

ISSN 0135-5910 (Print)

ISSN 2619-0753 (Online)

# ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Бюллетень научно-технической и экономической информации

---

23 ноября исполняется 200 лет со дня рождения  
**ОБУХОВА ПАВЛА МАТВЕЕВИЧА**



русского горного инженера и учёного-металлурга

---

## ***Ferrous Metallurgy***

*Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*

Том 76. № 11

2020

## РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ВЫСОКОГРАДИЕНТНОГО МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА

*Д. Н. ДИЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; В. А. ИЗМАЛКОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук, главный конструктор; С. Ю. КОПЫТОВА<sup>1</sup>, инженер-исследователь; В. М. ЛЕПЕХИН<sup>1</sup>, ведущий инженер; М. Н. МАКАРЕНКО<sup>1</sup>, заместитель начальника лаборатории, rapina-marina@yandex.ru; А. В. НАУМОВ<sup>1</sup>, ведущий инженер; А. О. ОЛЕНЕВ<sup>1</sup>, инженер I категории; А. В. ПОЛЯКОВ<sup>1</sup>, научный сотрудник; М. И. СУРИН<sup>1</sup>, д-р техн. наук, заместитель начальника отдела; Е. Я. ТАГУНОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук, директор по науке; А. В. ЧАНТУРИЯ<sup>3</sup>, руководитель проектов управления технической экспертизы проектов поддержания и модернизации производства Департамента горнорудного производства; Д. И. ШУТОВА<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук; В. И. ЩЕРБАКОВ<sup>1</sup>, главный специалист*  
(<sup>1</sup> Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Россия, г. Москва; <sup>2</sup> ООО “Магнетит”, Россия, г. Москва; <sup>3</sup> ООО УК “Металлоинвест”, Россия, г. Москва)

**Аннотация.** Высокоградиентные магнитные сепараторы хорошо зарекомендовали себя при обогащении слабомагнитных руд. Однако существующие промышленные установки имеют большие габариты при низкой удельной производительности и высоких энергетических затратах. В НИЦ “Курчатовский институт” разработан и испытан лабораторный прототип высокоградиентного магнитного сепаратора со сверхпроводниковой магнитной системой. Устройство предназначено для обогащения слабомагнитного сырья, в первую очередь окисленных железистых кварцитов. Разработка направлена на создание нового поколения сепараторов, оперирующих полями высокой индукции, и развитие прикладной сверхпроводимости для промышленного применения. Дано краткое описание поставленных задач, процесса разработки, изготовления и испытания сверхпроводниковой магнитной системы. Рассмотрены общая конструкция прототипа и конструкция осадительных кассет, оптимизированных для работы в магнитном поле с высокой индукцией. Описан процесс испытаний лабораторного прототипа высокоградиентного магнитного сепаратора со сверхпроводниковой магнитной системой по обогащению сырья, предоставленного горно-обогатительным комбинатом. Приведены данные о содержании железа общего до и после прохождения сепарации на прототипе, его основные рабочие характеристики. Результаты, полученные в ходе выполнения проекта, могут быть применены в горнодобывающей и металлургической промышленности для создания сверхпроводниковых магнитных сепараторов нового поколения, которые будут иметь по сравнению с традиционными сепараторами (с резистивными обмотками) меньшую потребляемую мощность и массу установки, более высокую индукцию магнитного поля в рабочем зазоре, возможность использования матриц с коэффициентом заполнения ферромагнитными осадительными элементами на уровне 6–8 % с большими зазорами для прохода пульпы, более высокие удельные показатели за счет увеличения плотности тока по обмотке до 50–100 А/мм<sup>2</sup>. Осуществление дальнейших работ по развитию тематики и созданию опытно-промышленного сверхпроводникового сепаратора позволит продвинуться вперед не только в области магнитного обогащения, но и откроет общепромышленные области применения прикладной сверхпроводимости.

**Ключевые слова:** горнодобывающая промышленность, обогащение слабомагнитного сырья, высокоградиентный магнитный сепаратор, сверхпроводниковый сепаратор, сверхпроводниковая криомагнитная система.

**Ссылка для цитирования:** Диев Д.Н., Измалков В.А., Копытова С.Ю., Лепехин В.М., Макаренко М.Н., Наумов А.В., Оленев А.О., Поляков А.В., Сурин М.И., Тагунов Е.Я., Чантурия А.В., Шутова Д.И., Щербаков В.И. Разработка, изготовление и испытания прототипа сверхпроводникового высокоградиентного магнитного сепаратора // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 11. С. 1097-1106.

**Doi:** 10.32339/0135-5910-2020-11-1097-1106

## DEVELOPMENT, MANUFACTURING AND TESTS OF SUPERCONDUCTING HIGH-GRADIENT MAGNETIC SEPARATOR PROTOTYPE

D. N. DIEV<sup>1</sup>, PhD (Tech.), Sen. researcher; V. A. IZMALKOV<sup>2</sup>, PhD (Tech.), Principal designer; S. YU. KOPYTOVA<sup>1</sup>, Engineer-researcher; V. M. LEPEKHIN<sup>1</sup>, Leading engineer; M. N. MAKARENKO<sup>1</sup>, Deputy head of laboratory, panina-marina@yandex.ru; A. V. NAUMOV<sup>1</sup>, Leading engineer; A. O. OLENEV<sup>1</sup>, Engineer first class; A. V. POLYAKOV<sup>1</sup>, Researcher; M. I. SURIN<sup>1</sup>, HD (Tech.), Deputy head of Department; E. YA. TAGUNOV<sup>2</sup>, PhD (Tech.), Director of science; A. V. CHANTURIYA<sup>3</sup>, project Manager, management of technical expertise of maintenance projects and production modernization of the mining Department; D. I. SHUTOVA<sup>1</sup>, PhD (Phys.-Math.); V. I. SHCHERBAKOV<sup>1</sup>, Leading specialist  
(<sup>1</sup> National Research Center "Kurchatov Institute", Russia, Moscow; <sup>2</sup> PLC "Magnetite", Russia, Moscow; <sup>3</sup> PLC TC "Metalloinvest", Russia, Moscow)

**Abstract.** High-gradient magnetic separator made a good showing at enrichment of low-magnetic ores. However, existing industrial facilities have large dimensions, low specific productivity and high energy costs. Laboratory prototype of high-gradient magnetic separator equipped with superconductor magnet system was developed, manufactured and tested at NRC "Kurchatov Institute". The device is designed for enrichment of low-magnetic mineral resources, mostly oxidized ferruginous quartzites. The goal of development was both creation of next-generation of separators operating with high-power magnetic fields as well as further progress in applied superconductivity for industrial applications. This paper gives a brief description of the problem, as well as of the process of development, manufacturing and testing the superconducting magnet system. Overall design of the prototype is described, as well as design of collector matrices designed specifically for high-power magnetic field. Next is description of testing process with mineral raw materials obtained from a real industrial enrichment facility. Data on total iron percentage before and after the separation process at the prototype presented, as well as its basic performance characteristics. The results obtained in the course of the project fulfilment can be used in mining industry and metallurgy for manufacturing superconducting magnetic separators of new generation. Such separators will have many advantages comparing with regular separators (with resistive windings) as following: lower energy consumption and less weight, higher induction of the magnetic field in the working gap, possibility to use matrices with coefficient of filling by ferromagnetic precipitating elements at the level of 6–8% with large gaps for pulp passing, higher specific indices due to increased current density in the winding up to 50–100 A/mm<sup>2</sup>.

**Key words:** mining industry, enrichment of low-magnetic raw materials, high-gradient magnetic separator, superconducting separator, superconducting cryomagnetic system.

**For citation:** Diev D.N., Izmalkov V.A., Kopytova S.Yu., Lepekhin V.M., Makarenko M.N., Naumov A.V., Olenov A.O., Polyakov A.V., Surin M.I., Tagunov E.Ya., Chanturiya A.V., Shutova D.I., Shcherbakov V.I. Development, manufacturing and tests of superconducting high-gradient magnetic separator prototype. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2020, vol. 76, no. 11, pp. 1097–1106. (In Russ.).

**Doi:** 10.32339/0135-5910-2020-11-1097-1106

В современных условиях потребление металлов в мире, в том числе черных, неуклонно возрастает при одновременном снижении качества перерабатываемых руд. В процесс обогащения вовлекаются руды, характеризующиеся тонкой вкрапленностью и слабой магнитной восприимчивостью.

Возникают проблемы эффективного извлечения слабомагнитных частиц в процессах мокрого и сухого обогащения различных видов минерального сырья, содержащего ценные компоненты в виде слабомагнитных включений: окисленных железистых кварцитов, марганцевых, ильменитовых, гранатовых, хромитовых, редкоземельных и ряда других руд.

Требуется внедрение новых обогатительных технологий с использованием более совершенных аппаратов и оборудования, в том числе и магнитных сепараторов, которые могли бы быть встроены в технологический цикл горнодобывающих комбинатов с целью максимального извлечения полезных компонентов, таких как, например, гематит. Несмотря на большой объем проведенных исследований, данная проблема российской горно-обогатительной отрасли на настоящий момент не решена и является задачей, от

решения которой зависит перспектива развития крупнейших предприятий горно-металлургической отрасли.

Поскольку магнитная сепарация является одним из наиболее экологически чистых методов обогащения минерального сырья, возможность ее применения в процессе обогащения рассматривается как приоритетное направление по сравнению с другими методами.

Основная сложность заключается в том, что магнитная восприимчивость частиц слабомагнитной фракции рассматриваемых руд или частиц слабомагнитных загрязнений весьма низка. Для гематита, например, она на два порядка меньше, чем у магнетита. Извлечь гематит возможно только при помощи высокоградиентных магнитных сепараторов, некоторые из которых достаточно неплохо зарекомендовали себя при обогащении отдельных видов слабомагнитных руд, но имеют большие габариты и массу при весьма невысокой удельной производительности.

Кроме того, проблемой высокоградиентных электромагнитных сепараторов является высокие энергетические затраты в электромагнитных системах, обеспечивающих в узких рабочих за-

зорах сепараторов магнитный поток интенсивностью 0,5–1,3 Тл. При этом важную роль имеет величина зазоров, по которым двигается пульпа в процессе сепарации. Принятая многими фирмами ширина зазоров 1,8–2,5 мм (до 4 мм в сепараторах БЭРМ) приводит к тому, что зазоры быстро забиваются твердой фазой питания и процесс магнитного обогащения нарушается.

Что касается возможности использования магнитных систем на постоянных магнитах, то и здесь поставленная задача не решена. Несмотря на то что характеристики современных магнитных материалов в последнее время заметно улучшились, применение постоянных магнитов не позволяет создать для требуемой промышленным производством производительности достаточно большой магнитный поток необходимой интенсивности.

Таким образом, назрела необходимость в технологиях переработки слабомагнитного сырья, которые не должны требовать для своего внедрения больших капитальных затрат и должны легко вписываться в существующие технологические схемы производств, одновременно с этим делая извлечение слабомагнитных продуктов экономически целесообразным. Одним из путей решения этой проблемы является разработка высокоградиентных магнитных сепараторов нового поколения со сверхпроводниковыми магнитными системами.

В НИЦ “Курчатовский институт” разработано и изготовлено свыше 300 сверхпроводящих криомагнитных систем для более чем 100 институтов и лабораторий, в том числе и для магнитной сепарации. Первый опыт разработки, изготовления и испытания магнитного сепаратора со сверхпроводящей магнитной системой для задач черной металлургии относится к середине 80-х годов прошлого века [1]. Это был опытный образец роторного магнитного сепаратора, предназначенного для обогащения железистых кварцитов Криворожского ГОКа. Сверхпроводниковая магнитная система (СМС) сепаратора была разработана, изготовлена и испытана в Москве, затем поставлена в Кривой Рог на опытную фабрику института “Механобрчермет”. На площадке института произведена общая сборка и монтаж всей установки, а также проведен комплекс технологических испытаний. Это была весьма трудоемкая работа, связанная прежде всего с доставкой жидкого гелия из Москвы в Кривой Рог, с вахтовым методом работы специалистов криогенной

службы, которые должны были охлаждать магнитную систему жидким гелием и запитывать ее током, периодически доливая испаряющийся гелий. Больше внимание приходилось уделять поддержанию СМС в “холодном” состоянии.

В настоящее время основные проблемы, связанные с созданием и эксплуатацией установок со СМС, решены.

Во-первых, на мировом рынке появились эффективные, надежные, коммерчески доступные, имеющие большой рабочий ресурс криогенные рефрижераторы, что позволяет легко поддерживать температурный режим и максимально упростить эксплуатацию промышленных устройств со СМС. Условия поддержания работы криогенных установок упрощаются практически до уровня бытового холодильника.

Во-вторых, появление высокотемпературных сверхпроводников, способных работать при температуре жидкого азота и пригодных для использования в промышленном оборудовании, позволяет расширить технологические и эксплуатационные возможности криомагнитных установок.

Следует отметить, что все типы высокоградиентных сепараторов с резистивными электромагнитными системами характеризуются большой массой магнитопровода и высокой энергоемкостью при работе. Это отражается на себестоимости получаемых продуктов. Применение СМС открывает возможность преодолеть недостатки магнитных сепараторов с обычными резистивными электромагнитными системами. СМС обеспечивают получение магнитного поля с высокой индукцией в большом объеме при низком энергопотреблении. Магнитопровод в сепараторе со СМС имеет значительно меньшие размеры и массу. Появляется возможность использования ферромагнитных матриц с большими рабочими зазорами для прохода пульпы, что способствует предотвращению забивания матрицы твердыми частицами питания. В связи с вышесказанным, использование технологий сверхпроводимости при создании магнитных сепараторов в настоящее время становится целесообразным, оправданным, а при обогащении слабомагнитного сырья и необходимым.

В НИЦ “Курчатовский институт” разработан, изготовлен и испытан прототип высокоградиентного магнитного сепаратора со СМС на основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (ВТСП) для очистки и обогащения слабомагнитных руд [2–6].

### **Конструкция высокоградиентного сверхпроводникового магнитного сепаратора**

На рис. 1 представлен общий вид магнитного сепаратора. Рабочим органом сепаратора является ротор диам. 700 мм с горизонтальной осью вращения, привод на основе мотор-редуктора с асинхронным двигателем (0,09 кВт), подключаемым через частотный преобразователь и обеспечивающим вращение ротора с возможностью

изменения частоты вращения в пределах 0,5–2 об/мин. Установка снабжена узлом подачи исходного питания с репульпатором, узлом подачи воды для промывки кассет, узлом сбора магнитной и немагнитной фракций. Основные параметры установки приведены в табл. 1.

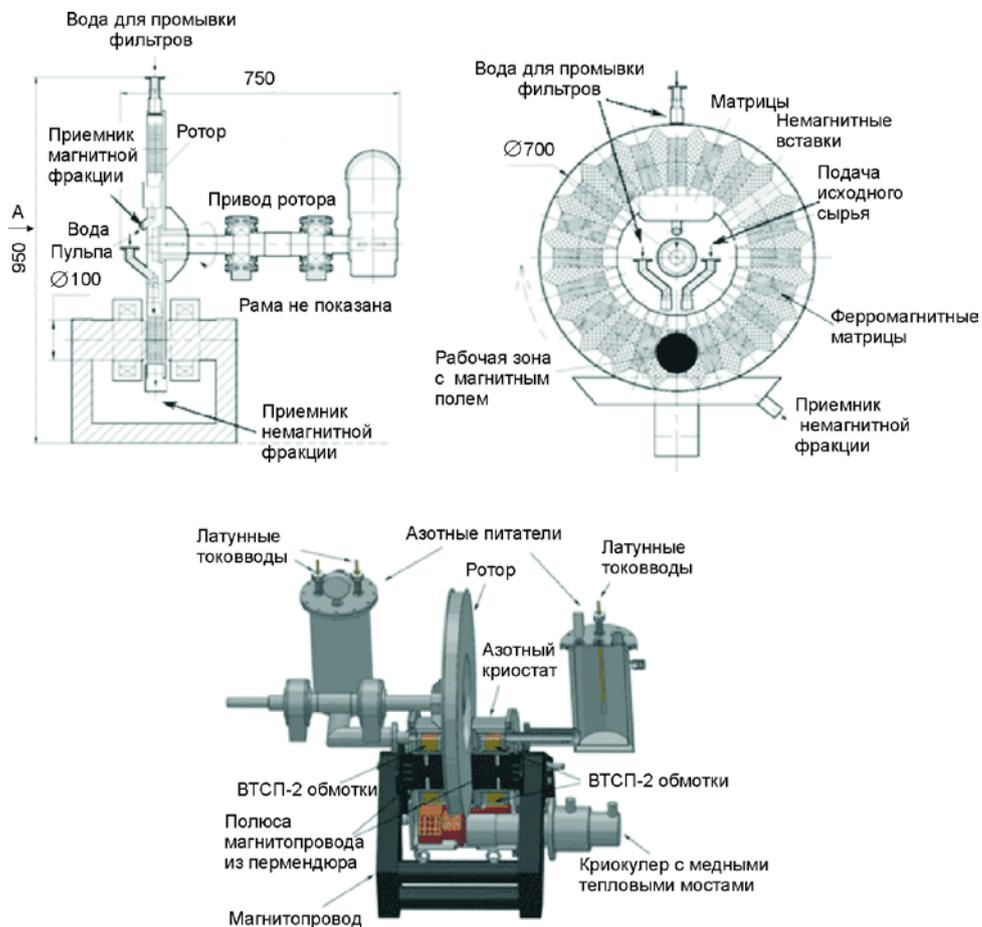


Рис. 1. Общий вид сепаратора

Fig. 1. Overall view of the separator

ТАБЛИЦА 1. ПАРАМЕТРЫ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОГО МАГНИТНОГО СЕПАРАТОРА СО СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

TABLE 1. HIGH-GRADIENT MAGNETIC SEPARATOR WITH A SUPERCONDUCTING MAGNETIC SYSTEM PARAMETERS

Параметр	Величина
Внешний диаметр ротора, мм	700
Частота вращения ротора, об/мин	0–2,5
Расстояние между полюсами магнита, мм	50
Индукция магнитного поля в пустом пространстве между полюсами магнита (при токе 100 А), Тл	1,3
Потребляемая мощность, кВт	5 (с учетом работающего криогенного рефрижератора)
Температура обмотки, К	35–70
Температура корпуса, К	300
Масса ярма, кг	130
Производительность по пульпе, кг/ч	20–25

В нижней части ротора в зоне действия магнитного поля осуществляется загрузка исходного питания и промывка, в верхней части ротора — зона смыва магнитной фракции. Смывная вода подается в матрицы с противоположной по отношению к подаче питания стороны. Когда исходное питание поступает в матрицу, в ее верхней части оседает большая часть магнитных частиц, поэтому обратный смыв магнитной фракции обеспечивает более эффективную регенерацию (очистку) матрицы перед очередной загрузкой по сравнению с прямым смывом, который осуществляется в большинстве сепараторов с вертикальной осью вращения ротора.

## Сверхпроводниковая магнитная система

Сверхпроводниковая магнитная система сепаратора состоит из двух круглых катушек (рис. 2), изготовленных из ленточного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения AMSC Apretium 8501 шириной 4,8 мм, толщиной 0,2 мм в изоляции из каптона толщиной 40 мкм. Наружный диаметр каждой катушки составляет 218 мм, внутренний — 148 мм, ширина — 45 мм. В каждой катушке насчитывается 800 витков. Катушки заключены в криостат и установлены на магнитопровод. На рис. 3 представлена общая сборка криостата и магнитопровода.



Рис. 2. ВТСП катушки

Fig. 2. HTSC coils

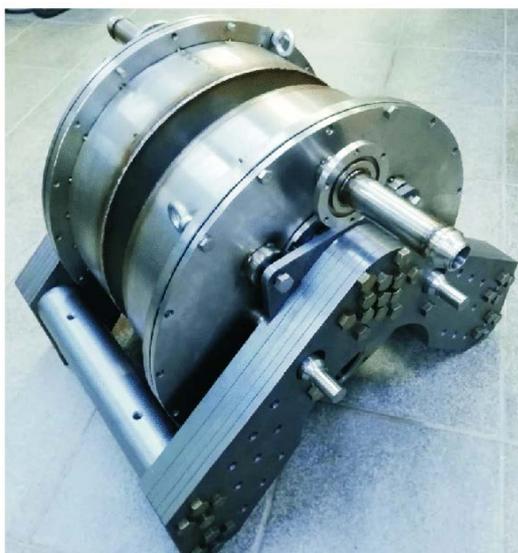


Рис. 3. Криостат в сборе со сверхпроводниковой магнитной системой и магнитопроводом

Fig. 3. Cryostat assembled with superconducting magnetic system and iron yoke

Магнитная система охватывает нижнюю рабочую часть ротора с ферромагнитными матрицами. Катушки в криостате максимально приближены к рабочему зазору, располагаются симметрично и установлены на цилиндрических полюсах магнитной системы диам. 100 мм. Расстояние между полюсами равно 50 мм. Таким обра-

зом, размеры рабочего пространства между полюсами составляют 100×100×50 мм.

После того как СМС была собрана, к ней подсоединили криогенный рефрижератор Sumitomo CH-110. Затем вся система была залита жидким азотом и запитана током. Плотность тока по сечению каждой катушки при токе питания 100 А составляет 51 А/мм<sup>2</sup>. Магнитодвижущая сила при этом равна 160000 А.

На рис. 4 представлена зависимость индукции магнитного поля в центре рабочего зазора системы от тока. Сравнение расчетных и экспериментальных значений индукции приведено на рис. 5. Заключительный этап сборки прототипа сепаратора на общей раме показан на рис. 6.

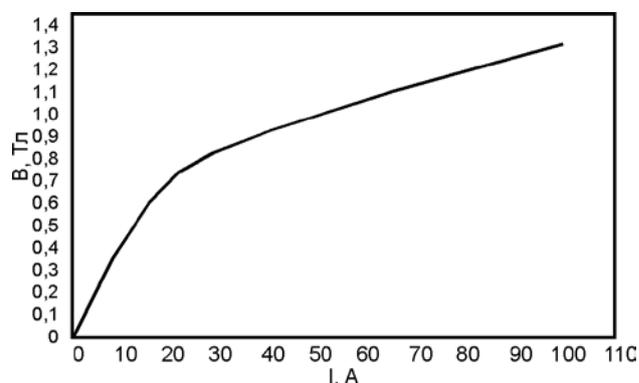


Рис. 4. Зависимость индукции магнитного поля в центре рабочего зазора сепаратора от тока магнитов

Fig. 4. Magnetic field induction dependence on coils current the center of the separator working gap

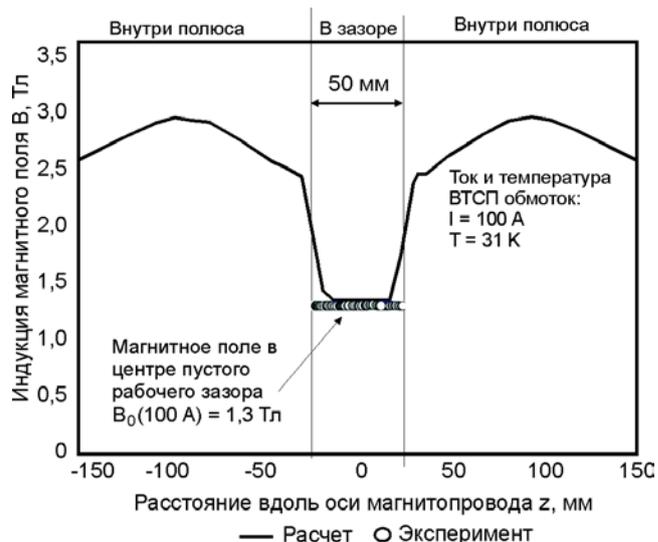


Рис. 5. Величина индукции магнитного поля в магнитопроводе и пустом зазоре сепаратора

Fig. 5. The value of the magnetic field induction in the iron yoke and the empty separator working gap



**Рис. 6.** Заключительный этап сборки сверхпроводникового магнитного сепаратора

**Fig. 6.** Final stage of assembly of the superconducting magnetic separator

### Ротор с ферромагнитными осадительными матрицами

Ротор сепаратора представляет собой два немагнитных нержавеющей диска, установленных на валу, между которыми закреплен набор из 20 прямоугольных ферромагнитных матриц с немагнитными перегородками. Размер матриц составляет 32×47×120 мм. На рис. 7 представлен ротор в процессе сборки.

что объясняется стремлением снизить магнитное сопротивление в магнитной цепи, по которой замыкается магнитный поток, пересекающий рабочее пространство сепаратора. С одной стороны, высокие значения этого коэффициента позволяют повысить до необходимого уровня индукцию магнитного поля в рабочей области осадительных элементов, с другой стороны, снижают эффективный динамический объем сепараторов, т. е. тот объем, в котором уровень магнитных сил достаточен для извлечения и удержания частиц сепарируемой магнитной фракции. Для сверхпроводниковых магнитных сепараторов в силу способности их магнитных систем создавать большие магнитные потоки при меньших массогабаритных параметрах и энергоемкости, возможно достижение необходимого уровня индукции магнитного поля в рабочей области осадительных элементов и при значительно большем магнитном сопротивлении рабочего пространства сепаратора. Именно это и позволяет значительно снизить коэффициент заполнения ферромагнитным материалом матриц и тем самым не только удовлетворить требование понижения сил взаимодействия между ферромагнитными элементами матриц и токопроводящими элементами магнитной системы, но и повысить эффективный рабочий объем сепаратора.



**Рис. 7.** Ротор сепаратора в процессе сборки

**Fig. 7.** Separator's rotor during the assembly process

При конструировании матриц с осадительными элементами для использования в сепараторе со СМС учтен ряд принципиально важных обстоятельств [4].

Во-первых, необходимость использовать матрицы с достаточно низким значением коэффициента заполнения ферромагнитным материалом (по предварительным оценкам, не выше 8 %). Для матриц, предназначенных для обычных электромагнитных систем и систем на постоянных магнитах, этот коэффициент заметно выше,

Во-вторых, все сказанное выше позволяет увеличить рабочие зазоры матриц с осадительными элементами, по которым осуществляется движение исходного материала в рабочей области. Таким образом увеличиваются временные интервалы между профилактическими приоста-

новками работы сепаратора, вызываемыми необходимостью периодической прочистки рабочих зазоров, которые в ходе эксплуатации постепенно забиваются некоторыми видами ферромагнитных примесей, содержащихся в исходном сырье.

В-третьих, конструкция кассет и рабочего органа должна предусматривать возможность замены одного типа матриц на другие, так как не существует универсальных матриц, пригодных для эффективной работы со всеми видами сырья, а свойства сепарируемого материала могут существенно изменяться даже при смене участков добычи руды или другого минерального сырья в пределах одного и того же месторождения. Кроме того, срок службы осадительных элементов всегда меньше срока эксплуатации самого сепаратора из-за абразивного износа и постепенного отложений солей на поверхности осадительных элементов.

Таким образом, сочетание в высокоградиентных магнитных сепараторах СМС с правильно подобранными для конкретного вида сырья осадительными ферромагнитными матрицами позволяет достичь следующих преимуществ по сравнению с известными моделями роторных сепараторов:

- заметно повысить уровень магнитных сил в зоне извлечения, так как повышение этого уров-

ня даже на 20–40 % означает, что ряд видов сырья, поддающихся эффективному магнитному обогащению или магнитной очистке, будет заметно расширен;

- применить разнообразные типы осадительных элементов, используемых в матрицах с малым коэффициентом заполнения ферромагнитным материалом, имеющих эксплуатационные преимущества и достаточно широкие перспективы повышения технологических параметров обогащения и магнитной очистки за счет повышения извлекающей способности по отношению к компонентам слабомагнитных фракций;

- снизить (за счет низкого значения коэффициента заполнения матрицы ферромагнитным материалом) возможное чрезмерное действие односторонних магнитных сил на элементы ротора в случае какой-либо несимметричности, что повысит надежность работы и срок службы устройства;

- существенно снизить массогабаритные характеристики и энергопотребление по сравнению с известными моделями высокоградиентных роторных сепараторов.

Конкретные численные оценки упомянутых параметров могут быть проведены на следующем этапе работы.

## Испытания

Технические испытания прототипа высокоградиентного магнитного сепаратора со СМС проводились на специально оборудованной площадке НИЦ “Курчатовский институт”. Подготовка исходного сырья к высокоградиентной магнитной сепарации осуществлялась ООО “Магнетит”.

Первый, предварительный этап испытаний был посвящен проверке работоспособности всех подсистем прототипа сепаратора: проверялась возможность изменения скорости вращения ротора в диапазоне от 0 до 2,5 об/мин; работоспособность узлов подачи питания, промывки, сбора магнитной и немагнитной фракции; герметичность соединений криогенной системы при ее заполнении хладагентом; возможность изменение величины тока в ВТСП обмотках сверхпроводниковых магнитах от 0 до 100 А; уровень магнитного поля в рабочей зоне сепаратора при изменении тока в ВТСП обмотках.

На основном этапе испытаний проведены демонстрационные технологические испытания устройства на окисленных железистых кварцитах Михайловского ГОКа крупностью 80 % класса –100 мкм. Сырьем для высокоградиентной сепарации являлся слабомагнитный продукт, полученный в ходе подготовки исходного минерального ресурса к высокоградиентной сепарации путем очистки от средне- и сильномагнитной

фракций. На рис. 8 представлена технологическая схема испытаний.

На двух стадиях сепарации в низкоинтенсивном поле использовался барабанный сепаратор ПБСц-22/9. Индукция магнитного поля на поверхности барабанного сепаратора составила 0,25 Тл на первой стадии и 0,16 Тл на второй стадии сепарации.

Индукция фонового магнитного поля в рабочей зоне прототипа сверхпроводникового магнитного сепаратора составила 1,3 Тл (ток сверхпроводящего соленоида магнитной системы — 100 А).

Ферромагнитная матрица (с осадительными элементами) выполнена в виде сетки из листа толщиной 0,5 мм просечно-вытяжным способом (ячейка сетки имеет вид ромба с диагоналями 9 и 4,5 мм). Коэффициент заполнения матрицы ферромагнитным материалом ~6,5 %, магнитное поле на поверхности осадительных элементов составляет не менее 3 Тл (расчетное значение).

Плотность пульпы Т:Ж = 1:10. Частота вращения ротора — 0,93 об/мин. Линейная скорость перемещения центра кассет — 24,3 мм/с.

Производительность прототипа в данном эксперименте составила 22 кг/ч при общей потребляемой мощности 5 кВт.

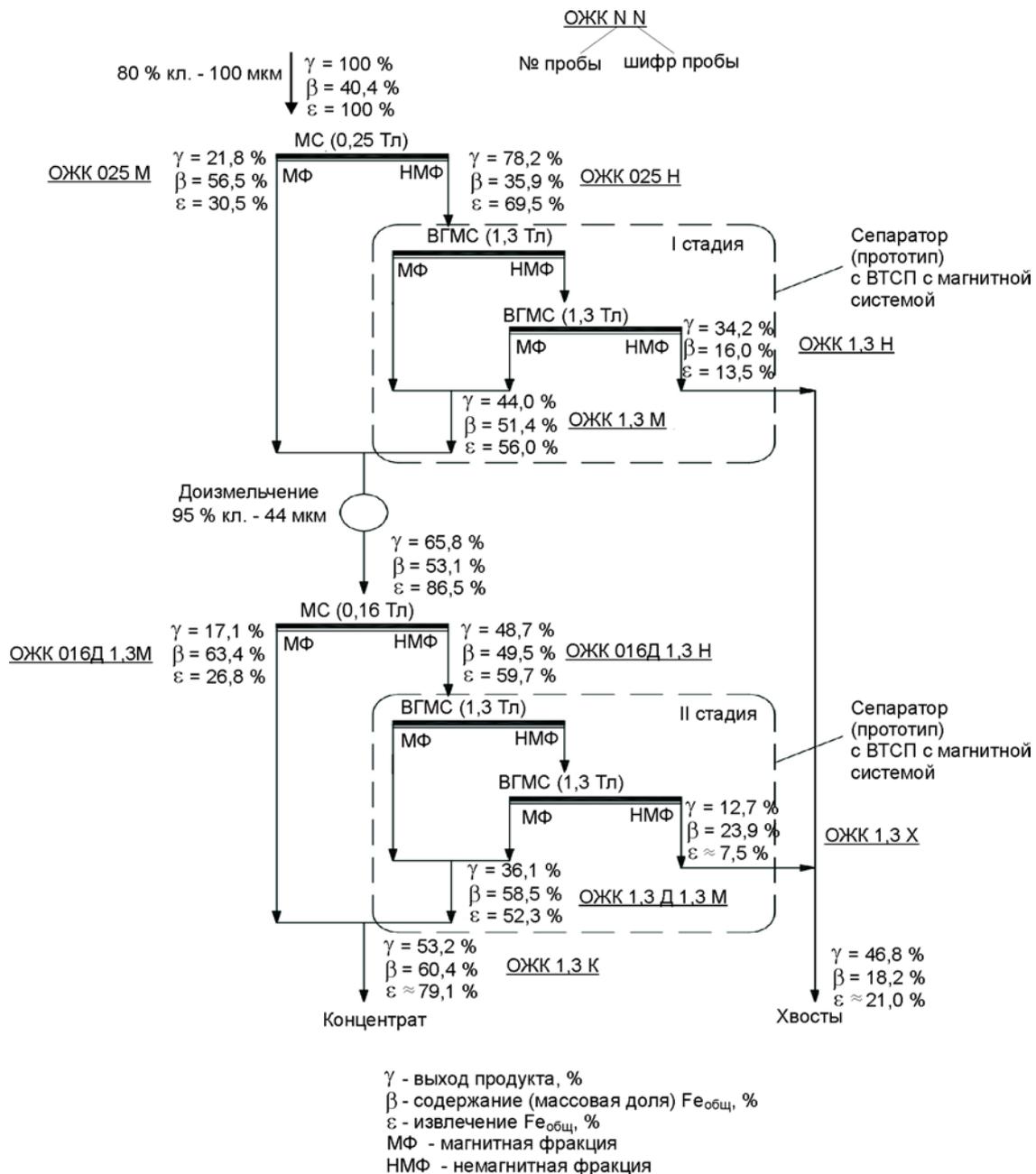


Рис. 8. Качественно-количественная схема магнитного обогащения окисленных железистых кварцитов Михайловского ГОКа

Fig. 8. Scheme of enrichment process for oxidized ferrous quartzite obtained at industrial enrichment facility

Анализ проб исходного сырья, промежуточных и конечного продукта на содержание  $Fe_{общ}$  осуществлялся путем проведения атомно-эмиссионного анализа с индуктивно-связанной плазмой (АЭ) с использованием спектрометра ICPE-9000 (Shimadzu, Япония) в аналитической лаборатории ФГБУ ВИМС.

Результаты проведенной работы по обогащению окисленных кварцитов представлены на рис. 8 и в табл. 2. Конечный концентрат содержал 60,4 %  $Fe_{общ}$  при высокой степени извлечения 79,5 %, что сопоставимо с показателями обогащения окисленной железной руды для промышленных резистивных высокоградиентных магнитных сепараторов [7, 8].

**ТАБЛИЦА 2. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОДУКТОВ СЕПАРАЦИИ ПО ЖЕЛЕЗУ ОБЩЕМУ**

**TABLE 2. QUANTITATIVE INDICES OF SEPARATION PRODUCTS BY TOTAL IRON**

	Выход, %	Содержание Fe <sub>общ</sub> , %	Извлечение Fe <sub>общ</sub> , %
Исходный продукт	100	40,4	100
Хвосты	46,8	17,7	20,5
Концентрат	53,2	60,4	79,5

На основе успешных технологических испытаний разработанного прототипа сверхпроводникового магнитного сепаратора и проведенных предварительных оценок можно сделать вывод, что использование СМС в будущих прототипах высокоградиентных магнитных сепараторов промышленной производительности позволит снизить энергопотребление и массу установок, тем самым снимая ограничения на их широкое внедрение в горной промышленности.

### Заключение

Проведенные испытания позволили успешно проверить и продемонстрировать возможность создания высокоградиентного магнитного сепаратора со СМС на основе ВТСП второго поколения. Созданный прототип стал испытательной площадкой для ряда технических решений в области прикладной сверхпроводимости и криогеники, в первую очередь касающихся использования кристаллизованного азота.

Результаты, полученные в ходе выполнения проекта, могут быть применены в горнодобывающей и металлургической промышленности прежде всего для создания сверхпроводниковых магнитных сепараторов нового поколения, которые будут иметь следующие преимущества по сравнению с традиционными сепараторами (с резистивными обмотками):

- меньшую потребляемую мощность и массу установки;
- более высокую индукцию магнитного поля в рабочем зазоре;

– возможность использования матриц с коэффициентом заполнения ферромагнитными осадительными элементами на уровне 6–8 % с большими зазорами для прохода пульпы;

– более высокие удельные показатели за счет увеличения плотности тока по обмотке до 50–100 А/мм<sup>2</sup>.

На взгляд авторов, необходимо продолжать дальнейшую работу по развитию данной тематики и двигаться в направлении создания опытно-промышленного сверхпроводникового сепаратора. Ориентирование на запросы и потребности горно-обогатительных предприятий (автономность работы, высокие производительность и надежность, низкая потребляемая мощность) позволит продвинуть вперед не только инженерные разработки в области магнитного обогащения, но и поспособствовать общему развитию прикладной сверхпроводимости, открыв, помимо существующих научных и медицинских задач, общепромышленные области применения.

*Авторский коллектив выражает благодарность руководству НИЦ “Курчатовский институт” за помощь в организации работы и предоставление испытательной площадки, а также ООО УК “Металлоинвест” за помощь в организации и проведении ресурсных испытаний.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Anashkin O.P., Cheremnykh P.A., Chernoplekov N.A. etc. Superconducting Volume-gradient Magnetic Separator // XVI International Mineral Processing Congress. 1988. P. 345–354.
2. Diev D.N., Lepelin V.M., Makarenko M.N. etc. HTS high gradient magnetic separator prototype // Progress in Superconductivity and Cryogenics. 2018. V. 20. № 4. P. 1–5.
3. Diev D.N., Lepelin V.M., Makarenko M.N. etc. High Temperature Superconducting Magnetic System for High Gradient Magnetic Separator // Physics of Atomic Nuclei. 2018. V. 81. № 11. P. 1554–1562.
4. Tagunov E.Y., Izmalkov V.A., Puchkov V.A., Diev D.N. Features of constructing polygradient matrices for high-gradient separators with superconducting magnetic systems // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2019. № 9. P. 102–114.
5. Diev D.N., Lepelin V.M., Makarenko M.N. etc. ReBCO split coil magnet for high gradient magnetic separation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 502. № 1. 012105. doi: 10.1088/1757-899X/502/1/012105.
6. Diev D.N., Makarenko M.N., Naumov A.V. etc. REBCO coil operation in gaseous helium and solid nitrogen // Progress in Superconductivity and Cryogenics. 2019. V. 21. № 3. P. 47–50.
7. Кармазин В.В., Пак С.Г., Маслов Д.С. Магнитное обогащение окисленных железистых кварцитов Михайловского железорудного обогащения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 12. С. 212–219.
8. Улубабов Р.С., Кармазин В.И. Развитие в Украине современного сепараторостроения для магнитного обогащения слабомагнитных руд // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. 2012. Вип. 48 (89). С. 13–23.

*Поступила 6 августа 2020 г.*

## REFERENCES

1. Anashkin O.P., Cheremnykh P.A., Chernoplekov N.A., Fedorov V.K., Keilin V.E., Krivykh A.V., Lepekhin V.M., Lomovtsev L.A. Superconducting Volume-gradient Magnetic Separator. *XVI International Mineral Processing Congress*, 1988, pp. 345–354.
2. Diev D.N., Lepehin V.M., Makarenko M.N., Polyakov A.V., Shcherbakov V.I., Shutova D.I., Surin M.I., Tagunov E.Y. HTS high gradient magnetic separator prototype. *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 1–5.
3. Diev D.N., Lepehin V.M., Makarenko M.N., Polyakov A.V., Shcherbakov V.I., Shutova D.I., Surin M.I. High Temperature Superconducting Magnetic System for High Gradient Magnetic Separator. *Physics of Atomic Nuclei*, 2018, vol. 81, no. 11, pp. 1554–1562.
4. Tagunov E.Y., Izmalkov V.A., Puchkov V.A., Diev D.N. Features of constructing polygradient matrices for high-gradient separators with superconducting magnetic systems. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2019, no. 9, pp. 102–114.
5. Diev D.N., Lepehin V.M., Makarenko M.N., Polyakov A.V., Shcherbakov V.I., Shutova D.I., Surin M.I. ReBCO split coil magnet for high gradient magnetic separation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 502, no. 1, 012105. doi: 10.1088/1757-899X/502/1/012105.
6. Diev D.N., Makarenko M.N., Naumov A.V., Polyakov A.V., Shcherbakov V.I., Shutova D.I., Surin M.I. REBCO coil operation in gaseous helium and solid nitrogen. *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 47–50.
7. Karmazin V.V., Pak S.G., Maslov D.S. Magnetic enrichment of oxidized ferruginous quartzites of the Mikhailovsky iron ore dressing. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2012, no. 12, pp. 212–219. (In Russ.).
8. Ulubabov R.S., Karmazin V.I. Development of modern separation equipment for magnetic enrichment of low-magnetic ores in Ukraine. *Zbagacheniya korisnikh kopolin: nauk.-tekhn. zb.*, 2012, no. 48 (89), pp. 13–23. (In Russ.).

*Received August 6, 2020*