

Повышение эффективности обезвоживания железорудного концентрата на основе реагентного модифицирования поверхности магнетита

Е.Д. Чылбак-оол^{1,2}, Ю.В. Конюхов¹ ✉, Е.С. Пермякова¹, Б.Е. Горячев¹, В.Г. Миненко³

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

² ООО «Научно-технический центр «Бакор», г. Щербинка, Российская Федерация

³ Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

✉ ykonukhov@misis.ru

Резюме: Исследование направлено на решение проблемы снижения эффективности процесса фильтрации железорудных магнетитовых концентратов на керамических дисковых вакуум-фильтрах вследствие внедрения горно-обогажительными комбинатами дополнительной стадии обратной флотации для максимального снижения содержания SiO₂ в камерном продукте, требующей проведения более тонкого измельчения и использования в качестве флотационных реагентов декстрина и аминов.

Предложен способ реагентной модификации поверхности магнетита с целью повышения ее гидрофильности и создания условий для формирования агрегатов, не имеющих внутренних закрытых пор. Изучено влияние флотационных реагентов: крахмала (гидролизованного щелочью) в комбинации с 3-(изодецилокси)пропиламином и полимеров (реагент А – анионный полиэлектролит на основе акриламида и акрилата натрия; реагент К – катионный коагулянт на основе полидиаллилдиметиламмония хлорида) на смачиваемость и электроповерхностные свойства промышленного магнетитового концентрата (содержание Fe₃O₄ 97+%) и аншлифов магнетита. На основании результатов измерений краевого угла смачивания, электродного и дзета-потенциала концентрата и аншлифов магнетита до и после обработки исследуемыми реагентами установлено, что оптимальные фильтрационные свойства концентрата достигаются не минимизацией отдельных параметров поверхности, а балансировкой всех трех характеристик через целенаправленный подбор реагентов. Установлено, что катионный полимер (реагент К) проявляет комбинированный механизм действия: нейтрализует отрицательный заряд (способствуя коагуляции) и одновременно гидрофилизует поверхность, частично экранируя гидрофобные радикалы амина. Это делает его наиболее эффективным агентом при обезвоживании флотационных магнетитовых концентратов.

Ключевые слова: железорудный концентрат, магнетит, фильтрация магнетита, флокулянты, дзета-потенциал, электродный потенциал, угол смачивания, модифицирование поверхности, обратная катионная флотация, обезвоживание концентрата

Для цитирования: Чылбак-оол Е.Д., Конюхов Ю.В., Пермякова Е.С., Горячев Б.Е., Миненко В.Г. Повышение эффективности обезвоживания железорудного концентрата на основе реагентного модифицирования поверхности магнетита. *Горная промышленность*. 2026;(2):78–84. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-78-84>

Enhancing the dewatering efficiency of iron ore concentrate by agent modification of the magnetite surface

E.D. Chylbak-ool^{1,2}, Yu.V. Konyukhov¹ ✉, E.S. Permyakova¹, B.E. Goryachev¹, V.G. Minenko³

¹ National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation

² Bacor STC LLC, Shcherbinka, Russian Federation

³ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ ykonukhov@misis.ru

Abstract: This study aims to address the issue of reduced filtration efficiency of magnetite iron ore concentrates in ceramic disc vacuum filters due to the introduction by mining and processing plants of an additional reverse flotation stage to minimize the SiO₂ content in the flotation tails, which requires finer grinding and utilization of dextrin and amines as flotation agents.

This work proposes a method for reagent-based modification of the magnetite surface to increase its hydrophilic properties and create conditions for formation of aggregates free of internal closed pores. The study examines the effect of the following

flotation agents: starch (alkali-hydrolyzed) in combination with 3-(isodecyloxy)propylamine and polymers (agent A being an anionic polyelectrolyte based on acrylamide and sodium acrylate; agent K being a cation coagulating agent based on polydiallyldimethylammonium chloride) on the wetting and electrostatic properties of the commercial magnetite concentrate (Fe_3O_4 content of 97%) and magnetite polished section. The results of measuring the limiting wetting angle, electrode and zeta potentials of the concentrate and the polished sections of magnetite before and after treatment with the examined agents helped to establish that the optimal filtration properties of the concentrate are achieved not by minimizing the individual surface parameters, but by balancing all the three characteristics through a targeted selection of agents. It was found that the cationic polymer (agent K) exhibits a combined mechanism of action, i.e. it neutralizes the negative charge promoting coagulation and simultaneously makes the surface hydrophilic, partially shielding the hydrophobic amine radicals. This makes it the most efficient agent for dewatering flotation magnetite concentrates.

Keywords: iron ore concentrate, magnetite, magnetite filtration, flocculants, zeta potential, electrode potential, wetting angle, surface modification, reverse cationic flotation, concentrate dewatering

For citation: Chylbak-ool E.D., Konyukhov Yu.V., Permyakova E.S., Goryachev B.E., Minenko V.G. Enhancing the dewatering efficiency of iron ore concentrate by agent modification of the magnetite surface. *Russian Mining Industry*. 2026;(2):78–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-78-84>

Введение

Разделение твердой и жидкой фаз представляет собой ключевую операцию в технологических цепочках обогащения полезных ископаемых и гидрометаллургических процессах [1; 2]. Однако эффективность традиционных методов разделения резко снижается при работе с ультрадисперсными суспензиями, характеризующимися высокой стабильностью и медленной кинетикой осаждения [3; 4]. Для преодоления этих ограничений широко применяются синтетические полимерные флокулянты, способствующие агрегации мелких частиц в крупные флоккулы. Эффективность процесса определяется комплексным взаимодействием физико-химических свойств поверхности минерала, типа и дозировки флокулянта, а также параметров среды (pH, ионная сила, температура) [5–7].

К наиболее используемым флокулянтам для осаждения магнетита относятся синтетические полиакриламиды (ПАА), крахмал и неорганические коагулянты [8]. При этом анионные полиакриламиды с разной степенью заряда, как правило, используют совместно с диспергаторами, что обеспечивает повышение селективности процесса осаждения [9].

В последнее время значительное количество исследований посвящено разработке нового класса полусинтетических флокулянтов на основе модификации полисахаридов [10; 11]. Широкое использование сополимерных флокулянтов на основе полисахаридных полимеров обусловлено их высокой молекулярной массой и адсорбционной способностью, которые обеспечивают высокую эффективность в связывании с тонкодисперсными взвешенными частицами и, как следствие, высокую скорость их осаждения в виде крупных флоккул [12]. Основной принцип флокуляции сополимерными флокулянтами заключается в адсорбции полимера на поверхности частиц, образовании межчастичных мостиков (макромолекула флокулянта одновременно закрепляется на нескольких разных частицах) и нейтрализации заряда частиц (сжатие двойного электрического слоя). В случае системы, содержащей противоположно заряженный полиэлектролит и дисперсные частицы, механизм нейтрализации заряда отвечает за формирование первичного флока [13]. Механизм нейтрализации заряда – это процесс, при котором полиэлектролит используется для уменьшения электростатического отталкивания частиц и способствует агрегации взвешенных частиц [14; 15]. При этом электростатическое отталкивание двойного

слоя (дзета-потенциал) обычно является наиболее значительным. Физическая адсорбция включает в себя присоединение молекул коллекторов через электростатическое притяжение между заряженными функциональными группами, в то время как химическая адсорбция приводит к образованию сильных, стабильных связей между ПАВ и ионами металлов на поверхности. Оба механизма изменяют заряд поверхности частиц, тем самым влияя на поведение агрегации.

В связи с вышеизложенным целью работы являлось исследование механизма влияния флотационных реагентов и полимерных модификаторов на комплекс поверхностных свойств магнетита (смачиваемость, дзета- и электродный потенциал) для определения параметров, обеспечивающих повышение эффективности фильтруемости концентрата.

Материалы и методы

Объект исследования

В качестве исходного материала был выбран флотационный железорудный концентрат, отобранный с промышленной линии обезвоживания: проба сформирована из осадка керамических дисковых вакуум-фильтров типа КДФ-90. Концентрат характеризуется высоким содержанием общего железа (69,7%) и низкой долей кремнезема (2,4%). Анализ гранулометрического состава (рис. 1)

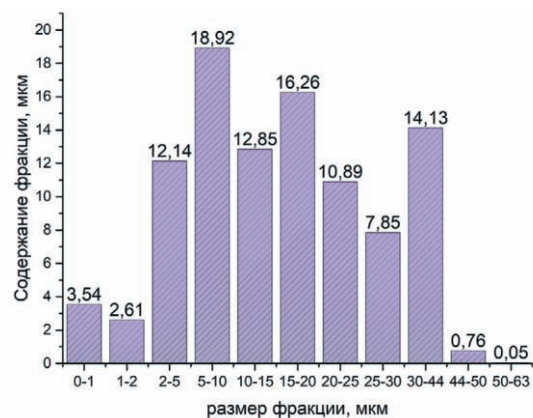


Рис. 1
Гранулометрический состав исходной пробы флотационного железорудного концентрата

Fig. 1
Particle size distribution in the initial sample of the iron ore flotation concentrate

выявил высокое (более 37%) содержание ультратонкой фракции (–10 мкм), размеры частиц которой соизмеримы с порами керамических фильтрующих элементов (1,8–10,5 мкм в зависимости от модификации). Такое совпадение размерных диапазонов обуславливает закупоривание пор фильтрующей перегородки и, как следствие, ухудшение фильтрационных характеристик.

Модификация поверхности частиц магнетита

Частицы имеют ограниченное количество поверхностных участков, на которые могут адсорбироваться полимеры. Эффективность сорбции напрямую связана с химическим составом и зарядом как модифицирующего агента, так и обрабатываемого минерала. Для сравнительной оценки влияния реагентов на эффективность и скорость агрегации частиц магнетита из железорудного концентрата выбраны четыре соединения: 3-(изодецилокси)пропиламин (далее «амин») – реагент собиратель пустой породы; декстрин (щелочной кукурузный крахмал) – реагент депрессор магнетита при обратной катионной флотации; высокомолекулярный полиэлектролит со средним анионным зарядом на основе акриламида и акрилата натрия (далее «реагент А») и полимерный катионный коагулянт на основе полидиаллилдиметиламмония хлорида (далее «реагент К»), характеризующийся высокой флокулирующей способностью и плотностью заряда. Выбранные аббревиатуры указывают на «знак» заряда соответствующего реагента: реагент А – анионный, реагент К – катионный.

Из железорудного концентрата готовили водную суспензию (250 мл) с содержанием твердой фазы 50% (масс.), жидкую фазу которой подщелачивали за счет добавления 1%-ного водного раствора гидроксида натрия до значений pH = 9–10. В подготовленную суспензию добавляли реагенты в соответствии с выбранными режимами (табл. 1), после дозировки каждого реагента суспензия интенсивно перемешивалась 5 мин. После обработки осадки фильтровали на воронке Бюхнера через фильтр обеззоленный «синяя лента» и сушили при комнатной температуре.

Измерения краевого угла смачивания

Для измерения краевого угла смачивания из порошков магнетита (исходного и модифицированных) были спрес-

сованы таблетки диаметром 10 мм при усиллии 5 т на квадратный сантиметр с использованием 50-тонного гидравлического пресса (Киевский РМЗ, Украина). Гидрофильность/гидрофобность полученных образцов оценивали методом измерения краевого угла смачивания по модели «лежащей капли» с использованием оборудования Easy Drop Kruss (KRÜSS, Германия). В качестве тестовой смачивающей жидкости применяли дистиллированную воду. Измерительная установка оснащена цифровой видеокамерой формата FireWire (IEEE 1394) и программным обеспечением C200SW, что позволяет регистрировать видеоизображение капли и осуществлять автоматизированный анализ геометрических характеристик её профиля в реальном времени.

Измерение дзета-потенциала

Готовили водную суспензию из образцов магнетита (исходного и модифицированных) в концентрации 10 мг/мл, pH суспензии довели до значений 9–10 за счет добавления 1%-ного раствора NaOH. Суспензия вводилась в кювету прибора для измерения дзета-потенциала (кюветы DTS1070). Дзета-потенциал определяли на приборе Zetasizer Nano ZS (Malvern Panalytical, Malvern, Великобритания).

Измерение электродного потенциала

Для подготовки экспериментального образца использовался природный кристалл магнетита. Из исходного образца были вырезаны пластинки толщиной 4 мм. Одна из поверхностей каждой пластинки подвергалась механической полировке. На противоположную поверхность наносился токопроводящий серебросодержащий клей (Keller, Россия), после чего фиксировался медный контактный провод. Далее образец полностью герметизировался парафином методом погружения с последующим контролируемым охлаждением, за исключением полированной рабочей поверхности, которая оставалась открытой для проведения измерений. Данная процедура обеспечивала электроизоляцию боковых граней и контактной зоны.

Измерения проводились на портативном многофункциональном исследовательском приборе «ЭЛ-02.06» (изготовитель – научно-производственная фирма «Элнитекс»), принципиальная схема которого представлена на рис. 2.

Таблица 1
Режимы модификации частиц магнетитового концентрата реагентами

Table 1
Process conditions for modification of the magnetite concentrate particles with chemical agents

№	Обозначение	Описание
1	Исх.	Исходный необработанный концентрат/минерал
2	Д	Добавление раствора декстрина к исходному образцу из расчета 900 мг/л жидкой фазы, перемешивание в течение 5 мин
3	Ам	Добавление раствора амина к исходному образцу из расчета 300 мг/л жидкой фазы, перемешивание в течение 5 мин
4	Д+Ам	Добавление раствора декстрина (900 мг/л), перемешивание в течение 5 мин, добавление раствора амина (300 мг/л), перемешивание в течение 5 мин
5	Д+Ам+Р(А)	Добавление раствора декстрина (900 мг/л), перемешивание в течение 5 мин, добавление раствора амина (300 мг/л), перемешивание в течение 5 мин, добавление раствора реагента А (30 мг/л), перемешивание в течение 5 мин
6	Д+Ам+Р(К)	Добавление раствора декстрина (900 мг/л), перемешивание в течение 5 мин, добавление раствора амина (300 мг/л), перемешивание в течение 5 мин, добавление раствора реагента К (30 мг/л), перемешивание в течение 5 мин

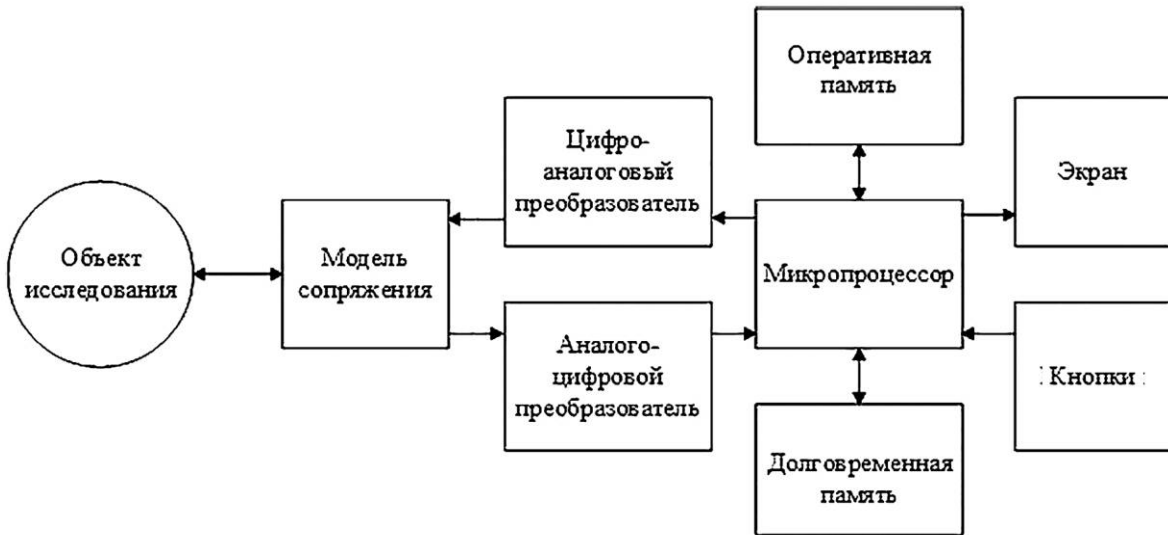


Рис. 2
Принципиальная схема прибора ЭЛ-02.06

Fig. 2
A functional diagram of the EL-02.06 device

Основными функциями прибора являются программное регулирование заданного напряжения на исследуемом объекте в режиме «потенциостат» или заданного тока через исследуемый объект в режиме «гальваностат» и регистрация параметров напряжения, тока и времени исследуемого процесса. В данной работе прибор использовался в режиме «гальваностат» по двухэлектродной схеме: рабочий электрод – образцы на основе магнетита, электрод сравнения – стандартный хлорсеребряный электрод. Для оценки влияния реагентов рабочий электрод помещался в растворы реагентов на 5 мин.

Исходные образцы (режим 1) демонстрируют выраженные гидрофильные свойства, что согласуется со способностью магнетита легко смачиваться из-за высокой полярности и способности к гидратации поверхности. Отрицательное значение дзета-потенциала исходного магнетита при pH 9–10 согласуется с ранее опубликованными работами [16–18], указывает, что на поверхности атомы железа в зоне адсорбции теряют электроны, а кислород на поверхности, с которой связывается диссоциированный водород, притягивает электроны, что обеспечивает адсорбцию гидроксильных групп или ионов в водной среде во

Результаты и их обсуждение

Обоснование реагента, обеспечивающего нивелирование негативного влияния флотационных реагентов, являлось ключевой задачей проводимого исследования. В связи с чем в работе изучено влияние выбранных реагентов на краевой угол смачивания, дзета-потенциал (табл. 2) и электродный потенциал (рис. 3) исследуемых образцов магнетита.

Таблица 2
Значения краевого угла смачивания и дзета-потенциала для исходного и модифицированного магнетитового концентрата

Table 2
The limiting wetting angle and zeta potential values for the initial and modified magnetite concentrate

№	Обозначение	Значение краевого угла смачивания, °	Значение дзета-потенциала, мВ
1	Исх.	22,7 ± 1,1	-13,7 ± 0,3
2	Д	30,0 ± 1,3	-17,5 ± 0,5
3	Ам	34,2 ± 1,0	-8,7 ± 0,8
4	Д+Ам	30,7 ± 0,9	-15,6 ± 0,4
5	Д+Ам+Р(А)	30,5 ± 0,9	-17,2 ± 0,4
6	Д+Ам+Р(К)	27,1 ± 1,2	-8,5 ± 0,9

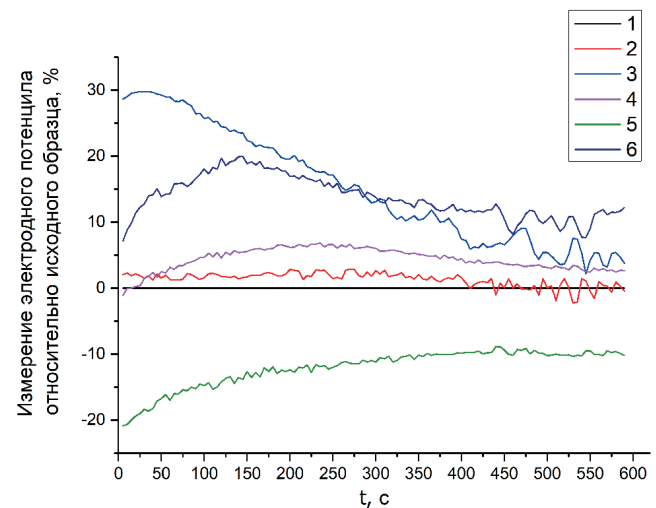


Рис. 3
Изменение электродного потенциала магнетитовых электродов после выдержки в растворах с модификаторами (2 – Д; 3 – Ам; 4 – Д+Ам; 5 – Д+Ам+Р(А); 6 – Д+Ам+Р(К)), нормированных на значение электродного потенциала исходного магнетита (1)

Fig. 3
Changes in the electrode potential of the magnetite electrodes upon their exposure in solutions containing modifiers (2 – Д; 3 – Ам; 4 – Д+Ам; 5 – Д+Ам+Р(А); 6 – Д+Ам+Р(К)), normalized with respect to the electrode potential value of the initial magnetite (1)

внешней обкладке ДЭС частиц магнетита. Это типично для железосодержащих минералов в нейтрально-щелочной среде. Электродный потенциал магнетитового электрода с необработанной поверхностью исследованными реагентами принят за базовое значение (0% отклонения). Такое сочетание характеристик обеспечивает естественную склонность к коагуляции, однако наличие ультратонких классов требует дополнительной модификации для эффективного обезвоживания.

Введение реагентов при обратной флотации магнетита существенно изменяет поверхностные свойства минерала, что негативно сказывается на подготовке флотационного магнетитового концентрата к фильтрации. Так, при введении декстрина (режим 2) наблюдается незначительное увеличение краевого угла смачивания, будучи гидрофильным полисахаридом, данный реагент не делает поверхность гидрофобной, но может незначительно изменять структуру адсорбционного слоя, обеспечивая повышение краевого угла за счёт упорядочения воды или образования тонкой пленки с меньшей энергией взаимодействия с водой, что также способствует увеличению отрицательного значения дзета-потенциала. Данный эффект обусловлен специфической хемосорбцией молекул декстрина на поверхности минерала посредством образования координационных связей между гидроксильными группами полисахарида и поверхностными атомами железа. Отрицательный сдвиг дзета-потенциала также может быть связан с диссоциацией адсорбированных гидроксильных групп декстрина в приповерхностном слое. Электродный потенциал показывает слабую динамику, незначительный положительный сдвиг вначале около +2 %, сменяющийся к околонулевым значениям к концу измерений.

Обработка амином (режим 3) приводит к заметному повышению краевого угла смачивания, демонстрируя максимальное значение среди всех тестируемых образцов (рис. 4), что, вероятно, обусловлено содержанием в составе модификатора длинной гидрофобной алкильной цепи (C_{12}), которая, адсорбируясь на поверхности, частично экранирует гидрофильные участки магнетита.

Дзета-потенциал снижается по модулю, что свидетель-

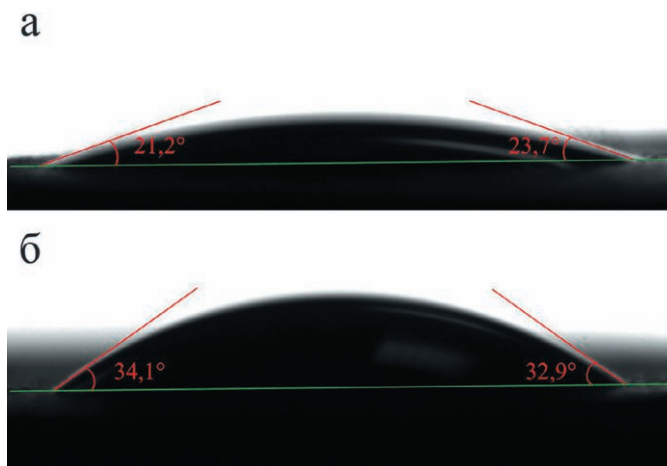


Рис. 4
Краевой угол смачивания магнетитового концентрата:
а – исходный (1),
б – обработанный амином (3)

Fig. 4
The limiting wetting angle of the magnetite concentrate:
а – initial sample (1),
б – amine-modified sample (3)

ствует о компенсации поверхностного заряда за счет адсорбции катионных форм коллектора. Механизм адсорбции амина включает электростатическое взаимодействие положительно заряженных аммониевых групп с отрицательно заряженными центрами на поверхности магнетита, а также гидрофобные взаимодействия углеводородных радикалов. Электродный потенциал демонстрирует высокий положительный сдвиг (+28 % на 5-й секунде), указывающий на интенсивное электрохимическое взаимодействие. Несмотря на снижение заряда дзета-потенциала частичная гидрофобизация поверхности аминами способствует образованию агрегатов с закрытыми порами, удерживающими влагу, что снижает скорость фильтрации.

При последовательном введении реагентов (режим 4), моделирующем обработку поверхности при обратной катионной флотации, наблюдается конкурентная адсорбция. Краевой угол смачивания, дзета-потенциал и электродный потенциал занимают промежуточные значения. Это указывает на конкурентный характер адсорбции данных реагентов за активные центры поверхности. Декстрин частично экранирует активные центры, предотвращая полную гидрофобизацию амином, однако совокупный эффект сохраняет тенденцию к стабилизации суспензии и ухудшению водоотдачи по сравнению с исходным минералом.

Добавление реагента А (режим 5) к флотационному концентрату не оказывает существенного влияния на смачиваемость, но усиливает отрицательное значение дзета-потенциала. На графике электродного потенциала фиксируется устойчивый отрицательный сдвиг (от -20% до -10%). Несмотря на мостиковый механизм флокуляции высокий энергетический барьер отталкивания делает данный режим неэффективным для задач повышения эффективности обезвоживания флотационных магнетитовых концентратов.

Реагент К (режим 6) демонстрирует наиболее благоприятное сочетание изменения поверхностных свойств. Краевой угол смачивания уменьшается по сравнению с режимами 2 и 4, что указывает на гидрофилизацию поверхности. Предположительно реагент К вытесняет или экранирует гидрофобные радикалы амина, восстанавливая способность поверхности к смачиванию водой. Дзета-потенциал снижается по модулю даже ниже, чем у исходного образца, что свидетельствует об эффективной нейтрализации отрицательного заряда катионными группами полимера. Это снижает электростатическое отталкивание и способствует коагуляции. Наблюдается положительный сдвиг электродного потенциала с тенденцией к росту во времени (от +7% до +20%). Это коррелирует с нейтрализацией поверхностного заряда и свидетельствует об активирующем действии реагента.

Выводы

1. Выявленная корреляция между изменениями дзета-потенциала и электродного потенциала, открывает возможность использования электрохимических измерений электродного потенциала магнетитового электрода в качестве экспресс-метода прогнозирования эффективности обезвоживания железорудных концентратов.
2. Установлено, что улучшение фильтруемости железорудного концентрата определяется не только адсорбцией модификаторов на поверхности магнетита, но и типом формируемого адсорбционного

слоя. Обработка катионным полимером (реагент К) приводит к формированию адсорбционного слоя, который одновременно нейтрализует заряд, снимая электростатическую стабилизацию, и гидрофилизует поверхность, предотвращая образование закрытых пор.

3. Последовательное введение депрессора (декстрин) и собирателя (амин) при обратной флотации магнети-

та создает устойчивый слой, ухудшающий фильтрацию магнетита. Добавление катионного флокулянта на финишной стадии модифицирует этот слой, улучшая агрегацию и водоотдачу, в то время как анионный флокулянт (реагент А) не рекомендуется для данной технологической операции.

Список литературы / References

1. Дмитрикова У.В., Круглов А.В., Юшина Т.И., Чыблук-Оол Е.Д. Опыт применения различного фильтровального оборудования на отечественных предприятиях. *Обогащение руд*. 2021;(4):52–56. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/2039/article/34196/> (дата обращения: 28.11.2025).
Dmitrakova U.V., Kruglov A.V., Yushina T.I., Chylbak-Ool E.D. Filtering equipment application practice at Russian enterprises. *Obogashchenie Rud*. 2021;(4):52–56. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/2039/article/34196/> (accessed: 28.11.2025).
2. Yao J., Ban X., Xie Y., Yin W., Wang Y., Xue F. Research advancement of efficient flotation separation technologies for magnesium-containing minerals. *Green and Smart Mining Engineering*. 2024;1(2):140–156. <https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.05.003>
3. Meng Q., Yang M., Zhang Z. Selective separation of magnetite and fayalite based on particle size effect: Flotation behavior and application of stepwise separation process. *Separation and Purification Technology*. 2025;355(Pt. A):129556. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129556>
4. Сенченко А.Е., Куликов Ю.В., Захаров А.Г., Исмагилов Р.И. Разработка технологии дообогащения рядового железорудного концентрата для обогатительной фабрики. *Горная промышленность*. 2024;(5S):158–165. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-158-165>
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*. 2024;(5S):158–165. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-158-165>
5. Волкова Г.А., Ануфриев В.Н. Интенсификация процесса коагуляции высокомолекулярными флокулянтами. *Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология*. 2019;(2):43–47. Режим доступа: <https://rep.bstu.by/handle/data/3718> (дата обращения: 28.11.2025).
Volkova G.A., Anufriyev V.N. Intensification of the process of biological treatment of waste waters of milk processing enterprises. *Vestnik of Brest State Technical University. Series: Water Engineering, Heat Power and Geoecology*. 2019;(2):43–47. (In Russ.) Available at: <https://rep.bstu.by/handle/data/3718> (accessed: 28.11.2025).
6. Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю. Современное состояние и направления совершенствования процессов разделения суспензий продуктов обогащения углей с применением флокулянтов. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2024;22(2):58–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-58-70>
Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu. Current state and areas of improving separation processes for suspensions of coal enrichment products using flocculants. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2024;22(2):58–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-58-70>
7. Ульрих Е.В., Баркова А.С. Использование флокулянтов для очистки сточных вод. *Трансформация экосистем*. 2023;6(1):168–187. <https://doi.org/10.23859/estr-220525>
Ulrich E.V., Barkova A.S. Use of flocculants for wastewater treatment. *Ecosystem Transformation*. 2023;6(1):168–187. <https://doi.org/10.23859/estr-220525>
8. Fan Q., Yuan S., Han R., Li Y., He J., Ning X. Desulfurization, desilication, and the separation and recovery of iron from bauxite: A review. *Minerals Engineering*. 2025;228:109315. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109315>
9. Arinaitwe E., Pawlik M. A role of flocculant chain flexibility in flocculation of fine quartz. Part I. Intrinsic viscosities of polyacrylamide-based flocculants. *International Journal of Mineral Processing*. 2013;124:50–57. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.01.006>
10. Dubey A., Patra A.S., Sarkar A.N., Basu A., Tripathy S.K., Mukherjee A.K., Bhatnagar A. Synthesis of a copolymeric system and its flocculation performance for iron ore tailings. *Minerals Engineering*. 2021;165:106848. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106848>
11. Bednarek P.S., Kowalczyk P.B. Cellulose and its derivatives as a sustainable reagent in mineral flotation: mechanisms and applications. *Separation and Purification Technology*. 2025;378(Pt 2):134690. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134690>
12. Pal S., Patra A.S., Ghorai S., Sarkar A.K., Dasa R., Sarkar S. M Modified guar gum/SiO₂: development and application of a novel hybrid nanocomposite as a flocculant for the treatment of wastewater. *Environmental Science: Water Research & Technology*. 2015;(1):84–95. <https://doi.org/10.1039/C4EW00023D>

13. Yu J., Wang D., Ge X., Yan M., Yang M. Flocculation of kaolin particles by two typical polyelectrolytes: A comparative study on the kinetics and floc structures. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2006;290(1-3):288–294. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.05.040>
14. El-taweel R.M., Mohamed N., Alrefaey K.A., Husien Sh., Abdel-Aziz A.B., Salim A.I. et al. A review of coagulation explaining its definition, mechanism, coagulant types, and optimization models; RSM, and ANN. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*. 2023;6:100358. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2023.100358>
15. Hjorth M., Jørgensen B.U. Polymer flocculation mechanism in animal slurry established by charge neutralization. *Water Research*. 2012;46(4):1045–1051. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.078>
16. Illés E., Tombácz E. The role of variable surface charge and surface complexation in the adsorption of humic acid on magnetite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2003;230(1-3):99–109. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2003.09.017>
17. Konuk M., Sellschopp K., Vonbun-Feldbauer G.B., Meißner R.H. Modeling charge redistribution at magnetite interfaces in empirical force fields. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2021;125(8):4794–4805. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c10338>
18. Прохоров К.В., Чибисова М.А., Шривастава А. Структура тонкой пленки электрохимически активированной воды на поверхности пирита. *Горная промышленность*. 2025;(4S):63–67. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-63-67>
Prokhorov K.V., Chibisova M.A., Srivastava A. Structure of an electrochemically activated water film on the pyrite surface. *Russian Mining Industry*. 2025;(4S):63–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-63-67>

Информация об авторах

Чылбак-оол Евгений Джамильевич – аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; научный сотрудник, ООО «Научно-технический центр «Бакор» г. Москва, г. Щербинка, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0007-9915-4809>; e-mail: chylbak-ool@ntcbakor.ru

Конюхов Юрий Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-0219-4809>; e-mail: ykonukhov@misis.ru

Пермякова Елизавета Сергеевна – кандидат технических наук, ассистент кафедры общей и неорганической химии, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-2581-0803>; e-mail: permyakova.es@misis.ru

Горячев Борис Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-5164-5920>; e-mail: beg@misis.ru

Миненко Владимир Геннадиевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории теории разделения минеральных компонентов, заместитель директора по научной работе отдела №4 проблем комплексного извлечения минеральных компонентов из природного и техногенного сырья, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-9117-4310>; e-mail: minenko_v@ipkonran.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.12.2025

Поступила после рецензирования: 24.02.2026

Принята к публикации: 25.02.2026

Information about the authors

Evgenii D. Chylbak-ool – Postgraduate Student, Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0007-9915-4809>; e-mail: chylbak-ool@ntcbakor.ru

Yury V. Konyukhov – Dr. Sci. (Eng.), Head of Department of Mineral Processing and Industrial Waste Recycling, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-0219-4809>; e-mail: ykonukhov@misis.ru

Elizaveta S. Permyakova – Cand. Sci. (Eng.), Assistant at the Department of General and Inorganic Chemistry, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2581-0803>; e-mail: permyakova.es@misis.ru

Boris E. Goryachev – Dr. Sci. (Eng.), Professor at the Department of Mineral Processing and Industrial Waste Recycling, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5164-5920>; e-mail: beg@misis.ru

Vladimir G. Minenko – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Laboratory of Theory of Separation of Mineral Components, Deputy Director for Research of Department No.4 Problems of Comprehensive Extraction of Mineral Components from Natural and Technogenic Raw Materials, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-9117-4310>; e-mail: minenko_v@ipkonran.ru

Article info

Received: 12.12.2025

Revised: 24.02.2026

Accepted: 25.02.2026