



## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СУХОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ РУД

Сединкина Н.А.<sup>1</sup>, Шавакулева О.П.<sup>1</sup>, Горлова О.Е.<sup>1,2</sup>, Панфилова О.Р.<sup>1</sup>, Швыдкий О.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Необходимость снижения себестоимости и повышения технико-экономических показателей обогащения железосодержащих руд ставит задачи совершенствования технологии обогащения и, в частности, схемы рудоподготовки, так как затраты на рудоподготовку достигают 40% общих затрат. Поэтому на многих горно-обогатительных комбинатах применяется сухая магнитная сепарация для выделения отвальных хвостов. Крупность руды, поступающей на сухую сепарацию, составляет 60(50)-15(10) мм. Руда крупностью 15(10)-0 мм сухой магнитной сепарацией не обогащается вследствие низкой эффективности сепарации на используемых барабанных сепараторах, а поступает на измельчение и мокрую магнитную сепарацию, что приводит к увеличению затрат на измельчение, обогащение и гидротранспорт. Поэтому применение сепараторов во взвешенном состоянии для повышения эффективности разделения железосодержащего сырья является весьма актуальной задачей. **Цель работы.** Установление оптимальных параметров сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии мелкодробленых железосодержащих руд с учетом особенностей их состава и свойств. **Используемые методы.** Исследования проводились на пробах магнетитовой руды Наследницкого месторождения, титаномагнетитовых руд Медведевского, Копанского и Чернореченского месторождений, а также сидеритовой руды Бакальского месторождения на установке для сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии. **Новизна.** Сухая магнитная сепарация во взвешенном состоянии характеризуется высокой избирательностью за счет оригинальной конструкции сепаратора с уменьшающейся по ходу перемещения материала напряженностью магнитного поля и с увеличенной активной зоной сепарации и обеспечивает получение высоких качественно-количественных показателей в случае обогащения мелкодробленых руд крупностью менее 10 мм различного состава. **Результат.** Сухая магнитная сепарация может быть эффективно использована для обогащения железных руд разного вещественного состава. **Практическая значимость.** Состоит в возможности использования сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии для обогащения мелкодробленых железных руд. Данный способ сепарации позволит повысить технико-экономические показатели обогащения и значительно снизить затраты на измельчение.

**Ключевые слова:** магнитная сепарация, магнетитовая руда, титаномагнетитовая руда, сидеритовая руда, рудоподготовка, вкрапленность, сепарация во взвешенном состоянии, эффективность обогащения

© Сединкина Н.А., Шавакулева О.П., Горлова О.Е., Панфилова О.Р., Швыдкий О.А., 2026

### Для цитирования

Оценка возможности сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии при обогащении железосодержащих руд / Сединкина Н.А., Шавакулева О.П., Горлова О.Е., Панфилова О.Р., Швыдкий О.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-5-14>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF DRY MAGNETIC SEPARATION IN A SUSPENDED STATE DURING THE ENRICHMENT OF IRON-CONTAINING ORES

Sedinkina N.A.<sup>1</sup>, Shavakuleva O.P.<sup>1</sup>, Gorlova O.E.<sup>1,2</sup>, Panfilova O.R.<sup>1</sup>, Shvydkiy O.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>2</sup>Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** The need to reduce the cost and improve the technical and economic performance of the enrichment of iron-containing ores sets the task of improving the enrichment technology and, in particular, the ore preparation scheme, as the cost of ore preparation reaches 40% of the total cost. Therefore, many mining and processing plants use dry magnetic separation to separate the tailings. The particle size of the ore entering dry separation is 60(50) – 15(10) mm. Ore with a particle size of 15(10)-0 mm is not enriched by dry magnetic separation due to the low efficiency of separation on the drum separators used, and is sent for grinding and wet magnetic separation, which leads to increased costs for grinding, enrichment, and hydrotransport. Therefore, the use of suspended separators to improve the efficiency of separation of iron-containing raw materials is a highly relevant task. **Objectives.** The research is aimed at establishing the optimal parameters for dry magnetic separation in a suspended state of finely crushed iron-containing ores, taking into account their composition and properties. **Methods Applied.** The studies have been conducted on samples of magnetite ore from the Naslednitsky deposit, titanium magnetite ore from the Medvedevsky, Kopansky, and Chernorechensky deposits, and siderite ore from the Bakalsky deposit using a unit for dry magnetic separation in a suspended state. **Originality.** Dry magnetic separation in a suspended state is characterized by high selectivity due to the original design of the separator, which has a decreasing magnetic field strength as the material moves and an increased active separation zone. This ensures high quality and quantity indicators in the case of enriching finely crushed ores with a particle size of less than 10 mm and various compositions. **Result.** Dry magnetic separation can be effectively used for the enrichment of iron ores of various compositions. **Practical Relevance.** It is possible to use dry magnetic separation in a suspended state for the enrichment of finely crushed iron ores. This separation method will improve the technical and economic performance of the enrichment process and significantly reduce the costs of grinding.

**Key words:** magnetic separation, magnetite ore, titanium magnetite ore, siderite ore, ore preparation, shot, separation in a suspended state, enrichment efficiency

## For citation

Sedinkina N.A., Shavakuleva O.P., Gorlova O.E., Panfilova O.R., Shvydkiy O.A. Assessment of the Possibility of Dry Magnetic Separation in a Suspended State During the Enrichment of Iron-Containing Ores. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-5-14>

## Введение

Черная металлургия – основной потребитель железного концентрата. Россия наряду с Австралией, Бразилией, Китаем и Индией входит в пятерку крупнейших производителей по объемам выпускаемой железорудной продукции (концентратов, окатышей, агломерата и продуктов прямого восстановления железа) и является одним из мировых лидеров по изготовлению стали.

Россия обладает богатой сырьевой базой железных руд и занимает второе место по запасам этого минерального сырья, но большинство из них не обладают высоким качеством. Так, по данным Государственного доклада о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году [1] балансовые запасы железных руд в нашей стране оцениваются в 118,4 млрд т. Они заключены в 207-ми месторождениях. На долю забалансовых запасов приходится 15 млрд т железных руд, которые сосредоточены в 23-х месторождениях

(рис. 1). Отмечено, что сырьевая база железных руд позволит обеспечить потребности российской экономики в долгосрочной перспективе до 2035 года.

Уральский федеральный округ является вторым регионом по запасам и добыче железных руд в России (15,9 % запасов), обеспечивающим 19,2% всей добычи. Основные запасы железа сосредоточены в месторождениях ванадийсодержащих титаномагнетитовых руд, наиболее крупными из которых являются Суроямское, Гусевогорское и Собственно-Качканарское месторождения [2]. Руды этих месторождений могут значительно снизить нехватку собственного железосодержащего сырья. Однако они относятся к труднообогатимым, требующим многостадийного обогащения и тщательной подготовки руды к обогащению [3]. Перспективным источником железорудного сырья на Южном Урале также могут стать значительные запасы бурожелезняковых руд в Зигазино-Комаровско-Инзерском районе Республики Башкортостан, которые в настоящее время не перерабатываются [4].



Были изучены руды Медведевского, Копанского, Чернореченского месторождений. По количественному соотношению рудных минералов эти месторождения делятся на сплошные титаномагнетитовые и вкрапленные. Размер зерен основной части рудных минералов (ильменита и титаномагнетита) колеблется от 1,5 до 0,5 мм. В состав руд входят силикатные минералы (пироксены, амфибол, плагиоклаз, сосюрит и др.) и рудные минералы (титаномагнетит, ильменит и магнетит). Доля этих руд в месторождении составляет около 78% при массовой доле диоксида титана до 7–9% и железа до 17–19%. Магнетит является наиболее распространенным минералом в составе как сплошных, так и вкрапленных руд. Содержание его составляет от 15–20 до 70–90%. Размеры зерен магнетита колеблются в широких пределах – от 0,05–0,08 до 1,5–2,0 мм. Вторым по степени распространения рудообразующим минералом является ильменит, содержание которого составляет от 10 до 30% от рудной массы. Химический анализ титаномагнетитовой руды показал значительную массовую долю в ней диоксида титана, которая достигает 12,0–12,7%. Массовая доля железа составляет 22,0–23,0%. Исследование структурно-текстурных особенностей руды показало, что зерна магнетита пронизаны точечными и пластинчатыми включениями ильменита.

Сидеритовая руда Бакальского месторождения относится к карбонатному типу. Карбонатные (сидеритовые) руды Бакала характеризуются сложным и непостоянным химико-минералогическим составом. Основным железорудным минералом данного месторождения является изоморфная смесь карбонатов железа, магния и марганца, которые встречаются в различном количественном соотношении – сидероплезит и пистомезит (до 80–95% рудной массы). Из нерудных минералов присутствуют кварц, анкерит, пирит, барит и другие минералы. Химический анализ руды показал массовую долю железа в пределах 28,2–32,5%. Изучение структуры сидерита свидетельствует о равномерно или неравномерно зернистой до тонко- и крупнозернистой. Форма зерен неправильная, близкая к изометрической. Текстура у сидеритовой руды и вмещающих карбонатных пород разнообразна.

Магнитное обогащение осуществляется в магнитных сепараторах, характерной особенностью которых является наличие в их рабочей зоне магнитного поля, в котором проявляется действие магнитных сил на намагниченные тела [14]. Действие этих сил объясняется наличием в телах быстро движущихся внутримолекулярных электрических зарядов. Разделение минеральных частиц по магнитным свойствам осуществляется успешно в том случае, когда эти магнитные свойства частиц существенно различаются между собой, а конструкция магнитного сепаратора обеспечивает необходимую селективность разделения по магнитным свойствам [15,16].

Физическая сущность магнитной сепарации заключается в том, что магнитное поле изменяет траекторию движения минералов, обладающих соответствующими магнитными свойствами, чем вызывает

их извлечение из потока других минералов, которые таких свойств не имеют.

В магнитных сепараторах применяются только неоднородные по напряженности поля, которые создаются соответствующей формой и расположением полюсов магнитной системы. Чем выше неоднородность поля, тем сильнее магнитная частица притягивается к полюсу в направлении сходимости магнитных силовых линий, которые выходят из северного и входят в южный полюс. Это изменение полярности вызывает переориентацию намагниченных частиц, что позволяет повысить качество концентрата.

Для обогащения железосодержащих руд применяются сепараторы для сухого и мокрого обогащения. Использование сухой сепарации имеет ряд преимуществ перед использованием сепараторов в водной среде [17]. Так, при использовании сухой магнитной сепарации руды удешевляется ее подготовка перед самой сепарацией вследствие резкого снижения затрат на электроэнергию, потребляемую мельницами, снижаются объемы руды, поступающие на дальнейшую переработку, повышается качество исходной руды, поступающей на мокрую магнитную сепарацию, что значительно сокращает количество самих операций обогащения. Однако процесс сухой магнитной сепарации усложняется тем, что в нем участвует большое количество частиц сепарируемого материала различной крупности, с различными физическими свойствами [18].

Известно, что одним из важнейших факторов, определяющих эффективность обогащения сухой магнитной сепарации, является крупность обогащаемого материала и различное соотношение магнитных и немагнитных минералов. В первом случае влияние оказывают различные механические свойства руды, отсюда разнообразная форма и размер раздробленной руды, во втором случае – расположение и доля железосодержащих зерен в руде.

Сепарация мелкодробленого материала в практике обогащения железосодержащих руд не нашла широкого использования за счет значительных потерь железа. С решением этой проблемы успешно справляется сепаратор во взвешенном состоянии (рис. 2).

Сухая магнитная сепарация во взвешенном состоянии является высокоэффективным процессом обогащения мелких продуктов, что объясняется практически полным отсутствием механического выноса немагнитных частиц в магнитный продукт, очисткой поверхности извлекаемых магнитных частиц от налипших мелких немагнитных и разрушением магнитных флокул в процессе сепарации.

В сепараторе обеспечивается неоднократное вытягивание частиц с различной скоростью из слоя материала и их отрыв от магнитной системы, что вызывает высвобождение и выпадение механически увлеченных частиц, самоочистку сталкивающихся частиц от налипших мелких частиц и повышение качества магнитного продукта в каждой последующей зоне сепарации.

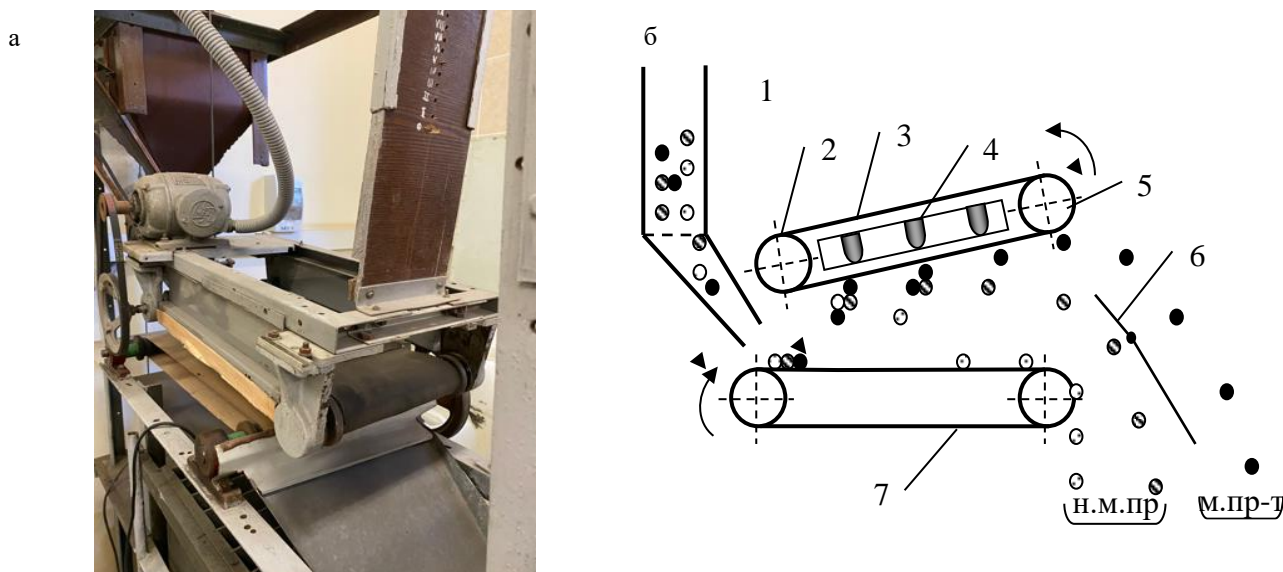


Рис. 2. Экспериментальная установка для сухой магнитной сепарации материала во взвешенном состоянии: а – фотография; б – принципиальная схема; 1 – бункер; 2 – хвостовой барабан; 3 – лента для съёма магнитного продукта; 4 – магнитная система; 5 – приводной барабан; 6 – регулирующий шибер; 7 – ленточный конвейер

Fig. 2. Experimental unit for dry magnetic separation of suspended material: a is photograph; б is schematic diagram; 1 is bunker; 2 is tail drum; 3 is magnetic product removal belt; 4 is magnetic system; 5 is drive drum; 6 is regulating gate; 7 is belt conveyor

За счет увеличения активной зоны сепарации повышается и полнота извлечения магнитных частиц. Уменьшение максимальной напряженности поля по ходу перемещения материала обеспечивает неоднократную перечистку магнитного продукта, образующегося в первой зоне сепарации. Поскольку в каждой зоне сепарации в первую очередь отрываються наиболее слабомагнитные и в последнюю очередь сильномагнитные частицы, то одновременно происходит подготовка материала к перечистке в каждой последующей зоне.

Все исследования выполнены на лабораторной установке для сухой магнитной сепарации материала во взвешенном состоянии. Для подготовки к исследованиям руда дробилась на лабораторной конусной дробилке типа ВКМД 10 до крупности 50-0 мм и подвергалась рассеву на ситах с размером отверстий 40, 30, 15, 10 и 7 мм. Для получения продукта крупностью 15-0, 10-0 и 7-0 мм использовались щековая типа ШД 6 и валковая ДВГ 200×125 дробилки. Проведены испытания на лабораторном барабанном магнитном сепараторе 138Т-СЭМ. Массовая доля железа в продуктах обогащения определялась титриметрическим методом по ГОСТ 32517.1-2013 (ISO2597-1:2005).

### Полученные результаты и их обсуждение

Магнетитовая руда относится к легкообогатимым рудам, поэтому для установления оптимальных параметров работы сепаратора во взвешенном состоянии была изучена магнетитовая руда Наследницкого месторождения [19-21].

Известно, что магнитная сепарация осуществляется только в неоднородном магнитном поле. При этом напряженность магнитного поля должна обеспечить магнитную силу, достаточную для перемещения частицы с определенной магнитной восприимчивостью в направлении большей напряженности поля. Изучение распределения напряженности магнитного поля в рабочей зоне установки для сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии показало, что силовые линии магнитного поля направлены в сторону перемещения материала, что способствует более эффективному извлечению магнетита в магнитный продукт. Благодаря чередующейся полярности магнитов и наличию межполюсного расстояния происходит перемешивание частиц, поворот их на определенный угол и отрыв от магнитной системы, что позволит очистить магнитный продукт от механически увлеченных немагнитных частиц и повысить качество концентрата [22, 23]. Определено, что максимальная напряженность магнитного поля на поверхности магнитной системы составляет 198 кА/м.

На характеристику поля многополюсной открытой магнитной системы оказывает влияние межполюсное расстояние ( $a$ , м), шаг полюсов ( $S$ , м), ширина полюса ( $b$ , м), а также форма полюсов или полюсных наконечников.

Результаты изучения влияния шага полюсов магнитной системы на технологические показатели обогащения магнетитовой руды Наследницкого месторождения крупностью 10-0 мм представлены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние шага полюсов на показатели обогащения  
Table 1. The effect of pole pitch on enrichment indicators

Наименование показателей обогащения	Шаг полюсов, м			
	0,10	0,13	0,16	0,19
Выход магнитного продукта, %	56,16	53,91	51,97	49,69
	58,32	54,56	52,17	51,46
Массовая доля железа в магнитном продукте, %	50,79	52,79	54,58	56,54
	49,09	52,35	54,18	54,23
Извлечение железа в магнитный продукт, %	88,04	87,84	87,54	86,72
	88,36	88,15	87,25	86,14

Примечание. Числитель – показатели при параллельном расположении лент, знаменатель – при угле, равном 10°; массовая доля железа в исходной руде составляет 32,4%.

Результаты изучения влияния шага полюсов на показатели обогащения магнетитовой руды показали, что при увеличении шага полюсов выход магнитного продукта и извлечение в него железа снижается, а массовая доля железа повышается. Это происходит вследствие того, что при увеличении шага полюсов магнитные частицы, попадая в зону действия первого магнита, образуют магнитные пряди. При перемещении ко второму магниту происходит отрыв и переориентация магнитных частиц, а также выпадение из прядей механически увлеченных частиц. При этом длина пряди уменьшается, а прочность повышается. Дальнейшее перемещение к третьему магниту обеспечивает практически полное удаление немагнитных частиц, что приводит к повышению качества концентрата. Оптимальное значение шага полюсов принимается равным 0,16 м.

На характеристику поля многополюсной системы оказывает отношение ширины полюса  $b$  к ширине межполюсного расстояния  $a$ . Экспериментально установлено, что оптимальным отношением  $b/a$  является 1,25.

Межполюсное расстояние магнитной системы установки для сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии является основным показателем, обеспечивающим эффективное разделение сильномагнитного мелкодробленного материала. Межполюсное расстояние обеспечивает отрыв частиц от магнитной системы и зависит от напряженности магнитного поля, высоты слоя руды и расстояния от магнитной системы до слоя руды. Для установления оптимального значе-

ния межполюсного расстояния магнитной системы при сепарации во взвешенном состоянии было изучено распределение напряженности магнитного поля и gradH в рабочей зоне сепаратора и влияние расстояния от магнитной системы (0; 0,005; 0,01 и 0,02 м) до слоя руды на напряженность магнитного поля и gradH. Установлено, что оптимальное расстояние от полюса до конвейерной ленты составляет 0,005–0,01 м.

Одним из показателей эффективной работы сепаратора является скорость перемещения материала. Влияние скорости перемещения материала на показатели разделения мелкодробленного материала крупностью 10-0 мм приведено в табл. 2.

Данные, приведенные в табл. 2, показывают, что при увеличении скорости перемещения тонкозернистого материала с 0,18 до 0,28 м/с выход магнитного продукта в него железа увеличивается с 54,87 до 55,85%, а извлечение возрастает с 84,95 до 88,55%, при этом и массовая доля железа в магнитном продукте увеличивается с 50,16 до 51,37%. Это объясняется тем, что при небольшой скорости перемещения материала происходит только переориентация и частичный разрыв наиболее длинных флокул и этого недостаточно для полного удаления немагнитных частиц из флокул. С увеличением скорости до 0,28 м/с и частоты поля качество магнитного продукта повышается за счет более интенсивного разрушения флокул. При дальнейшем увеличении скорости перемещения материала до 0,8 м/с происходит резкое снижение показателей обогащения. Это объясняется тем, что при такой скорости перемещения руды частицы не успевают оторваться от поверхности конвейерной ленты и все выделяются в магнитный продукт, тем самым загрязняя его. Таким образом, установлено, что оптимальное значение скорости перемещения материала в рабочей зоне сепаратора во взвешенном состоянии составляет 0,28 м/с.

Одним из важных параметров обогащения сухой магнитной сепарацией является крупность обогащаемого материала. Для интенсификации процесса сухой магнитной сепарации были проведены исследования по изучению влияния крупности магнетитовой руды на показатели обогащения (табл. 3).

Результаты магнитной сепарации магнетитовой руды различной крупности показали, что при снижении размера материала с 50-15 до 30-7 мм потери железа с немагнитным продуктом снизились с 11,5 до 9,36%. При этом массовая доля железа в магнитном продукте увеличивается почти на 1,8%. Таким образом, оптимальным значением крупности руды, поступающей на сухую магнитную сепарацию, является класс 30-7 мм.

Таблица 2. Влияние скорости перемещения мелкодробленного материала на показатели обогащения  
Table 2. Influence of the movement speed of finely crushed material on enrichment indicators

Наименование показателей обогащения	Скорость перемещения руды в рабочей зоне сепаратора, м/с						
	0,18	0,22	0,28	0,37	0,55	0,8	
Выход магнитного продукта, %	54,87	55,17	55,85	53,28	17,30	5,28	
Массовая доля железа в магнитном продукте, %	50,16	51,13	51,37	52,27	52,23	52,14	
Извлечение железа в магнитный продукт, %	84,95	87,07	88,55	85,97	27,89	8,5	

Примечание. Высота подъема магнитной системы 0,01 м; массовая доля железа в исходной руде составляет 32,4%.

Таблица 3. Результаты сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии магнетитовой руды различной крупности

Table 3. Results of dry magnetic separation of suspended magnetite ore of various particle sizes

Крупность руды, мм	Наименование продукта	Выход, %	Массовая доля железа, %	Извлечение железа, %
50-15	Магнитный	63,66	45,04	88,50
	Немагнитный	36,34	10,25	11,50
50-10	Магнитный	64,20	44,92	89,00
	Немагнитный	35,80	9,96	11,00
50-7	Магнитный	63,27	45,64	89,13
	Немагнитный	36,73	9,58	10,87
40-7	Магнитный	62,95	46,20	89,77
	Немагнитный	37,05	8,95	10,23
30-7	Магнитный	62,79	46,77	90,64
	Немагнитный	37,21	8,15	9,36

Примечание. Массовая доля железа в исходной руде составляет 32,4%.

Были проведены исследования сепарации во взвешенном состоянии при крупности магнетитовой руды 15-0, 10-0 и 7-0 мм. Результаты обогащения (табл. 4) показывают, что при уменьшении крупности руды выход магнитной фракции и извлечение в нее железа повышаются. Так, при снижении крупности руды с 15-0 до 7-0 мм выход магнитной фракции повышается с 33,46 до 42,48%, а извлечение железа увеличивается с 58,27 до 71,23%. При этом массовая доля железа в магнитной фракции снижается незначительно – с 56,42 до 54,32%. Это свидетельствует о высокой избирательности процесса сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии. Таким образом, исследования, проведенные на магнетитовой руде Наследницкого месторождения, позволили установить рациональные конструктивные и технологические параметры данного процесса.

Для оценки перспективности применения сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии мелкодробленого продукта для железных руд Медвед-

ского, Копанского и Чернореченского месторождений, а также сидеритовой руды Бакальского месторождения проведен сравнительный анализ обогащения этих руд на барабанном сепараторе и сепараторе во взвешенном состоянии, результаты которого представлены в табл. 5. Крупность исходного продукта составила 7-0 мм, напряженность магнитного поля на барабанном сепараторе и сепараторе во взвешенном состоянии – 105 кА/м, угол подъема магнитной системы – 10°, высота подъема частиц – 40 мм, скорость перемещения материала – 0,28 м/с.

Таблица 4. Влияние крупности руды на показатели обогащения

Table 4. The effect of ore particle size on enrichment indicators

Крупность руды, мм	Наименование продукта	Выход, %	Массовая доля железа, %	Извлечение железа, %
15-0	Магнитный	33,46	56,42	58,27
	Немагнитный	66,54	20,32	41,73
10-0	Магнитный	37,77	55,10	64,24
	Немагнитный	62,23	18,62	35,76
7-0	Магнитный	42,48	54,32	71,23
	Немагнитный	57,52	16,21	28,77

Примечание. Угол подъема магнитной системы – 10°, напряженность магнитного поля – 105 кА/м, высота подъема частиц – 40 мм, скорость перемещения материала – 0,28 м/с, массовая доля железа в исходной руде составляет 32,4%.

Полученные результаты магнитной сепарации различных железосодержащих руд показали эффективность применения сепарации во взвешенном состоянии. Использование совершенствованного способа магнитной сепарации дает повышение массовой доли железа в магнитном продукте в среднем на 5% и снижение потерь железа с хвостами обогащения в среднем на 12%. Проведенные исследования позволяют рекомендовать сухую магнитную сепарацию во взвешенном состоянии для обогащения магнетитовых, титаномагнетитовых и сидеритовых руд крупностью менее 10 мм.

Таблица 5. Результаты сравнительного магнитного разделения различных типов железных руд

Table 5. Results of comparative magnetic separation of different types of iron ores

Наименование руды	Наименование продукта	Способ магнитной сепарации			
		На барабанном сепараторе		Сепарация во взвешенном состоянии	
		Массовая доля железа, %	Извлечение, %	Массовая доля железа, %	Извлечение, %
Титаномагнетитовая Медведского месторождения	Магнитный	31,5	64,1	36,1	78,4
	Немагнитный	11,6	35,9	10,7	21,6
	Исходный	19,5	100,0	19,5	100,0
Титаномагнетитовая Копанского месторождения	Магнитный	30,3	65,9	34,9	77,2
	Немагнитный	14,5	34,1	9,9	22,8
	Исходный	22,1	100,0	22,1	100,0
Титаномагнетитовая Чернореченского месторождения	Магнитный	30,8	65,5	36,2	76,2
	Немагнитный	12,5	34,5	8,6	23,8
	Исходный	20,5	100,0	20,5	100,0
Сидеритовая Бакальского месторождения	Магнитный	35,4	60,5	42,8	71,0
	Немагнитный	21,9	39,5	15,7	29,0
	Исходный	28,5	100,0	28,5	100,0
Магнетитовая Наследницкого месторождения	Магнитный	52,3	67,1	57,3	79,1
	Немагнитный	18,24	32,9	12,3	20,9
	Исходный	32,4	100,0	32,4	100,0

### Заключение

Проведённые исследования подтвердили высокую эффективность и технологическую перспективность сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии для предварительного обогащения мелкодробленых железных руд (крупностью менее 10 мм) различного генезиса.

Основные научно-практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлены и оптимизированы ключевые параметры процесса для руды Наследницкого месторождения:

- оптимальный шаг полюсов магнитной системы – 0,16 м;
- оптимальная скорость перемещения материала в рабочей зоне – 0,28 м/с;
- рекомендуемое расстояние от магнитной системы до слоя руды – 40 мм;
- наиболее эффективная крупность питания для данного процесса – 7-0 мм.

2. Доказана принципиальная возможность и эффективность обогащения тонких классов (7-0 мм), что является значительным преимуществом сепарации во взвешенном слое перед традиционной сепарацией на барабанном сепараторе. Для магнетитовой руды Наследницкого месторождения крупностью 7-0 мм достигнуто извлечение железа в магнитный продукт на уровне 71,23%, при массовой доле железа 54,32%.

3. Проведён сравнительный анализ с традиционной барабанной сепарацией для широкого спектра руд. Установлено, что сепарация во взвешенном состоянии обеспечивает:

- повышение массовой доли железа в магнитном концентрате в среднем на 5%;
- снижение потерь железа с хвостами в среднем на 12 %.

Наиболее значимый эффект продемонстрирован для труднообогащаемых титаномагнетитовых руд (месторождения Медведевское, Копанское, Чернореченское), где извлечение железа возросло в среднем на 11-14%.

Таким образом, сухая магнитная сепарация во взвешенном состоянии представляет собой научно обоснованную и технологически отработанную альтернативу, способную решить актуальную проблему повышения эффективности обогащения мелкодробленых железных руд и снижения себестоимости концентрата.

### Список источников

1. Гальянов А.В., Яковлев В.Л., Гордеев В.А. Сырьевая база промышленного комплекса черной металлургии России. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 340 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году». 2024. 714 с.
3. Бузмаков В.Н., Володина Ю.В. Титаномагнетитовые месторождения как перспективная сырьевая база металлургии Урала (на основе опыта разработки Качкарской группы месторождений) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения

памяти П.Н. Чирвинского: сборник научных статей; ПГНИУ. Пермь, 2022. Вып. 25. С. 27-33.

4. Перспективы переработки бурожелезняковых руд Южного Урала / Колодежная Е.В., Горлова О.Е., Шадрунова И.В., Гаркави М.С., Хардин И.С., Шавакулева О.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 5-16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-5-16>.
5. Современные тенденции в развитии технологий переработки железных руд / Т.И. Юшина, Е.Л. Чантурия, А.М. Думов, А.В. Мясков // Горный журнал. 2021. № 11. С. 75-83.
6. Совершенствование технологии получения магнетитового концентрата при обогащении магнетит-апатитовых руд / А.С. Опалев, С.А. Алексеева, А.А. Паливода, Р.В. Калужная // Обогащение руд. 2024. № 3. С. 3-9.
7. Пелевин А.Е. Применение сухой магнитной сепарации в схемах обогащения ильменит-титаномагнетитовых руд // Обогащение руд. 2025. № 2. С. 32-37.
8. Пелевин А.Е. Моделирование результатов сухого магнитного обогащения слабомагнитных минералов в валковых сепараторах // Обогащение руд. 2024. № 1. С. 19-26.
9. Пелевин А.Е. Повышение эффективности обогащения железорудного сырья путем применения сепарации в повышенном магнитном поле // Черные металлы. 2022. № 1. С. 31-36.
10. Turkenich A.M., Lapshin E.S., Dudnik V. I. Continuous barrier separation of weakly magnetic ores in the field of repulsive magnetic force // Magnetic and Electrical Separation. 1997, vol. 8, no. 2, pp. 81-87.
11. Dry magnetic separation of magnetite ores / Chokin K.S., Yedilbayev A.I., Yedilbayev B.A., Yugay V.D. // Periodico Tchc Quimica. 2020. vol. 17, no. 34, pp. 700-710.
12. Едильбаев А.И. Разработка технологий обогащения бедного железорудного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 10. С. 247-251.
13. Пелевин А.Е. Оценка возможности снижения потерь железа с хвостами сухой магнитной сепарации // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXIX Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XXII Уральской горнопромышленной декады 01-10 апреля 2024 г. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. С. 6-9.
14. Сединкина Н.А. Влияние различных параметров на сепарацию промпродукта ДОФ-5 ОАО «ММК» // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 3(19). С. 22-25.
15. Газалеева Г.И., Сопина Н.А., Мушкетов А.А. Особенности технологии обогащения титаномагнетитовых руд Масальского месторождения (Республика Казахстан) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S1-4. С. 94-103.
16. Колокольцев В.М., Бигеев В.А., Ключковский С.П. Применение методов пиро- и гидрометаллургии для переработки сидеритовых руд // Горный журнал. 2012. № S3. С. 22-24.
17. Пути снижения уровня потерь при комплексной добыче и переработке железистых кварцитов / Рудская Л.В., Кулешов В.В., Новикова Г.И., Костромина Л.П. // Из-

- вестия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 3(48). С. 228-233.
18. Kuskov V.L., Lvov V.V., Yushina T.I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing // CIS Iron and Steel Review. 2021, no. 21, pp. 4-8.
  19. Ismagilov R.I., Yushina T.I., Dumov A.M. Contrast range examination of rich iron ore from Mikhailovskoe deposit and evaluation of possibility of its preliminary concentration via physical methods // CIS Iron and Steel Review. 2023, vol. 26, pp. 22-32.
  20. Чижевский В.Б., Сединкина Н.А., Шавакулева О.П. Изучение основных параметров магнитного поля установки для магнитной сепарации во взвешенном состоянии // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы Международной научно-технической конференции. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2008. С. 63-66.
  21. Чижевский В.Б., Горлова О.Е., Сединкина Н.А. Влияние конструктивных параметров установки на показатели сепарации мелкодробленых продуктов во взвешенном состоянии // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы Международной научно-технической конференции. Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2006. С. 266-270.
  22. Факторы, влияющие на процесс сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии / Сединкина Н.А., Павелин А.В., Хисаметдинова Д.Н., Мубаряков Р.С. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Магнитогорск, 2014. Т. 1. С. 39-42.
  23. Пелевин А.Е., Сытых Н.А., Черепанов Д.В. Влияние крупности частиц на эффективность сухой магнитной сепарации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 11-1. С. 293-305. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_293.
  - processing. *Gorniy zhurnal* [Mining Journal]. 2021;(11):75-83. (In Russ.)
  6. Opalev A.S., Alekseeva S.A., Palivoda A.A., Kalyuzhnaya R.V. Improving the technology for obtaining magnetite concentrate in the processing of magnetite apatite ores. *Obogashchenie Rud* [Ore enrichment]. 2024;(3):3-9. (In Russ.)
  7. Pelevin A.E. Application of dry magnetic separation in beneficiation processes for ilmenite-titanomagnetite ores. *Obogashchenie Rud* [Ore enrichment]. 2025;(2):32-77. (In Russ.)
  8. Pelevin A.E. Modeling of dry magnetic separation results for weakly magnetic minerals processed in roll separators. *Obogashchenie Rud* [Ore enrichment]. 2024;(1):19-26. (In Russ.)
  9. Pelevin A.E. Increasing the efficiency of iron ore raw materials beneficiation by separation in an increased magnetic field. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2022;(1):31-36. (In Russ.)
  10. Turkenich A.M., Lapshin E.S., Dudnik V.I. Continuous barrier separation of weakly magnetic ores in the field of repulsive magnetic force. *Magnetic and Electrical Separation*. 1997;8(2):81-87.
  11. Chokin K.S., Yedilbayev A.I., Yedilbayev B.A., Yugay V.D. Dry magnetic separation of magnetite ore. *Periodico Tche Quimica*. 2020;17(34):700-710.
  12. Yedilbayev A.I. Development of technologies for enrichment of poor iron ore raw materials. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin]. 2011;(10):247-251. (In Russ.)
  13. Pelevin A.E. Assessment of the possibility of reducing iron losses with the tailings of dry magnetic separation. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya. Materialy XXIX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, provodimoy v ramkah XXII Uralskoy gornopromyshlennoy dekady* [Scientific foundations and practice of processing ores and man-made raw materials. Proceedings of the XXIX The International Scientific and Technical Conference held within the framework of the XXII Ural Mining Decade]. Yekaterinburg: Publishing House of Ural State Mining University, 2024, pp. 6-9. (In Russ.)
  14. Sedinkina N.A. Influence of various parameters on the separation of the intermediate product DOF-5 of JSC MMK. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2007;(3(19)):22-25. (In Russ.)
  15. Gazaleeva G.I., Sopina N.A., Mushketov A.A. Features of the technology of processing titanium-magnetite ores of the Masalsky deposit (Republic of Kazakhstan). *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin]. 2015;(S1-4):94-103. (In Russ.)
  16. Kolokoltsev V.M., Bigeev V.A., Klochkovskiy S.P. Application of methods of pyro- and hydrometallurgy for processing of siderite ores. *Gorniy zhurnal* [Mining Journal]. 2012;(S3):22-24. (In Russ.)
  17. Rudskaya L.V., Kuleshov V.V., Novikova G.I., Kostromina L.P. Ways to reduce losses during complex mining and processing of ferruginous quartzites. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Southwestern State University]. 2013;(3(48)): 228-233. (In Russ.)

### References

1. Galyanov A.V., Yakovlev V.L., Gordeev V.A. *Syrevaya baza promyshlennogo kompleksa chernoy metallurgii Rossii* [Raw materials base of Russia's iron and steel industry complex]. Vologda: Infra-Engineering Publishing House LLC, 2022, 340 p. (In Russ.)
2. State Report "On the state and use of mineral resources in the Russian Federation in 2023". 2024, 714 p. (In Russ.)
3. Buzmakov V.N., Volodina Yu.V. Titanomagnetite deposits as a promising raw material base for metallurgy in the Urals (based on the experience of developing the Kachkanar group of deposits). *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo. Sbornik nauchnykh statei* [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky. Collection of scientific articles]. PGNIU. Perm. 2022, Iss. 25, pp. 27-33 (In Russ.)
4. Kolodezhnaya E.V., Gorlova O.E., Shadrinova I.V., Garkavi M.S., Khardin I.S., Shavakuleva O.P. Prospects for processing the low-grade brown iron ores of the Southern Urals. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025;23(3):5-16. (In Russ.)
5. Yushina T.I., Chanturia E.L., Dumov A.M., Myaskov A.V. Modern trends of technological advancement in iron ore

18. Kuskov V.L., Lvov V.V., Yushina T.I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing. CIS Iron and Steel Review. 2021;(21):4-8.
19. Ismagilov R.I., Yushina T.I., Dumov A.M. Contrast range examination of rich iron ore from Mikhailovskoe deposit and evaluation of possibility of its preliminary concentration via physical methods. CIS Iron and Steel Review. 2023;26:22-32.
20. Chizhevsky V.B., Sedinkina N.A., Shavakuleva O.P. Study of the main parameters of the magnetic field of a magnetic separation unit in a suspended state. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Scientific foundations and practice of processing ores and man-made raw materials. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Yekaterinburg: Fort Dialog-Iset, 2008, pp. 63-66. (In Russ.)
21. Chizhevsky V.B., Gorlova O.E., Sedinkina N.A. Influence of the design parameters of the unit on the separation indicators of finely crushed products in a suspended state. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Scientific foundations and practice of processing ores and man-made raw materials. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Yekaterinburg: AMB Publishing House, 2006, pp. 266-270. (In Russ.)
22. Sedinkina N.A., Pavelin A.V., Khisametdinova D.N., Mubaryakov R.S. Factors affecting the process of dry magnetic separation in a suspended state. *Aktualnye problem sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Actual problems of modern science, technology and education]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, vol. 1, pp. 39-42. (In Russ.)
23. Pelevin A.E., Sytykh N.A., Cherepanov D.V. Particle size impact on dry magnetic separation efficiency. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin]. 2021;(11-1):293-305. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_293

Поступила 30.10.2025; принята к публикации 27.01.2026; опубликована 31.03.2026  
Submitted 30/10/2025; revised 27/01/2026; published 31/03/2026

**Сединкина Наталья Анатольевна** – кандидат технических наук, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: magnetyt@mail.ru. ORCID0000-0003-0060-8203.

**Шавакулева Ольга Петровна** – кандидат технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: shavakylevao@yandex.ru. ORCID 0000-0001-6291-2687.

**Горлова Ольга Евгеньевна** – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия. E-mail: gorlova\_o\_e@mail.ru. ORCID 0000-0003-1142-0652.

**Панфилова Ольга Рашидовна** – кандидат технических наук, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: halikova@inbox.ru. ORCID0000-0001-6395-6948.

**Швыдкий Олег Алексеевич** – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: 2005god.oleg@mail.ru.

**Natalya A. Sedinkina** – PhD (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: magnetyt@mail.ru. ORCID 0000-0003-0060-8203

**Olga P. Shavakyleva** – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shavakylevao@yandex.ru. ORCID 0000-0001-6291-2687

**Olga E. Gorlova** – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; Lead Researcher, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: gorlova\_o\_e@mail.ru. ORCID 0000-0003-1142-0652.

**Olga R. Panfilova** – PhD (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: halikova@inbox.ru. ORCID 0000-0001-6395-6948.

**Oleg A. Shvydkiy** – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: 2005god.oleg@mail.ru.