

УДК 669.046: 662.778

**МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВИЧНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ РУД —  
СЫРЬЯ АБАГУРСКОЙ ФАБРИКИ**

**Э. К. Якубайлик, В. И. Килин, М. В. Чижик,  
И. М. Ганженко\*, С. В. Килин**

*Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН,  
660036, г. Красноярск, Россия  
\*ОАО “Евразруда”, 654027, г. Новокузнецк, Россия*

Работа содержит результаты измерений основных магнитных характеристик девяти первичных концентратов магнетитовых и слабоокисленных руд железорудных месторождений Сибири — сырья Абагурской фабрики. Наибольшими значениями магнитных параметров обладают магнетитовые промпродукты Абазы, Ирбы, Каза; наименьшими — слабоокисленные Изых-Гола, Краснокаменска; значения характеристик пропорциональны содержанию магнетита в исходной пробе. Учитывая это, слабоокисленные руды необходимо обогащать совместно с магнетитовыми для снижения потерь магнетита в хвосты.

*Первичный концентрат, магнетитовые, слабоокисленные руды, магнитные характеристики*

**ВВЕДЕНИЕ**

Большую часть железорудного сырья Абагурская обогатительно-агломерационная фабрика получает в виде магнетитовых промпродуктов сухой магнитной сепарации с горнорудных предприятий Кемеровской области (Горной Шории), Хакасии и Красноярского края. Первичные концентраты руд разных месторождений отличаются по вещественному составу, в первую очередь по типу ферромагнитной компоненты и ее содержанием, текстурно-структурными признаками, важнейший из которых крупность зерен магнитных минералов и другим характеристикам. Следствием этого многообразия является широкий спектр магнитных параметров первичных концентратов.

Как известно, магнитные характеристики минералов определяют поведение магнитных частиц в магнитном поле сепаратора. Таким образом, необходимо знать величины основных магнитных параметров исходных промпродуктов руд для нахождения оптимальной технологии их мокрой магнитной сепарации на фабрике.

Магнитные свойства промпродуктов сухого магнитного обогащения руд сибирских месторождений изучались и ранее. Наиболее полная информация по 5-и месторождениям (Шерегеш, Каз, Таштагол, Абакан, Тея) приведена в работе [1]. Эти материалы опубликованы в 1974 г. По ряду продуктов Абакана, Абагаза значения магнитных параметров приведены в недавних публикациях [2, 3].

Назрела необходимость в системных исследованиях магнитных свойств исходного сырья Абагура; таким образом, задача настоящей работы — изучить основные магнитные характеристики первичных концентратов, поступающих на Абагурскую обогатительно-агломерационную фабрику.

Классификация исходного материала, измерения магнитных параметров выполнены в Институте физики СО РАН. Химический анализ исходных и изученных проб проведен в Центральной технологической лаборатории ОАО “Евразруда”.

## 1. СИТОВЫЙ АНАЛИЗ И СОСТАВ ПЕРВИЧНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ РУД

### Гранулометрическая характеристика продуктов

С Абагурской обогатительно-агломерационной фабрики ОАО “Евразруда” получены для исследований 9 проб усредненных первичных концентратов крупностью  $-1 \div +0$  мм следующих месторождений: Тейского, Изых-Гольского, Ирбинского (К42 и К45), Краснокаменского, Казского, Шерегешского, Таштагольского (К42) и Абаканского (К45).

Для проведения ситового анализа и оценки распределения по крупности железа исходные концентраты, по согласованию с Техническим отделом фабрики, разделены на 3 класса частиц:  $-1 \div +0.28$  мм,  $-0.28 \div +0.07$  мм и менее 0.07 мм. Результаты ситового анализа содержатся в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Ситовая характеристика первичных концентратов

Проба	Выход, %, по классу крупности (мм)				
	+ 1	$-1 \div +0.28$	$-0.28 \div +0.07$	- 0.07	Итого
Тея	3.5	52.8	26.9	16.8	100.0
Иzych-Гол	1.3	42.5	37.7	18.5	100.0
Ирба, К42	1.0	42.7	36.3	20.0	100.0
Ирба, К45	1.7	42.1	33.1	23.1	100.0
Краснокаменск	2.0	43.4	30.9	23.7	100.0
Каз	2.5	44.5	31.0	22.0	100.0
Шерегеш	2.0	43.5	27.4	27.1	100.0
Таштагол, К42	1.9	37.3	31.1	29.7	100.0
Абакан, К45	0.3	34.7	34.9	30.1	100.0

Анализ табл. 1 показывает, что в целом “крупных” частиц в представленных пробах первичных концентратов больше. Отметим также, что крупных классов больше в слабоокисленных рудах (максимум — на Тее), тонких частиц больше в магнетитовых (максимум — на абаканском первичном концентрате).

### Содержание железа в исходных пробах

Результаты химического анализа трех классов крупности исходных первичных концентратов руд представлены в табл. 2. Наибольшее содержание  $Fe_{\text{общ}}$  и  $Fe_{\text{маг}}$  в классе  $-0.07$  мм в концентратах Абакана (~ 51 и 46 %), Каза (~ 47 и 42 %), пробах Ирбы (~ 45 и 41 %). Наименьшее — в промпродуктах слабоокисленных руд Теи (36 и 32 %), Краснокаменска (~ 39 и 32 %) соответственно.

Общей закономерности изменения содержания железа от крупности частиц в изученных пробах не наблюдается. Только на абаканском материале содержание железа (общего и магнетитового) больше в тонком классе. На тейском промпродукте обратная картина — железа больше в крупном классе.

ТАБЛИЦА 2. Результаты химического анализа исходных первичных концентратов

Номер	Проба	Класс, мм	Содержание, %			
			Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>маг</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	Тяя	-1 + 0.28	39.8	36.2	16.31	38.77
2		-0.28 + 0.07	38.7	34.9	15.58	37.98
3		-0.07	36.0	32.1	14.83	35.09
4	Изых-Гол	-1 + 0.28	46.6	38.3	14.33	50.71
5		-0.28 + 0.07	50.3	42.8	14.84	55.41
6		-0.07	41.2	30.9	10.48	47.23
7	Ирба, К42	-1 + 0.28	42.7	38.7	18.29	40.78
8		-0.28 + 0.07	49.1	45.1	20.55	47.40
9		-0.07	44.9	40.8	18.53	43.64
10	Ирба, К45	-1 + 0.28	45.8	41.9	19.18	44.26
11		-0.28 + 0.07	50.4	47.1	20.50	49.30
12		-0.07	45.0	40.9	17.82	44.60
13	Краснокаменск	-1 + 0.28	40.6	34.2	16.37	39.86
14		-0.28 + 0.07	44.9	40.1	17.10	45.17
15		-0.07	38.9	31.9	15.15	38.85
16	Каз	-1 + 0.28	45.9	39.8	25.49	37.30
17		-0.28 + 0.07	48.6	43.3	26.44	40.21
18		-0.07	47.1	42.4	26.62	37.87
19	Шерегеш	-1 + 0.28	42.2	39.1	18.93	39.32
20		-0.28 + 0.07	44.5	41.5	19.55	41.91
21		-0.07	41.2	38.2	18.33	38.57
22	Таштагол, К42	-1 + 0.28	41.1	36.8	17.07	39.79
23		-0.28 + 0.07	46.5	43.3	19.63	44.74
24		-0.07	41.4	37.3	17.27	40.07
25	Абакан, К45	-1 + 0.28	43.6	38.0	22.44	37.45
26		-0.28 + 0.07	46.1	40.1	22.55	40.92
27		-0.07	50.9	46.0	24.81	45.29

На семи продуктах максимум содержания железа приходится на “средний” класс крупностью  $-0.28 + 0.07$  мм. Разница в содержании железа между “средним” и “тонким” классами колеблется по Fe<sub>общ</sub> от 1.5 % для Каза до 9.1 % для Изых-Гола; по Fe<sub>маг</sub> от 0.9 % Каз до 11.9 % — Изых-Гол.

По данным работы [4] содержание железа в концентрате первой стадии обогащения абаканской фабрики возрастает с 53.4 % Fe<sub>общ</sub> и 50.7 % Fe<sub>маг</sub> в классе  $-1 \div + 0$  мм до 60.5 и 59.1 % соответственно в классе  $-0.05$  мм; т. е. в процессе переработки первичные концентраты разных месторождений “усредняются” и в итоге получаем “абаканскую” зависимость содержания железа от крупности материала.

Химический анализ подтвердил, что количество железа в промпродуктах магнетитовых руд более чем на 10 % выше, нежели в слабоокисленных.

## 2. МАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕРВИЧНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Основными магнитными характеристиками сильномагнитных железных руд и минералов, определяющими поведение магнитных частиц в магнитном поле сепаратора и влияющими на процесс разделения, являются: намагниченность насыщения  $\sigma_s$ , остаточная намагниченность  $\sigma_r$ , коэрцитивная сила  $H_c$  [5].

На двух классах первичных концентратов ( $-1 + 0.28$  мм и  $-0.07$  мм) определены удельная намагниченность насыщения  $\sigma_s$ , удельная остаточная намагниченность  $\sigma_r$ , коэрцитивная сила  $H_c$ , а также удельная намагниченность  $\sigma$  в поле  $H = 80$  кА/м, близком к полю сепарации.

К их числу следует отнести и удельную магнитную восприимчивость  $\chi$ , входящую в выражение удельной магнитной силы  $f_m$ , действующей на зерно, — основное для магнитного обогащения.

Измерения проведены на автоматизированном вибрационном магнитометре в полях до 800 кА/м. Принципы измерения магнитных свойств на вибрационном магнитометре изложены в работе [6], данные собраны в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Магнитные характеристики исходных проб

Номер	Проба	Класс	$\sigma_s$ , Ам <sup>2</sup> /кг	$\sigma_r$ , Ам <sup>2</sup> /кг	$H_c$ , кА/м	$\sigma_H = 80$ кА/м, Ам <sup>2</sup> /кг
1	Тея	$-1 + 0.28$	38.68	2.76	4.54	25.40
2		$-0.07$	39.76	5.57	4.96	26.60
3	Изых-Гол	$-1 + 0.28$	33.09	3.41	9.02	19.93
4		$-0.07$	26.57	2.87	10.56	14.93
5	Ирба, К42	$-1 + 0.28$	53.65	2.22	2.58	37.40
6		$-0.07$	48.00	2.87	4.09	32.10
7	Ирба, К45	$-1 + 0.28$	53.80	2.55	2.93	36.57
8		$-0.07$	47.07	3.18	4.68	31.40
9	Абакан, К45	$-1 + 0.28$	52.93	4.34	5.70	34.42
10		$-0.07$	56.93	3.92	4.53	38.50
11	Таштагол, К42	$-1 + 0.28$	51.13	2.02	2.42	35.26
12		$-0.07$	45.28	2.04	3.15	30.42
13	Шерегеш	$-1 + 0.28$	42.44	1.72	2.48	29.25
14		$-0.07$	48.73	2.56	3.47	33.25
15	Каз	$-1 + 0.28$	56.10	3.08	2.74	40.25
16		$-0.07$	48.91	3.19	4.26	33.30
17	Краснокаменск	$-1 + 0.28$	35.41	1.73	4.06	22.20
18		$-0.07$	33.81	2.42	6.02	20.45

По величинам удельной намагниченности насыщения  $\sigma_s$  первичные концентраты (класс  $-0.07$  мм) укрупненно можно разделить на две группы: магнетитовые и слабоокисленные руды. Удельные намагниченности насыщения  $\sigma_s$  и остаточные  $\sigma_r$  слабоокисленных руд (Тея, Изых-Гол, Краснокаменск) меньше, чем магнетитовых (Абакан, Ирба, Каз и др.).

Значения  $\sigma_s$  и  $\sigma_r$  магнетитовых руд (Абакан, Ирба, Каз) близки и составляют от 56 до 47 Ам<sup>2</sup>/кг для  $\sigma_s$  и в пределах 4–3 Ам<sup>2</sup>/кг для  $\sigma_r$ . Зависимость величин  $\sigma_s$  и  $\sigma_r$  от крупности частиц не отмечена.

Прослеживается четкая корреляция величин удельной намагниченности насыщения  $\sigma_s$  проб и содержания в них магнетитового железа  $Fe_{\text{маг}}$  (рис. 1). Наибольшие значения  $\sigma_s$  и  $Fe_{\text{маг}}$  на материале Абазы, наименьшие — в пробах Изых-Гола, т. е. намагниченность практически линейно пропорциональна количеству магнетита в промпродукте.

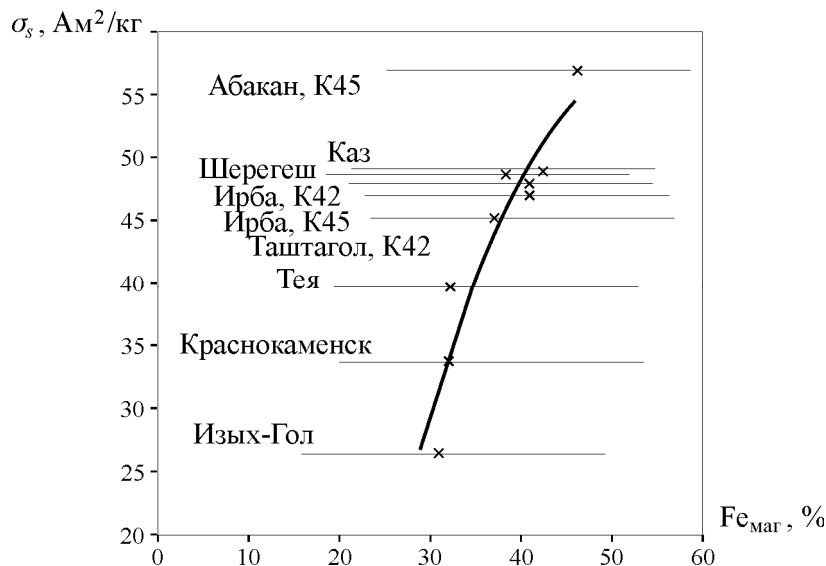


Рис. 1. Зависимость удельной намагниченности насыщения от содержания в пробах магнетитового железа

По данным магнитных измерений, поля насыщения  $H_s$  магнетитовых руд составляют порядка 400–480 кА/м, слабоокисленных — 720–800 кА/м, что приводит к потере части слабомагнитных минералов с хвостами обогащения. Коэрцитивная сила  $H_c$  выше, как правило, в тонком классе и выше, как и должно быть, для слабоокисленных руд. Максимум — до 10.6 кА/м на Изых-Голе.

По принятой терминологии первичные концентраты слабоокисленных руд по значениям  $H_c$  относятся к магнитотвердым материалам, промпродукты магнетитовых руд — к магнитомягким; граничное значение —  $H_c = 4.0$  кА/м [5].

Таким образом, величины коэрцитивной силы  $H_c$  первичных концентратов, поступающих на Абагурскую фабрику, не создают серьезных трудностей для их подмагничивания и размагничивания в технологических процессах.

По петлям гистерезиса проб определены значения удельной намагниченности  $\sigma$  в разных полях; зная величины  $\sigma$  и  $H$ , подсчитана удельная магнитная восприимчивость  $\chi$  (для класса –0.07 мм). Полевая зависимость удельной восприимчивости  $\chi$  двух “типичных” образцов — магнетитовых и слабоокисленных руд — показана на рис. 2. Максимумы удельной восприимчивости и их поля, а также значения  $\chi$  в интервале полей 80.0–176.0 кА/м всех девяти проб представлены в табл. 4, из которой видно, что удельная восприимчивость слабоокисленных руд наибольшая в поле  $H \sim 20.8$  кА/м (Иzych-Гол), а магнетитовых — в поле  $H \sim 12.0$  кА/м (Абакан) с резким спадом в более сильных полях. Подобная полевая зависимость удельной восприимчивости ферромагнитных минералов описана давно, а на сибирских рудах ее наблюдали А. А. Бикбов и Л. В. Крюковская [1].

На магнетитах четырех месторождений Л. Ф. Рычков, Л. А. Ломовцев [7] получили аналогичное изменение удельной восприимчивости от поля, а также уточнили методику определения удельной силы магнитного притяжения сильномагнитных частиц к полюсам сепаратора.

Результаты настоящих измерений качественно совпадают с цитируемыми данными [1, 7].

ТАБЛИЦА 4. Удельная магнитная восприимчивость исходных проб в различных магнитных полях

Проба	Максимум $\chi$		$\chi \cdot 10^{-4}$ , м <sup>3</sup> /кг в поле $H$			
	$H$ , кА/м	$\times 10^{-4}$ , м <sup>3</sup> /кг	$H$ , кА/м			
			80	95	111	175
Тея	11.83	4.32	1.88	1.48	0.83	0.25
Изых-Гол	21.04	2.26	1.28	1.07	0.70	0.35
Ирба, К42	10.42	5.71	2.24	1.75	1.13	0.48
Ирба, К45	11.11	5.52	2.16	1.66	1.23	0.39
Абакан, К45	12.37	6.84	2.58	2.00	1.42	0.52
Таштагол, К42	9.68	5.29	2.10	1.67	0.97	0.34
Шерегеш	9.76	5.94	2.25	1.80	1.28	0.44
Каз	11.03	5.93	2.19	1.75	1.07	0.43
Краснокаменск	14.09	3.32	1.62	1.31	0.92	0.45

Максимумы удельной магнитной восприимчивости первичных концентратов магнетитовых руд в пределах от  $6.84 \times 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг (Абакан) до 5.29 (Таштагол), слабоокисленных промпродуктов значительно меньше — от  $4.32 \times 10^{-4}$  (Тея) до 2.26 м<sup>3</sup>/кг (Изых-Гол). Такая разница между магнетитовыми и слабоокисленными рудами указывает на необходимость магнитного обогащения последних в составе шихты с чисто магнетитовыми рудами, что будет способствовать уменьшению потерь магнетита из слабоокисленных руд в хвосты.

Сопоставляя значения удельной восприимчивости и содержание в пробах магнетитового железа, можно говорить об их пропорциональности. С ростом поля значения удельной восприимчивости падают в несколько раз. Характер же полевой зависимости  $\chi$  для всех изученных проб одинаков и показан на рис. 2. Вид полевой зависимости удельной восприимчивости и ее величины “раскрывают” оптимальные условия магнитной сепарации данного материала.

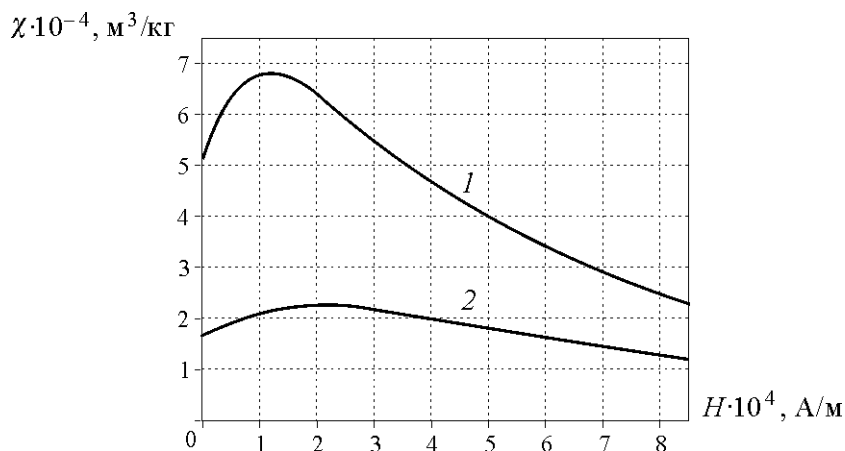


Рис. 2. Зависимость удельной магнитной восприимчивости от величины поля: 1 — Абакан, 2 — Изых-Гол

Однако удельная магнитная сила  $f_m$  кроме  $\chi$  пропорциональна также удельной магнитной силе магнитной системы  $H \text{grad}H$  [5], т. е. при магнитном обогащении руд с низкими значениями  $\chi$  (слабоокисленных) требуются высокие величины  $H \text{grad}H$ . Заметим, что второй параметр — более регулируемый, чем первый. Отсюда необходимо знание величин удельной восприимчивости и полей их максимумов.

#### ВЫВОДЫ

1. Изучены магнитные характеристики, определяющие эффективность магнитной сепарации, девяти первичных концентратов руд — сырья Абагурской обогатительно-агломерационной фабрики. Основные результаты следующие.

2. Наибольшими значениями магнитных характеристик отличаются промпродукты месторождений Абакан, Ирба, Каз, наименьшими — Изых-Гол, Краснокаменск. Удельная намагниченность насыщения  $\sigma_s$  первичных концентратов пропорциональна содержанию магнетитового железа в пробе. Удельная магнитная восприимчивость в поле  $H = 80$  кА/м, близком к рабочему полю обогащения, максимальна для Абакана, Шерегеша, минимум — на пробах Изых-Гола и Краснокаменска.

3. По величине коэрцитивной силы  $H_c$  первичные концентраты можно разделить на магнитомягкие (магнетитовые руды) и магнито жесткие (слабоокисленные руды), однако технических трудностей для процессов намагничивания и размагничивания магнито жесткие руды не представляют.

4. Низкие значения магнитных параметров промпродуктов слабоокисленных руд, к которым относятся Тейская, Изых-Гольская и Краснокаменская, подтверждают целесообразность их мокрого обогащения в составе шихты с промпродуктами магнетитовых руд Таштагольской, Шерегешской, Ирбинской, Абаканской, Казской — для достижения наименьших потерь магнетита в хвосты.

5. Операция размагничивания в составе технологического процесса переработки представленных руд не будет вызывать увеличения потерь магнетита в хвосты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бикбов А. А., Крюковская Л. В. Магнитные свойства некоторых магнетитовых промпродуктов // Обогащение руд. — 1974. — № 5.
2. Килин В. И., Якубайлик Э. К. Изучение магнитных свойств и процессов сепарации абаканских магнетитов // ФТПРПИ. — 2002. — № 5.
3. Килин В. И., Якубайлик Э. К., Костененко Л. П., Ганженко И. М. Изучение обогатимости гематит-магнетитовых руд Абагасского месторождения // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.
4. Исследование процессов магнитной сепарации труднообогатимых руд Абагасского месторождения и определение магнитных характеристик продуктов Абагурской фабрики с целью их флокулирования: отчет Института физики СО РАН. — Красноярск, 2007.
5. Ломовцев Л. А., Нестерова Н. А., Дробченко Л. А. Магнитное обогащение сильномагнитных руд. — М.: Недра, 1979.
6. Балаев А. Д., Бояршинов Ю. В., Карпенко М. М., Хрусталев Б. П. Автоматизированный магнитометр со сверхпроводящим соленоидом // ПТЭ. — 1985. — Т. 3.
7. Рычков Л. Ф., Ломовцев Л. А. Удельная магнитная восприимчивость сильномагнитных руд при различной напряженности магнитного поля // ФТПРПИ. — 1978. — № 6.

Поступила в редакцию 2/VII 2012