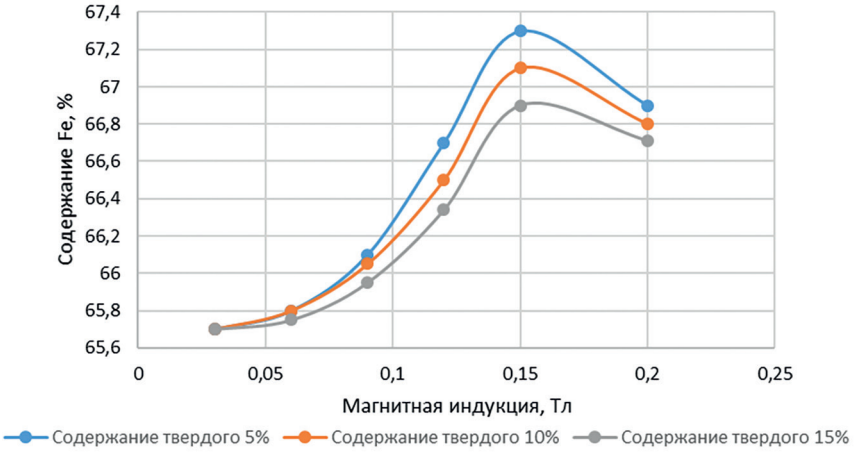

Рис. 2. Содержание Fe в концентрате в зависимости от магнитной индукции и содержания твердого в питании

Fig. 2. The Fe content in the concentrate depending on the magnetic induction and the solid content in the feed

стиц в водной среде в зависимости от их крупности, что описано в разработанной ранее математической модели процесса магнитного гидроциклонирования. Более крупные частицы способны развивать большую скорость и, соответственно, имеют большую вероятность преодолеть турбулентный поток и попасть в концентрат [20]. Следует учитывать, что из-за турбулентного течения суспензии в магнитном гидроциклоне стадии этого процесса не имеют четких границ разделения, как и в обычном гидроциклоне.

Начиная с тока величиной 0,9 А, что соответствует магнитной индукции 0,15 Тл в центре катушки, магнитный гидроциклон дает высокое извлечение железа в концентрат (85%) при качестве продукта 67,3% Fe. С повышением плотности суспензии эффективность работы МГЦ незначительно снижается из-

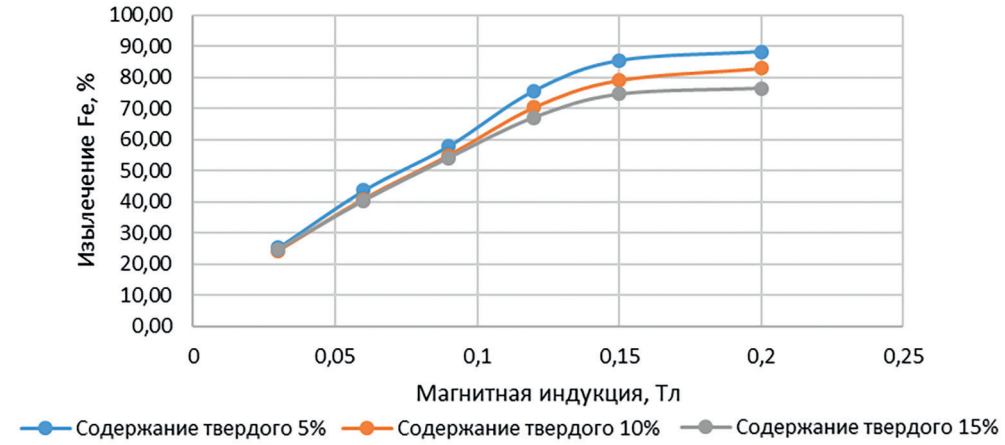

Рис. 3. Извлечение Fe в концентрат в зависимости от магнитной индукции и содержания твердого в питании

Fig. 3. Extraction of Fe into concentrate depending on magnetic induction and solids content in the feed

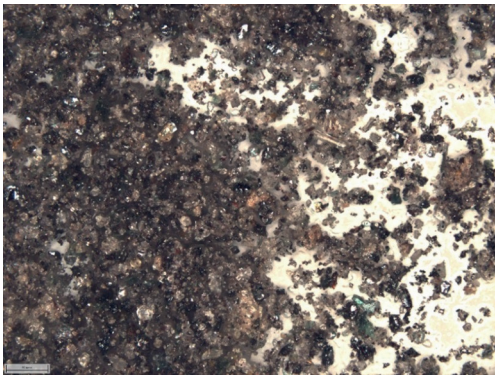

Рис. 4. Исходный материал (хвосты). Цена деления 60 мкм

Fig. 4. Source material (tailings). Division value 60 μm

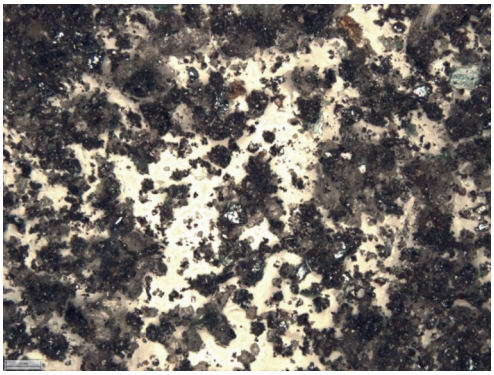

Рис. 5. Концентрат магнитной сепарации. Цена деления 20 мкм

Fig. 5. Magnetic separation concentrate. Division value 20 μm

за увеличения стесненности движения частиц.

Таким образом, получается два продукта, один из которых является практически готовым концентратом (свыше 67% Fe), а другой (менее 60% Fe) может быть дополнительно доизмельчен и очищен или использован как сырье для доменного передела.

Переработка рядовых концентратов (промпродуктов) позволяет получить концентраты приемлемого качества без сложных операций, например, многостадиальной тонкой классификации рядового концентрата, имеющей невысокую эффективность.

Также была проверена возможность доизвлечения магнетита из хвостов обогащения железорудной фабрики с содержанием Fe 37,5%. С целью получения максимального извлечения устанавливали предельную магнитную индукцию — 0,2 Тл.

Обогащение данного материала при помощи мокрого барабанного сепаратора не давало существенного прироста содержания Fe, поскольку он уже прошел несколько стадий магнитной сепарации, подвергался флотационному воздействию и к тому же сильно ошламован, то есть является бросовым продуктом. Общий вид хвостов обогатительной фабрики представлен на рис. 4.

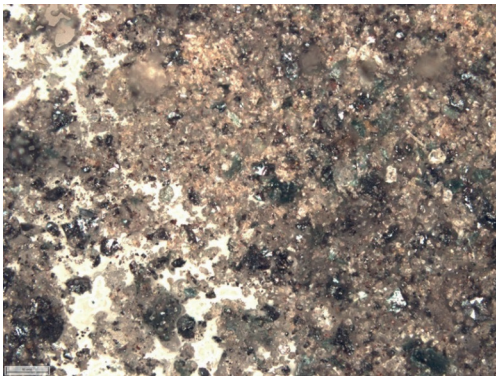

Рис. 6. Хвосты магнитной сепарации. Цена деления 60 мкм

Fig. 6. Magnetic separation tailings. Division value 60 μm

После прохождения материала через магнитный гидроциклон были получены концентрат и хвосты сепарации, общий вид которых представлен на рис. 5 и рис. 6 и наглядно показывает их различие.

Результаты сепарации хвостов обогащения представлены на рис. 7 и 8. Из полученных данных следует, что с увеличением давления на входе магнитного гидроциклона качество продукта сначала повышается, затем падает, то есть существует оптимум скорости подачи суспензии. Снижение качества и

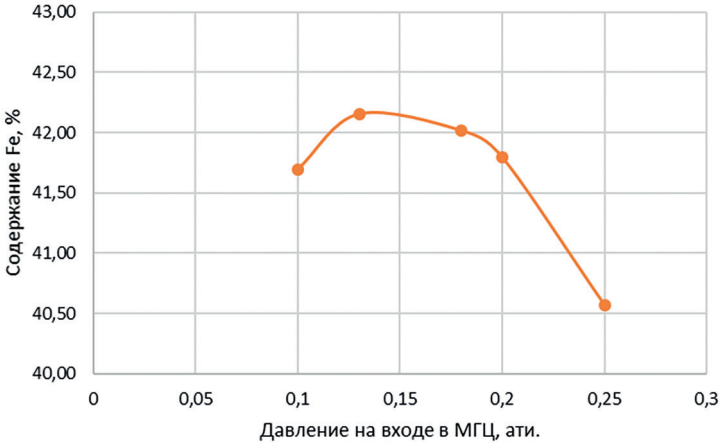

Рис. 7. Содержание Fe в концентрате в зависимости от давления на входе МГЦ. Магнитная индукция 0,2 Тл

Fig. 7. Fe content in concentrate depending on the pressure at the MHC inlet. Magnetic induction 0.2 T

извлечения с повышением скорости подачи объясняется увеличением центробежной силы, действующей на частицы. В целом эти параметры изменяются незначительно. Следует отметить, что при давлении менее 0,1 ати магнитный гидроциклон работает неустойчиво и не выходит на рабочий режим.

Анализ полученных результатов показал, что из хвостов обогатительной фабрики можно получить за одну стадию сепарации продукт, пригодный для дальнейшей переработки, с достаточно хорошим выходом более 50%. Были проведены опыты по многократной перечистке указанного продукта на МГЦ, в результате чего получен продукт с содержанием 55% Fe и выходом 28% от исходного, который можно считать товарным концентратом (рис. 9).

Из данных, представленных на рис. 9, следует, что прирост содержания железа с каждой следующей стадией магнитного гидроциклонирования снижается и применение большего количества перечистных операций нецелесообразно.

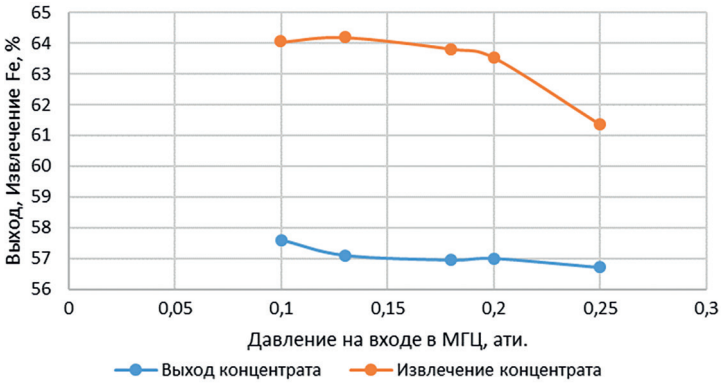

Рис. 8. Извлечение Fe в концентрат в зависимости от давления на входе МГЦ. Магнитная индукция 0,2 Тл

Fig. 8. Extraction of Fe into concentrate depending on the pressure at the MHC inlet. Magnetic induction 0.2 T

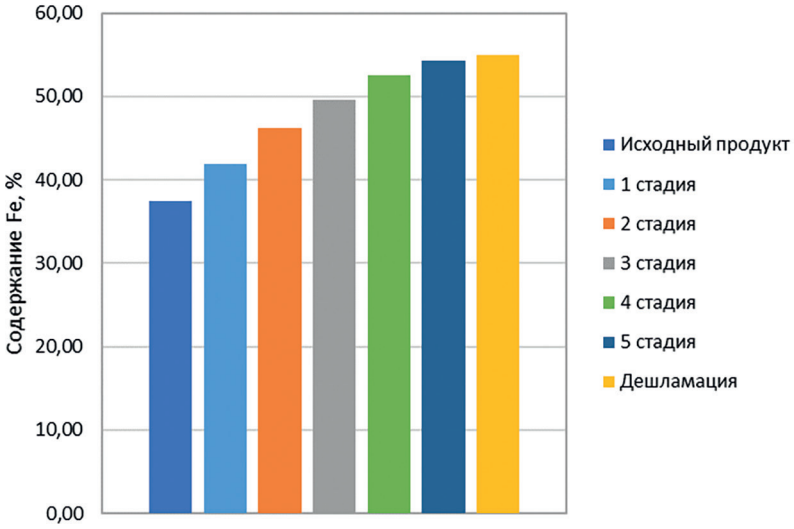

Рис. 9. Содержание железа в продуктах магнитной сепарации при многократной перечистке хвостов обогащения железорудной фабрики с содержанием Fe 37,5%

Fig. 9. Iron content in magnetic separation products during multiple cleaning of iron ore plant enrichment tailings with an Fe content of 37.5%

Заключение

Предложен новый вариант процесса магнитного гидроциклонирования, позволяющий обогащать магнетитсодержащие суспензии с довольно широким диапазоном крупности и различным содержанием железа магнитного, который приемлем для практического применения. Его отличием является конструкция магнитной системы, представляющая собой электромагнит с чашеобразным магнитопроводом, обладающим минимальным рассеянием магнитного поля. Магнитная система концентрирует магнитное поле в области соединения цилиндрической и конической частей корпуса.

Магнитный гидроциклон показывает высокую эффективность при магнитной индукции от 0,15 Тл и более, при давлении на входе выше 0,1 ати и содержании твердого в питании на уровне 5%. С повышением магнитной индукции до 0,15 — 0,17 Тл содержание железа в магнитном концентрате возрастает с 65 до 67,3% при извлечении 85 — 88%.

При магнитном гидроциклонировании хвостов железорудной фабрики, содержащих 37,5% железа, и последующей пятикратной перечистке магнитного продукта получен товарный концентрат с содержанием 55% Fe при выходе 28%.

Усовершенствованный метод магнитного гидроциклонирования позволяет перерабатывать сложные для барабанных магнитных сепараторов шламистые и богатые сростками суспензии, что делает обоснованным его применение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Люнген Х. Б., Нолдин Х., Шмёле П.* Тенденции развития технологических процессов выплавки чугуна и оценка ресурсов железной руды и угля // Черные металлы. — 2016. — № 6. — С. 17 — 24.

2. *Терехин Е. П.*, *Чуева Е. А.*, *Хворостянова В. И.* Совершенствование технологии дообогащения для повышения качества железорудного концентрата // Техника и технология горного дела. — 2023. — № 3 (22). — С. 82—92. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-3-82-93.

3. *Пелевин А. Е.* Технологии обогащения железных руд России и пути повышения их эффективности // Записки Горного Института. — 2022. — Т. 256. — С. 589—592. DOI: 10.31897/PMI.2022.61.

4. *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.

5. *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—256. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_2_0_76.

6. *Якубайлик Э. К.*, *Ганженко И. М.*, *Бутов П. Ю.*, *Килин В. И.* Снижение потерь железа при мокрой сепарации в высоких полях // Журнал СФУ. Техника и технологии. — 2016. — № 8. — С. 1302—1310. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-8-1302-1310.

7. *Hikmet Sisa, Tekin Karaağaça, Mustafa Birincia, Tufan Kıyaka* Enrichment of low-grade magnetite ore by magnetic and gravity Separations: effect of particle size // Madencilik. 2021, vol. 60, no. 1, pp. 31—39. DOI: 10.30797/madencilik.796806.

8. *Rodriguez V. A.*, *Barrios G. K. P.*, *Bueno G.*, *Tavares L. M.* Investigation of lateral confinement, roller aspect ratio and wear condition on HPGR performance using DEM-MBD-PRM simulations // Minerals. 2021, vol. 11, no. 8, article 801. DOI: 10.3390/min11080801.

9. *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.

10. *Qian Wang, Dong Wang, Quanxiang Yan* Mechanism of a combined depressant of Fe^{3} and cornstarch on the flotation separation of magnetite and quartz // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2025, vol. 61, no. 5. http://www.journalssystem.com/ppmp.

11. *Zhang X., Gu X., Han Y., Parra-Álvarez N., Claremboux V.*, *Kawatra S. K.* Flotation of iron ores: A review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2021, vol. 42, no. 3, pp. 184—212. DOI: 10.1080/08827508.2019.1689494.

12. *Опалев А. С.*, *Черезов А. А.* Опыт освоения магнитно-гравитационной сепарации на предприятиях России и стран СНГ для повышения качества железорудного сырья // Горная промышленность. — 2023. — № 3. — С. 122—128. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-3-122-128.

13. *Пелевин А. Е.*, *Сытых Н. А.* Сравнение использования гидроциклонов и грохотов в замкнутом цикле измельчения титаномагнетитовой руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5. — С. 154—166. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_154.

14. *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 // Journal of Mining Science. 2019, vol. 55, pp. 142—148. DOI: 10.1134/S1062739119015395.

15. *Birinci M.* Enrichment of apatite-bearing iron ore by magnetic separation and flotation // European Journal of Technique. 2021, vol. 11, no. 1.

16. *Behnamfard A., Khaphaje E.* Beneficiation of a low-grade iron ore by combination of wet low-intensity magnetic separation and reverse flotation methods // Journal of Mining and Environment. 2019, vol. 10, no. 1, pp. 197—212. DOI: 10.22044/jme.2018.7392.1595.

17. *Гриненко В. И.*, *Опалев А. С.*, *Маевский П. В.*, *Карпов И. В.* Повышение качества железорудного концентрата на АО «ССГПО» методом магнитно-гравитационной сепарации // Горный журнал. — 2021. — № 10. — С. 23—27. DOI: 10.17580/gzh.2021.10.10.

18. *Опалев А. С.* Повышение качества магнетитовых концентратов на основе магнитно-гравитационной сепарации // Горный журнал. — 2020. — № 9. — С. 72—77.

19. *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.

20. *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. ГИАБ

REFERENCES

1. Lyngen H. B., Noldin H., Schmöle P. Trends in the development of iron smelting technological processes and assessment of iron ore and coal resources. *Chernye Metally*. 2016, no. 6, pp. 17 — 24.

2. Terekhin E. P., Chueva E. A., Khvorostyanova V. I. Improvement of re-enrichment technology to improve the quality of iron ore concentrate. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2023, no. 3(22), pp. 82 — 92. [In Russ]. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-3-82-93.

3. Pelevin A. E. Iron ore beneficiation technologies in russia and ways to improve their efficiency. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 589 — 592. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.61.

4. Pelevin A. E. Ways to improve the efficiency of iron ore beneficiation technology. *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific and technical information*. 2019, vol. 75, no. 2, pp. 137 — 146. [In Russ].

5. Aleksandrova T. N., Chanturia A. V., Kuznetsov V. V. Mineralogical and technological features and patterns of selective destruction of ferruginous quartzites of the Mikhailovskoye deposit. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 517 — 256. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_2_0_76.

6. Yakubaylik E. K., Ganzhenko I. M., Butov P. Yu., Kilin V. I. Reduction of iron losses during wet separation in high fields. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2016, no. 8, pp. 1302 — 1310. [In Russ]. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-8-1302-1310.

7. Hikmet Sisa, Tekin Karaağaça, Mustafa Birincia, Tufan Kıyaka Enrichment of low-grade magnetite ore by magnetic and gravity Separations: effect of particle size. *Madencilik*. 2021, vol. 60, no. 1, pp. 31 — 39. DOI: 10.30797/madencilik.796806.

8. Rodriguez V. A., Barrios G. K. P., Bueno G., Tavares L. M. Investigation of lateral confinement, roller aspect ratio and wear condition on HPGR performance using DEM-MBD-PRM simulations. *Minerals*. 2021, vol. 11, no. 8, article 801. DOI: 10.3390/min11080801.

9. Ismagilov R. I., Kozub A. V., Gridasov I. N., Shelepov E. V. Modern directions for increasing the efficiency of ferruginous quartzite processing on the example of JSC Mikhailovsky GOK named after A.V. Varichev. *Russian Mining Industry Journal*. 2020, no. 4, pp. 98 — 103. [In Russ]. DOI: 10. 30686/1609-9192-2020-4-98-103.

10. Qian Wang, Dong Wang, Quanxiang Yan Mechanism of a combined depressant of Fe^{3} and cornstarch on the flotation separation of magnetite and quartz. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2025, vol. 61, no. 5. http://www.journalssystem.com/ppmp.

11. Zhang X., Gu X., Han Y., Parra-Álvarez N., Claremboux V., Kawatra S. K. Flotation of iron ores: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2021, vol. 42, no. 3, pp. 184 — 212. DOI: 10.1080/08827508.2019.1689494.

12. Opalev A. S., Cherezov A. A. Experience in mastering magnetic-gravity separation at enterprises in Russia and the CIS countries to improve the quality of iron ore raw materials. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 3, pp. 122 — 128. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-3-122-128.

13. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Efficiency of screens and hydrocyclones in closed-cycle grinding of titanomagnetite ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2022, no. 5, pp. 154 — 166. [In Russ]. DOI: 10.250 18/0236_1493_2022_5_0_154.

14. 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. *Journal of Mining Science*. 2019, vol. 55, pp. 142 — 148. DOI: 10.1134/S1062739119015395.

15. Birinci M. Enrichment of apatite-bearing iron ore by magnetic separation and flotation. *European Journal of Technique*. 2021, vol. 11, no. 1.

16. Behnamfard A., Khaphaje E. Beneficiation of a low-grade iron ore by combination of wet low-intensity magnetic separation and reverse flotation methods. *Journal of Mining and Environment*. 2019, vol. 10, no. 1, pp. 197 — 212. DOI: 10.22044/jme.2018.7392.1595.

17. Grinenko V. I., Opalev A. S., Maevsky P. V., Karpov I. V. Improving the quality of iron ore concentrate at JSC SSGPO using magnetic-gravity separation. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 10, pp. 23 — 27. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.10.10.

18. Opalev A. S. Improving the quality of magnetite concentrates based on magnetic-gravity separation. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 9, pp. 72 — 77. [In Russ].

19. Sysa P. A., Lavrinenko A. A., Agarkov I. I. *Patent RU 27489116,* 2021. [In Russ].

20. Lavrinenko A. A., Sysa P. A. Forecasting the results of the magnetic hydrocycloning process for suspensions of beneficiated materials. *Journal of Mining Sciences*. 2023, no. 4, pp. 142 — 150. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20230415.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лавриненко Анатолий Афанасьевич[1] — д-р техн. наук,
главный научный сотрудник, зав. лабораторией,
e-mail: lavrin_a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7955-5273,
Сыса Павел Анатольевич[1] — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
e-mail: pavel_syssa@mail.ru, ORCID ID: 0009-0007-9883-8360,
[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.), Chief Researcher, Head of Laboratory,
e-mail: lavrin_a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7955-5273,
P.A. Sysa[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: pavel_syssa@mail.ru, ORCID ID: 0009-0007-9883-8360,
[1] Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.
Corresponding author: A.A. Lavrinenko, e-mail: lavrin_a@mail.ru.

Получена редакцией 09.09.2025; получена после рецензии 01.11.2025; принята к печати 17.11.2025.
Received by the editors 09.09.2025; received after the review 01.11.2025; accepted for printing 17.11.2025.

КОМПЕТЕНТНОСТЬ ПЕРСОНАЛА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ КАК ФАКТОР, ВЛИЯЮЩИЙ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ТРАВМАТИЗМ

(2025, № 11, СВ 22, 16 с.)

Овчинникова Татьяна Игоревна — д-р техн. наук, зав. кафедрой, НИТУ МИСИС, e-mail: ovchinnikova_ti@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-5849-6473; *Тертычная Светлана Вячеславовна* — канд. техн. наук, доцент, НИТУ МИСИС, e-mail: svetter@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9054-6178; *Бабуридис Айк Гаспарович* — специалист по охране труда, АО «РТК», e-mail: baburidis@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-4570-3928,
Арефьева Наталья Михайловна — начальник отдела, Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, e-mail: n.m.arefyeva@gmail.com, ORCID: 0009-0003-7524-0359.

Исследования показывают, что безопасность на рабочем месте зависит не только от уровня приобретенных знаний сотрудников, но и от их способности эффективно применять эти знания в условиях производства. Эта способность реализуется под воздействием многочисленных факторов и характеризуется как компетентность в сфере обеспечения безопасности труда. Критерии, определяющие уровень компетентности персонала, можно условно разделит на группы критериев компетентности: профессиональные, базовые и психофизиологические. Установленная зависимость показывает неоспоримое влияние компетентности персонала горнодобывающей промышленности на уровень травматизма, что дает возможность разработать эффективные мероприятия для повышения уровня компетентности персонала с целью снижения производственного травматизма.

Ключевые слова: горнодобывающая отрасль, компетентность персонала, производственный травматизм, критерии компетентности, безопасность труда, культура безопасности труда.

COMPETENCE OF MINING PERSONNEL AS A FACTOR INFLUENCING OCCUPATIONAL INJURIES

T.I. Ovchinnikova, Dr. Sci. (Eng.), Head of Chair, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: ovchinnikova_ti@mail.ru,
S.V. Tertychnaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia,
A.G. Baburidis, Occupational safety specialist, JSC «RTK» , 119180, Moscow, Russia, e-mail: baburidis@gmail.com,
N.M. Arefyeva, Head of Department, Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia, 105066, Moscow, Russia, e-mail: n.m.arefyeva@gmail.com, ORCID: 0009-0003-7524-0359.

Research shows that workplace safety depends not only on the level of knowledge acquired by employees, but also on their ability to effectively apply this knowledge in a production environment. This ability is realized under the influence of numerous factors and is characterized as competence in the field of occupational safety. The criteria that determine the level of competence of the staff can be divided into groups of competence criteria: professional, basic and psychophysiological. The established relationship in this work shows the undeniable influence of the competence of mining industry personnel on the level of injury, which makes it possible to develop effective measures to increase the level of competence of personnel in order to reduce occupational injuries.

Key words: mining industry, personnel competence, occupational injuries, competence criteria, occupational safety, occupational safety culture.