

УДК 669.046:662.778

**ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДОИЗВЛЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА
ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ**

Э. К. Якубайлик¹, А. Д. Балаев¹, И. М. Ганженко²

¹*Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН,*

E-mail: churilov@iph.krasn.ru, Академгородок, 50, стр. 38, 660036, г. Красноярск, Россия

²*ОАО “Евразруда”, Кондомское шоссе, 39, 654018, г. Новокузнецк, Россия*

Показана возможность доизвлечения железа из вторичного минерального сырья — хвостов сухой магнитной сепарации рудничных дробильно-обогажительных фабрик Абазы и Ирбы и хвостов мокрого магнитного обогащения Абагурской обогажительной фабрики ОАО “Евразруда”. Методом сухой центробежной сепарации из хвостов Абазы класса –3 мм получено 6.3 % промпродукта, содержащего 40.4 % Fe_{общ} и 32 % Fe_{маг}; из хвостов Ирбы крупностью –5 мм соответственно — 7.7 % промпродукта, где 39.9 % Fe_{общ} и 30.8 % Fe_{маг}. Мокрая магнитная сепарация хвостов Абагурской фабрики класса –0.07 мм позволяет извлечь от 0.6 до 1.45 % магнитной фракции, в которой 53.3 и 51.6 % Fe_{общ} и 49.8 и 48.5 % Fe_{маг}. Применение современных сепараторов с магнитными системами на основе неодим-железа-бора значительно увеличивает их производительность (на сухой центробежной сепарации) и выход магнитного продукта при мокром обогащении хвостов.

Отвальные хвосты, сухая центробежная сепарация, мокрая сепарация, магнитные характеристики, неодим-железо-бор

Проблема утилизации отходов железорудного сырья актуальна давно — за многолетний период работы горно-обогажительных предприятий из-за несовершенства ранее используемых технологий добычи, обогащения и применяемой техники в хвостохранилищах рудников и фабрик накоплены миллионы тонн хвостов с массовой долей потеряннного магнетитового железа в пределах 1.5–10.0 %.

Только на комбинатах крупнейшего сибирского “обогапителя” — ОАО “Евразруда” к настоящему времени общее количество отходов обогащения железных руд составляет около 220 млн т. Так, на Абагурской обогапительной фабрике в трех хранилищах на территории 385 га содержится свыше 90 млн т шламов обогапительного производства, на Мундыбашской обогапительной фабрике накоплено более 30 млн т отходов обогащения [1].

В рудничных отвалах Шерегеша находится более 24 млн т хвостов, в отвалах Абазы — свыше 21, Теи — более 22 млн т. Ежегодно на предприятиях ОАО “Евразруда” складирруется 3.5 млн м³ отходов сухой магнитной сепарации и 1.6 млн м³ — мокрой сепарации [2].

Для железорудных предприятий наибольший интерес представляет извлечение железа из хвостов, хотя в отвалах присутствуют и цветные металлы — марганец, медь, цинк, кобальт и др. Кроме того, хвосты могут быть использованы для производства строительных материалов, удобрений и другой товарной продукции.

Прогноз перспектив промышленного освоения вторичных железорудных образований рудников и фабрик сибирского региона содержится в работах Института горного дела (ИГД) СО РАН [1, 3]. Экономическая и экологическая целесообразность переработки лежалых хвостов обогащения железорудного сырья подтверждена расчетами проектных институтов [2].

Основной объем информации по хвостам сибирских предприятий носит сугубо “констатирующий” характер, особенно по хвостам сухой сепарации. Работ по доизвлечению из них железа — единицы, публикаций по дообогащению хвостов мокрой сепарации в литературе не обнаружено.

Учитывая изложенное, представляет практическое значение поиск эффективных методов дообогащения отвальных хвостов магнетитовых руд как сухой магнитной сепарации — “первичное” дообогащение на рудничных ДОФ, так и мокрой — на крупных фабриках с получением конечного продукта. Подобные исследования выполнены совместно специалистами Абагурского филиала ОАО “Евразруда” и сотрудниками Института физики (ИФ) СО РАН.

Подготовка образцов к исследованиям, измерения магнитных характеристик выполнены в Институте физики, мокрый магнитный анализ — на Абагурской фабрике и в ИФ, полупромышленная сухая центробежная сепарация — на фабрике. Химический анализ исходных и изученных проб проведен в Центральной технологической лаборатории ОАО “Евразруда”.

О ПРИРОДЕ ПОТЕРЬ МАГНЕТИТА В ОТХОДЫ

Практика обогащения и лабораторные исследования показывают, что основные потери железа в хвосты обусловлены классами магнетита размером менее 70 мкм.

Ситовый анализ отвальных хвостов ряда сибирских фабрик (Абаза, Ирба) подтвердил, что с уменьшением крупности частиц количество в них железа возрастает. Для примера, в хвостах ДОФ Абаканского рудника содержание $Fe_{\text{маг}}$ в классе –0.07 мм достигает 29.96 %, в то время как в частицах крупностью 1.25–2.5 мм — всего 2.4 %, т. е. оставшееся магнетитовое железо связано преимущественно с тонкими классами [4].

Известно, что при размере зерна магнетита менее 60–70 мкм удельная магнитная восприимчивость χ , удельная остаточная намагниченность σ_r заметно падают, а коэрцитивная сила H_c возрастает. Для магнетитовых руд эти зависимости описаны в работах [5, 6]. Установлено, что магнитного поля “обычного” сепаратора типа ПБС или ПБМ с магнитной системой из феррита бария недостаточно для извлечения тонких зерен магнетита в концентрат и магнетит “уходит” в хвосты, обеспечивая в них высокое содержание железа.

Существуют и широко используются несколько способов “борьбы” с данным явлением: прежде всего — увеличение напряженности магнитного поля сепарации, магнитная обработка материала — флокуляция и дефлокуляция и др.

ДООБОГАЩЕНИЕ ХВОСТОВ МЕТОДАМИ СУХОЙ СЕПАРАЦИИ

В 2007 г. ИГД СО РАН проведены промышленные испытания по получению первичных магнетитовых концентратов из лежалых магнетитовых хвостов отвала “Феофановский” на дробильно-обогащительной фабрике Шерегешского рудника. Из лежалых отходов при переработке двух технологических проб крупностью 16–0 мм, где $Fe_{\text{общ}} \sim 15.8$ и 16.3 % и $Fe_{\text{маг}}$ 9.1 и 10 % соответственно, выделен первичный концентрат с содержанием $Fe_{\text{общ}} \sim 37$ %, $Fe_{\text{маг}} \sim 30$ % и выходом $\gamma \sim 21$ и 27 % (на разных сепараторах). Расчетная себестоимость производства концентрата из отходов оказалась в 5 раз ниже фактической себестоимости первичного концентрата из сырой руды, добытой шахтным способом [3].

Институт физики СО РАН и Абагурская обогатительная фабрика опробовали для дообогащения хвостов сухую центробежную сепарацию — метод, известный с 60-х годов XX в., но малоиспользуемый в практике магнитного обогащения [7].

В барабанных сепараторах в какой-либо точке барабана при его вращении относительно разноименных неподвижных полюсов вектор магнитного поля изменяет свое направление с частотой

$$f = \frac{v}{2S} = \frac{\pi R n}{60S},$$

где v — скорость вращения поверхности барабана, м/с; S — шаг полюсов магнитной системы, м; R — радиус барабана, м; n — число оборотов вращения барабана, об/мин.

При скорости вращения барабана 1–2 м/с, шаге полюсов магнитной системы 0.15–0.2 м частота изменения направления магнитного поля составляет 4–8 Гц. При такой низкой частоте происходит переориентация магнитных прядей, состоящих из рудных зерен, сростков и породных частиц. При большой частоте поля, т. е. в быстроходном режиме сепаратора, “пряди” разрушаются полностью и чистые рудные зерна отделяются от сростков и застрявших в прядях породных частиц.

Высокая частота изменения направления поля сепаратора типа ПБСЦ создается увеличением скорости вращения барабана и уменьшением шага полюсов, т. е. магнитная система имеет значительный (около 230°) угол охвата барабана и большое (около 20) число радиально расположенных полюсов с чередующейся полярностью.

Методом сухой центробежной сепарации на тонкоизмельченном материале (90 % класса менее 0.074 мм) получены концентраты с содержанием железа до 70 % [8]. В [9] отмечено, что сухая центробежная магнитная сепарация обеспечивает получение более высоких результатов по сравнению с другими известными методами магнитного обогащения.

Опыты выполнены на хвостах Абаканской ДОФ крупностью менее 3 мм и хвостах Ирбинской ДОФ с размером частиц менее 5 мм на сухом полупромышленном центробежном сепараторе ПБСЦ 63/50 с полюсным шагом 50 мм и напряженностью магнитного поля на поверхности барабана $H = 103.2$ кА/м. Сепарация проведена на двух частотах вращения барабана: на материале Абазы — 90 и 120 об/мин, пробе Ирбы — 66 и 100 об/мин.

Показатели сепарации и данные химанализа продуктов представлены в табл. 1. Из хвостов Абазы получено 6.3 % магнетитового продукта, содержащего 40.4 % железа и не уступающего по качеству первичным концентратам ряда железорудных предприятий; частота вращения барабана — 122 об/мин [10].

ТАБЛИЦА 1. Результаты центробежной сепарации хвостов сухой сепарации

Исходное питание	Продукт	Выход, %	Содержание, %		Частота вращения барабана, об/мин
			Fe _{общ}	Fe _{маг}	
Хвосты Абазы	Магнитный	7.4	36.4	26.9	90
	Немагнитный	92.6	12.0	0.7	
	Магнитный	6.3	40.4	32.0	122
	Немагнитный	93.7	12.0	0.7	
	Исходный	100.0	13.8	2.5	
Хвосты Ирбы	Магнитный	9.4	35.6	25.5	66
	Немагнитный	90.6	11.3	0.6	
	Исходный	100.0	13.6	3.0	
	Магнитный	81.9	39.9	30.8	100
	Немагнитный	18.1	16.2	8.0	
	Исходный	100.0	35.6	25.5	

Перечистка хвостов Ирбы при частоте вращения барабана 66 об/мин позволяет доизвлечь 9.4% промпродукта, в котором 35.6% железа, а повторная перечистка его на более высоких оборотах барабана (100 об/мин) повышает содержание в нем железа до 39.9% с выходом 7.7% от исходной массы. Однако в быстроходном режиме сепарации потери железа с хвостами существенно больше [11].

По итогам опытов можно заключить, что сухая центробежная сепарация — эффективный способ доизвлечения железа из хвостов сухой сепарации.

ДОИЗВЛЕЧЕНИЕ ЖЕЛЕЗА МЕТОДАМИ МОКРОЙ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

На фабриках мокрого магнитного обогащения уровень техники и технологии выше по сравнению с таковым на “сухих” фабриках “первичного” обогащения. Отсюда и уровень потерь магнетитового железа в отходы достаточно низкий. По данным технического отдела Абагурской обогатительной фабрики, содержание магнетитового железа в отвальных хвостах в 2013 г. составило менее 1%. Снижение потерь железа на 0.1% экономит фабрике 4.5 тыс. т руды (два состава) в год. Однако накопленные в хвостохранилищах многолетние шламы содержат магнетитового железа значительно больше из-за несовершенства оборудования и технологии прошлых лет. В 2013 г. специалистами Абагурской фабрики и сотрудниками Института физики СО РАН выполнены опыты по доизвлечению железа из отвальных хвостов участков 1 и 2 фабрики. В хвостах участка 2 магнетитового железа оказалось больше, чем в хвостах участка 1, так как на участке 2 ведется сгущение и фильтрация концентрата обоих участков, в результате чего “богатые” хвосты направляются в отвал.

В табл. 2 приведены результаты мокрой магнитной сепарации абагурских хвостов двух классов крупности ($-1+0.2$ и $-0.07+0$ мм) в магнитном поле $H=175$ кА/м.

ТАБЛИЦА 2. Магнитный анализ хвостов Абагурской фабрики

Проба	Класс крупности, мм	Продукт	Выход, %	Содержание, %	
				Fe _{общ}	Fe _{маг}
Хвосты участка 1	-1+0.2	Магнитный	1.9	16.15	12.82
		Немагнитный	98.1	6.91	0.63
		Исходный	100	7.22	0.87
	-0.07+0	Магнитный	0.56	53.3	49.85
		Немагнитный	99.31	9.34	0.29
		Исходный	100	9.64	0.57
Хвосты участка 2	-1+0.2	Магнитный	2.02	17.3	13.6
		Немагнитный	97.98	8.7	0.96
		Исходный	100	9.05	1.23
	-0.07+0	Магнитный	1.45	51.61	48.46
		Немагнитный	98.55	10.17	0.31
		Исходный	100	10.92	1.03

Видно, что в классе $-0.07+0$ мм из исходного питания, содержащего Fe_{маг} ~ 0.6% (хвосты участка 1) и ~ 1% (участка 2) доизвлекается от 0.6 (участок 1) до 1.45% (участок 2) концентрата с содержанием Fe_{маг} около 50%.

Качество полученного концентрата характеризуют значения магнитных параметров. Измерения магнитных характеристик абагурских проб выполнены на автоматизированном вибрационном магнитометре в магнитных полях до 800 кА/м. Погрешность измерения магнитного момента — $5 \cdot 10^{-8}$ А·м², поля — 40 А/м, массы исследуемых образцов — 0.1 мг. Методика измерения магнитных свойств на вибрационном магнитометре описана в [12].

В табл. 3 представлены значения магнитных характеристик исходного материала питания и выделенного магнитного продукта класса $-0.07+0$ мм. Для сравнения приведены параметры концентрата, из хвостов которого доизвлечена магнитная фракция. Отметим, что магнитные характеристики близки; удельная намагниченность насыщения σ_s фракции несколько ниже, а коэрцитивная сила H_c выше, так как в хвостах больше “тонких” частиц.

ТАБЛИЦА 3. Магнитные характеристики исходных проб и магнитных продуктов сепарации (класс $-0.07+0$ мм)

Проба	Продукт	σ_s	σ_r	σ_H	H_c	$\chi, 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$		
		А·м ² /кг			кА/м	H_{\max}	χ_{\max}	χ_H
Хвосты участка 1	Исходный	1.61	0.146	1.3	9.7	9.9	0.79	0.05
	Магнитный	57.3	6.33	50.4	5.18			
Хвосты участка 2	Исходный	1.51	0.129	1.23	8.8	10.8	0.83	0.05
	Магнитный	61.3	7.48	54.1	5.9			
Концентрат	Исходный	75.4	7.71	68.3	4.02	9.0	1.31	0.07

Анализ данных табл. 2 и 3 показывает, что в магнитном продукте, полученном из хвостов класса $-1+0.2$ мм, содержание $\text{Fe}_{\text{маг}}$ меньше, чем в продукте из класса $-0.07+0$ мм, в ~ 3.9 раза на участке 1 и в ~ 3.6 раза — на участке 2. Выходы магнитных фракций на крупном классе выше: в 2.7 раза на участке 1 и 0.5 % на участке 2.

Удельная намагниченность насыщения σ_s магнитной фракции из тонкого класса выше в 4.2 раза для участка 1 и в 4.9 раза — для участка 2; σ_s класса $-1+0.2$ мм магнитного продукта участка 1 составляет 13.6, участка 2 — 12.5 А·м²/кг.

Значения параметров удельной магнитной восприимчивости χ (поля максимума, максимума и величины χ в $H=175$ кА/м) также близки, за исключением максимума χ на концентрате.

Результаты измерений магнитных характеристик магнитных фракций, полученных из отвальных хвостов, подтвердили высокое содержание в них железа. Отмечена пропорциональность содержания магнетитового железа магнитным характеристикам.

ВЫВОДЫ

Проведены опыты по доизвлечению железа из отходов обогащения железосодержащих руд: отвальных хвостов сухой магнитной сепарации абаканских и ирбинских руд и хвостов мокрой сепарации Абагурской обогатительной фабрики.

Из абаканских хвостов класса $-3+0$ мм, ирбинских хвостов крупностью $-5+0$ мм методом сухой центробежной сепарации доизвлечено 6.3 % промпродукта, содержащего 40.4 % $\text{Fe}_{\text{общ}}$ и 32 % $\text{Fe}_{\text{маг}}$ (Абаза); получено 7.7 % промпродукта, в котором 39.9 % $\text{Fe}_{\text{общ}}$ и 30.8 % $\text{Fe}_{\text{маг}}$ (Ирба).

Создание Научно-производственной корпорацией “Механобр-техника” сепараторов типа ПБСЦ с длиной барабана 200 см, магнитной системой на основе неодим-железа-бора и установкой двигателей с большим числом оборотов значительно увеличивает их производительность, улучшает качество выделяемого продукта, расширяя возможности практического использования.

С помощью мокрой магнитной сепарации хвостов Абагурской обогатительной фабрики класса $-0.07+0$ мм извлечено от 0.56 до 1.45 % магнитного продукта с содержанием $\text{Fe}_{\text{общ}}$ до 53 и $\text{Fe}_{\text{маг}}$ до 50 %. Опыты проведены в поле напряженностью $H=175$ кА/м на сепараторе ПБМ 90/250, в котором магнитная система из феррита бария заменена системой из сплава неодим-железо-бор.

Применение по всей технологической схеме сепараторов с системами на основе неодим-железа-бора позволит поднять выход магнитного продукта при мокрой сепарации отвальных хвостов до 2%. Дообогащение отвальных хвостов методом как сухой, так и мокрой сепарации может быть рентабельно на фабриках, где они и получены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Филиппов П. А.** О потенциале техногенных образований рудников Западной Сибири // ФТПРПИ. — 2008. — № 4. — С. 71–77.
2. **Новиков Н. И., Килин В. И., Матвеев Ю. Г.** Использование отходов железорудного сырья на горнорудных предприятиях ОАО “Евразруда” для производства первичного концентрата, строительных материалов и товаров народного потребления // Материалы 2-го Междунар. конгр. “Цветные металлы–2010”. — Красноярск, 2010. — С. 762–765.
3. **Филиппов П. А., Усков В. А.** Технология переработки вторичного железорудного сырья // Сб. материалов VII конгресса обогатителей стран СНГ. — М.: МИСиС, 2009.
4. **Килин В. И., Якубайлик Э. К.** Изучение магнитных свойств и процессов сепарации абаканских магнетитов // ФТПРПИ. — 2002. — № 5. — С. 104–109.
5. **Ломовцев Л. А., Нестерова Н. А., Дробченко Л. А.** Магнитное обогащение сильномагнитных руд. — М.: Недра, 1979. — 235 с.
6. **Бикбов А. А., Крюковская Л. В.** Магнитные свойства некоторых магнетитовых промпродуктов // Обогащение руд. — 1974. — № 5. — С. 17–20.
7. **Деркач В. Г.** Сухое магнитное обогащение на быстроходных барабанных сепараторах // Обогащение руд. — 1963. — № 4. — С. 3–9.
8. **Сентемова В. А.** Повышение качества магнетитовых концентратов методом центробежной магнитной сепарации // Обогащение руд. — 1970. — № 1, 2. — С. 34–35.
9. **Кармазин В. В.** Электрические и магнитные методы сепарации. — М.: Наука, 1966. — С. 58–67.
10. **Килин В. И., Ганженко И. М., Якубайлик Э. К.** Выделение аглоруды из первичных магнетитовых концентратов сухой центробежной сепарацией // Изв. вузов. Черная металлургия. — 2007. — № 6. — С. 9–10.
11. **Николаев С. Б., Якубайлик Э. К., Соловьева И. В.** Перечистка ирбинских магнетитовых продуктов центробежной сепарацией // Изв. вузов. Черная металлургия. — 2008. — № 8. — С. 63–65.
12. **Балаев А. Д., Бояршинов Ю. В., Карпенко М. М., Хрусталева Б. П.** Автоматизированный магнитометр со сверхпроводящим соленоидом // ПТЭ. — 1985. — Т. 3. — С. 167–168.

Поступила в редакцию 7/VIII 2016