УДК 622.778.2 : 622.341.1

Р.В. Калюжная

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНО-ГРАВИТАЦИОННОЙ СЕПАРАЦИИ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖЧАСТИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В МАГНИТНО-СТАБИЛИЗИРОВАННОМ ОЖИЖЕННОМ СЛОЕ

Аннотация. Дана оценка возможности применения магнитно-гравитационной сепарации на горно-обогатительных комбинатах и указаны основные факторы, препятствующие распространению данного способа разделения минеральных частиц. Рассмотрено соотношение влияния внешнего магнитного поля низкой напряженности и восходящего водного потока на свойства ферромагнитной суспензии, сформированной из частиц магнетита различной крупности. Представлены зависимости выхода концентрата и содержание железа общего в концентрате от напряженности магнитного поля при различных скоростях восходящего потока. Установлена зависимость изменения показателя эффективности обогащения в магнитно-гравитационном сепараторе от напряженности магнитного поля для рассматриваемых скоростей восходящего потока. Отмечено принципиальное значение соотношения межчастичных магнитных взаимодействий и гидродинамических характеристик в процессе магнитно-гравитационной сепарации. Полученные данные предложено использовать при описании алгоритма для создания системы автоматического управления процессами магнитно-гравитационной сепарации.

Ключевые слова: Ферромагнитная суспензия, ожижженый слой, магнитное поле, восходящий поток, частицы магнетита, межчастичные магнитные взаимодействия, эффективность обогащения, магнитно-гравитационная сепарация.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-146-152

Ограниченность и невозможность техногенного воспроизводства минерального сырья, рост потребления железных руд при современном уровне металлургического производства, обусловили вовлечение в обогатительный передел бедные железные руды со сложным вещественным составом и низким содержанием полезных компонентов.

Современное состояние горно-металлургического производства вызывает потребность в разработке новых эффективных способов обогащения полезных ископаемых, применение которых обеспечит повышение извлечения полезных компонентов и возможность получения железорудных концентратов высокого качества при параллельном снижении себестоимости переработки руды.

Схемы обогащения магнетитсодержащих руд на подавляющем большинстве железорудных комбинатов, исходя из зависимости минерального и химического состава, а также грануломет-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 7. С. 146–152.
© Р.В. Калюжная. 2018.

рического состава руды, крупности ее дробления и тонины помола, построены по принципу стадиальных циклов измельчения и магнитной сепарации, стадиального вывода хвостов по мере раскрытия полезного минерала.

Существующие типовые схемы переработки железистых кварцитов предусматривают от одной до пяти стадий обогащения [1—3]. Стадиальность схем обуславливается степенью обогатимости перерабатываемой руды [4, 5]. Готовый концентрат получается после последней стадии измельчения и магнитной сепарации, когда содержание железа в концентрате достигает требуемого значения.

Магнитная сепарация осуществляется преимущественно на промышленных барабанных сепараторах, в процессе работы которых в хвосты удаляются немагнитные зерна пустой породы. Однако в магнитный продукт переходят чистые зерна магнетита вместе со сростковой фракцией, тем самым снижая качество концентрата.

Современные достижения в области физики твердого тела, теории электричества и магнетизма и тенденция к развитию новых подходов к процессу обогащения железосодержащих руд позволяют применять сочетание магнитных и гравитационных методов разделения минеральных частиц в одном аппарате. Действие таких аппаратов с комбинированными физическими полями основано на способности частиц ферромагнетика изменять свою локальную концентрацию и сохранять высокую подвижность суспензии под воздействием совокупности магнитной и гравитационной сил.

Сепаратор данного типа создан на основе управления магнитным агрегированием при воздействии на суспензию из ферромагнитных частиц магнитным полем низкой напряженности и центробежно-восходящим водным потоком. Однако применению магнитно-гравитационной сепарации препятствуют такие факторы, как недостаточная изученность механизмов межчастичных магнитных взаимодействий в ожиженных ферромагнитных суспензиях под влиянием магнитных полей с низкой напряженностью, необходимость оценки основных технологических параметров в процессах разделения минерального сырья, нерешенность вопросов оптимизации и регулирования выходных параметров новых способов сепарации.

На основе исследований Н.А. Алейникова, П.А. Усачева, А.С. Опалева [6—8] Горным институтом КНЦ РАН проведена многолетняя работа по изучению возможности применения разработанных конструкций магнитно-гравитационного сепаратора на горно-обогатительных предприятиях нашей страны и за рубежом.

Технология переработки железистых кварцитов с использованием в обогатительном переделе магнитно-гравитационной сепарации внедрена на Оленегорском обогатительном комбинате АО «Олкон» в 80-х годах прошлого столетия. В настоящее время для реализации операции сгущения готового железорудного концентрата перед операцией фильтрации на дробильно-обогатительной фабрике применяется магнитно-гравитационный сепаратор ЭМС-150, разработанный ГоИ КНЦ РАН [9].

Для решения задачи повышения эффективности применения магнитно-гравитационной сепарации выполнены исследования по определению оптимальных параметров процесса агрегирования ферромагнитных частиц в ожиженном магнитно-стабилизированном слое суспензии. Основной интерес представляет определение условий стабилизации ожиженного состояния слоя ферромагнитной суспензии.

Разделительный объем в магнитно-гравитационного сепараторе по своей сути представляет магнитно-стабилизи-

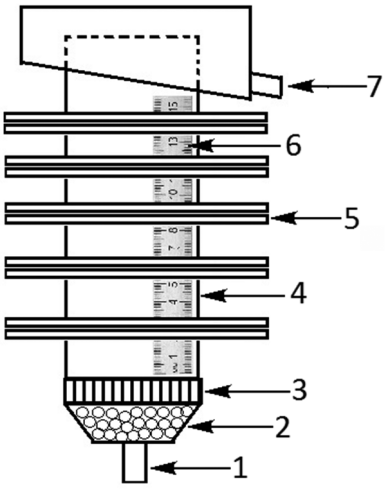

Рис. 1. Общий вид лабораторного стенда для исследования формирования ожиженного магнитно-стабилизированного слоя суспензии из частиц магнетита: 1 — нижний патрубок; 2 — полость конической формы, заполненная пластиковыми шариками; 3 — сетка с ячеей 42 мкм; 4 — колонка из оргстекла; 5 — электромагнитная система; 6 — измерительная шкала; 7 — сливной желоб

Fig. 1. Overall view of laboratory-scale plant for investigating the formation of a magnetically stabilized fluidization bed of a suspension of magnetite particles: 1 —lower fitting; 2 —the cavity of conical shape filled with plastic balls; 3 —a grid with a mesh 42 μm; 4 —column made of plexiglass; 5 —electromagnetic system; 6 —measuring scale; 7 —overflow gutter

рованный по высоте кипящий слой. Визуальные эффекты, возникающие при формировании ожиженного слоя из ферромагнитных частиц с наложенным однородным магнитным полем при восходящем водном потоке, описаны в работах М.В. Филиппова и И.М. Кирко [10, 11]. Основы теории магнитно-стабилизированных ожиженных слоев базируются на исследованиях Розенцвейга и Зигеля [12—14].

На рис. 1 представлена схема лабораторного стенда для исследования формирования ожиженного магнитно-стабилизированного слоя суспензии из частиц магнетита, полученных из железорудного концентрата ДОФ АО «Олкон» с содержанием железа общего 70—71%. Эксперимент был проведен для пяти узких классов крупности: –71+45 мкм, –100+71 мкм, –125+100 мкм, –160+ +125 мкм, –200+160 мкм. Экспериментальная часть, проведенных исследований и методика расчетов описана в работе [15].

Увеличение значения напряженности магнитного поля *H* влечет за собой снижение высоты слоя магнетитовой суспензии за счет сил межчастичного взаимодействия с образованием жестких агрегатов, что ведет к усилению гидродинамического сопротивления слоя и потере его подвижности. Для установления ожиженного состояния слоя необходимо увеличить скорость восходящего потока *V*, уравновесив гравитационные силы материала. При пропорциональном увеличении этих параметров высота слоя стабилизируется, ферромагнитные агрегаты сохраняют подвижность, обладая упругими свойствами, растягиваясь в направлении действия вектора скорости жидкости.

В таблице представлены диапазоны существования слоя ожиженной магнитно-стабилизированной ферромагнитной суспензии для отобранных классов крупности и их смеси в равных долях, отражающие допустимые границы значений плотности суспензии, выраженные через содержание твердого по массе $C_м$, в зависимости от выявленного диапазона скорости восходящего потока *V* при обозначенной напряженности магнитного поля *H*.

С целью определения оптимальных параметров для режима магнитно-гравитационной сепарации, проведена серия экспериментальных исследований на материале, полученном из железорудного концентрата II стадии магнитной сепарации ДОФ АО «Олкон» с содержанием железа общего до 45%. Опыты осуществлялись на лабораторном стенде — магнитно-гравитационном сепара-

Диапазоны существования слоя ожиженной магнитно-стабилизированной по высоте ферромагнитной суспензии

Occurrence ranges of layer of vertically magnetically stabilized liquefied ferromagnetic suspension

H, кА/м	-71+45 мкм		-100+71мкм		-125+100 мкм		-160+125 мкм		-200+160 мкм		-200+45 мкм	
	Диапазон существования стабилизированного ожиженного слоя											
	V, см/с	$C_м$, %	*V*, см/с	$C_м$, %	*V*, см/с	$C_м$, %	*V*, см/с	$C_м$, %	*V*, см/с	$C_м$, %	*V*, см/с	$C_м$, %
0	0,12–0,33	82–64	0,2–0,6	91–65	0,25–1,1	92,4–66	0,4–1,4	92,8–61,4	0,42–1,5	94,4–74	0,4–0,8	84,4–65,4
0,8	0,13–0,4	81,9–63,9	0,21–0,79	89,9–64	0,19–1,145	92,3–66,7	0,5–1,57	92–65	0,5–1,6	93–77	0,41–1,18	83–66,5
1,6	0,14–0,41	81,7–67	0,21–0,9	88,8–63	0,193–1,18	91,2–68,2	0,56–1,6	90–69	0,57–1,5	92,8–80	0,42–1,2	83,7–70
2,4	0,14–0,43	81–65	0,23–0,8	82,2–68	0,26–1,26	91–70,5	0,56–1,7	86,9–73,2	0,57–1,6	90–78	0,43–1,27	85–74
3,2	0,15–0,44	78–64	0,23–0,6	80,3–71,5	0,26–1,26	84,1–70,2	0,6–1,75	82–71,5	0,6–1,65	85,8–77,2	0,46–1,3	84,8–72
4	0,18–0,42	74,8–66	0,25–0,6	77–70	0,3–1,26	81,5–67	0,9–1,89	76,5–66,4	0,94–1,65	79,4–72,6	0,54–1,35	77,7–69,8
4,8	0,18–0,41	71,9–63	0,25–0,63	73–66	0,33–1,35	78,9–64,5	0,95–1,89	71,4–63,4	1–1,7	74–68,7	0,57–1,35	70,6–66,7

торе периодического действия, общий вид которого представлен на рис. 2. Для работы были подготовлены навески крупностью –200+0 мкм с содержанием железа общего до 59%. Напряженность поля и скорость восходящего потока поочередно изменялись согласно данным приведенной выше таблицы относительно класса крупности –200+45 мкм в диапазоне значений от 3 до 5 кА/м; 0,8 и 1,2 см/с соответственно.

На рис. 3 представлена зависимость выхода концентрата (рис. 3, *а*) и содержание $Fe_{общ}$ в концентрате (рис. 3, *б*) от напряженности магнитного поля при различных скоростях восходящего потока, показывающая увеличение выхода концентрата при возрастании значения поля и одновременном снижении содержания железа в нем.

Эффективность обогащения полезных ископаемых имеет ключевое значение в получении концентрата заданного качества при оптимальной для данного

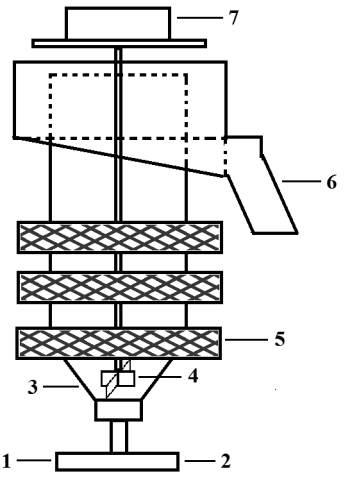

Рис. 2. Общий вид лабораторного стенда — магнитно-гравитационный сепаратор: 1 — патрубок питающей воды; 2 — разгрузочный патрубок; 3 — цилиндро-конический корпус; 4 — мешалка; 5 — электромагнитная система; 6 — сливной желоб; 7 —привод мешалки

Fig. 2. Overall view of laboratory-scale plant —magnetic-gravity separator: 1 —fitting of feed water; 2 — discharge sleeve; 3 —cylinder-conical case; 4 —mixer; 5 —electromagnetic system; 6 —overflow gutter; 7 —mixing machine

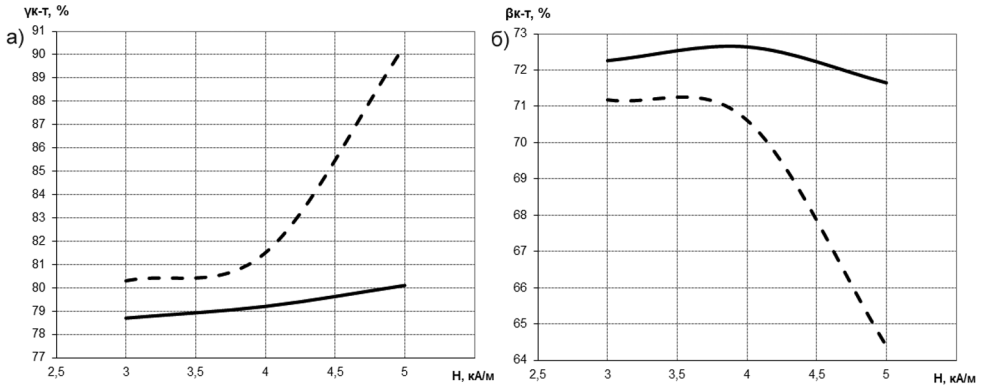

Рис. 3. Зависимости выхода концентрата (а) и содержание Feобщ в концентрате (б) от напряженности магнитного поля Н для скоростей восходящего потока: _ _ —0,8 см/с; ___ —1,2 см/с

Fig. 3. The dependence of the concentrate yield (a) and the total iron content in the concentrate (b) on the intensity of magnetic field at different velocities of upflow: _ _ —0,8 cm/s; ___ —1,2 cm/s

случая степени извлечения ценного компонента. Для ее оценки используется большое количество критериев оптимизации разделительных процессов [16]. Наиболее применяемым и объективно отражающим суть процесса разделения является критерий Ханкока-Луйкена:

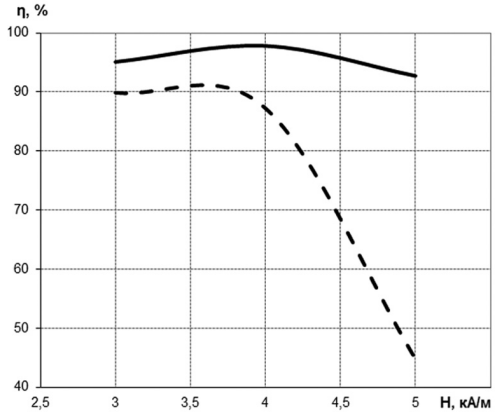

Рис. 4. Зависимость эффективности разделения магнетитового концентрата II стадии магнитной сепарации ДОФ АО «ОЛКОН» крупностью -200+0 мкм от напряженности поля Н для скоростей восходящего потока: _ _ —0,8 см/с; ___ —1,2 см/с

Fig. 4. Dependence of the separation efficiency of the magnetite concentrate of the II stage of magnetic separation of the crushing-processing plant of Open Joint-Stock Company «OLKON» of grade of —200 + 0 μm on the field strength H for the velocities of upflow: _ _ —0,8 cm/s; ___ —1,2 cm/s

$$\eta = \frac{\gamma(\beta - \alpha)}{\alpha\left(1 - \frac{\alpha}{\beta_T}\right)}$$

где γ — выход обогащенного продукта; α — содержание ценного компонента в исходном продукте; β — содержание ценного компонента в обогащенном продукте; β_T — теоретически предельно возможное содержание ценного компонента.

На рис. 4 графически представлена зависимость изменения показателя эффективности разделения при магнитно-гравитационной сепарации от напряженности магнитного поля *H* для скорости восходящего потока кратной 0,8 см/с и 1,2 см/с.

Обогатительный процесс для выбранного диапазона напряженности поля при скорости 1,2 см/с является наиболее эффективным. Полученные данные показывают, что для данного материала крупностью –200+0 мкм максимальное значение η = 97,8% достигается при значении напряженности магнитного поля равной 4 кА/м и скорости восходящего потока 1,2 см/с. Экстремумы функций рассматриваемых скоростей смещены относительно друг друга на 0,5 кА/м, что подчеркивает принципиальное значение

соотношения межчастичных магнитных взаимодействий и гидродинамических характеристик в процессе магнитно-гравитационной сепарации.

Установление режима сепарации с учетом данных, приведенных в таблице, в частности регулирование скорости восходящего водного потока в допустимых пределах позволит контролировать выход бедных сростков в хвосты, а богатых в концентрат, управляя степенью агрегирования ферромагнитной суспензии. Применение полученных результатов позволит описать алгоритм для связки трех основных параметров регулирования процессами магнитно-гравитационной сепарации: высоты слоя магнитностабилизированный ферромагнитной суспензии из частиц магнетита, скорости восходящего потока и величины напряженности магнитного поля в рабочем объеме аппарата, который будет использован в системах автоматического управления операцией разделения минеральных частиц в магнитно-гравитационном сепараторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лищинский В.С.*, *Попов В.П.*, *Остапенко А.В.* Основные направления подготовки к производству концентрата для металлизированных брикетов // Горный журнал. — 1997 — № 5—6. — С. 57—60.

2. *Ломовцев Л.А.*, *Несторова Н.А.*, *Дробченко Л.А.* Магнитное обогащение сильномагнитных руд. — М.: Недра, 1979. — С. 67—70.

3. *Ломовцев Л.А.*, *Ганжа Р.П.* Перспективные направления совершенствования технологии обогащения бедных магнетитовых кварцитов // Горный журнал. — 1998. — № 1. — С. 24—26.

4. Справочник по обогащению руд. Основные процессы / Под ред. О.С. Богданова, 2 изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1983. — С. 141.

5. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / Под ред. О.С. Богданова. — М.: Недра, 1982. — 366 с.

6. *Алейников Н.А.*, *Усачев П.А.*, *Зеленов П.И.* Структурирование ферромагнитных суспензий. — Л.: Наука, 1974. — 119 с.

7. *Усачев П.А.* Получение высококачественных железных концентратов на обогатительной фабрике ОАО «Лебединский ГОК» // Горный журнал. — 2000. — № 3. — С. 41—44.

8. *Усачев П.А.*, *Опалев А.С.* Магнитно-гравитационное обогащение руд. — Апатиты: КНЦ РАН. — 1993. — 92 с.

9. *Щербаков А.В.*, *Опалев А.С.* Разработка и внедрение энергосберегающей технологии обогащения железистых кварцитов на АО «ОЛКОН» // Труды Кольского научного центра РАН. — 2015. — № 3 (29) — С. 176—184.

10. *Филиппов М.В.* Взвешенный слой ферромагнитных частиц и действие на него магнитного поля // Прикладная магнитогидродинамика. —1961. — Т.12. — С. 215—236.

11. *Кирко И.М.*, *Филиппов М.В.* Особенности взвешенного слоя ферромагнитных частиц в магнитном поле // Журнал технической физики. — 1960. — Т. 30. — № 9. — С. 1081—1084.

12. *Rosensweig R.E.* Fluidization: Hydrodynamic stabilization with a magnetic field // Science. 1979. Vol. 204. P. 57—60.

13. *Rosensweig R.E.* Magnetic stabilization of the state of uniform fluidization // Ind. Eng. Chem. Fundam. 1979. Vol. 18, N 3. P. 260–269.

14. *Siegell J.* Magnetized-fluidized beds // Powder Technology. 1991, no 64. P. 1.

15. *Калюжная Р.В.* Исследование влияния магнитного поля на свойства ожиженной ферромагнитной суспензии в процессе магнитно-гравитационной сепарации// Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. —№ 7. — С. 392—402.

16. *Барский Л.А.*, *Плаксин И.Н.* Критерии оптимизации разделительных процессов. М.: Наука, 1967 — 215 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Калюжная Раиса Вячеславовна — аспирант, e-mail: krv@goi.kolasc.net.ru,
Горный институт Кольского научного центра РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 7, pp. 146–152.

Optimization of magnetic–gravity separation parameters based on the studies of interparticle magnetic interaction in magnetically stabilized liquefied layer

Kalyuzhnaya R.V., Graduate Student, e-mail: krv@goi.kolasc.net.ru,
Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia.

Abstract. The possibility of application of magnetic-gravity separation at mining and processing enterprises has been estimated. The main factors obstructing the distribution of this method have been indicated. The relationship between the effect of an external low-intensity magnetic field and an upflow of water on the properties of a ferromagnetic suspension formed from magnetite particles of various grade has been considered. The paper presents the dependence of the concentrate yield and the total iron content in the concentrate on the intensity of magnetic field at different velocities of upflow. The dependence of the change of the enrichment efficiency in a magnetic gravitational separator on the intensity of the magnetic field for the considered upflow velocities has been established. The principal significance has been noted of the relationship between interparticle magnetic interactions and hydrodynamic characteristics in the process of magnetic-gravity separation. The obtained data are proposed to be used in the description of the algorithm for creating an automatic control system of magnetic gravity separation.

Key words: ferromagnetic suspension, fluidized bed, a magnetic field, upflow, magnetite particles, interparticle magnetic interactions, enrichment efficiency, magnetic-gravity separation.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-146-152

REFERENCES

1. Lishinskiy V.S., Popov V.P., Ostapenko A.V. Osnovnye napravleniya podgotovki k proizvodstvu koncentrata dlya metallizirovannyh briketov [Basic trends of preparation for production of concentrate for metallized products]. *Gornyy zhurnal.* 1997, no 5–6, pp. 57–60. [In Russ].

2. Lomovcev L.A., Nestorova N.A., Drobchenko L.A. *Magnitnoe obogashenie silnomagnitnyh rud* [Magnetic concentration of strong-magnetic ore], Moscow, Nedra, 1979, pp. 67–70.

3. Lomovcev L.A., Ganzha R.P. Perspektivnye napravleniya sovershenstvovaniya tehnologii obogasheniya bednyh magnetitovyh kvarcitov [Promising areas of improvement of low-grade magnetite quartzite processing]. *Gornyy zhurnal*. 1998, no 1, pp. 24–26. [In Russ].

4. *Spravochnik po obogasheniyu rud. Osnovnye processy*. Pod red. O.S. Bogdanova, 2 izd. [Ore dressing handbook. Basic processes. Bogdanov O.S. (Ed.), 2nd edition], Moscow, Nedra, 1983, pp. 141.

5. *Spravochnik po obogasheniyu rud. Podgotovitelnye processy*. Pod red. O.S. Bogdanova [Ore dressing handbook. Preparatory process. Bogdanov O.S. (Ed.)], Moscow, Nedra, 1982, 366 p.

6. Alejnikov N.A., Usachev P.A., Zelenov P.I. *Strukturirovanie ferromagnitnyh suspenziy* [Structuring of ferromagnetic suspensions], Leningrad, Nauka, 1974, 119 p.

7. Usachev P.A. Poluchenie vysokokachestvennyh zheleznyh koncentratov na obogatitelnoj fabrike OAO «Lebedinskij GOK» [Production of high-quality iron concentrates at processing plant of Lebedinsky Mining and Processing Plant]. *Gornyy zhurnal*. 2000, no 3, pp. 41–44. [In Russ].

8. Usachev P.A., Opalev A.S. *Magnitno-gravitacionnoe obogashenie rud* [Magnetic–gravity ore concentration], Apatity, KNC RAN, 1993, 92 p.

9. Sherbakov A.V., Opalev A.S. Razrabotka i vnedrenie energosberegayushej tehnologii obogasheniya zhelezistyh kvarcitov na AO «OLKON» [Development and introduction of energy-saving ferruginous quartzite processing technology at OLKON]. *Trudy Kolskogo nauchnogo centra RAN*. 2015, no 3 (29) C. 176–184. [In Russ].

10. Filippov M.V. Vzveshennyy sloy ferromagnitnyh chastic i dejstvie na nego magnitnogo polya [Blanket of ferromagnetic particles and effect of magnetic field on it]. *Prikladnaya magnitogidrodinamika*. 1961, vol. 12, pp. 215–236. [In Russ].

11. Kirko I.M., Filippov M.V. Osobennosti vzveshennogo sloya ferromagnitnyh chastic v magnitnom pole [Features of blanket of ferromagnetic particles in magnetic field]. *Zhurnal tehnicheskoy fiziki*. 1960, vol. 30, no 9, pp. 1081–1084. [In Russ].

12. Rosensweig R.E. Fluidization: Hydrodynamic stabilization with a magnetic field. *Science*. 1979. Vol. 204. P. 57–60.

13. Rosensweig R.E. Magnetic stabilization of the state of uniform fluidization. *Ind. Eng. Chem. Fundam*. 1979. Vol. 18, No 3. Pp. 260–269.

14. Siegell J. Magnetized-fluidized beds. *Powder Technology*. 1991, no 64. P. 1.

15. Kalyuzhnaya R.V. Issledovanie vliyaniya magnitnogo polya na svojstva ozhizhennoj ferromagnitnoj suspenzii v processe magnitno-gravitacionnoj separacii [Analysis of magnetic field effect on properties of liquefied ferromagnetic suspension during magnetic–gravity separation]. Gornyy informacionno-analiticheskiy byulleten. 2016, no 7, pp. 392–402.

16. Barskiy L.A., Plaksin I.N. Kriterii optimizacii razdelitelnyh processov [Optimization criteria for separation processes], Moscow, Nauka, 196, 215 p.