

УДК 669.046:662.778

УРОВЕНЬ ПОТЕРЬ МАГНЕТИТОВОГО ЖЕЛЕЗА ПРИ МОКРОЙ СЕПАРАЦИИ

Якубайлик Э.К.¹, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник (churilov@iph.krasn.ru)

Ганженко И.М.², инженер (a.ganzhenko@mail.ru)

Бутов П.Ю.², главный обогатитель (Pavel.Butov@evraz.com)

Килин В.И.³, д.т.н., главный обогатитель (Kilin_Vladimir@mail.ru)

¹ Институт физики СО РАН им. Л.В. Киренского

(660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38)

² ОАО «Евразруда»

(654018, Россия, г. Новокузнецк, Кемеровская обл., Кондомское шоссе, 39)

³ ЗАО «ГМК Казахалтын»

(021500, Республика Казахстан, г. Степногорск, Микрорайон 6, стр. 5)

Аннотация. Изучены пробы отвальных хвостов всех операций, проводимых по схеме обогащения Абагурской фабрики. Выполнены магнитный, химический анализы общих хвостов, измерены магнитные характеристики продуктов. Среднее содержание железа магнетитового в отвальных хвостах составило в 2013 г. примерно 0,9 %. Опыты подтвердили, что основные потери магнетита связаны с его тонкими классами, их низкими магнитными параметрами. Потери магнетита снижаются с повышением поля сепарации. На фабрике заменено 45 % феррит-барьерных магнитных систем сепараторов ПБМ 90/250 на системы из композитов неодим – железо – бор; поле возросло с 111 до 175 кА/м. Рекомендовано завершить модернизацию магнитных систем всех сепараторов фабрики; на операции сгущения установить сепараторы для регенерации суспензий с полем 190 кА/м. В итоге реконструкции уровень потерь магнетитового железа на фабрике может быть достигнут 0,45 – 0,55 %.

Ключевые слова: магнетитовое железо, отвальные хвосты, потери, мокрая сепарация, высокоинтенсивные магниты, магнитные параметры.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-6-397-401

Снижение потерь извлекаемого магнетитового железа в хвосты в процессе обогащения мокрой магнитной сепарацией до технологически предельного уровня является одной из важнейших задач обогащения.

На Абагурскую обогатительную фабрику ОАО «Евразруда» с двухстадийной схемой обогащения при конечной крупности 70 % класса менее 71 мкм (качественная технологическая схема, представленная на рисунке) поступают первичные сухие концентраты различных сибирских железорудных месторождений. Из них фабрика производит вторичный железорудный концентрат.

Таким образом, вторичный концентрат Абагурской фабрики – это продукт переработки исходных материалов с широким спектром магнитных параметров, что усложняет задачу обогащения.

Потери железа при сухом способе (первом этапе обогащения) рассматривать не будем, а в основном рассмотрим потери железа при мокром способе, на заключительном этапе, так как при сухом способе вскрываются преимущественно текстурные сростки, а при мокром – структурные, магнитные свойства которых существенно отличаются [1].

Настоящая работа посвящена анализу потерь магнетита в процессе мокрой магнитной сепарации и поиску возможностей их уменьшения. Данные подготов-

лены по материалам, выполненным в последние годы, совместных исследований специалистов Абагурского филиала ОАО «Евразруда» и сотрудников Института физики СО РАН.

Исторически магнетитовое железо в отходах начали определять с 1971 г., когда была разработана официальная методика [2]. В содержании общего железа, по справочным данным, доля магнетитового составляет от 3 до 5 % [3].

В 80-е годы началом серийного производства сепараторов ПБМ конструкции «Механобр» с феррит-барьерными полюсами [4] потери железа магнетитового снизились до 1,7 – 2,8 % [5]. В настоящее время с модернизацией сепараторов и оптимизацией технологии потери магнетитового железа удалось еще уменьшить. На Абагурской фабрике, оборудованной современными сепараторами ПБМ 90/250, усредненное содержание магнетитового железа в отвальных хвостах составило в 2013 г. до 0,90 %. Таким образом, встал вопрос достижимого предела снижения этих потерь.

Потери магнетита с хвостами при магнитном обогащении, в основном, обусловлены природой ферромагнетизма. Установлено, что с уменьшением размера частиц магнетита менее 60 – 70 мкм, удельная магнитная восприимчивость (χ) и удельная остаточная намагни-

ченность (σ_r) заметно снижаются, а коэрцитивная сила (H_c) резко возрастает.

Возникает противоречие: для обеспечения достаточного раскрытия магнетита и увеличения его содержания в концентрате исходная проба подвергается тонкому измельчению (до 70 мкм), которое и ухудшает показатели сепарации. Локального поля сепаратора не хватает для извлечения столь тонких зерен в концентрат, и они удаляются в хвосты, повышая потери магнетитового железа.

На магнетитовых рудах эти зависимости ранее наблюдали авторы работы [6]; подобные опыты описаны в монографии [7]. Значительное увеличение содержания магнетитового железа в тонких классах отвальных хвостов Абаканского рудника подтверждено в работе [8]. Отметим также, что анализ величин полей насыщения H_s по данным магнитных измерений показывает их значительный разброс для руд различных сибирских месторождений, что также приводит к ухудшению показателей извлечения [9].

В практике магнитного обогащения наиболее часто применяют способ снижения потерь железа с хвостами путем повышения напряженности и градиента магнитного поля сепарации. В последние два десятилетия этого достигают путем использования высокоинтенсивных магнитов типа неодим–железо–бор [10, 11].

Как предельный случай рассмотрим сепарацию методом высокоградиентной магнитной сепарации (ВГМС). Физические основы разделения, конструкции отечественных и зарубежных ВГМС-сепараторов, опыт их использования достаточно полно изложены в монографии [12].

В настоящей работе обогащение реализовывали высокоградиентной сепарацией четырех проб, взятых с Абагасского железорудного месторождения: проб №№ 60 и 62 – окисленных гематитовых руд и №№ 61 и 1 – хвостов магнитной сепарации смешанных руд, выделенные на магнитном анализаторе в поле $H = 80$ кА/м. Напряженность «первичного» поля в зазоре электромагнита, заполненном стальными шарами диам. 5 мм, составляла $H = 960$ кА/м. При этом содержание магнетитового железа в хвостах ВГМС снизилось во всех пробах до 0,1 % [13].

Концентраты такой ВГМС-сепарации неприемлемы для металлургического передела ввиду низкого содержания в них железа, но проведенные опыты показывают динамику потерь железа в высоких магнитных полях. Очевидно, требуются не столь высокое магнитное поле (как при ВГМС-сепарации) и изменение конструкции сепараторов, способствующее более высокой степени промывки материала, чтобы компенсировать действие соответствующего повышения магнитного поля.

В период проведения этой работы на Абагурской фабрике уже было установлено 17 сепараторов с полюсами, изготовленными из композита неодим–железо–бор, создающими на поверхности барабанов сепараторов ПБМ 90/250 напряженность 175 кА/м. Расстояние меж-

ду полюсами составляло 80 мм. Остальные сепараторы ПБМ 90/250 имели феррит-бариевые магниты с расстоянием между полюсами 120 мм и напряженность поля на поверхности барабана 111 кА/м. Таким образом, рост магнитного поля на новых сепараторах был компенсирован увеличением частоты смены полюсов и, соответственно, частотой перемешивания обогащаемого материала. На момент опробования количество установленных на первой стадии сепараторов с новыми магнитными системами составило около 45 %, на сепарации сгущения – около 45 % и на второй стадии примерно 35 %. Всего в схеме обогащения было задействовано в период отбора проб до 45 агрегатов ПБМ 90/250.

Итоги исследований и опытно-промышленных испытаний, связанных с модернизацией магнитных систем сепараторов на фабриках ОАО «Евразруда», подведены в работе [14].

Для изучения состояния сепарации в течение двух месяцев 2013 г. были отобраны усредненные пробы отвальных хвостов всех операций фабрики (см. рисунок). Пробы были подвергнуты ситовому и химическому анализам (табл. 1).

Как видно из приведенных в табл. 1 результатов, потери магнетитового железа в крупных классах хвостов ($-1 + 0,2$ мм и $-0,2 + 0,071$ мм) всех операций примерно одинаковы (0,87 – 1,15 %), но в классе $-0,071 + 0$ мм при операции сгущения они возрастают до 3,25 % против 0,57 и 0,50 % на первой и второй стадиях обогащения.

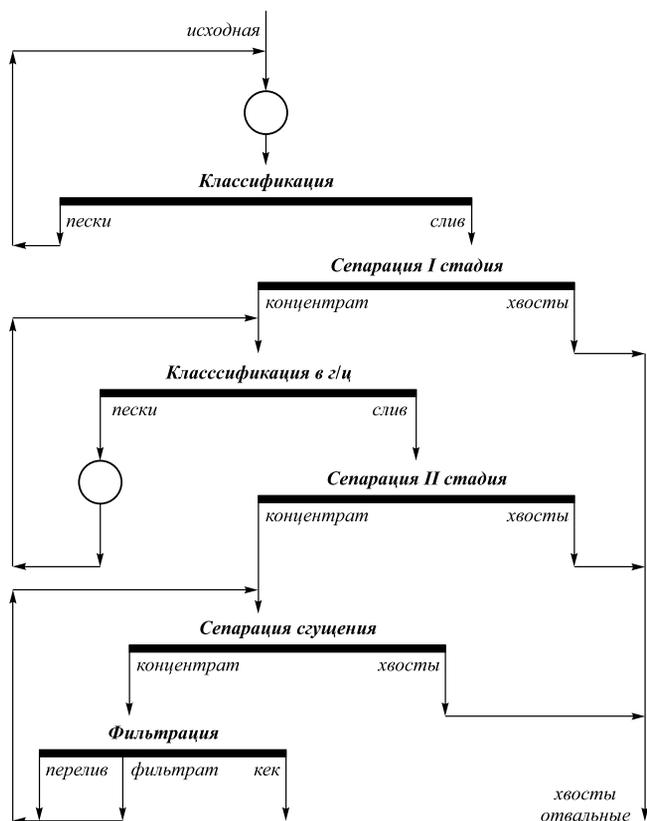
Это явление еще раз подтверждает в производственных условиях упоминавшееся ранее снижение магнитных свойств мелких классов магнетита. И, если на первой и второй стадиях обогащения это в мелких классах не ощущается, то на операции сгущения заметно.

Поскольку операция сгущения сопряжена с фильтрацией и на нее замкнут кругооборот перелива фильтров и фильтрата (см. рисунок), то получаем добавочный эффект гравитационного обогащения в ванне фильтров (перелив) и фильтрат, которые представлены мельчайшими отмытыми или просочившимися частицами, в том числе магнетита. Последние не успевают перемешаться перед сепарацией сгущения с концентратом второй стадии (см. рисунок) и на обычных сепараторах уходят в хвосты.

Для проверки этого предположения проведены магнитные анализы класса $-0,071 + 0$ мм хвостов на всех операциях обогащения (табл. 2).

Далее определим магнитные свойства продуктов разделения. Магнитные характеристики продуктов магнитного анализа хвостов измерены на автоматизированном вибрационном магнитометре в магнитном поле напряженностью 800 кА/м с погрешностью измерения магнитного момента 10 А/м, поля 40 А/м, массы исследуемых образцов 0,1 мг. Методика измерений на вибрационном магнитометре изложена в работе [15]. Значения магнитных параметров приведены в табл. 3.

По представленным в табл. 3 магнитным параметрам подсчитываем удельную магнитную восприим-



Качественная схема обогащения

Qualitative flowsheet of enrichment

чивость (χ) магнитных продуктов магнитного анализа хвостов класса $-0,071 + 0$ мм.

Как видно из табл. 4, удельная магнитная восприимчивость (при напряженности магнитного поля $H = 175$ кА/м) магнетита в классе $-0,071 + 0$ мм на всех операциях процесса обогащения практически одинакова. Это означает, что на повышенные потери при операции сгущения влияет наличие замкнутого круговорота перелива и фильтрата. Для устранения этих потерь наиболее целесообразно применять на операции сгущения сепараторы для регенерации суспензий (ПБР-П-90/250А) Воронежского завода горно-обогатительного оборудования с магнитными системами из композита неодим–железо–бор и напряженностью поля на поверхности барабана 190 кА/м. Сепараторы имеют глубокую ванну и спокойное ламинарное течение внутри нее, а также угол охвата магнитной системы около 270° против обычных $130 - 150^\circ$. Применение таких агрегатов на сгущении позволит (согласно данным табл. 2 и 1) снизить на $0,15 - 0,20$ % потери магнетитового железа в хвостах фабрики.

Уровень потерь магнетитового железа в хвосты ($0,90$ %) в 2013 г. был достигнут после установки на 17 сепараторах (примерно одинаково распределенных по операциям) новых систем из композита неодим–железо–бор, что составляло около 45 % всего количества работавших сепараторов. До их внедрения наилучший

Т а б л и ц а 1

Ситовый и химический составы хвостов операций фабрики

Table 1. Sieve analysis and chemical composition of mill operations tailing

Операции	Выход, %, по схеме	Класс крупности, мм	Выход класса, %	Содержание железа, %	
				Fe _{общ}	Fe _{маг}
Первая стадия	22 – 26	-1 + 0,2	6,5	7,2	0,87
		-0,2 + 0,1	15,4	9,2	1,07
		-0,1 + 0,071	3,9	–	–
		-0,071 + 0	74,2	9,6	0,57
		Итого	100,0	9,4	0,67
Вторая стадия	11 – 13	-1 + 0,2	3,7	6,9	0,90
		-0,2 + 0,1	15,0	9,1	1,15
		-0,1 + 0,071	6,2	–	–
		-0,071 + 0	75,2	10,9	0,50
		Итого	100,0	10,5	0,54
Сгущение	2,5 – 3,5	-1 + 0,2	0,3	8,1	1,05
		-0,2 + 0,1	1,8	9,0	1,10
		-0,1 + 0,071	0,6	–	–
		-0,071 + 0	97,3	13,4	3,25
		Итого	100,0	13,3	3,20
Хвосты общие	39,0	–	100,0	9,7	1,00

Примечание. Fe_{общ} – железо общее; Fe_{маг} – железо магнетитовое.

Т а б л и ц а 2

Магнитный анализ класса –0,071 + 0 мм хвостов операций

Table 2. Magnetic analysis of –0,071 + 0 mm class of operation tailing

Проба	Содержание, %, в					
	исходном продукте		магнитном продукте		немагнитном продукте	
	Fe _{общ}	Fe _{маг}	Fe _{общ}	Fe _{маг}	Fe _{общ}	Fe _{маг}
Хвосты 1-й стадии	9,6	0,57	53,3	49,8	9,3	0,29
Хвосты 2-й стадии	10,9	0,50	41,5	37,6	10,7	0,23
Хвосты сгущения	13,4	3,25	51,6	48,5	10,2	0,31

показатель по потерям магнетитового железа в хвосты Абагурской фабрики составлял за год 1,10 %. Следовательно, полная замена во всем парке сепарации феррит-бариевых систем на системы из композита неодим–железо–бор на всех операциях может снизить уровень потерь магнетитового железа в хвосты еще не менее, чем на 0,20 – 0,25 %. В итоге замена устаревших магнитных систем на сепараторах фабрики на системы из композита неодим–железо–бор и установка на операции сгущения сепараторов для регенерации суспензий

ПБР-П-90/250А Воронежского завода позволят снизить потери магнетитового железа в отходы до 0,45 – 0,55 %.

Выводы. Проведено изучение процесса мокрой магнитной сепарации на Абагурской обогатительной фабрике, получающей для переработки первичные сухие концентраты различных сибирских железорудных месторождений и выделявшей на момент испытаний отходы с содержанием железа магнетитового 1,0 – 0,9 %. На фабрике произведена замена 45 % феррит-бариевых магнитных систем на сепараторах ПБМ 90/250, имеющих напряженность поля 111 кА/м, на системы из композита неодим–железо–бор с полем 175 кА/м. Показано, что главные потери магнетита на фабрике происходят за счет мелких классов (менее 70 мкм), которые имеют пониженные магнитные характеристики, что дополняет известные ранее исследования. Проведенные на фабрике мероприятия позволяют уменьшить потери магнетитового железа в отходы не менее, чем на 0,15 – 0,20 %. Достижимым уровнем потерь магнетитового железа в отходы на Абагурской фабрике при использовании современных техники и технологии следует считать 0,45 – 0,55 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Деркач В.Г. Специальные методы обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1966. – 338 с.
2. ГОСТ 16589–71. Руды железные типа железистых кварцитов. Метод определения железа магнетита. – М.: ГК СССР по стандартам, 1986.
3. Справочник по обогащению руд. Т. 3 / Под ред. О.С. Богданова. – М.: Недра, 1974. С. 164 – 252.

Т а б л и ц а 3

Магнитные характеристики продуктов магнитного анализа

Table 3. Magnetic characteristics of magnetic analysis products

Пробы	$\sigma_s, \text{A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$	$\sigma_r, \text{A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$	$H_c, \text{кА/м}$	$\sigma_H, \text{A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$, в поле напряженностью		
				80 кА/м	111 кА/м	175 кА/м
Хвосты 1-й стадии	1,67/57,3	0,146/6,33	9,70/5,18	0,70/40,4	1,02/45,5	1,30/50,4
Хвосты 2-й стадии	0,82/43,0	0,10/4,7	12,00/5,34	0,44/29,1	0,54/33,2	0,65/37,3
Хвосты сгущения	1,51/61,3	0,129/7,48	8,80/5,90	0,87/43,6	1,04/48,9	1,23/53,1

Пр и м е ч а н и е. Числитель – материал исходной пробы; знаменатель – магнитный продукт магнитного анализа исходной пробы.

Т а б л и ц а 4

Удельная магнитная восприимчивость магнитных продуктов

Table 4. Specific magnetic susceptibility of magnetic products

Проба	Железо		Максимум $\chi \cdot 10^{-4}, \text{м}^3/\text{кг}$		$\chi \cdot 10^{-4}, \text{м}^3/\text{кг}$ при		
	Fe _{общ} , %	Fe _{маг} , %	H, кА/м	χ	H = 80 кА/м	H = 111 кА/м	H = 175 кА/м
Хвосты 1-й стадии	53,3	49,9	9,9	0,79	0,22	0,13	0,05
Хвосты 2-й стадии	41,5	37,6	10,8	0,47	0,15	0,10	0,04
Хвосты сгущения	51,6	48,5	10,8	0,83	0,21	0,13	0,05

4. Справочник по обогащению руд. Основные процессы / Под ред. О.С. Богданова. – М.: Недра, 1983. С. 167 – 181.
5. Справочник по обогащению руд. Обоганительные фабрики / Под ред. О.С. Богданова. – М.: Недра, 1984. С. 153 – 217.
6. Бикбов А.А., Крюковская Л.В. Магнитные свойства некоторых магнетитовых промпродуктов // Обогащение руд. 1974. № 5. С. 17 – 20.
7. Ломовцев Л.А., Нестерова Н.А., Дробченко Л.А. Магнитное обогащение сильномагнитных руд. – М.: Недра, 1979. – 235 с.
8. Килин В.И., Якубайлик Э.К. Изучение магнитных свойств и процессов сепарации абаканских магнетитов // ФТПРПИ. 2002. № 5. С. 104 – 109.
9. Килин В.И., Якубайлик Э.К., Костененко Л.П., Ганженко И.М. Изучение обогатимости гематит-магнетитовых руд Абагасского месторождения // ФТПРПИ. 2012. № 2. С. 160 – 166.
10. Пелевин А.Е., Цыпин Е.Ф., Колтунов А.В., Комлев С.Г. Высокоинтенсивные магнитные сепараторы с постоянными магнитами // Изв. вуз. Горный журнал. 2001. № 4-5. С. 133 – 136.
11. Пелевин А.Е. Обогащение магнетитовых руд в сепараторах с бегущим магнитным полем // Изв. вуз. Горный журнал. 2001. № 2. С. 118 – 122.
12. Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Высшее горное образование. – М.: изд. МГУ, 2005. – 670 с.
13. Килин В.И., Якубайлик Э.К., Ганженко И.М., Килин С.В. Оценка обогатимости абагасских окисленных руд // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 12. С. 6 – 8.
14. Килин В.И. Повышение эффективности магнитной сепарации магнетитовых руд. – Чита: изд. ЧитГУ, 2011. – 327 с.
15. Балаев А.Д., Бояршинов Ю.В., Карпенко М.М., Хрусталев Б.П. Автоматизированный магнитометр со сверхпроводящим соленоидом // Приборы и техника эксперимента. 1985. № 3. С. 167, 168.

Поступила 25 декабря 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 6, PP. 397-401.

LOSS LEVEL OF MAGNETITE IRON AT WET SEPARATION

E.K. Yakubailik¹, I.M. Ganzhenko², P.Yu. Butov², V.I. Kilin³

¹ Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

² JSC “Evrazruda”, Novokuznetsk, Russia

³ CJSC Kazakhgold, Stepnogorsk, Republic of Kazakhstan

Abstract. The article presents the studies of tailing operation flowsheet of Abagur factory. The magnetic, chemical analysis of the overall tailings, as well as the measured magnetic characteristics of the products has been submitted. The iron content of magnetite in the tailings has been averaged in 2013 and made up ~0.9 %. The experiments have confirmed that the main losses are associated with magnetite thin classes, their low magnetic parameters. The loss of magnetite decreases with increasing separation of the field. The factory replaced 45 % of barium ferrite magnetic systems separators PBM 90/250 by composite neodymium-iron-boron systems; therefore, the field was increased from 111 to 175 kA/m. It is recommended to complete the modernization of magnetic separators systems of all factory operations and to set condensation separators for regeneration of suspensions with a field of 190 kA/m. As a result of the reconstruction magnetite iron loss level in the factory can be achieved nearly ~ 0.45 – 0.55 %.

Keywords: magnetite iron, final tailings, loss, wet separation, high intensity magnets, magnetic parameters.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-6-397-401

REFERENCES

1. Derkach V.G. *Spetsialnye metody obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* [Special methods of mineral processing]. Moscow: Nedra, 1966, 338 p. (In Russ.).
2. *GOST 16589-71. Rudy zheleznye tipa zhelezistykh kvartsitov. Metod opredeleniya zheleza magnetita* [Iron ores of iron quartzite type. Method for determination of magnetite iron]. Moscow: GK SSSR standard 1986. (In Russ.).
3. *Spravochnik po obogashcheniyu rud* [Minerals processing: Reference book]. Bogdanov O.S. ed. Vol. 3. Moscow: Nedra, 1974, pp. 164–252. (In Russ.).
4. *Spravochnik po obogashcheniyu rud. Osnovnye protsessy* [Minerals processing: Reference book. Fundamental processes]. Bogdanov O.S. ed. Moscow: Nedra, 1983, pp. 167–181. (In Russ.).
5. *Spravochnik po obogashcheniyu rud. Obogatitelnye fabriki* [Minerals processing: Reference book. Ore-dressing plants]. Bogdanov O.S. ed. Moscow: Nedra, 1984, pp. 153–217. (In Russ.).
6. Bikbov A.A., Kryukovskaya L.V. Magnetic Properties of intermediate magnetite products. *Obogashchenie rud*. 1974, no. 5, pp. 17–20. (In Russ.).
7. Lomovtsev L.A., Nesterova N.A., Drobchenko L.A. *Magnitnoe obogashchenie sil'nomagnitnykh rud* [Magnetic beneficiation of strongly magnetic ores]. Moscow: Nedra, 1979, 235 p. (In Russ.).
8. Kilin V.I., Yakubailik E.K. Investigation into magnetic properties and processes of separation of Abakan magnetites. *Journal of Mining Science*. 2002, vol. 38, no. 5, pp. 506–511.
9. Kilin V.I., Yakubailik E.K., Kostenenko L.P., Ganzhenko I.M. Dressability of abagas hematite-magnetite ores. *Journal of Mining Science*. 2012, vol. 48, no. 2, pp. 363–368.
10. Pelevin A.E., Tsypin E.F., Koltunov A.V., Komlev S.G. High-intensity magnetic separators with permanent magnets. *Izvestiya VUZov. Gornyy zhurnal*. 2001, no. 4-5, pp. 133–136. (In Russ.).
11. Pelevin A.E. Concentration of magnetite ores in separators with the travelling magnetic field. *Izvestiya VUZov. Gornyy zhurnal*. 2001, no. 2, pp. 118–122. (In Russ.).
12. Karmazin V.V., Karmazin V.I. *Magnitnye, elektricheskie i spetsialnye metody obogashcheniya poleznykh iskopaemykh. Vyshee gornoe obrazovanie* [Magnetic, electrical and special methods of mineral enrichment]. Vol. 1. Moscow: izd. MSGU, 2005, 670 p. (In Russ.).
13. Kilin V.I., Yakubailik E.K., Ganzhenko I.M., Kilin S.V. The assessment process for abagas oxidized ores preparation characteristics. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 12, pp. 6–8. (In Russ.).
14. Kilin V.I. *Povyshenie effektivnosti magnitnoi separatsii magnetitovykh rud* [Increase of effectiveness of magnetic separation of magnetite ores]. Chita: izd. ChitGU, 2011, 327 p. (In Russ.).
15. Balaev A.D., Boyarshinov Yu.V., Karpenko M.M., Khrustalev B.P. Automated Superconductive – Solenoid Magnetometer. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 1985, vol. 3, pp. 167–168. (In Russ.).

Information about the authors:

E.K. Yakubailik, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Reseacher (churilov@iph.krasn.ru)

I.M. Ganzhenko, Engineer (a.ganzhenko@mail.ru)

P.Yu. Butov, Chief Preparator (Pavel.Butov@evraz.com)

V.I. Kilin, Dr. Sci. (Eng.), Chief Preparator

(Kilin_Vladimir@mail.ru)

Received December 25, 2015