УДЕЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД СИБИРСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

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)

¹Институт физики СО РАН им. Л.В. Киренского
(660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38)

²ОАО «Евразруда»
(654018, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, проспект Курако, 49а)

Аннотация. Содержатся результаты исследования удельной магнитной восприимчивости первичных концентратов сибирских железорудных месторождений, ее зависимости от магнитного поля сепаратора. Опыты (лабораторная сепарация, магнитные измерения) выполнены на концентрате класса крупности –0,07 мм. Изучались руды семи месторождений, четыре из которых магнетитовые, а три – слабоокисленные, что обусловлено содержанием в них от 3 до 6 % мартита, гематита и лимонита. Наибольшими значениями магнитной восприимчивости обладают промпродукты магнетитовых руд, меньшими – слабоокисленные, однако поля максимумов удельной магнитной восприимчивости проб у последних выше. Эксперименты показали, что значения удельной магнитной восприимчивости первичных концентратов пропорциональны содержанию в них магнетитового железа.

Ключевые слова: удельная магнитная восприимчивость, первичные концентраты, магнетитовые, слабоокисленные руды, магнетитовое железо.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-852-856

Удельная магнитная восприимчивость (χ) является одним из основных параметров ферромагнетиков, входящим в известное выражение удельной магнитной силы магнитного притяжения частиц к полюсам сепаратора:

$$f_{\text{mag}} = \chi H \text{grad} H;$$

здесь H – напряженность магнитного поля сепаратора.

Таким образом, удельная магнитная восприимчивость, наряду с удельной магнитной силой магнитной системы (ее конструкцией), фактически определяет поведение ферромагнитных частиц в магнитном поле сепаратора. Следовательно, для разработки технологических режимов магнитного обогащения практически необходимо знание величин удельной магнитной восприимчивости первичных концентратов железосодержащих руд, их зависимости [1, 2] от магнитного поля сепаратора.

Объектами изучения являлись промпродукты сухой магнитной сепарации семи обогатительных фабрик сибирских месторождений. Исследования проведены совместно специалистами Абагурского филиала ОАО «Евразруда» и сотрудниками Института физики СО РАН. Подготовка проб к исследованиям (измельчение, классификация), измерение магнитных характеристик выполнены в Институте физики, лабораторная мокрая магнитная сепарация – на Абагурской обогатительной фабрике и в Институте физики СО РАН, химический

анализ исходных и изученных проб – в Центральной технологической лаборатории ОАО «Евразруда».

В качестве образцов для исследований на Абагурской обогатительной фабрике были отобраны девять проб первичных концентратов. По вещественному составу исходные промпродукты укрупненно можно разделить на две группы: магнетитовые (с месторождений Ирба, Каз, Шерегеш, Таштагол и Абакан) и слабоокисленные руды (с месторождений Тёя, Изых-Гол, Краснокаменск).

Результаты химического анализа первичных концентратов и продуктов их мокрой сепарации представлены следующими данными (в числителе – для исходных проб, в знаменателе – для магнитных фракций):

Проба руды месторождения	Содержание, %	
	Fe _{общ}	Fe _{mag}
Слабоокисленные руды		
Тёя	<u>36,00</u>	<u>32,10</u>
	61,25	60,37
Краснокаменск	<u>38,90</u>	<u>31,90</u>
	65,94	65,11
Иzych-Гол	<u>41,20</u>	<u>30,90</u>
	67,33	66,24
Магнетитовые руды		
Ирба	<u>44,90</u>	<u>40,80</u>
	66,39	65,54

Абакан	<u>50,90</u> 66,80	<u>46,00</u> 65,75
Таштагол	<u>41,40</u> 66,06	<u>37,30</u> 65,33
Шерегеш	<u>41,20</u> 63,04	<u>38,20</u> 62,14
Каз	<u>47,10</u> 64,67	<u>42,40</u> 63,26

Примечание. Слабоокисленные руды содержат от 3 до 6 % мартита, гематита и лимонита.

Видно, что содержание $Fe_{\text{общ}}$ и $Fe_{\text{маг}}$ в первичных концентратах магнетитовых руд примерно на 15 % выше, чем в слабоокисленных. К примеру, в промпродукте с месторождения Абакана содержание $Fe_{\text{общ}}$ и $Fe_{\text{маг}}$ составляет примерно 51 и 46 %; в слабоокисленной пробе Тёи – соответственно 36 и 32 %.

Названные продукты исследовались и ранее. Результаты лабораторного мокрого магнитного анализа перечисленных первичных концентратов в поле напряженностью $H = 80$ кА/м, близком к «рабочему» полю сепарации, опубликованы в работе [3]. Основные магнитные характеристики промпродуктов – удельная намагниченность насыщения σ_s , удельная остаточная намагниченность σ_r , коэрцитивная сила H_c обсуждались в исследовании [4], однако удельная магнитная восприимчивость этих продуктов изучена слабо. Остановимся более подробно на изучении этой характеристики.

Удельная магнитная восприимчивость промпродуктов сухого магнитного обогащения сибирских руд исследуется с 80-х годов прошлого века [5]. На материале пяти месторождений подтверждены известные в ферромагнетизме закономерности: зависимость этой величины от содержания магнетитового железа в пробе, от крупности частиц (значительный ее спад при уменьшении размера частиц). Последнее явление, как показывает практика обогащения, приводит к большим потерям магнетитового железа с отвальными хвостами как при сухой, так и при мокрой магнитной сепарации [6, 7].

Заметим, что за десятилетия эксплуатации месторождений состав руд, включая генетические особенности, наличие немагнитных включений и изоморфных замещений, степень окисленности, существенно изменились. Таким образом необходима новая оценка величин их магнитных параметров для оптимизации процессов магнитной сепарации.

По величинам удельной намагниченности σ первичных концентратов в различных магнитных полях, измеренной на автоматизированном вибрационном магнитометре [8], и значениям этих полей подсчитана удельная магнитная восприимчивость χ проб.

Зависимость удельной магнитной восприимчивости от содержания магнетитового железа в пробах руд различных месторождений представлена на рис. 1 (при $H = 80$ кА/м). Просматривается прямая пропорциональная зависимость между значениями χ проб первичных

Рис. 1. Зависимость удельной магнитной восприимчивости от содержания в пробах различных месторождений железа магнетитового

Fig. 1. Dependence of specific magnetic susceptibility on the content of magnetite iron in the samplers of different deposits

концентратов и количеством в них магнетитового железа. Минимальные значения отмечены на слабоокисленном материале с месторождения Изых-Гола, наибольшие – на магнетитовом промпродукте Абаканского месторождения.

Максимумы удельной магнитной восприимчивости первичных концентратов и их поля, а также значения χ в полях $H = 80$ кА/м (наименьшее) и $H = 175$ кА/м (наибольшее) сведены в таблицу. Отметим, что значение поля максимума χ слабоокисленных руд выше таковых для магнетитовых руд: значения напряженности соответственно $H \approx 21$ кА/м (Изых-Гол) и $H \approx 12,4$ кА/м (Абакан). Максимумы значений χ первичных концентратов магнетитовых руд находятся в пределах от 6,84 (Абакан) до $5,29 \cdot 10^{-4}$ м³/кг, слабоокисленных же руд значительно меньше – от 4,32 до $2,26 \cdot 10^{-4}$ м³/кг (Изых-Гол).

Как известно, конечным продуктом мокрой многостадийной технологии обогащения первичных концентратов на Абагурской обогатительной фабрике является вторичный железорудный концентрат.

Представляет интерес сравнительная оценка величин удельной магнитной восприимчивости исходных первичных концентратов и конечного концентрата Абагурской фабрики. Из таблицы видно, что значения χ магнитных фракций значительно больше таковых немагнитных продуктов; поле же максимума удельной восприимчивости практически вдвое выше у немагнитной фракции. Просматривается аналогия с параметрами удельной магнитной восприимчивости на магнетитовых и слабоокисленных промпродуктах.

На рис. 2 представлены графики зависимости параметра χ магнитного и немагнитного продуктов разделения конечного концентрата от величины H . Вид зависимости удельной магнитной восприимчивости

**Удельная магнитная восприимчивость различных проб первичных концентратов и конечного концентрата
Абагурской аглофабрики в различных магнитных полях**

**Specific magnetic susceptibility of different samples of primary concentrates and finite concentrate
of Abagur sinter plant in different magnetic fields**

Проба руды месторождений		Максимум		$\chi \cdot 10^{-4}$, м ³ /кг, в поле H , кА/м	
		H , кА/м	$\chi \cdot 10^{-4}$, м ³ /кг	80	175
Тёя		11,83	4,32	1,88	0,25
Изых-Гол		21,04	2,26	1,28	0,35
Ирба		10,42	5,71	2,24	0,48
Абакан		12,37	6,84	2,58	0,52
Таштагол		9,68	5,29	2,10	0,34
Шерегеш		9,76	5,94	2,25	0,44
Каз		11,03	5,93	2,19	0,43
Краснокаменск		14,09	3,32	1,62	0,45
Концентрат конечный	Магнитный	10,90	1,40	0,26	0,03
	Немагнитный	19,50	40,10	20,30	4,00

продуктов разделения от величины напряженности магнитного поля подобен приведенным в литературе [9, 10] графикам $\chi(H)$ первичных концентратов – с максимумом χ в относительно слабых полях и «крутым» спадом в полях более 100 кА/м.

Лабораторные эксперименты свидетельствуют о взаимосвязи удельной магнитной восприимчивости, содержанием магнетитового железа в пробе и крупностью частиц концентрата.

По данным А.А. Бикбова промпродукты класса –0,5 мм обладают на 9–20 % большей удельной магнитной восприимчивостью в сравнении с таковыми класса –0,07 мм [5].

По данным Л.А. Ломовцева удельная магнитная восприимчивость частиц качканарского концентрата клас-

са –0,2 мм более чем в два раза превышает таковую частиц класса –0,04 мм в поле $H \approx 21$ кА/м, где параметр максимален [10]. Таким образом подтверждено, что удельная магнитная восприимчивость в процессе магнитной сепарации зависит от крупности частиц обогащаемого материала.

Изменение гранулометрического состава материала достигается предварительной его подготовкой в магнитном поле – флокуляцией. Отмечено, что удельная магнитная восприимчивость предварительно сфлуктурированного порошкового магнетита в поле $H = 14,3$ кА/м в 1,8 раза выше таковой несфлуктурированного магнетита [10].

Флокуляция сильномагнитных минералов (частиц магнетита и сростков магнетита с породой) описана в работах [11, 12]; новые методы магнитной обработки магнетитовых руд – в работе [13].

Положительный эффект от применения предварительной магнитной флокуляции материала получен на горно-обогатительных предприятиях Кривбасса – СевГОКе и ЦГОКе [14].

Авторы наблюдали на продуктах Абагурской фабрики как «наведенную» внешним магнитным полем флокуляцию, так и «собственную» – за счет остаточной намагниченности. Интервал напряженностей магнитных полей, в которых последовательно фиксировалась «наведенная», а затем «собственная» флокуляция, составил от 24 до 200 кА/м. С ростом крупности частиц флокуляция проявляется слабее, процесс «сдвигается» в более высокие поля; это характерно как для «наведенной», так и «собственной» флокуляции [15]. Можно сказать, что изменение гранулометрических параметров материала за счет магнитной флокуляции приводит к увеличению его удельной магнитной восприимчивости.

Рис. 2. Зависимость удельной магнитной восприимчивости продуктов разделения от величины напряженности магнитного поля (концентрат конечный класса –0,07 мм)

Fig. 2. Dependence of specific magnetic susceptibility of the separate products on the value of magnetic field strength (concentrate of finite class –0.07 mm)

Выводы. Измерены величины удельной магнитной восприимчивости χ проб первичных концентратов магнетитовых и слабоокисленных руд семи сибирских обогатительных фабрик. На графике зависимости удельной магнитной восприимчивости от содержания железа магнетитового в пробах прослеживается пропорциональность между этими параметрами. Поле максимума магнитной восприимчивости промпродуктов слабоокисленных руд больше его аналога для магнетитовых руд, значения же удельной магнитной восприимчивости на магнетитовых пробах выше. Проведено сравнение удельной магнитной восприимчивости первичных концентратов с таковой магнитного и немагнитного продуктов конечного концентрата Абагурской аглофабрики. Характер зависимости удельной магнитной восприимчивости от значений напряженности поля названных проб идентичен.

Предварительная флокуляция в магнитном поле регулирует гранулометрические параметры материала, создавая условия для увеличения магнитной восприимчивости. Необходимые параметры магнитного поля технически достижимы на обогатительных фабриках. Низкие значения удельной магнитной восприимчивости промпродуктов слабоокисленных руд подтверждают необходимость их мокрого обогащения в составе шихты с концентратами магнетитовых руд, что снизит потери в хвосты магнетита из слабоокисленных руд. Значения удельной магнитной восприимчивости промпродуктов могут использоваться при расчетах технологических режимов сепарации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. – М.: изд. МГУ, 2005. – 670 с.
2. Килин В.И. Повышение эффективности магнитной сепарации магнетитовых руд. – Чита: изд. ЧитГУ, 2011. – 327 с.
3. Якубайлик Э.К., Килин В.И., Ганженко И.М., Чижик М.В., Килин С.В. Лабораторные исследования мокрой магнитной

сепарации первичных концентратов сибирских железорудных месторождений // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 2. С. 47 – 51.

4. 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 Abagyr Enrichment-Agglomeration Plant / Journal of mining science. 2013. Vol. 49. No. 1. P. 153 – 159.
5. Бикбов А.А., Крюковская Л.В. Магнитные свойства некоторых магнетитовых промпродуктов // Обогащение руд. 1974. № 5. С. 17 – 20.
6. Килин В.И., Якубайлик Э.К. Изучение магнитных свойств и процессов сепарации абаканских магнетитов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2002. № 5. С. 104 – 109.
7. Панов О.В., Ломовцев Л.А., Потапов В.Д. и др. Влияние предварительной магнитной флокуляции на процесс мокрой магнитной сепарации магнетитовых руд Соколовского и Сарбайского месторождений // Обогащение руд. 1980. № 5. С. 19 – 23.
8. 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.
9. Рычков Л.Ф., Ломовцев Л.А. Удельная магнитная восприимчивость сильномагнитных руд при различной напряженности магнитного поля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1978. № 6. С. 108 – 110.
10. Ломовцев Л.А., Нестерова Н.А., Дробченко Л.А. Магнитное обогащение сильномагнитных руд. – М.: Недра, 1979. – 235 с.
11. Младецкий И.К. Оценка флокуляции сильномагнитного минерала в полях магнитных сепараторов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1979. № 6. С. 101 – 106.
12. Младецкий И.К., Боровик В.А. Оценка средней силы взаимодействия магнетитосодержащих частиц при флокуляции // Изв. вуз. Горный журнал. 1987. № 4. С. 118, 119.
13. Килин В.И., Килин С.В. Новые методы магнитной обработки магнетитовых руд с целью повышения эффективности их обогащения // Обогащение руд. 2008. № 5. С. 31 – 33.
14. Герасименко И.А., Ломовцев Л.А., Иголинская З.А. О целесообразности применения предварительной магнитной флокуляции материала // Горный журнал. 1991. № 2. С. 33, 34.
15. Якубайлик Э.К., Килин В.И., Чижик М.В., Ганженко И.М., Килин С.В. Изучение процессов намагничивания и размагничивания сильномагнитных руд методом цифровой фотографии // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 2. С. 5 – 11.

Поступила 20 июня 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 12, pp. 852–856.

SPECIFIC MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF IRON ORES OF SIBERIAN DEPOSITS

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

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

² JSC “Evrazruda”, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. The article contains the results of a study of the specific magnetic susceptibility of primary concentrates of Siberian iron ore deposits and its dependence on the magnetic field of the separator. The experiments (laboratory separation, magnetic measurements) were performed on the class size of –0.07 mm. Study of ore subjected to seven deposits, four of which are magnetite and three – lightly oxidized, due to their content of martite, hematite and limonite from 3% to 6%. The middlings of magnetite ore have the largest values of magnetic susceptibility, the middlings of lightly oxidized ores have the less value. But

the fields of maximum specific susceptibility of lightly oxidized ore samples are higher than the maximum specific susceptibility of magnetite middlings samples. The experiments have shown that the values of specific magnetic susceptibility of primary concentrates are proportional to the content of magnetite iron in them.

Keywords: specific magnetic susceptibility, primary concentrate, magnetite, lightly oxidized ore, magnetite iron.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-852-856

REFERENCES

1. Karmazin V.V., Karmazin V.I. *Magnitnye, elektricheskie i spetsial'nye metody obogashcheniya poleznykh iskopaemykh. T. 1. Magnitnye i elektricheskie metody obogashcheniya*

- poleznykh iskopaemykh* [Magnetic, electric and special methods of enrichment of mineral resources. Vol. 1. Magnetic and electrical methods of mineral processing]. Moscow: MGGU, 2005, 670 p. (In Russ.).
2. Kilin V.I. *Povyshenie effektivnosti magnitnoi separatsii magnetitovykh rud* [Efficiency increase of magnetic separation of magnetite ores]. Chita: ChitGU, 2011, 327 p. (In Russ.).
3. Yakubailik E.K., Kilin V.I., Ganzhenko I.M., Chizhik M.V., Kilin S.V. The laboratory investigations of wet magnetic separation of the primary concentrates from the Siberian iron-ore deposits. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 2, pp. 47–51. (In Russ.).
4. 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 Abagyr enrichment-agglomeration plant. *Journal of Mining Science*. 2013, vol. 49, no. 1, pp. 153–159.
5. Bikbov A.A., Kryukovskaya L.V. Magnetic properties of some magnetite industrial products. *Obogashchenie rud*. 1974, no. 5, pp. 17–20. (In Russ.).
6. 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. 508–511.
7. Panov O.V., Lomovtsev L.A., Potapov V.D. etc. Influence of magnetic flocculation on the process of wet magnetic separation of magnetite ores of Sokolovsky and Sarbaisky deposits. *Obogashchenie rud*. 1980, no. 5, pp. 19–23. (In Russ.).
8. 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.
9. Rychkov L.F., Lomovtsev L.A. Magnetic susceptibility of strongly magnetic ores at different magnetic field intensities. *Soviet Mining Science*. 1978, vol. 14, no. 6, pp. 623–625.
10. Lomovtsev L.A., Nesterova N.A., Drobchenko L.A. *Magnitnoe obogashchenie sil'nomagnitnykh rud* [Magnetic enrichment of strongly magnetic ores]. Moscow: Nedra, 1979, 235 p. (In Russ.).
11. Mladetskii I.K. Estimating flocculation of a strongly magnetic mineral in the fields of magnetic separators. *Soviet Mining Science*. 1979, vol. 15, no. 6, pp. 620–624.
12. Mladetskii I.K., Borovik V.A. Essence of average interaction force of magnetite-containing particles at the flocculation. *Izvestiya VUZov. Gornyi zhurnal*. 1987, no. 4, pp. 118, 119. (In Russ.).
13. Kilin V.I., Kilin S.V. New methods of magnetic treatment of magnetite ores in order to increase the efficiency of the enrichment. *Obogashchenie rud*. 2008, no. 5, pp. 31–33. (In Russ.).
14. Gerasimenko I.A., Lomovtsev L.A., Igolinskaya Z.A. On the usefulness of preliminary magnetic flocculation of the material. *Gornyi zhurnal*. 1991, no. 2, pp. 33, 34. (In Russ.).
15. Yakubailik E.K., Kilin V.I., Chizhik M.V., Ganzhenko I.M., Kilin S.V. Study of strong-magnetic ores magnetization and demagnetization processes by the method of digital photography. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 2, pp. 5–11. (In Russ.).

Information about the authors:

E.K. Yakubailik, *Cand. Sci. (Phys.-math.), Senior Researcher*
(churilov@iph.krasn.ru)
I.M. Ganzhenko, *Engineer* (a.ganzhenko@mail.ru)
P.Yu. Butov, *Chief Preparator* (Pavel.Butov@evraz.com)

Received 20 June, 2016