

УДК 622.778

**ИЗУЧЕНИЕ ОБОГАТИМОСТИ ГЕМАТИТ-МАГНЕТИТОВЫХ РУД
АБАГАССКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

В. И. Килин, Э. К. Якубайлик*, Л. П. Костененко*, И. М. Ганженко**

ОАО “Евразруда”, 654027, г. Новокузнецк, Россия

**Институт физики СО РАН, 660036, г. Красноярск, Россия*

***Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, Россия*

Различными методами магнитной сепарации исследована обогатимость двух основных типов руд Абагасского железорудного месторождения: гематито-магнетитового и магнетито-мушкетовитового. Сухой магнитной сепарацией достигнуты приемлемые для первой стадии показатели обогащения, а мокрой — выделены высококачественные железорудные концентраты. На смешанных гематит-магнетитовых рудах опробована двухстадийная схема обогащения, значительно повысившая суммарное извлечение железа из руды

Магнетит, гематит, ильваит; сухая, мокрая, высокоградиентная сепарация, отсадка

ВВЕДЕНИЕ

Абагасское железорудное месторождение, находящееся в 300 м от Тейского (Республика Хакасия), открыто в 1931 г. и неоднократно разведывалось. Руды отличаются от тейских повышенным количеством слабромагнитных рудных минералов, что приводит к значительным потерям железа с хвостами при обогащении на сепараторах типа ПБС.

С 1996 г. ведется частичная отработка VI рудного тела карьерным методом. Для переработки абагасская руда поступает на Тейскую дробильно-обоганительную фабрику, где обогащается в крупности 0–16 мм по одностадийной схеме на модернизированных сепараторах ПБС 90/250 и 2ПБС 90/250 с увеличенной напряженностью магнитного поля.

Для роста добычи и обогащения необходимо лабораторное изучение обогатимости абагасской руды различного состава с целью оценки как качества получаемых продуктов, так и экономики их производства. Настоящая работа является продолжением исследований обогатимости руд Абагасса, ведущихся в ОАО “Евразруда” с 2005 г. [1].

Подготовка материала к исследованиям (дробление, измельчение, классификация), измерение магнитных параметров, магнитная сепарация проб выполнены Институтом физики СО РАН; разделение методом отсадки — на кафедре обогащения полезных ископаемых; минералогические исследования — на кафедре геологии, минералогии и петрографии Сибирского федерального университета.

Химический анализ исходных и исследованных образцов абагасской руды проведен в Центральной технологической лаборатории ОАО “Евразруда”.

1. ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АБАГАССКИХ РУД

Объекты исследований: четыре пробы руды Абагасского месторождения; в том числе три пробы (керна) Северной зоны — № 60061, 60073, 60115 (далее сокращенно № 61, 73, 115), отобранные из разных скважин и одна валовая проба № 1 — с Южной.

Минералогический анализ выполнен на керновых образцах руд класса -0.07 мм и продуктах их мокрой сепарации в различных магнитных полях.

По содержанию основных минералов руды разделяются на две группы. Три пробы (№ 61, 115, 1) можно отнести к гематит-магнетитовому составу. Отдельно следует рассматривать магнетит-мушкетовитовую пробу № 73, обогащенную сульфидами.

По данным минералогического анализа количество рудных минералов следующее: проба № 73 — магнетита — 56 %, гематита — 4.7 %; № 115 — соответственно 30 и 4.5; № 61 — 25 и 21.5; № 1 — 22 и 6. В рудах незначительно присутствует гетит — от 0.5 до 2 %; в пробе № 73 до 14 % пирита.

Проба № 1 отличается наличием (до 23 %) довольно редкого минерала ильваита – железокальциевого силиката, содержащего ~41 % слабомагнитного железа. Информации по нему крайне мало. Из-за тонкого срастания ильваита (преобладающий размер зерен 0.4×0.1 мм) с рудными и нерудными минералами выделить его монофракцию для исследований, к сожалению, не удалось.

Исходная руда дробилась в несколько стадий. Сначала на щековой дробилке до класса $-5+0$ мм с грохочением на ситах 10, 5 мм, затем часть продукта крупностью $-5+0$ мм — на валковой дробилке с разгрузочной щелью 1 мм с грохочением на сите 1 мм. В итоге был получен материал двух классов: $-5+0$ мм для сухой сепарации и $-1+0$ мм для классификации и исходных проб для мокрой сепарации.

Для изучения гранулометрического состава и распределения по крупности основного ценного компонента — железа — каждая из проб была разделена на 7 классов крупности от $-5+0$ мм до -0.07 мм.

Не приводя полный химический анализ всех классов проб и ситовую характеристику классов $-1+0$ мм, кратко отметим основное:

— как таковой зависимости содержания железа от крупности на изученном материале не наблюдается. В разных классах проб № 73, 1, 115 количество $Fe_{общ}$ отличается незначительно; на пробе № 61 “всплеск” в 5 % на классе -0.07 мм. Согласно анализу, магнетитовое железо максимально в пробе № 73, вдвое меньше – в остальных пробах;

— рассев класса $-1+0$ мм показал, что в нем преобладают крупные частицы, тонких частиц (менее 0.1 мм) в пробах 15–18 %.

На двух классах изученных проб $-1+0$ мм и -0.07 мм измерена удельная намагниченность насыщения σ_s в поле $H = 800$ кА/м. Магнитные свойства руд исследованы на вибрационном магнитометре.

Величины намагниченностей и массовые доли железа названных исходных проб содержатся в табл. 1.

Результаты химического анализа коррелируют с величинами удельной намагниченности проб, так как она фактически определяется количеством в ней магнетита. К примеру, высокие значения σ_s на пробе № 73 обусловлены значительным содержанием магнетита ~56 %. В случае сложного многофазного состава окислов железа такая взаимосвязь может исказить реальное соотношение минералов.

ТАБЛИЦА 1. Данные химанализа и магнитных измерений исходных проб абагасских руд

Номер пробы	Крупность, мм	Содержание, %		σ_s , Ам ² /кг
		Fe _{общ}	Fe _{маг}	$H = 800$ кА/м
73	-1 + 0	51.1	40.5	63.0
	-0.07	50.2	39.0	58.0
61	-1 + 0	34.0	17.8	21.0
	-0.07	39.2	19.1	23.0
1	-1 + 0	29.9	15.2	19.0
	-0.07	29.8	15.5	22.0
115	-1 + 0	30.5	21.3	27.0
	-0.07	30.1	21.1	24.0

Хорошую сходимость магнитные характеристики показывают и с данными минералогических исследований.

Минералогический и химический анализы, измерения удельной намагниченности насыщения σ_s подтверждают: рудная часть отобранных проб содержит два типа магнитных минералов — сильномагнитный магнетит и слабомагнитные — гематит, гетит, ильваит, что имеет принципиальное значение для обогащения абагасских руд.

2. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

В настоящее время на Тейской дробильно-обогащительной и Абагурской обогащительно-агломерационной фабриках метод обогащения — магнитная сепарация, поэтому основной объем лабораторных исследований абагасских проб проведен этим методом. Сепарация выполнена двумя способами: “мокрым” — на анализаторе 25Т и на модели высокоградиентного сепаратора на базе электромагнита ФЛ; “сухим” — на центробежном полупромышленном сепараторе ПБСЦ 63/50.

Мокрый магнитный анализ

Опыты проведены на материале 100 % класса -0.07 мм при двух напряженностях магнитного поля: в поле $H = 80$ кА/м, близком к рабочему полю сепараторов типа ПБМ; учитывая, что три пробы содержат немалое количество слабомагнитных минералов, разделения осуществлены и в достаточно высоком поле $H = 480$ кА/м.

Содержание железа в полученных продуктах, показатели сепарации собраны в табл. 2. В таблице даны средние выходы фракций по трем опытам.

Обращает внимание по существу отсутствие полевой зависимости выхода магнитной фракции γ_m . Это объясняется тем, что в поле $H = 80$ кА/м практически весь магнетит извлекается в магнитный продукт. Высокие цифры извлечения магнетитового железа и данные минералогии также “говорят” об этом.

Наибольший выход магнитного продукта ~65 % на пробе № 73, на “смешанных” рудах № 61, 1, 115 — выход в 2 раза меньше — от 25 до 33 %, соответственно извлечение Fe_{общ} от 82 до 47–68 %. Качество концентрата высокое — 62–64 % железа общего, потери с хвостами от высоких (29 %) до удовлетворительных (14 %). К сожалению, в пробе № 73 большое содержание серы: в концентрате — 2.8 %, в хвостах ~15 %.

В табл. 2 приведены значения удельной намагниченности насыщения σ_s исходных образцов и полученных фракций класса -0.07 мм в поле $H = 80$ кА/м всех четырех проб. Эта информация дополняет вышеизложенное.

ТАБЛИЦА 2. Результаты мокрой магнитной сепарации абагасских руд и значения намагниченности продуктов сепарации (в числителе — для магнитной фракции, в знаменателе — для немагнитной)

Номер пробы	H , кА/м	γ , % выход	Содержание, %		Извлечение, %		σ_S , Ам ² /кг
			Fe _{общ}	Fe _{маг}	Fe _{общ}	Fe _{маг}	
73	80	$\frac{65.6}{34.4}$	$\frac{62.7}{26.4}$	$\frac{58.6}{2.2}$	$\frac{81.9}{18.1}$	$\frac{98.5}{1.5}$	$\frac{86.0}{3.25}$
	480	$\frac{65.1}{34.9}$	$\frac{63.4}{25.3}$	$\frac{59.6}{1.3}$	$\frac{82.2}{17.8}$	$\frac{99.5}{0.5}$	—
	Исходный	100.0	50.2	39.0			58.0
61	80	$\frac{28.4}{71.6}$	$\frac{64.5}{29.5}$	$\frac{61.7}{1.4}$	$\frac{46.7}{53.3}$	$\frac{91.7}{8.3}$	$\frac{83.0}{1.8}$
	480	$\frac{30.2}{69.8}$	$\frac{63.8}{28.1}$	$\frac{59.7}{0.7}$	$\frac{49.1}{50.9}$	$\frac{94.4}{5.6}$	—
	Исходный	100.0	39.2	19.1			23.0
1	80	$\frac{24.5}{75.5}$	$\frac{62.7}{19.3}$	$\frac{61.6}{1.0}$	$\frac{51.5}{48.5}$	$\frac{97.4}{2.6}$	$\frac{90.0}{1.6}$
	480	$\frac{24.8}{75.2}$	$\frac{63.4}{18.8}$	$\frac{62.0}{0.4}$	$\frac{52.8}{47.2}$	$\frac{99.2}{0.8}$	$\frac{92.0}{1.0}$
	Исходный	100.0	29.8	15.5			22.0
115	80	$\frac{33.1}{66.9}$	$\frac{62.2}{14.0}$	$\frac{60.9}{1.3}$	$\frac{68.4}{31.6}$	$\frac{95.5}{4.5}$	$\frac{84.0}{2.0}$
	480	$\frac{32.9}{67.1}$	$\frac{63.7}{13.6}$	$\frac{62.7}{0.6}$	$\frac{69.6}{30.4}$	$\frac{97.8}{2.2}$	$\frac{108.0}{1.4}$
	Исходный	100.0	30.1	21.1			24.0

Определенные по кривым намагничивания изученных проб поля насыщения смешанных руд H_S составляют свыше 480 кА/м. Отсюда понятны высокие потери слабомагнитного железа с хвостами при обычной мокрой сепарации.

Сухая центробежная сепарация

Отобранные пробы абагасских руд класса $-5+0$ мм разделены методом сухой центробежной сепарации на полупромышленном центробежном сепараторе ПБСЦ 63/50. Скорость вращения барабана сепаратора — 66 об/мин.

ТАБЛИЦА 3. Показатели сухой центробежной сепарации абагасских руд и химический анализ продуктов разделения

Номер пробы	Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
			Fe _{общ}	Fe _{маг}	Fe _{общ}	Fe _{маг}
73	Концентрат	85.1	54.0	45.9	92.6	99.1
	Хвосты	14.9	31.3	2.6	7.4	0.9
	Исходный	100	49.6	39.4	—	—
61	Концентрат	42.1	46.1	39.1	58.3	95.7
	Хвосты	57.9	24.3	1.2	41.7	4.3
	Исходный	100	33.3	17.2	—	—
1	Концентрат	38.7	46.0	37.6	59.5	98.3
	Хвосты	61.3	20.8	2.0	40.5	1.7
	Исходный	100	29.9	14.8		
115	Концентрат	61.6	42.2	35.4	83.6	100.0
	Хвосты	38.2	15.3	2.5	16.4	0
	Исходный	100	31.1	21.8	—	—

Данные химического анализа и показатели обогащения проб представлены в табл. 3. Максимальный выход концентрата ~85 % на пробе № 73, на смешанных рудах — от 39 до 62 % с содержанием железа общего от 54 до 42 %. Извлечение $Fe_{\text{общ}}$ ~93 % для пробы № 73 и от 58 до 84 % для смешанных руд. Как и при мокрой сепарации, много слабомагнитного железа, а также сульфидное железо пробы № 73 теряется с хвостами. Магнетит же извлекается практически полностью.

Показатели сухой сепарации абагасских руд в целом более чем удовлетворительные. Качество концентрата центробежной сепарации может быть еще повышено за счет увеличения числа оборотов барабана сепаратора.

Результаты магнитной сепарации, полученные в настоящей работе, “качественно” совпадают с данными исследований Центральной технологической лаборатории и Абагурской фабрики [1], несовпадение связано с различием минерального состава проб, выполнением опытов в разных условиях, на другой крупности частиц.

Высокоградиентная сепарация

Проведенные опыты и предыдущие лабораторные и промышленные исследования в ОАО “Евразруда” [1] свидетельствуют о том, что при обогащении смешанных гематит-магнетитовых (не говоря об окисленных) руд в полях порядка 96 кА/м (на сепараторах типа ПБС и ПБМ) в хвостах остается до 30 % и более слабомагнитного железа. Нами предпринята попытка доизвлечь его методом ВГМС из хвостов проб № 61, 115, 1.

Полиградиентная, а точнее, высокоградиентная магнитная сепарация (ВГМС) основана на создании в рабочей зоне сепаратора (внесением ферромагнитных заполнителей) множества локальных зон с трехмерной неоднородностью магнитного поля, в которых магнитная сила $H_{\text{grad}}(H)$ резко возрастает. ВГМС имеет наибольшие возможности при извлечении тонкоизмельченных слабомагнитных минералов, что обусловило ее широкое использование в России и за рубежом. Физические принципы процесса, конструкции сепараторов, практика применения ВГМС детально описаны в монографии В. И. и В. В. Кармазиных [2].

За основу лабораторного полиградиентного сепаратора взят электромагнит ФЛ. Между плоскими полюсными наконечниками (расстояние между ними $d = 26$ мм) электромагнита помещалась медная кассета с феррозполнителем – стальными шарами $d = 5$ мм. Величина поля в зазоре электромагнита ~960 кА/м. Навески руды в виде пульпы проливались через намагниченные шары.

Методом ВГМС на классе –70 мкм перечищались немагнитные фракции (хвосты) обычной мокрой сепарации в поле $H = 80$ кА/м проб № 61, 115, 1 смешанных руд. Данные перечистки собраны в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Результаты высокоградиентной магнитной сепарации
(в числителе данные по магнитной фракции, в знаменателе — по немагнитной)

Номер пробы	γ , % выход	Содержание, %		Извлечение, %	σ_S , Ам ² /кг
		$Fe_{\text{общ}}$	$Fe_{\text{маг}}$	$Fe_{\text{общ}}$	
61 _{н/м}	32.0	51.3	4.0	55.6	3.63
	68.0	18.4	0.1	44.4	0.5
1 _{н/м}	37.0	27.8	2.9	53.3	3.6
	63.0	14.4	0.1	46.7	0.8
115 _{н/м}	32.4	20.2	4.5	46.7	1.9
	67.6	11.7	0.1	53.3	0.52

При дообогащении немагнитного продукта обычной сепарации пробы № 61 получаем 32 % концентрата, где 51 % железа. Качество выделенных перечисткой магнитных продуктов от проб № 1 и 115 значительно ниже. Очевидное объяснение — в исходных хвостах пробы № 61 содержалось около 30 % железа, пробы № 1 — ~19 %, а пробы № 115 — всего 14 %.

По минералогическим данным в режиме ВГМС в магнитной фракции при перечистке хвостов пробы № 61 гематита больше в 2–2.5 раза, чем в немагнитных, а ильвайта (при перечистке хвостов пробы № 1) — почти в 4 раза.

В итоге методом ВГМС из хвостов пробы № 61 получено около 30 % (от исходной массы) магнитного продукта с достаточно высоким содержанием железа, т. е. осуществлена двухстадиальная схема; суммарный выход магнитной фракции возрос до ~51 %, а суммарное извлечение железа — до ~77 %.

3. ОБОГАЩЕНИЕ АБАГАССКИХ РУД ОТСАДКОЙ

Серия опытов по обогащению слабomagнитного железорудного сырья проведена простым и экономичным гравитационным способом — отсадкой. Способ давно и успешно используется в Кривбассе при обогащении смешанных руд [3].

Разделения выполнены на пробе № 1 на крупности –3 + 0 мм и –3 + 0,5 мм на лабораторной диафрагмовой двухкамерной отсадочной машине. Время опытов 5 мин, расход воды 8.4 л/мин для обеих камер на классе –3 + 0 мм; 15 и 6.6 л/мин на крупности –3 + 0.5 мм.

Выход концентрата ~42%, содержание железа в нем от 38 (класс –3 + 0 мм) до 43 % (класс –3 + 0.5 мм), в хвостах ~22 %; извлечение ~52 %.

Минералогический анализ хвостов отсадки показал, что в них (в виде включений в нерудные минералы) остается 20–22 % железосодержащих минералов. Преобладает ильвайт (13–17%), на долю рудных минералов (магнетит, гематит) приходится 5–7 %.

Из концентрата отсадки класса –70 мкм, в котором ~38 % железа, на анализаторе выделено ~37 % магнитного продукта с качеством более ~63 % железа общего, потерями ~24 % и извлечением ~61 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторная оценка обогатимости проб основных типов гематит-магнетитовых руд Абагасского месторождения позволяет сделать основные выводы:

1. Руды, представленные пробами № 73, 61, 1, 115 обогащаются сухим способом (сепараторы типа ПБСЦ, класс –5 + 0 мм) с выходом концентратов от 39 до 85 % и содержанием железа от 42 до 54 %. Очевидно, на большей крупности на сепараторах типа ПБС показатели будут несколько ниже.

2. Мокрой сепарацией из этих руд получены концентраты с выходом от 24 до 33 % на смешанных рудах и 65 % (проба № 73) с высоким качеством по железу — 62–64 %.

3. На смешанных гематит-магнетитовых рудах № 61, 1, 115 проведена перечистка немагнитной фракции анализатора методом высокоградиентной сепарации, т.е. реализована двухстадиальная схема обогащения с выделением магнетита в первой стадии в “слабом” поле и слабomagнитных минералов — в сильном градиентном поле — во второй. Вторая стадия существенно поднимает суммарное извлечение железа из пробы № 61; по данным эксперимента перечистка хвостов целесообразна при содержании железа в них ~30 %.

4. На одном материале (№ 1) опробована отсадка. Результаты “средние”: выход концентрата ~42 %, качество — от 38 до 43 % железа, но следует учесть экономичность метода.

Достиженные показатели обогащения могут быть использованы в качестве исходных для технико-экономических расчетов рентабельности переработки абагасских руд изученного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Исследование** обогатимости руд Абагасского месторождения (карьер Южный-2). Отчет № 1 — пробы № 8–10; Отчет № 2 — пробы № 11, 13-21 / ОАО “Евразруда”. — Новокузнецк, 2005.
2. **Кармазин В. В., Кармазин В. И.** Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. — М.: Изд-во МГГУ, 2005. — Т. 1.
3. **Суббота Л. Ф., Малый В. М. и др.** Обогащение бедных кусковых руд Кривбасса отсадкой // Черная металлургия: бюлл. ин-та “Черметинформация”. — 1991. — 6 (1106).

Поступила в редакцию 16/XI 2011