

## КОРРЕЛЯЦИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ И СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА В ПРОДУКТАХ МОКРОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

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

**Балаев А.Д.<sup>1</sup>**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник

**Ганженко И.М.<sup>2</sup>**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник

**Бутов П.Ю.<sup>2</sup>**, главный специалист по обогащению, главный обогатитель

<sup>1</sup> Институт физики СО РАН

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

<sup>2</sup> ОАО «Евразруда»

(654027, Россия, Кемеровская область, г. Новокузнецк, пр. Курако, 49а)

**Аннотация.** Изучено изменение одного из основных параметров мокрого магнитного обогащения – содержания железа – и магнитных характеристик продуктов по технологической схеме обогащения Абагурской обогатительной фабрики (от слива классификаторов до концентрата 2-й стадии). Количество железа в пробах заметно растет с уменьшением крупности частиц. Приращение содержания железа магнетитового по схеме составляет 27,43 %, удельная намагнитченности насыщения  $\sigma_s$  возрастает на 25,8 А·м<sup>2</sup>/кг; в поле сепарации  $H = 175$  кА/м прирост удельной намагнитченности насыщения аналогичен – 25,76 А·м<sup>2</sup>/кг. Значения удельной магнитной восприимчивости  $\chi$  в концентрате в сравнении со сливом выше. С ростом напряженности поля сепарации удельная восприимчивость продуктов уменьшается в несколько раз. По всей схеме обогащения наблюдается пропорциональность значений содержания железа и магнитных параметров продуктов. Учитывая эту закономерность, магнитные характеристики продуктов можно использовать для контроля и регулирования технологических режимов процессов мокрого магнитного обогащения.

**Ключевые слова:** мокрая сепарация, слив, концентрат, удельная намагнитченность насыщения, удельная магнитная восприимчивость.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-10-744-748

Значения магнитных характеристик материала можно изменять величиной поля сепарации, магнитной флокуляцией, другими магнитными воздействиями, концентрацией ферромагнитных минералов. Прямая взаимосвязь магнитных параметров с количеством магнетита в промпродукте позволяет говорить о фактическом регулировании качества конечного продукта (концентрата) изменением магнитных параметров.

Абагурская обогатительная фабрика получает на переработку первичные концентраты с сибирских горно-обогатительных предприятий ОАО «Евразруда», как правило, двух типов магнетитовых руд: сильномагнитных (основная масса) – Каз, Шерегеш, Таштагол, Абакан – и слабомагнитных – Тея. Наибольшее содержание  $Fe_{\text{общ}}$  и  $Fe_{\text{маг}}$  в классе  $-0,07 + 0$  мм в промпродуктах Абакана составляет соответственно 50,9 и 46,0 %, Каза – 47,1 и 42,4 %; наименьшее – в слабомагнитных продуктах Теи – 36,0 и 32,1 %. Значения удельной намагнитченности насыщения  $\sigma_s$  составляют 56,9 А·м<sup>2</sup>/кг (Абакан), 48,9 А·м<sup>2</sup>/кг (Каз) и 39,8 А·м<sup>2</sup>/кг (Тея). Можно заключить, что удельная намагнитченность линейно пропорциональна количеству магнетита в пробе.

Результаты изучения магнитных свойств и процессов магнитного обогащения железосодержащих руд Сибирского региона, выполненные после 2000 г., отражены в работах [1 – 3].

Цель настоящей работы – одновременно проследить динамику изменений по технологической цепочке как содержания железа (магнетитового) в продуктах, так и их магнитных характеристик, что представляет практическое значение для повышения качества конечного концентрата.

Подготовка образцов к исследованиям, измерение магнитных характеристик выполнены в Институте физики СО РАН, лабораторная магнитная сепарация – на Абагурской обогатительной фабрике и в Институте физики; химический анализ исходных и изученных проб проведен в Центральной технологической лаборатории ОАО «Евразруда».

Для исследований на Абагурской обогатительной фабрике были отобраны четыре представительных пробы крупностью  $-1 + 0$  мм по технологической схеме обогащения: 1 – слив классификатора обоих участков объединенный (Слив); 2 – концентрат конечный, кек (Конц.); 3 – хвосты отвальные участка 1 (Хв.1); 4 – хвосты отвальные участка 2 (Хв.2). Технологическая схема фабрики изображена на рис. 1.

Для изучения гранулометрического состава и оценки распределения по крупности железа пробы были разделены на восемь классов от  $+1$  мм до  $-0,045 + 0$  мм. Результаты «укрупненного» ситового анализа трех классов частиц (условно «крупных», «средних» и «тонких») приведены ниже:

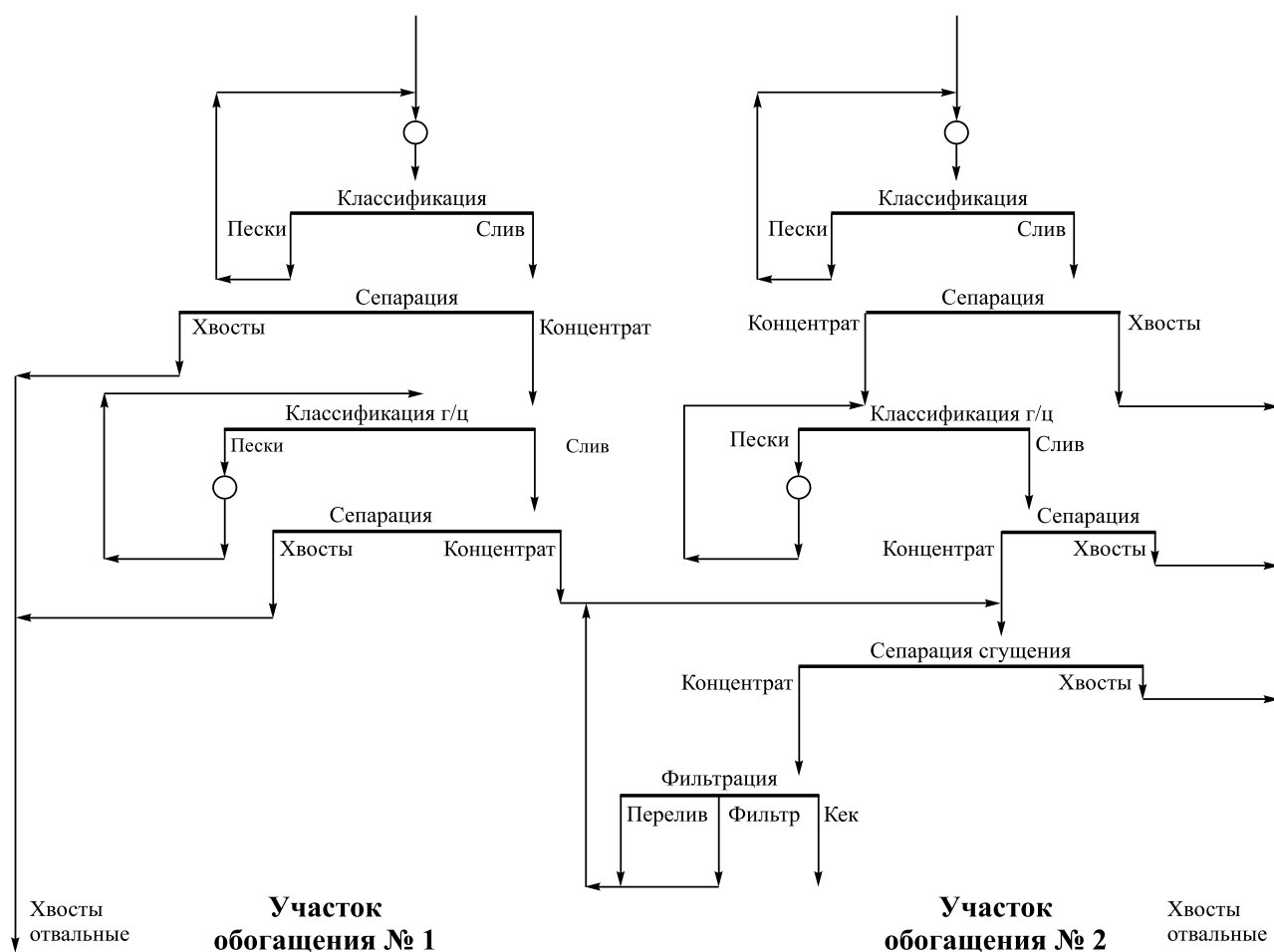


Рис. 1. Технологическая схема фабрики

Fig. 1. Technological scheme of the factory

Класс, мм	Выход классов, %, для проб			
	Слив	Конц.	Хв. 1	Хв. 2
-1,0 + 0,2	28,7	5,9	3,7	19,2
-0,2 + 0,071	26,2	25,8	21,2	22,6
-0,071 + 0	45,1	68,3	75,1	58,2
Итого:	100	100	100	100
В том числе -0,045 + 0	36,3	55,0	67,0	50,6

Видно, что частиц тонкого класса ( $-0,071 + 0$  мм) больше в концентрате (до 68,3 %) и хвостах участка 1 (75,1 %); в сливе классификатора и хвостах участка 2 их существенно меньше (соответственно 45,1 и 58,2 %). Частицы крупных классов присутствуют больше в сливе, чем в концентрате; частиц средних классов в сливе и концентрате практически равное количество, несколько меньше – в хвостах.

Отметим, что по данным гранулометрии все пробы крупностью менее 0,071 мм в значительной части представлены частицами менее 0,045 мм; в сливе их всего 36,3 %, в концентрате 55,0 %, хвостах участка 1 – 67,0 %; участка 2 – 50,6 %.

Распределение железа по классам крупности частиц в абатурских продуктах представлено следующими данными:

Проба	Класс, мм	Содержание, %	
		Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>маг</sub>
Слив	-1,0 + 0,28	36,30	31,24
	-0,28 + 0,07	42,94	38,10
	-0,07 + 0	43,03	37,99
Конц.	-1,0 + 0,28	40,87	37,22
	-0,28 + 0,07	58,45	55,84
	-0,07 + 0	66,50	65,42
Хв. 1	-1,0 + 0,2	6,56	0,77
	-0,2 + 0,1	9,08	0,74
	-0,07 + 0	10,94	0,39
Хв. 2	-1,0 + 0,2	9,05	1,23
	-0,2 + 0,1	10,74	1,36
	-0,07 + 0	10,92	1,03

Прослеживается известная классическая закономерность – рост содержания железа с уменьшением размера частиц.

Измерения магнитных параметров проб выполнены методом вибрационного магнитометра в магнитных полях до 800 кА/м. Методика измерения магнитных свойств на вибрационном магнитометре описана в работе [4].

Магнитные характеристики слива классификатора и концентрата измерены на трех классах крупности:  $-1,0 + 0,28$ ;  $-0,28 + 0,071$  и  $-0,071 + 0,9$  мм; хвостов – на двух:  $-1,0 + 0,2$  и  $-0,071 + 0$  мм.

Основными магнитными характеристиками сильно-магнитных железистых руд и минералов, определяющими поведение магнитных частиц в магнитном поле сепаратора и процесс разделения, являются намагниченность насыщения, остаточная намагниченность, коэрцитивная сила [5].

Результаты измерений значений удельной намагниченности насыщения  $\sigma_s$ , удельной остаточной намагниченности  $\sigma_r$ , коэрцитивной силы  $H_c$  и удельной намагниченности  $\sigma_H$  в магнитных полях 80, 111 и 175 кА/м представлены в таблице.

Зная величины  $\sigma$  и  $H$ , подсчитали удельную магнитную восприимчивость  $\chi$  (для класса  $-0,071 + 0$  мм). Значения  $\chi_{\max}$ , поля  $H$  максимума и величины  $\chi_{H_{80}}$ ,  $\chi_{H_{111}}$  и  $\chi_{H_{175}}$  приведены ниже:

Проба	$H$ , кА/м	$\chi_{\max} \cdot 10^{-4}$ , м <sup>3</sup> /кг	$\chi \cdot 10^{-4}$ , м <sup>3</sup> /кг, при		
			$H_{80}$	$H_{111}$	$H_{175}$
Слив	12,6	0,57	0,22	0,15	0,05
Конц.	9	1,31	0,27	0,17	0,07
Хв. 1	10,8	0,47	0,15	0,1	0,04
Хв. 2	10,8	0,83	0,21	0,13	0,05

На рис. 2 изображены основные кривые намагничивания слива классификаторов и концентрата: явно видна разница в величинах удельной намагниченности насыщения  $\sigma_s$  двух продуктов.

Значения магнитных параметров слива сравнимы с таковыми первичных магнетитовых концентратов, а кон-

центрата – с характеристиками магнитных продуктов их мокрой сепарации. Параметры первичных концентратов девяти сибирских месторождений измерены ранее [6, 7].

Выше приведены данные о содержании железа в продуктах обогащения и их магнитные характеристики. Остановимся на анализе полученных результатов на основном классе сепарации – частицах крупностью  $-0,07 + 0$  мм.

Содержание железа возрастает в конце технологии с 43,03 %  $Fe_{\text{общ}}$  и 37,99 %  $Fe_{\text{маг}}$  в сливе до 66,5 и 65,42 % в концентрате; в хвостах участка 1 остается на уровне 10,94 и 0,39 %; хвостах участка 2 – соответственно 10,92 и 1,03 %.

Удельная намагниченность насыщения  $\sigma_s$  увеличивается с 49,6 А·м<sup>2</sup>/кг для слива до 75,4 А·м<sup>2</sup>/кг для концентрата; для хвостов этот параметр составляет 0,82 (участок 1) и 1,5 А·м<sup>2</sup>/кг (участок 2). Таким обра-

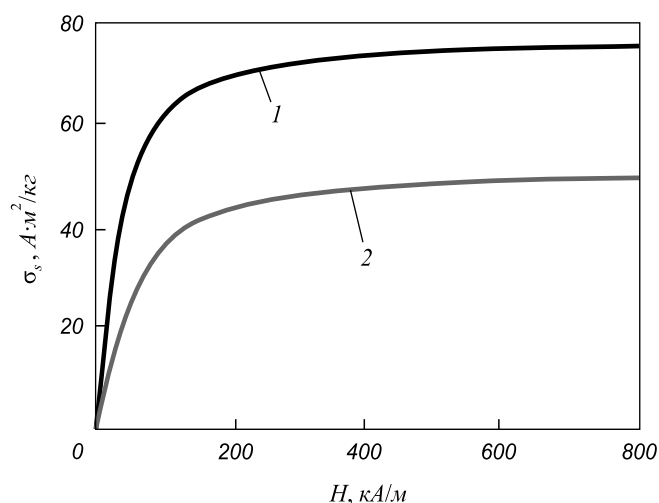


Рис. 2. Основные кривые намагничивания (класс  $-0,071 + 0$  мм): 1 – концентрат; 2 – слив классификатора

Fig. 2. Main curves of magnetization (class  $-0.071 + 0$  mm): 1 – concentrate; 2 – classifier discharge

### Магнитные характеристики продуктов Абагурской аглофабрики

### Magnetic characteristics of the products of Abagur Enrichment Plant

Проба	Класс, мм	$\sigma_s$ , А·м <sup>2</sup> /кг	$\sigma_r$ , А·м <sup>2</sup> /кг	$H_c$ , кА/м	$\sigma_{H_{80}}$ , А·м <sup>2</sup> /кг	$\sigma_{H_{111}}$ , А·м <sup>2</sup> /кг	$\sigma_{H_{175}}$ , А·м <sup>2</sup> /кг
Слив	$-1,00 + 0,28$	49,00	3,72	4,22	33,00	37,70	42,40
	$-0,28 + 0,071$	48,90	3,18	3,74	33,40	38,00	42,60
	$-0,071 + 0$	49,60	3,73	5,13	32,70	37,60	42,60
Конц.	$-1,00 + 0,28$	51,50	4,38	4,20	36,90	41,30	45,50
	$-0,28 + 0,071$	80,70	10,14	5,14	64,50	69,50	74,20
	$-0,071 + 0$	75,40	7,71	4,02	57,70	63,10	68,30
Хв. 1	$-1,00 + 0,20$	1,34	0,07	5,22	0,75	0,91	1,08
	$-0,071 + 0$	0,82	0,10	12,00	0,44	0,54	0,65
Хв. 2	$-1,00 + 0,20$	1,47	0,09	5,38	0,88	0,04	1,22
	$-0,071 + 0$	1,51	0,13	8,80	0,87	1,04	1,23

зом, в процессе обогащения по этапам «приращение» количества железа магнетитового в продукте достигает 27,43 %, а приращение удельной намагниченности насыщения – 25,8 А·м<sup>2</sup>/кг.

Удельная намагниченность в поле сепарации  $H = 175$  кА/м для слива составляет 42,6 А·м<sup>2</sup>/кг, в концентрате поднимается до 68,3 А·м<sup>2</sup>/кг; в хвостах – соответственно 0,65 и 1,23 А·м<sup>2</sup>/кг.

Приведенные выше данные об удельной магнитной восприимчивости свидетельствуют, что значения этой одной из основных магнитных характеристик, входящей в выражение удельной магнитной силы, действующей на частицы в магнитном поле сепаратора, в том числе  $\chi_{\max}$ , величины поля максимума, величин  $\chi$  в различных магнитных полях в концентрате выше в сравнении со сливом (для класса  $-0,07 + 0$  мм).

Отметим, что удельная магнитная восприимчивость максимальна в концентрате в наиболее слабом магнитном поле, т.е. концентрат намагничивается «легче» слива. Спад удельной магнитной восприимчивости в более сильных полях наблюдали ранее на промпродуктах пяти сибирских месторождений, а также на магнетитах четырех месторождений [8, 9].

Значения же коэрцитивной силы  $H_c$ , показателя магнитной жесткости материала, изменяются в процессе обогащения незначительно (реально же увеличиваются только в «тонком» классе хвостов). Исследуемые абатурские продукты по величине коэрцитивной силы находятся на границе магнитотвердых и магнитомягких материалов: граничное значение примерно 4 кА/м [10].

Заметно, что в концентрате проявляется «размерная» зависимость параметров: как содержание  $\beta$ -железа, так и параметр  $\sigma_s$  и другие магнитные характеристики растут с уменьшением крупности материала.

Можно утверждать, что по технологической цепочке обогащения наблюдается пропорциональность значений содержания железа и магнитных характеристик продуктов.

**Выводы.** Проведен сравнительный анализ одного из основных параметров обогащения – содержания железа – и магнитных характеристик по технологической схеме от слива классификатора до конечного продукта – концентрата второй стадии. Прирост содержания  $Fe_{\text{mag}}$

по схеме составляет 27,43 %, удельная намагниченность насыщения возрастает на 25,8 А·м<sup>2</sup>/кг. Потери с хвостами  $Fe_{\text{mag}}$  составляют 0,39 % на участке 1 и 1,03 % на участке 2; их удельная намагниченность насыщения 0,82 и 1,51 А·м<sup>2</sup>/кг. Значителен прирост удельной намагниченности насыщения (25,7 А·м<sup>2</sup>/кг) и в поле сепарации 175 кА/м. Выше для концентрата и удельная магнитная восприимчивость: как значения максимума, так и значения этого параметра в различных магнитных полях. Подтверждено, что значения магнитных характеристик прямо пропорциональны количеству  $Fe_{\text{mag}}$  в продуктах по схеме обогащения. Возможен контроль мокрого обогащения по магнитным характеристикам продуктов на этапах процесса.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Килин В.И. Повышение эффективности магнитной сепарации магнетитовых руд. – Чита: изд. ЧитГУ, 2011. – 327 с.
2. Килин В.И., Килин С.В. Метод подготовки железных руд к сухой магнитной сепарации // Обогащение руд. 2008. № 4. С. 30 – 32.
3. Килин В.И. Влияние магнитной обработки на магнитные свойства сильномагнитных железных руд // Обогащение руд. 2010. № 6. С. 23 – 26.
4. Балаев А.Д., Бояришинов Ю.В., Карпенко М.М., Хрусталев Б.П. Автоматизированный магнитометр со сверхпроводящим соленоидом // Приборы, техника эксперимента. 1985. Т. 3. С. 167, 168.
5. Карамзин В.В., Карамзин В.И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Высшее горное образование – М.: изд. МГТУ, 2005. – 670 с.
6. Yakubailik E.K., Kilin V.I., Chizhik M.V., Ganzhenko I.M., Kilin S.V. Magnetic Characteristics of Primary Concentrates Supplied as a Feedstock to Abagur Enrichment – Agglomeration Plant // Journal of Mining Science. 2013. Vol. 49, № 1, pp. 153 – 159.
7. Якубайлик Э.К., Килин В.И., Ганженко И.М. и др. Лабораторные исследования мокрой магнитной сепарации первичных концентратов сибирских железорудных месторождений // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 2. С. 47 – 51.
8. Бикбов А.А., Крюковская Л.В. Магнитные свойства некоторых магнетитовых промпродуктов // Обогащение руд. 1974. № 5. С. 17 – 20.
9. Рычков Л.Ф., Ломовцев Л.А. Удельная магнитная восприимчивость сильномагнитных руд при различной напряженности магнитного поля // ФТПРПИ. 1978. № 6. С. 108 – 110.
10. Ломовцев Л.А., Нестерова Н.А., Дробченко Л.А. Магнитное обогащение сильномагнитных руд. – М.: Недра, 1979. – 235 с.

Поступила 16 января 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 10, pp. 744–748.

#### CORRELATION OF MAGNETIC PARAMETERS AND IRON CONTENT IN PRODUCTS OF WET MAGNETIC SEPARATION

*E.K. Yakubailik<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Phys.-mat.), Senior Researcher (churilov@iph.krasn.ru)*

*A.D. Balaev<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Phys.-mat.), Senior Researcher*

*I.M. Ganzhenko<sup>2</sup>, Leading Engineer*

*P.Yu. Butov<sup>2</sup>, Chief Specialist of mineral processing equipment*

<sup>1</sup> Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (50, bld.38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia)

<sup>2</sup> JSC “Evrazruda” (49a, Kurako ave., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654010, Russia)

**Abstract.** The change of one of the main parameters of wet magnetic concentration – the iron content and magnetic characteristics of products

made by the concentration technological scheme of Abagur Enrichment Plant (from classifier discharge to concentrate of the 2nd stage) has been studied. The iron content in the samples is growing significantly with the decrease of the particle coarseness. The increment of iron magnetite by the scheme is 27.43 %, the specific value of saturation magnetization  $\sigma_s$  increases by 25.8 A·m<sup>2</sup>/kg. The growth of specific magnetization in the separation field  $H = 175$  kA/m is similar – 25.76 A·m<sup>2</sup>/kg. The values of specific magnetic susceptibility  $\chi$  in the concentrate are higher in comparison with the discharge. The specific product susceptibility decreases in several times with the growth of separation field strength. Throughout the concentration scheme the quantity proportionality of iron content and magnetic parameters of products is observed. Taking into an account all the regularities, magnetic characteristics of the products can be used to control and regulate the process of technological modes of wet magnetic separation processes.

**Keywords:** wet separation, discharge, concentrate, specific saturation magnetization, specific magnetic susceptibility.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-10-744-748

# REFERENCES

1. Kilin V.I. *Povyshenie effektivnosti magnitnoi separatsii magnetitovykh rud* [Effectiveness increase of magnetic separation of magnetite ores]. Chita: izd. ChitGU, 2011. 327 p. (In Russ.).
2. Kilin V.I., Kilin S.V. Preparation method of iron ores for dry magnetic separation. *Obogashchenie rud.* 2008, no. 4, pp. 30–32. (In Russ.).
3. Kilin V.I. Influence of magnetic treatment on magnetic properties of strong-magnetic iron ores. *Obogashchenie rud.* 2010, no. 6, pp. 23–26. (In Russ.).
4. Balaev A.D., Boyarshinov Yu.V., Karpenko M.M., Khrustalev B.P. Automated magnetometer with superconducting solenoid. *Instruments and experimental techniques New York*, 1985, Vol. 28, no. 3, pp. 685–687.
5. Karamzin V.V., Karamzin V.I. *Magnitnye, elektricheskie i spetsial'nye metody obogashcheniya poleznykh iskopaemykh. Vol. 1. Vysshee gornoe obrazovanie*. [Magnetic, electrical and special methods of mineral processing. Vol. 1. Higher mining education]. Moscow: Izd-vo MGGU, 2005. 670 p. (In Russ.).
6. Yakubailik E.K., Kilin V.I., Chizhik M.V., Ganzhenko I.M., Kilin S.V. Magnetic characteristics of primary concentrates supplied as a feedstock to Abagur Enrichment – Agglomeration Plant. *Journal of Mining Science*. 2013, Vol. 49, no. 1, pp. 153–159.
7. Yakubailik E.K., Kilin V.I., Ganzhenko I.M., Chizhik M.V., Kilin S.V. Laboratory researches of wet magnetic separation of primary concentrate of Siberian iron ore deposits. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 2, pp. 47–51. (In Russ.).
8. Bikbov A.A., Kryukovskaya L.V. Magnetic properties of some magnetite industrial products. *Obogashchenie rud.* 1974, no 5, pp. 17–20. (In Russ.).
9. Rychkov L.F., Lomovtsev L.A. Specific magnetic susceptibility of strong-magnetic ores at different magnetic field strength. *FTRPI*. 1978, no. 6, pp. 108–110. (In Russ.).
10. Lomovtsev L.A., Nesterova N.A., Drobchenko L.A. *Magnitnoe obogashchenie sil'nomagnitnykh rud* [Magnetic concentration of strong-magnetic ores]. Moscow: Nedra, 1979. 235 p. (In Russ.).

Received January 16, 2015