

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Голдун З.В. и др. // Изв. вуз. Чер. металлургия. 2012. № 10. С. 35 – 38.
2. Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Старовацкая С.Н. и др. // Изв. вуз. Чер. металлургия. 2012. № 6. С. 26 – 29.

3. Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Крюков Р.Е. и др. // Изв. вуз. Чер. металлургия. 2013. № 4. С. 30 – 34.

© 2014 г. Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков,  
А.В. Поор, С.Н. Старовацкая, В.Ф. Игушев  
Поступила 31 октября 2013 г.

УДК 669.046:662.778

**Э.К. Якубайлик<sup>1</sup>, В.И. Килин<sup>2</sup>, И.М. Ганженко<sup>2</sup>,  
М.В. Чижик<sup>3</sup>, С.В. Килин<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Институт физики СО РАН (г. Красноярск)

<sup>2</sup> ОАО «Евразруда» (г. Новокузнецк)

<sup>3</sup> ОАО «Красцветмет» (г. Красноярск)

<sup>4</sup> ЗАО «Полус» (г. Красноярск)

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОКРОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ ПЕРВИЧНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ СИБИРСКИХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Аннотация.** Подведены результаты исследований лабораторной мокрой сепарации первичных концентратов железорудных месторождений Сибири – сырья Абагурской обогатительной фабрики ОАО «Евразруда». Мокрый магнитный анализ выполнен на девяти пробах класса –0,07 мм промпродуктов двух типов руд – магнетитовых и слабоокисленных в магнитном поле 80 кА/м. Измерены основные магнитные характеристики исходных первичных концентратов и продуктов их сепарации. Наибольший выход магнитного продукта получен на магнетитовых рудах – более 68 % (Абакан), на слабоокисленных – существенно меньше (43 – 45 %), т.е. выход падает с уменьшением содержания магнетита в исходном материале. Практические рекомендации: слабоокисленные руды целесообразно обогащать в общей шихте с магнетитовыми для уменьшения потерь железа с хвостами; необходимо завершить реконструкцию магнитных систем сепараторов ПБМ 90/250 с переходом на высокоинтенсивные магниты.

**Ключевые слова:** мокрая магнитная сепарация, концентрат, руда.

**E.K. Yakubaylik<sup>1</sup>, V.I. Kilin<sup>2</sup>, I.M. Ganzhenko<sup>2</sup>, M.V. Chizhik<sup>3</sup>, S.V. Kilin<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Physics SB RAS (Krasnoyarsk)

<sup>2</sup> OAO "Evrazruda" (Novokuznetsk)

<sup>3</sup> OAO "Krasvetmet" (Krasnoyarsk)

<sup>4</sup> ZAO "Polyus" (Krasnoyarsk)

## THE LABORATORY INVESTIGATIONS OF WET MAGNETIC SEPARATION OF THE PRIMARY CONCENTRATES FROM THE SIBERIAN IRON-ORE DEPOSITS

**Abstract.** In this paper the results of the investigations of the wet laboratory separation of the primary concentrates from the Siberian iron-ore deposits (raw materials of Abagurskya concentrating mill –“Evrazruda” JSC) are shown. Wet magnetic analysis has been carried out on nine samples (0.07 mm class) of two ores types – magnetite and sub-acidulate at the magnetic field ( $H = 80$  kA/m) ores. The quantity of the obtained largest magnetic product output is above 68 % (Abakan) for magnetite ores and 43 – 45 % for sub-acidulate ores, i.e. the yield diminishes with a decrease of the magnetite content at the initial material. Practical guidelines: it is appropriate to concentrate sub-acidulate ores at the common charge with the magnetite ores to decrease the losses of the iron with tailings; it is necessary to complete the reconstruction of the magnetic systems of PBM 90/250 separators with using the high-insensitive magnets.

**Keywords:** wet magnetic separation, concentrate, ore.

E-MAIL: yakubailik@gmail.com

Железорудный концентрат Абагурской обогатительной фабрики, производимый для металлургического передела на ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», является конечным продуктом сложной обогатительной технологии с первичными концентратами руд сибирских месторождений. Из них формируется многокомпо-

нентная шихта, из которой в итоге извлекается концентрат; часть же железа, связанная с железосиликатами, серой и окисленными минералами, теряется с хвостами обогащения.

Исходные первичные концентраты в силу различных условий образования руд отличаются составом,

прежде всего, ферромагнитных минералов, их количеством, крупностью зерен и другими параметрами, что приводит к значительным колебаниям их магнитных характеристик и как следствие – широкому спектру показателей мокрой магнитной сепарации первичных концентратов разных месторождений.

Для получения оптимального конечного продукта – концентрата для металлургии, подбора технологических условий его производства необходимо знание показателей мокрого магнитного обогащения всех составляющих исходной шихты.

Целью настоящей работы является определение показателей лабораторной мокрой сепарации исходных первичных концентратов (сырья Абагурской фабрики) и оценка взаимосвязи магнитных свойств материала и полученных показателей магнитного разделения.

Техническим отделом Абагурской фабрики ОАО «Евразруда» были подготовлены пробы усредненных первичных концентратов крупностью  $-1 + 0$  мм руд девяти сибирских железорудных месторождений: Тейского, Изых-Гольского, Краснокаменского – слабоокисленные руды и Ирбинского (К42 и К45), Казского, Шерегешского, Таштагольского (К42) и Абаканского (К45) – магнетитовые руды.

Классификация исходных проб, их ситовый анализ, мокрая магнитная сепарация и измерения магнитных свойств выполнены в Институте физики СО РАН.

Мокрый магнитный анализ проб осуществлен на анализаторе 25Т с использованием 100 % материала крупностью  $-0,071$  мм в магнитном поле напряженностью 80 кА/м, близком к «рабочему» полю сепарации.

Магнитные свойства исходных первичных концентратов и продуктов их сепарации класса  $-0,071$  мм измерены на автоматизированном вибрационном магнитометре в полях насыщения  $H \approx 800$  кА/м, а также в поле  $H = 80$  кА/м. Погрешность измерения магнитного момента – не хуже  $10^{-8}$  А·м<sup>2</sup>, магнитного поля – 40 А/м, массы исходных образцов – 0,1 мг, массы исследуемых образцов – примерно 5 мг. Методика измерений описана в работе [1].

Измерены основные магнитные характеристики: удельная намагниченность насыщения  $\sigma_s$ , удельная намагниченность  $\sigma$  в поле  $H = 80$  кА/м, удельная остаточная намагниченность  $\sigma_r$ , коэрцитивная сила  $H_c$ . С использованием данных определения параметров  $\sigma$  и  $H$  по петлям гистерезиса подсчитаны значения удельной магнитной восприимчивости  $\chi$  в поле  $H = 80$  кА/м.

Химический анализ исходных и изученных образцов – продуктов сепарации – проведен в Центральной технологической лаборатории ОАО «Евразруда».

Показатели мокрой магнитной сепарации первичных концентратов и результаты химического анализа продуктов разделения приведены в табл. 1.

В целом результаты лабораторной сепарации первичных концентратов, включая выход концентрата, количество в нем железа, его извлечение, потери с

хвостами, на магнетитовых рудах выше, нежели на слабоокисленных. На рис. 1 представлены зависимости выхода магнитного продукта сепарации ( $\gamma_m$ ) от содержания железа в исходных пробах; заметна корреляция параметра  $\gamma_m$  и содержания железа общего ( $Fe_{общ}$ ) и магнитного ( $Fe_{маг}$ ).

Во всех полученных магнитных продуктах высокое содержание железа: примерно от 61 до 67 %  $Fe_{общ}$  и 60 – 66 %  $Fe_{маг}$ ; минимум – на тейском слабоокисленном первичном концентрате. Близки к «пределу» показатели извлечения металла из первичных концентратов: железа общего – около 90 % (за исключением слабоокисленных руд), железа магнетитового – 92 – 98 %.

Прямой линейной связи содержания железа в концентрате мокрой сепарации с его количеством в исходном материале не обнаруживается, поскольку состав и структура руд различны.

О потерях железа с хвостами сепарации можно сказать следующее. Уходит в хвосты слабомагнитное железо слабоокисленных руд – мартит и лимонит; сульфидное – магнетитовых руд, магнитные свойства которых практически на порядок меньше, чем у магнетита. Наибольшие потери железа магнетитового на пробах месторождения Изых-Гол – около 4 %; велики его потери на пробах абаканского первичного концентрата – примерно 2,7 %; в хвостах сепарации ирбинских проб – более 2 %  $Fe_{маг}$ , в хвостах обогащения остальных первичных концентратов – в пределах 1,9 – 1,5 %.

В описанных выше лабораторных опытах обогащения, проведенных в поле  $H = 80$  кА/м, наименьшее содержание железа магнетитового содержится в хвостах (1,51 %), что выше фактически достигаемых производственных показателей на фабрике (1,0 – 1,1 %). Однако на фабрике мокрая сепарация ведется в основном на сепараторах ПБМ 90/250 с модернизированной магнитной системой на основе высокоинтенсивных постоянных магнитов типа неодим–железо–бор с полем в рабочей зоне сепарации 176 кА/м.

С ростом напряженности поля в концентрат частично извлекаются и слабомагнитные минералы, что ведет к уменьшению потерь железа магнетитового с хвостами. Это подтверждают и проведенные опыты по обогащению окисленных руд Абаказа, где потери  $Fe_{маг}$  в поле с высокой напряженностью ( $H = 480$  кА/м) составляют порядка 0,4 – 0,7 %, что вдвое меньше, чем при  $H = 80$  кА/м [2].

Характер взаимосвязи магнитных свойств исходных первичных концентратов руд различных месторождений и показателей их лабораторной мокрой сепарации подтверждает основную закономерность магнитного обогащения – прямую пропорциональность показателей обогащения, обусловленных силой магнитного притяжения  $F_m$ , величине  $\chi$  – удельной магнитной восприимчивости руды [3].

В табл. 2 сведены параметры, характеризующие магнитные свойства исходных первичных концент-

Результаты мокрой магнитной сепарации первичных концентратов

Проба руды месторождения	Выход концентрата, %	Содержание, %				Извлечение, %	
		Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>маг</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>маг</sub>
Тея	51,5	61,25	60,37	25,32	59,46	87,62	96,85
	48,5	8,97	1,87	3,22	9,26	12,12	2,87
Исходная	100,0	36,0	32,1	14,83	35,09	–	–
Изых-Гол	43,5	67,33	66,24	20,18	73,86	71,08	93,25
	56,5	20,60	3,83	2,98	26,13	28,25	7,00
Исходная	100,0	41,2	30,9	10,48	47,23	–	–
Ирба, К42	60,5	66,39	65,54	27,43	64,46	89,45	97,18
	39,5	11,30	1,91	4,58	11,08	9,94	1,85
Исходная	100,0	44,9	40,8	18,53	43,64	–	–
Ирба, К45	60,9	66,34	65,53	26,38	65,59	89,78	97,57
	39,1	11,35	2,08	4,39	11,36	9,86	1,98
Исходная	100,0	45,0	40,9	17,82	44,60	–	–
Краснокаменск	45,25	65,94	65,11	23,45	68,26	76,70	92,35
	54,75	14,71	1,59	7,84	12,34	20,70	2,74
Исходная	100,0	38,9	31,9	15,15	38,85	–	–
Каз	64,75	64,67	63,26	34,11	54,62	88,90	96,6
	35,25	15,05	1,89	11,84	8,38	11,26	1,58
Исходная	100,0	47,1	42,4	26,62	37,87	–	–
Шерегеш	60,0	63,04	62,14	27,75	59,35	91,80	97,60
	40,0	8,34	1,51	3,86	7,65	8,09	1,58
Исходная	100,0	41,2	38,2	18,33	38,57	–	–
Таштагол, К42	55,5	66,06	65,33	27,32	64,14	88,56	97,2
	44,5	10,59	1,60	4,81	9,80	11,38	1,9
Исходная	100,0	41,4	37,3	17,27	40,07	–	–
Абакан, К45	68,5	66,80	65,75	29,79	65,45	89,89	97,91
	31,5	17,60	2,67	12,08	11,76	10,89	1,82
Исходная	100,0	50,9	46,0	24,81	45,29	–	–

Примечание. В числителе – для магнитной фракции, в знаменателе – немагнитной.

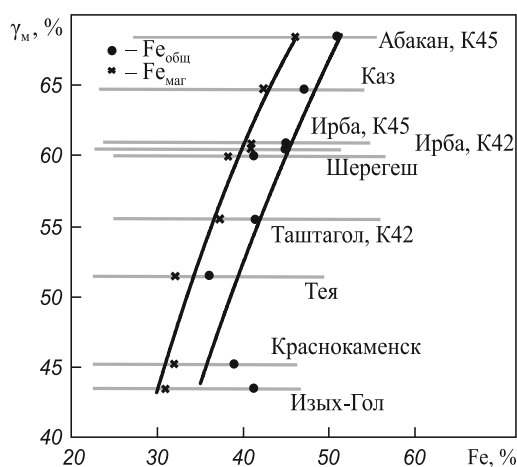


Рис. 1. Зависимость выхода магнитного продукта сепарации от содержания железа в исходных пробах для проб образцов различных месторождений

ратов. Сопоставляя приведенные значения удельной намагниченности насыщения  $\sigma_s$ , удельной намагниченности  $\sigma$ , удельной магнитной восприимчивости  $\chi$  в поле  $H = 80$  кА/м с показателями сепарации – выходом магнитного продукта  $\gamma_m$ , содержанием железа магнетитового Fe<sub>маг</sub>, отметим, что как наибольшие, так и наименьшие значения этих параметров получены на одних и тех же пробах – Абакана и Изых-Гола. Можно добавить, что выход магнитного продукта, как отмечено выше, максимален для магнетитовых первичных концентратов и падает с уменьшением содержания магнетита в исходном материале.

На рис. 2 представлена зависимость выхода магнитного продукта от удельной намагниченности насыщения исходного первичного концентрата ( $\gamma_m$  от  $\sigma_s$ ); также построена зависимость показателя  $\gamma_m$  от удельной намагниченности  $\sigma$  в поле напряженностью

**Параметры, характеризующие магнитные свойства исходных первичных концентратов (числитель) и продуктов их мокрой сепарации – магнитной фракции (знаменатель)**

Проба с месторождения	$\sigma_s$ , А·м <sup>2</sup> /кг	$\sigma_r$ , А·м <sup>2</sup> /кг	$\sigma_{H=80 \text{ кА/м}}$ , А·м <sup>2</sup> /кг	$H_c$ , кА/м	$\chi_{H=80 \text{ кА/м}} \cdot 10^{-4}$ , м <sup>3</sup> /кг
Тея	<u>39,76</u> 73,70	<u>5,57</u> 7,53	<u>26,60</u> 55,50	<u>4,96</u> 4,78	1,88
Изых-Гол	<u>26,57</u> 57,65	<u>2,87</u> 8,63	<u>14,93</u> 38,00	<u>10,56</u> 9,66	1,28
Ирба, К42	<u>48,00</u> 76,70	<u>2,87</u> 6,75	<u>32,10</u> 59,50	<u>4,09</u> 3,76	2,24
Ирба, К45	<u>47,07</u> 73,20	<u>3,18</u> 7,14	<u>31,40</u> 56,30	<u>4,68</u> 4,31	2,16
Абакан, К45	<u>56,93</u> 81,98	<u>3,92</u> 8,09	<u>38,50</u> 61,70	<u>4,53</u> 4,58	2,58
Таштагол, К42	<u>45,28</u> 78,62	<u>2,04</u> 5,84	<u>30,42</u> 61,70	<u>3,15</u> 3,09	2,10
Шерегеш	<u>48,73</u> 78,25	<u>2,56</u> 6,40	<u>33,25</u> 61,40	<u>3,47</u> 3,40	2,25
Каз	<u>48,91</u> 75,48	<u>3,19</u> 7,01	<u>33,30</u> 58,80	<u>4,26</u> 3,94	2,19
Краснокаменск	<u>33,81</u> 71,40	<u>2,42</u> 7,66	<u>20,45</u> 51,70	<u>6,02</u> 5,50	1,62

$H = 80 \text{ кА/м}$  – поле сепарации. Видна явная корреляция параметров.

Качество выделенных лабораторной мокрой сепарацией первичных концентратов магнитных продуктов наряду с данными химического анализа характеризуют и их магнитные свойства. Параметры магнитных свойств продуктов разделения первичных концентратов – магнитных фракций – также приведены в табл. 2.

В сравнении с «исходными» резко выросли значения  $\sigma_s$  магнетитовых продуктов (максимум  $82 \text{ А·м}^2/\text{кг}$  на пробах образцов с Абакана), существенен рост и других магнитных характеристик:  $\sigma_{H=80 \text{ кА/м}}$ ,  $\sigma_r$ . За счет

увеличения содержания магнетита в магнитном продукте высоки значения  $\sigma_s$  и слабоокисленных руд с минимумом на пробах с Изых-Гола ( $58 \text{ А·м}^2/\text{кг}$ ), причем на слабоокисленных рудах «прирост» больше, чем на магнетитовых: на пробах с Изых-Гола и Краснокаменска – более, чем в два раза. Цифры «прироста» основных магнитных характеристик магнитного продукта обогащения можно оценить по данным табл. 2.

Значения коэрцитивной силы  $H_c$  магнитных продуктов магнетитовых руд практически не изменились, а слабоокисленных – уменьшились из-за падения в магнитном продукте количества слабомагнитных минералов, обладающих высокой магнитной жесткостью.

Сводный анализ данных табл. 1 и 2, содержащих достигнутые показатели лабораторной сепарации первичных концентратов и величины магнитных характеристик продуктов, позволяет говорить о прямой пропорциональности названных групп параметров, подтверждая принципы магнитного обогащения.

**Выводы.** Наибольший выход магнитного продукта получен на магнетитовых рудах – более 68 % (на Абаканских), на слабоокисленных – существенно (на треть) меньше – 44 % (на Изых-Гольских). Магнитные характеристики ( $\sigma_s$ ) концентратов лабораторного обогащения первичных концентратов в основном близки: 73 –  $82 \text{ А·м}^2/\text{кг}$  для магнетитовых и 58 –  $73 \text{ А·м}^2/\text{кг}$  для слабоокисленных руд и значительно выше своих аналогов в исходном материале. Пониженные показатели лабораторной сепарации и магнитных характеристик

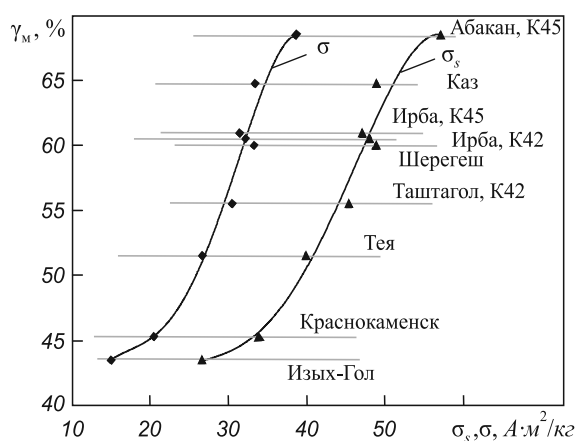


Рис. 2. Зависимость выхода концентрата от магнитных характеристик для проб образцов различных месторождений

продуктов слабоокисленных руд свидетельствуют о целесообразности их мокрого обогащения в составе шихты с магнетитовыми рудами для уменьшения потерь железа с хвостами. Частицы магнетита с высокой удельной намагниченностью становятся центрами флокуляции зерен слабомагнитных минералов, тем самым оставляя их в магнитной фракции. Наблюдаемая зависимость потерь магнетитового железа с хвостами от магнитного поля сепарации указывает на необходимость завершения реконструкции магнитных систем сепараторов типа ПБМ 90/250 с заменой заводских магнитов из феррита бария на высокополевые магниты из сплава типа неодим–железо–бор. Достигнутые результаты лабораторной сепарации могут быть «ориен-

тирами» при разработке технологических режимов на фабрике.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балаев А.Д., Бояршинов Ю.В., Карпенко М.М., Хрусталева Б.П. // ПТЭ. 1985. Т. 3. С. 167, 168.
2. Килин В.И., Якубайлик Э.К., Костененко Л.П., Ганженко И.М. // ФТПРПИ. 2012. № 2. С. 160 – 166.
3. Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Высшее горное образование. – М.: изд. МГТУ, 2005. – 670 с.

© 2014 г. Э.К. Якубайлик, В.И. Килин, И.М. Ганженко, М.В. Чижик, С.В. Килин  
Поступила 12 февраля 2013 г.

12 февраля 2014 г. исполняется 150 лет со дня рождения великого русского ученого-металлурга, члена-корреспондента АН СССР, организатора и первого заведующего кафедрой металлургии стали и теории печей Уральского политехнического института Владимира Ефимовича Грум-Гржимайло. В честь этого знаменательного события ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» совместно ОАО «УГМК Холдинг» с 26 по 29 марта 2014 г. проводит международную научно-практическую конференцию «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло», III Всероссийскую научно-практическую конференцию студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2014) с международным участием, олимпиаду для школьников по истории металлургии.

**Проект организации конференций получил финансовую поддержку Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 14-08-06802).**

**Цель конференций** – анализ и обсуждение актуальных проблем металлургической теплотехники и разработка рекомендаций по повышению энергоэффективности технологий в металлургии, машиностроении, промышленности строительных материалов.

#### **Основные задачи конференций:**

1. Оценка современного состояния теории и практики в области металлургической теплотехники, систем автоматизации и информатизации в образовании, науке и производстве, а также разработка рекомендаций по дальнейшему их развитию.
2. Привлечение работников научно-исследовательских институтов, проектных органи-

заций, фирм, промышленных предприятий и вузов к обсуждению новых подходов к созданию тепловых агрегатов и разработке режимов, удовлетворяющих возросшим требованиям энергоэффективности, ресурсосбережения и защиты окружающей среды.

3. Развитие интеграции образования и науки, исследовательской и инновационной деятельности вузов в целях дальнейшего повышения качества подготовки квалифицированных специалистов в области металлургической теплотехники, систем автоматизации и информатизации широкого назначения, привлечения студентов к исследовательской работе в университете и участию в решении производственных задач.
4. Укрепление международных связей отечественных и зарубежных ученых.

**Основные научные направления работы конференций включают в себя:**

- математическое и физическое моделирование тепломассообменных и газодинамических процессов в тепловых агрегатах металлургии, машиностроения и промышленности строительных материалов;
- методы и способы эффективного использования энергетических ресурсов в металлургии, машиностроения, промышленности строительных материалов;
- состояние и проблемы подготовки кадров для металлургии в высшей школе (круглый стол).

**Подробная информация о конференциях представлена на сайте кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» УрФУ (<http://tim.ustu.ru>).**