

УДК 622.7

МАГНИТНОЕ ГИДРОЦИКЛОНИРОВАНИЕ СЛАБОМАГНИТНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ШЛАМОВ

А. А. Лавриненко, П. А. Сыса

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: lavrin_a@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Обосновано применение метода магнитного гидроциклонирования для извлечения из тонкодисперсной магнитной суспензии шламистых частиц с низкой магнитной восприимчивостью. Показано эффективное использование лабораторного магнитного гидроциклона с обычной электромагнитной системой из медных проводов на конической его части без применения сверхпроводящих материалов для частиц магнетита крупностью – 20 мкм. Результаты исследования свидетельствуют о возможности выделения гематита и других слабомагнитных минералов магнитным гидроциклонированием в поле с необходимой индукцией 2 – 10 Тл, создаваемой сверхпроводящей магнитной системой в условиях соответствующего охлаждения при температуре жидкого азота, что сводит к минимуму эксплуатационные энергетические затраты магнитной сепарации. Применение сверхпроводящей магнитной системы с высокотемпературными материалами, установленной на конической части гидроциклона, позволит эффективно извлекать слабомагнитные частицы, например красных шламов крупностью – 10 мкм.

Магнитный гидроциклон, шламы, магнетит, обогащение железорудного сырья, магнитная индукция, содержание железа, извлечение железа

DOI: 10.15372/FTPRPI20240317

EDN: VFXZIB

Вовлечение в переработку низкокачественного минерального сырья приводит к необходимости использования большого количества тонкодисперсных отходов, что способствует минимизации энергетических затрат и снижению вредного воздействия на окружающую среду. Обогащение шламов минерального сырья, получаемых в результате работы горно-металлургических предприятий, — важная экономическая задача.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Шламохранилища, существующие практически на всех обогатительных комбинатах, содержат большое количество полезных компонентов. Например, красные шламы, образуемые при получении глинозема из бокситов методом Байера, являются ценным химическим сырьем, источником железа (50 %) и редких металлов, %: ванадия (0.150); галлия (0.005); титана (2.650); ниобия (0.002); циркония (0.120); скандия (0.010); иттрия (0.030); лантаноидов (до 0.140). Размер частиц красных шламов очень мал — 0.1 – 200 мкм [1] (рис. 1).

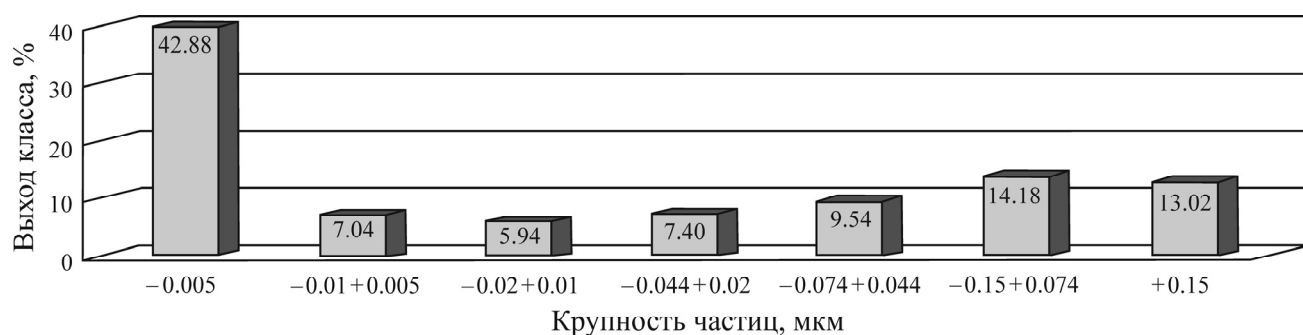


Рис. 1. Ситовая характеристика красного шлама, полученного по методу Байера

В России красных шламов складировано более 600 млн т и их количество увеличивается ежегодно. Задача их утилизации не решена, так как обогащение тонкодисперсного слабомагнитного продукта сопряжено с трудностями. Существуют проекты непосредственной переработки красных шламов путем плавки в чугуны с высоким содержанием фосфора, при которой возможность извлечь редкие металлы теряется [2, 3]. Поскольку железа в красных шлаках содержится до 50 %, одна из главных операций по переработке — магнитная сепарация. Вместе с оксидами железа в магнитный продукт выделяются скандий и иттрий, остальные редкоземельные элементы остаются в немагнитном продукте и далее выщелачиваются. С увеличением напряженности магнитного поля извлечение скандия и иттрия в магнитный продукт возрастает [4]. Для этого необходимо применение достаточно дорогих в эксплуатации высокоградиентных магнитных сепараторов. Известно множество способов переработки красных шламов, связанных с предварительным магнитным обжигом, позволяющим превратить гематит и другие слабомагнитные соединения железа в магнетит [5, 6]. Однако обжиг также дорогостоящая операция. Наиболее привлекательная с точки зрения бюджета магнитная сепарация, в ходе которой из красных шламов извлекается магнитная фракция [7]. Заметим, что применение современных высокоградиентных сепараторов накладывает ограничения, в том числе по крупности. Например, при использовании валковых высокоградиентных сепараторов крупность материала должна быть — 3 мм [8].

Извлечение переизмельченного магнетита из огромного количества сбросных вод в схемах обогащения существующих горно-обогатительных комбинатов сопровождается рядом проблем. Одна из них — снижение магнитной восприимчивости магнетита с уменьшением его крупности и, как следствие, худшее извлечение на барабанных магнитных сепараторах. Вообще шламовая составляющая обогащается плохо и ее традиционно удаляют из схемы с помощью дешламаторов, теряя часть металла. Отметим, что магнетитовые зерна крупностью — 40 мкм являются полностью раскрытыми. Проблема изменения магнитной восприимчивости магнетита с изменением крупности изучена в [9]. На рис. 2 представлено изменение магнитной восприимчивости.

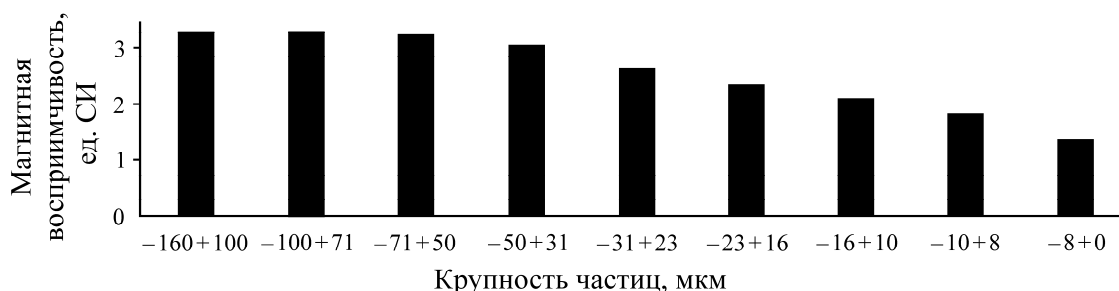


Рис. 2. Изменение магнитной восприимчивости магнетита с понижением крупности

Следовательно, необходим аппарат, несложный в эксплуатации и с большой производительностью отделяющий магнитную составляющую из потока тонкодисперсной суспензии. Таким аппаратом является гидроциклон с расположением магнитной системы на конусной части [10]. Его достоинство — высокая удельная производительность, простота конструкции, отсутствие движущихся частей. Гидроциклон с диаметром цилиндрической части 250 мм имеет производительность 35–85 м³/ч, извлечение с его помощью достигает 68–96 %. Технически сложным препятствием остается необходимость установки магнитной системы, позволяющей достичь уровня магнитной индукции 1–2 Тл для извлечения слабомагнитных соединений железа, таких как гематит.

Магнитные системы сепараторов изготавливаются с применением постоянных магнитов, либо наматываются медной проволокой на стальной магнитопровод. В обоих случаях, даже с использованием концентрирующих магнитное поле поверхностей, не удастся достичь магнитной индукции > 1.1 Тл. Это обусловлено ограниченной индукцией насыщения магнитных сердечников, выполненных из железосодержащих материалов. Без применения магнитных сердечников высокой магнитной индукции достичь еще сложнее, так как на поверхности постоянных магнитов она не более 0.4 Тл, а разработать медный соленоид, дающий 1 Тл, невозможно из-за высоких тепловых потерь, возрастающих с повышением силы тока в квадратичной зависимости. Для создания магнитного поля с индукцией 2–10 Тл предлагаются материалы, которые обеспечивают сверхпроводимость магнитной системы в условиях соответствующего охлаждения при температуре жидкого азота и сводят к минимуму эксплуатационные энергетические затраты.

Поскольку сверхпроводники обладают нулевым сопротивлением, то и тепловые потери при их эксплуатации равны нулю, и основные затраты электроэнергии будут связаны с охлаждением до температур кипения жидкого азота или немного ниже. В [11] приведен пример использования сверхпроводников в барабанных сепараторах для обогащения угля. Применение сверхпроводящих материалов позволяет достичь необходимых параметров магнитного поля и значительно уменьшить потребление электроэнергии. По сути, потребителем в конструкции останется шламовый насос, подающий суспензию в гидроциклон.

Преимущества мощных сверхпроводящих магнитных систем продемонстрированы в опытах, проведенных в 1973 г. под руководством В. В. Кармазина. Они выполнялись на установке магнитного гидроциклонирования с использованием сверхпроводника на основе NbTi₂, работающего при $T=9$ К и производительностью до 5 т/ч (рис. 3) [12].

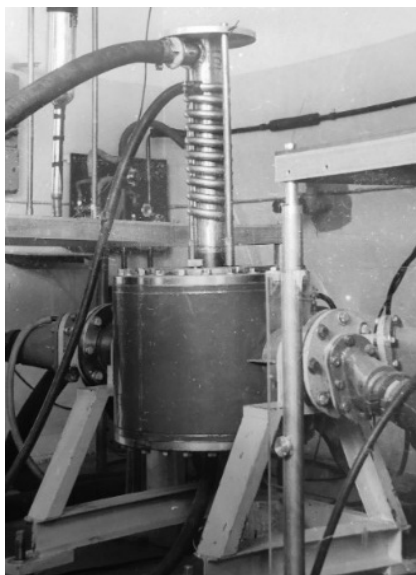


Рис. 3. Магнитный гидроциклон со сверхпроводящей магнитной системой

Получены удовлетворяющие результаты по обогащению гематитосодержащей суспензии под воздействием магнитного поля 2–5 Тл. При индукции магнитного поля > 4 Тл наблюдалась флокуляция гематита, вызванная эффектом Дзялошинского. На установке проводились опыты по обессериванию угольных пиритосодержащих шламов крупностью -0.5 мм и достигнуто извлечение 83 % серы при магнитной индукции 2 Тл.

С появлением новых сверхпроводящих материалов можно создавать более компактные установки магнитного гидроциклонирования. Проводником может служить сверхпроводящая лента второго поколения (Суперокс, Россия), работающая при температуре кипения жидкого азота 77.4 К [13]. Производитель гарантирует плотность тока 500 А/мм^2 при $T = 77 \text{ К}$ и предельной магнитной индукции 20 Тл. Более высокая температура перехода в сверхпроводящее состояние позволяет упростить конструкцию магнитной системы и снизить эксплуатационные затраты. Поскольку изготовление сверхпроводящей магнитной системы процесс дорогостоящий, целесообразно предварительно смоделировать условия процесса разделения тонкодисперсного сырья в магнитном гидроциклоне с обычной электромагнитной системой из медных проводов и оценить степень перехода его шламистой части (-20 мкм) в концентрат.

Цель настоящей работы — проверка возможности извлечения из тонкодисперсной магнитной суспензии шламистых частиц, обладающих низкой магнитной восприимчивостью, методом магнитного гидроциклонирования в магнитном поле. Задача исследования — моделирование условий процесса извлечения тонкодисперсных магнитных частиц крупностью -20 мкм из полидисперсной суспензии в лабораторном магнитном гидроциклоне без применения сверхпроводящих материалов.

ОБОСНОВАНИЕ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Методика экспериментов основывалась на том, что магнитная сила F_m , действующая на частицу, зависит от магнитной восприимчивости, магнитной индукции и ее градиента:

$$F_m = \frac{\chi m B \text{grad} B}{\mu_0},$$

где μ_0 — магнитная восприимчивость вакуума; χ — удельная магнитная восприимчивость вещества; m — масса вещества; B — магнитная индукция; $\text{grad} B$ — градиент B [14].

В случае обогащения гематитовой суспензии $\chi = 1.3 - 13 \cdot 10^{-3}$ уровень магнитной индукции должен быть на уровне 1.5–2.0 Тл. При пропорциональном изменении магнитной восприимчивости сырья χ в большую сторону и произведения $B \text{grad} B$ в меньшую сила, действующая на частицу, и параметры процесса обогащения должны сохраниться. Это обстоятельство позволит использовать для моделирования процесса магнетитовую смесь и обычную магнитную систему. В системе СИ для магнетита $\chi = 8.8 - 25.0$, для гематита — $\chi = 1.3 - 13 \cdot 10^{-3}$. Учитывая, что магнитная восприимчивость гематита (г) меньше χ магнетита (м) в 2000 раз, во столько же раз больше необходимо иметь для извлечения гематита произведение $B \text{grad} B$, при этом $B_r / B_m = \chi_m / \chi_r = \sqrt{2000} = 44.43$.

Экспериментальные исследования на магнетитовом сырье в слабом магнитном поле (магнитная индукция меньше необходимой для гематита в 45 раз) можно рассматривать как модель поведения слабомагнитных частиц в сильном магнитном поле, которое можно создать сверхпроводящей магнитной системой при условии сохранения геометрических размеров гидроциклона и остальных параметров сепарации.

Была использована выполненная из меди модель магнитного гидроциклона диаметром 50 мм с обычной электромагнитной системой на конической части корпуса. Магнитная система запитывалась от источника постоянного тока (рис. 4). Уровень создаваемой магнитной системой индукции — 0.01–0.10 Тл. Предполагалось, что моделируемая сверхпроводящая магнитная система будет выполнена аналогично обычной электромагнитной системе. Магнитная индукция в опытах с рудой составляла 0.06 Тл.

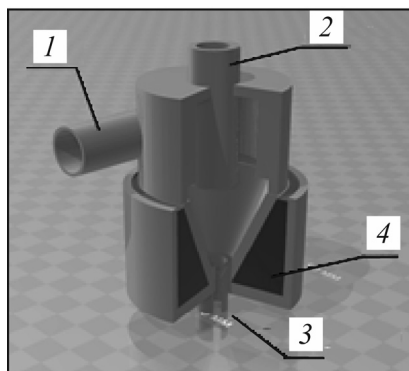


Рис. 4. Модель магнитного гидроциклона в разрезе: 1 — входной патрубок; 2 — сливной патрубок; 3 — песковая насадка; 4 — магнитная система

Исследования проводились на двух минеральных продуктах:

- искусственная смесь магнетитового концентрата с кварцем крупностью 80 % класса –0.071 мм и содержанием железа 65 %;
- кварцсодержащая магнетитовая руда с содержанием железа 43.71 % и гранулометрическим составом, представленным ниже:

Крупность, мм	–0.02	–0.04+0.02	–0.071+0.04	–0.1+0.071
Выход класса, %	13.08	16.29	27.65	42.98

Каждый класс крупности руды обогащали отдельно. Подачу питания в магнитный гидроциклон осуществляли с помощью лабораторного зумпфа, производительностью 600 л/ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнены опыты, в ходе которых на примере обогащения искусственной смеси магнетитового концентрата с кварцем установлено значение магнитной индукции (0.06 Тл), позволяющей практически полностью извлекать магнетит в концентрат (рис. 5). В эксперименте при включении магнитного поля наблюдалось существенное осветление слива (хвосты обогащения) и потемнение песков (концентрат) магнитного гидроциклона.

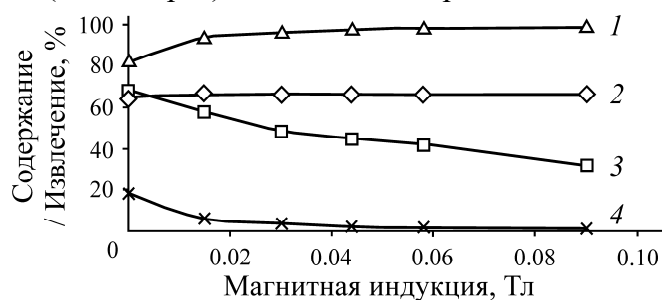


Рис. 5. Результаты разделения магнетитосодержащей смеси: 1 — извлечение Fe в концентрат; 2 — содержание Fe в концентрате; 3 — содержание Fe в хвостах; 4 — извлечение Fe в хвосты

Дальнейшие исследования по обогащению каждого класса крупности железосодержащей руды осуществлялось отдельно при индукции магнитного поля 0.06 Тл. На рис. 6 представлены результаты по выходу концентратов, содержанию и извлечению в них железа.

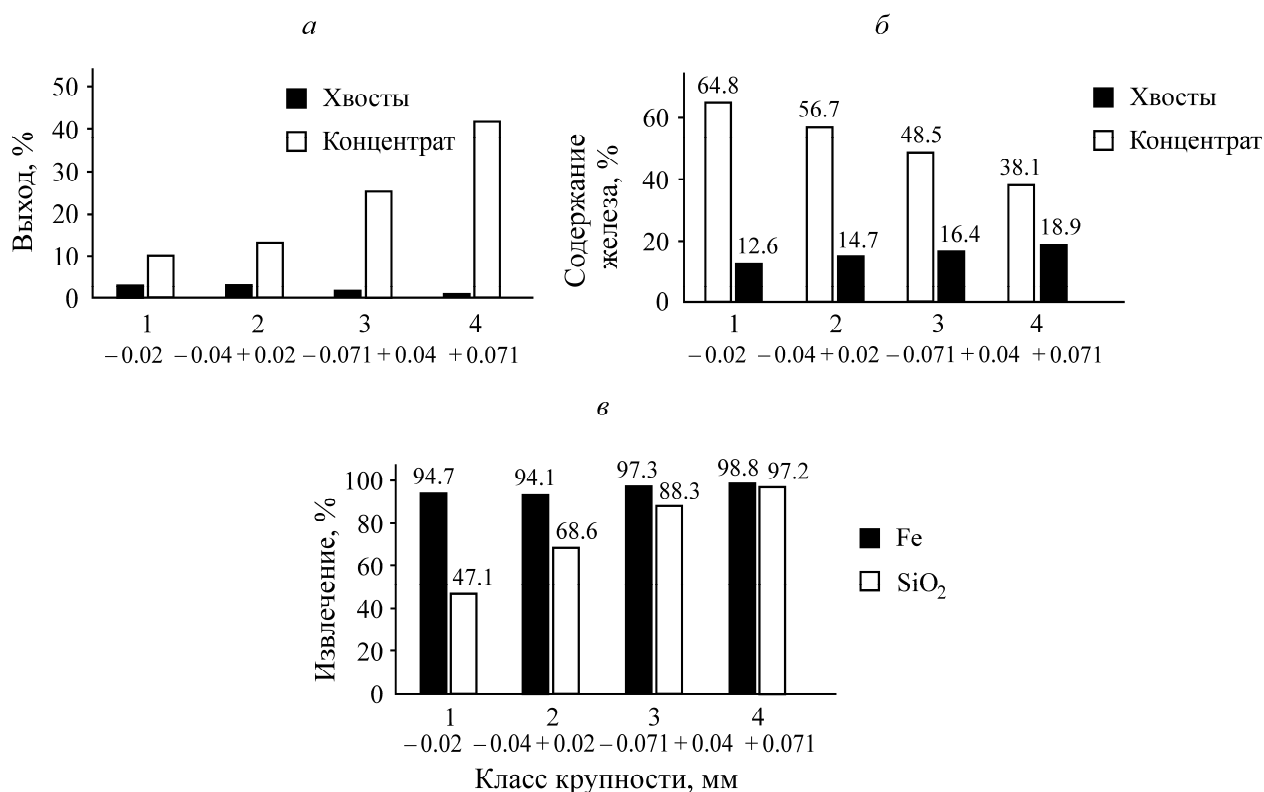


Рис. 6. Выход продуктов обогащения по классам крупности от исходной руды (а), содержание Fe в продуктах обогащения руды (б) и извлечение Fe и SiO₂ в концентрат (в)

В результате магнитного гидроциклонирования извлечение магнитного железа в крупном классе достигает 98.8%. Отметим, что при обогащении руды класса –0.02 мм содержание железа в концентрате достигает 64.8%, извлечение 94.7%, что является почти готовым магнитным концентратом, который может использоваться в металлургическом производстве.

Обогащать на устройстве с магнитной системой на конической части имеет смысл только очень тонкодисперсные суспензии, шламы, так как только при крупности –20 мкм начинается существенное разделение магнитной и немагнитной составляющих. Извлечение тонкодисперсных магнитных частиц крупностью –10–20 мкм может успешно осуществляться методом магнитного гидроциклонирования, хотя их магнитная восприимчивость существенно снижается (см. рис. 2). Для суспензий частиц с низкой магнитной восприимчивостью необходимы магнитные системы со сверхпроводимостью, обеспечивающие высокоэффективное извлечение. Для разделения более крупных частиц существует другая конструкция магнитного гидроциклона, в которой магнитная система расположена на крышке цилиндрической части [15].

ВЫВОДЫ

В результате применения магнитной системы на конической части гидроциклона установлена возможность эффективного извлечения в слабом магнитном поле шламистых магнитных частиц крупностью –20 мкм с пониженной магнитной восприимчивостью. Использование

сверхпроводящей магнитной системы с высокотемпературными материалами на исследованной конструкции магнитного гидроциклона позволит эффективно извлекать слабомагнитные частицы красных шламов крупностью – 10 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зиновеев Д. В., Грудинский П. И., Дюбанов В. Г., Коваленко Л. В., Леонтьев Л. И. Обзор мировой практики переработки красных шламов. Ч. 1. Пирометаллургические способы // Черн. металлургия. — 2018. — Т. 61. — № 11. — С. 843–858.
2. Valeev D., Zinoveev D., Kondratiev A., Lubyanoi D., and Pankratov D. Reductive smelting of neutralized red mud for iron recovery and produced pig Iron for heat-Resistant Castings, Metals, 2020, Vol. 10, No. 1.
3. Evan K. The history, challenges and new developments in the management and use of bauxite residue, J. Sustainable Metal., 2016, Vol. 2. — P. 316–331.
4. Пат. 2147622 RU. Способ извлечения редкоземельных металлов, скандия и иттрия из красных шламов глиноземного производства / С. Л. Орлов, И. Ю. Энтелис, Б. Н. Смирнов // Опубл. в БИ. — 2000. — № 45.
5. Combined SAF smelting and hydrometallurgical treatment of bauxite residue for enhanced valuable metal recovery, Travaux 46, Proc. 35th Int. ICSOBA Conf., Germany, 2017.
6. Liu Y., Zhao B., and Yang T. Recycling of iron from red mud by magnetic separation after co-roasting with pyrite, Thermochimica Acta, 2014, Vol. 588. — P. 11–15.
7. Утков В. А., Сизяков В. М. Современные вопросы металлургической переработки красных шламов // Зап. Горн. ин-та. — 2013. — Т. 202. — С. 39–43.
8. Пелевин А. Е. Обогащение слабомагнитных минералов в валковых сепараторах с системой из постоянных магнитов // ГИАБ. — 2022. — № 11-1. — С. 155–168.
9. Опалев А. С., Марчевская В. В. Исследование влияния крупности зерен магнетита на магнитную восприимчивость железорудных концентратов // ФТПРПИ. — 2023. — № 1. — С. 161–167.
10. Пат. 522857 SU. Магнитный гидроциклон / В. И. Кармазин, Е. М. Савицкий, В. В. Кармазин, В. В. Барон, О. П. Малюк, П. Е. Остапенко и др. // Опубл. в БИ. — 1976. — № 28.
11. Zhilong Hou, Wenbin Ma, Meifen Wang, Ling Zhao, Kexiang Wang, Jin Zhou, Weichao Yao, Zhongxiu Liu, Zhiyong Liu, and Zian Zhu. Development of a superconducting electromagnet iron separator, J. Supercond Nov. Magn., 2012, Vol. 25. — P. 969–973.
12. Кармазин В. В. Проблемы и перспективы магнитного обогащения // ГИАБ. — 2013. — № S1. — С. 560–575.
13. Фетисов С. С., Зубко В. В. Базовые технологии изготовления силовых кабелей на основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения // Электричество. — 2021. — № 6. — С. 12–24.
14. Кармазин В. И., Кармазин В. В. Магнитные методы обогащения. — М.: Недра, 1978. — 304 с.
15. Пат. 2748911 РФ. Способ извлечения магнитной фракции из потока суспензии и устройство для его осуществления / П. А. Сыса, А. А. Лавриненко, И. И. Агарков // Опубл. в БИ. — 2021. — № 16.

Поступила в редакцию 12/IV 2024

После доработки 10/V 2024

Принята к публикации 17/V 2024