

УДК 667.662.1

**ИЗЫСКАНИЕ СПОСОБОВ ГЛУБОКОГО ОБОГАЩЕНИЯ  
БОГАТЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ**

**Т. Н. Гзогян, С. Р. Гзогян, Е. В. Гришкина**

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
E-mail: mehanobr1@yandex.ru, ул. Победы, 85, 308015, г. Белгород, Россия*

Приведены результаты исследований по глубокому обогащению основной минералогической разновидности природных богатых руд с целью получения высококачественной железорудной продукции как сырья для металлизации. Для технологических экспериментов использованы основные методы обогащения (избирательное дробление, магнитное обогащение в слабом и сильном поле, гравитационное и флотационное). Показано, что из природных богатых железных руд по простой технологии можно получать высококачественную железорудную продукцию. На первом этапе необходимо максимально извлечь высококачественную продукцию по простой технологии, а затем применять мокрые процессы разделения, которые неизбежно приведут к значительным потерям товарной продукции, вызовут осложнения с ее обезвоживанием и сушкой.

*Богатая железная руда, глубокое обогащение, избирательное дробление, дезинтеграция, мокрая магнитная сепарация, полиградиентная сепарация, гравитационное и флотационное обогащение, металлизация, агломерационный продукт*

DOI: 10.15372/FTPRPI20190217

В технологическом плане на ближайшую перспективу открываются возможности развития технологий нового поколения, в частности технологий прямого восстановления железа [1]. В качестве надежной сырьевой базы прямого восстановления железа черной металлургии России необходимо рассматривать глубокозалегающие месторождения природных богатых руд Белгородского железорудного региона Курской магнитной аномалии (КМА). К важным преимуществам региона относится благоприятное сочетание географических, природных и экономических условий, в том числе огромных запасов и высокого качества этого вида сырья [2, 3]. Богатые железные руды региона могут стать потенциальным источником получения высококачественного железорудного продукта для технологий прямого восстановления после соответствующей подготовки. Вопрос глубокого обогащения богатых руд месторождений региона рассматривался неоднократно. Установлено, что из рыхлых и полурыхлых руд месторождений возможно получение продукта, пригодного для металлизации.

Богатые руды месторождений сложены однообразными геолого-минералогическими типами, среди которых, в зависимости от наличия и количественного соотношения рудообразующих минералов и вторичных наложенных процессов, выделены разнообразные минеральные типы [4, 5].

За рубежом (Канада, США, Австралия, Мексика) объем производства железорудной продукции из аналогичного типа руд является значительным, а в Бразилии эти руды — практически единственный источник железорудного сырья не только для собственного потребления, но и для экспорта в больших объемах. Технология обогащения богатых руд включает гравитационные, магнитные (в поле высокой интенсивности) и флотационные методы обогащения, которые используются как в комбинированных, так и в обычных схемах. Последовательность их применения в комбинированных схемах определяется технологическими свойствами руд. Наиболее широко используется избирательное дробление, которое позволяет бедную часть природных богатых руд перевести в мелочь и затем выделить ее для складирования или обогащения каким-либо иным способом.

### ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований служила технологическая проба ~3 т крупностью – 150 мм, отобранная на Яковлевском месторождении и представленная рыхлой и полурыхлой мартитовой и железослюдко-мартитовой разновидностью, частично хлоритизированной (особенно в крупных фракциях), с включением жильного безрудного кварца и сланцев. Первоначальная массовая доля влаги 11.5%. Характеристика полного химического и минерального состава, распределение железа по минералам технологической пробы представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Химическая и минеральная характеристика технологической пробы

Оксиды и компоненты		Минерал	Массовая доля, %	
Наименование	Массовая доля, %		минерала	железа в минерале
Fe <sub>общ</sub>	67.30	Мартит + гематит	66.60	60.63
FeO	3.42	Магнетит	6.86	4.97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	92.42	Гидрооксиды железа	0.70	0.41
SiO <sub>2</sub>	2.40	Силикаты	2.45	0.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.58	Карбонаты	2.00	0.47
CaO	0.54	Сульфиды	0.02	0.01
MgO	0.23	Кварц	1.36	—
TiO <sub>2</sub>	0.08			
MnO	0.005			
S <sub>общ</sub>	0.025			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04			
п.п.п.	0.73			
K <sub>2</sub> O	0.14			
Na <sub>2</sub> O	0.23			

Основными рудными минералами в исследуемой пробе являются мартит и гематит (железная слюдка), образующие мономинеральные и смешанные прослои. Мартит наблюдается в виде отдельных идиоморфных зерен и полиэдрических агрегатных сростков, т. е. сохраняет структуру зерен магнетита, по мартиту развиваются гидроксиды железа. Гематит встречается в виде удлиненных пластинок и чешуек, расположенных чаще вдоль слоистости (особенно в железослюдковых прослоях), в отдельных случаях беспорядочно. Магнетит присутствует в небольшом количестве и развивается в виде различных по размеру реликтов в зернах и агрегатах мартита.

Гидроксиды железа представлены гидрогематитом и гидрогетитом. Гидрогематит развивается по мартиту в виде гнезд, каемок, заполняет микротрещины. Гидрогетит встречается совместно с гидрогематитом, а также развивается по силикатным и карбонатным минералам. Силикатные минералы представлены в основном хлоритом (шамозитом), в меньшей степени — каолинитом и гидрослюдой. Карбонатные минералы в основном представлены сидеритом, который слагает отдельные прослои и цементирует рудные зерна. Кварц является реликтовым минералом, образует как самостоятельные, так и смешанные с рудными минералами прослои. Встречается жильный крупнокристаллический кварц, зерна кварца маршаллитизированы. В виде единичных зерен и небольших скоплений присутствует пирит и марказит. Гидроксиды алюминия выполнены бемитом (тонкозернистые агрегаты) и гиббситом (таблитчатые кристаллы).

Перед технологическими исследованиями проведено определение полного гранулометрического состава пробы с распределением химических компонентов по классам крупности. Характер распределения классов крупности и химических компонентов  $Fe_{общ}$ ,  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$  приведены на рис. 1.

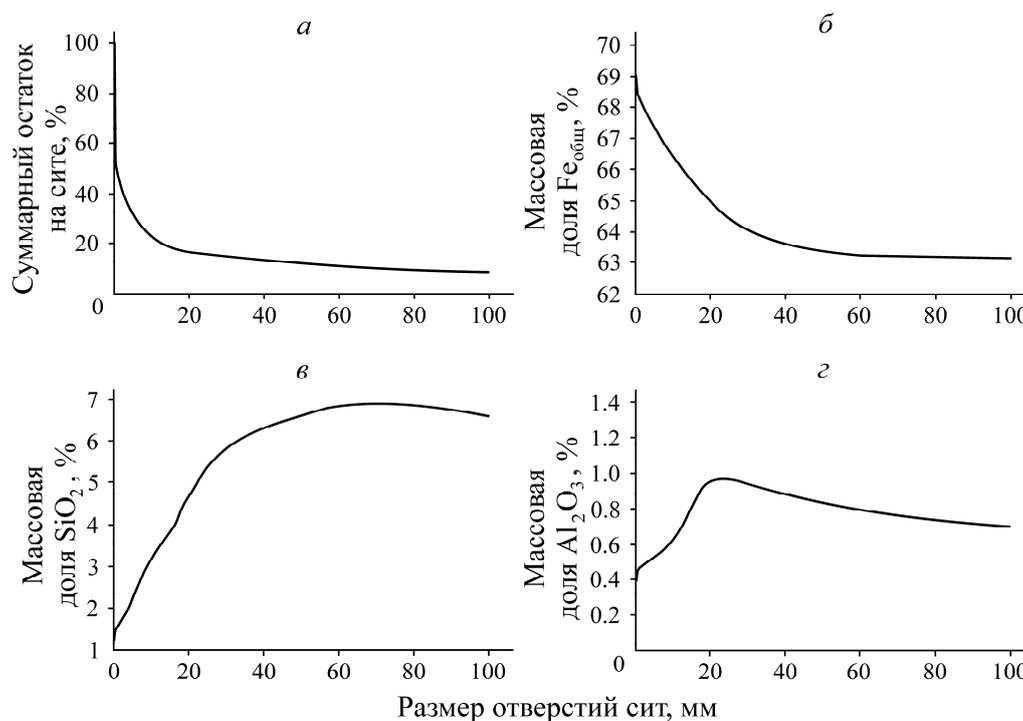


Рис. 1. Гранулометрическая характеристика (а), распределение  $Fe_{общ}$  (б),  $SiO_2$  (в) и  $Al_2O_3$  (з) по классам крупности в технологической пробе

Распределение по классам крупности химических компонентов показывает четко выраженную тенденцию — увеличение  $Fe_{общ}$  и уменьшение  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$  от крупных классов к мелким (рис. 1). Во всех фракциях — 8 мм массовая доля  $SiO_2$  не превышает 2 % (при  $Fe_{общ}$  до 69 %).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что наиболее эффективным способом выделения высококачественной части продукции из рыхлых и полурыхлых руд является сортировка на грохотах по граничной крупности 8 мм.

Учитывая сложность эффективного грохочения руд с повышенной влажностью, предварительно выполнены исследования по определению предела влажности руды и проведены эксперименты по эффективности грохочения руды с различной влажностью. После предварительного ручного отсева класса +70 мм и грохочения класса –70 мм на виброгрохоте фирмы Haver Woesker (Германия) на решетке с размером отверстий 10 мм рассев осуществлялся по классу 8 мм (выход класса –8 мм составил 65.5 % с массовой долей  $Fe_{общ} = 68.4\%$  и  $SiO_2 = 1.4\%$ ). Для экспериментов подготовлены пробы с различной влажностью, с последующим рассевом каждой пробы на виброгрохоте на решетке с размером отверстий 10 мм и определением эффективности грохочения (рис. 2). Анализ экспериментов показывает, что эффективность грохочения по классу 8 мм при массовой доле влаги до 8 % остается на высоком уровне (90–95 %), увеличение влажности (с 8 до 11 %) привело к резкому падению эффективности грохочения (до 60 %). Дальнейшее увеличение влажности создает условия для мокрого грохочения.

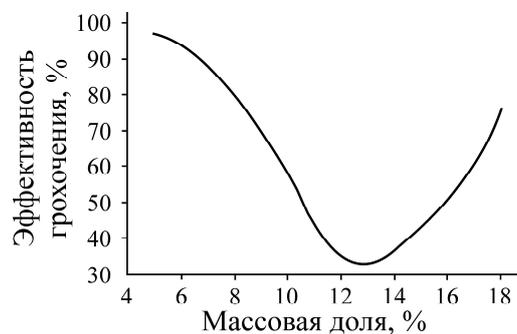


Рис. 2. Зависимость эффективности грохочения технологической пробы руды от влажности

На основании изложенного массовая доля влаги выбрана не более 8.5–9.0 %. Для технологических исследований путем дренирования и перемешивания массовая доля влаги исходной руды снижена до 8.3 %. Учтено, что хранение влажной пробы руды при доступе воздуха приводит к изменению вещественного состава ввиду склонности ее к интенсивному окислению. По истечении 10 дней в маритовой и железослюдко-маритовой руде Яковлевского месторождения массовая доля магнетита уменьшилась с 5.10 до 2.57 %.

В [4, 5] установлена четкая взаимосвязь между крупностью (адекватна прочности) и качеством руды как в пределах одной минералогической разновидности, так и между отдельными разновидностями (менее прочные составляющие характеризуются более высоким качеством). В рыхлых и полурыхлых рудах имеются слабосцементированные богатые (по  $Fe_{общ}$ ) разности, которые при грохочении остаются в надрешетном продукте, снижая выход качественной руды. В этой связи необходимо выполнить разрушение этих разностей, а более плотные (скальные и полускальные) не разрушать. Для проведения экспериментов из общей пробы выделена частная проба и разделена на грохоте на классы крупности +70, –70 + 8 и –8 мм (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Усредненная характеристика фракций по классам крупности, %

Класс крупности, мм	Выход класса крупности	Массовая доля оксидов и компонентов в классах крупности					
		$Fe_{общ}$	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$P_2O_5$	$S_{общ}$	п.п.п.
+70	10.0	63.10	6.64	0.75	0.041	0.010	0.67
–70+8	16.4	65.60	4.17	0.71	0.042	0.025	0.72
–8	73.6	68.25	1.43	0.51	0.043	0.027	0.73
Итого	100.0	67.30	2.40	0.567	0.043	0.025	0.72

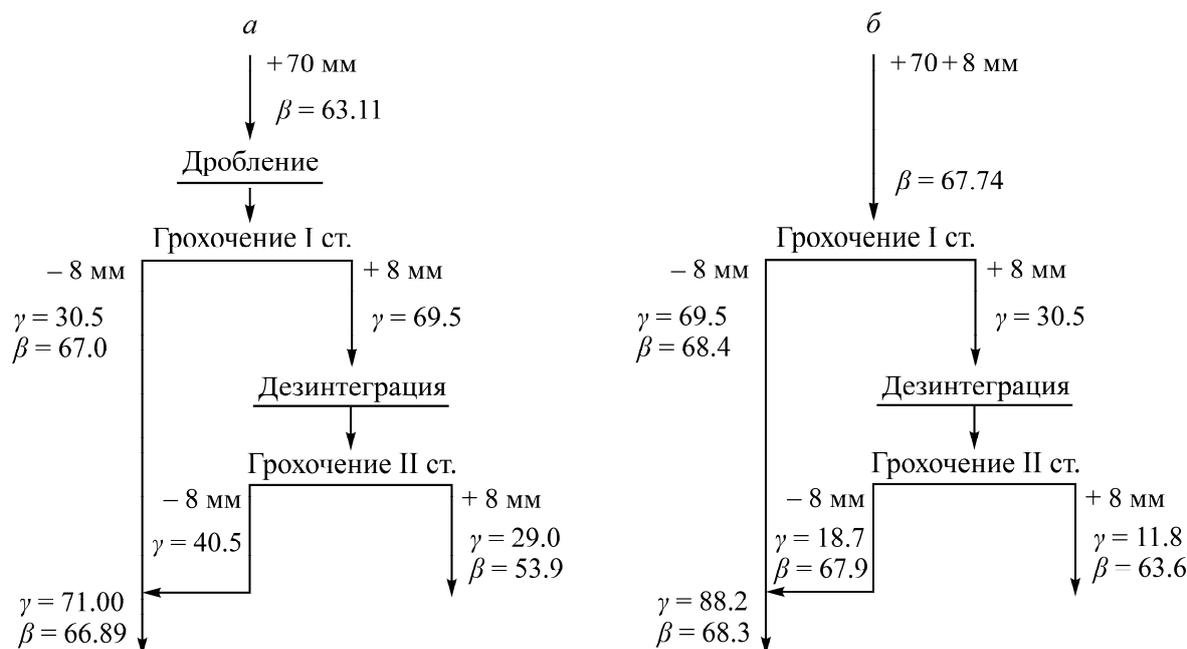


Рис. 3. Схема избирательного дробления рыхлых и полурыхлых руд крупностью + 70 (а) и - 70 + 8 мм (б)

Видно, что класс - 8 мм удовлетворяет требованиям к сырью для металлизации (табл. 2). С целью увеличения выхода этой фракции выполнены исследования по дезинтеграции крупных классов + 70 и - 70 + 8 мм методом избирательного дробления. Разрушение крупных классов крупности выполнялось раздельно на дезинтеграторе типа DESI-16С, с регулированием окружной скорости вращения ротора от 15.5 до 30.2 м/с и выбором оптимального скоростного режима 15 м/с (рис. 3, табл. 3). Полученные результаты показали, что с увеличением скорости вращения ротора дезинтегратора увеличивается и выход класса - 8 мм, при этом массовая доля  $Fe_{общ}$  снижается и увеличивается массовая доля  $SiO_2$ .

ТАБЛИЦА 3. Усредненные результаты избирательного дробления богатой руды (класс - 70 + 8 мм) в дезинтеграторе

Скорость вращения ротора, м/с	Продукты разделения		Массовая доля оксидов и компонентов, %				
	Клас, мм	Выход класса, %	$Fe_{общ}$	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$P_2O_5$	$S_{общ}$
15.5	+8	48.20	63.10	6.30			
	-8	51.80	68.10	1.90	0.84	0.045	0.014
	Исходная	100.00	65.70	4.02			
20.7	+8	35.40	62.80	6.80			
	-8	64.60	67.50	2.00	0.96	0.052	0.016
	Исходная	100.00	65.84	3.70			
26.0	+8	28.65	62.10	7.20			
	-8	71.35	66.90	2.80	1.04	0.044	0.033
	Исходная	100.00	65.52	4.06			
30.2	+8	20.80	61.80	7.70			
	-8	79.20	66.20	3.30	1.16	0.052	0.027
	Исходная	100.00	65.28	4.21			

Обогащение методом избирательного дробления фракции +70 мм не позволило выделить продукт, удовлетворяющий кондиции на сырье для металлизации. Эту фракцию следует рассматривать как сырье для аглодоменного производства (рис. 3а). Обогащение методом избирательного дробления фракции –70+8 мм дало возможность выделить из нее часть продукта (выход 18.7%), удовлетворяющего кондиции на сырье для металлизации, а полученную фракцию +8 мм (выход 11.8%) — рассматривать как сырье для аглодоменного производства (рис. 3б, табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Усредненный химический состав продуктов разделения методом избирательного дробления

Оксиды и компоненты	Массовая доля оксидов и компонентов в продуктах, %	
	для металлизации	для аглодоменного процесса
Fe <sub>общ</sub>	68.30	63.60
Fe <sub>магн</sub>	5.10	—
FeO	3.50	—
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	93.79	—
SiO <sub>2</sub>	1.50	6.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50	0.85
CaO	0.40	1.12
MgO	0.17	0.46
TiO <sub>2</sub>	0.004	—
MnO	0.006	—
Na <sub>2</sub> O	0.08	—
K <sub>2</sub> O	0.05	—
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	—
S <sub>общ</sub>	0.03	—
п.п.п.	0.35	1.20

Исследования показали, что для производства сырья для металлизации может применяться простая схема с использованием избирательного дробления и получением кондиционного продукта (Fe<sub>общ</sub> до 68.3 и SiO<sub>2</sub> до 1.5%). Подтверждена принципиальная возможность получения высококачественного железорудного продукта для прямого восстановления. Массовая доля вредных примесей в нем не превысила S<sub>общ</sub> = 0.01–0.03%, P до 0.06%, соотношение шлакообразующих оксидов до 0.29%.

Применение мокрых процессов разделения для всей рудной массы, содержащей большое количество мелкозернистой фракции и шламов в виде гидроксидов железа, вызывает трудности с обезвоживанием и утилизацией и приводит к значительным потерям металла. Более рационально применение механического разделения для крупнокусковой фракции руды > 8 мм. Природное различие по удельному весу рудных и нерудных минералов может быть одним из возможных (гравитационных) методов повышения металлургической ценности богатых руд.

Гравитационная обогатимость выполнена на пробе +8 мм агломерационной руды, полученной при избирательном дроблении при различной скорости вращения ротора. Класс крупности +8 мм после промывки подвергался разделению в тяжелой суспензии (гранулированный ферросилиций) при плотности суспензии 3.2 г/см<sup>3</sup> (табл. 5). Результаты показали, что за счет гравитационного обогащения можно существенно увеличить качество выделенного после избирательного дробления агломерационного продукта.

Оптико-минералогическим изучением установлено, что продукты гравитационного разделения с удельным весом < 3.2 г/см<sup>3</sup> представлены в основном жильным безрудным кварцем и сланцами.

ТАБЛИЦА 5. Результаты гравитационного анализа

Скорость вращения ротора, м/с	Удельный вес фракции, г/см <sup>3</sup>	Выход фракции, %	Массовая доля оксидов, %	
			Fe <sub>общ</sub>	SiO <sub>2</sub>
15.5	< 3.2	11.4	33.00	46.60
	> 3.2 и класс – 3 мм	88.6	66.90	2.40
	Класс + 8 мм	100.0	63.04	7.44
20.7	< 3.2	13.9	34.80	39.70
	> 3.2 и класс – 3 мм	86.1	67.00	2.10
	Класс + 8 мм	100.0	62.52	7.33
30.2	< 3.2	15.9	29.20	46.70
	> 3.2 и класс – 3 мм	84.1	66.60	2.70
	Класс + 8 мм	100.0	60.65	9.70

Получение высококачественного металлургического сырья многоцелевого назначения возможно при глубоком обогащении руд. За рубежом наиболее широкое распространение для обогащения гематитовых руд получила полиградиентная магнитная сепарация (ВИМС). Эксперименты по магнитной технологии проводились на пробе + 8 мм агломерационной руды, полученной при избирательном дроблении при различной скорости вращения ротора. Кроме того, проба искусственно засорена пустопородными включениями. Искусственное засорение выполнено в связи с тем, что при добыче в отдельные периоды будет происходить засорение добываемой руды пустопородными включениями (безрудные и оруденелые сланцы). На первом этапе выполнены исследования по кинетике измельчения и установлена оптимальная крупность, которая должна быть не более 70–72 % класса – 0.045 мм. Схема технологических экспериментов на измельченном классе – 8 мм (до 72 % класса – 0.045 мм) приведена на рис. 4.

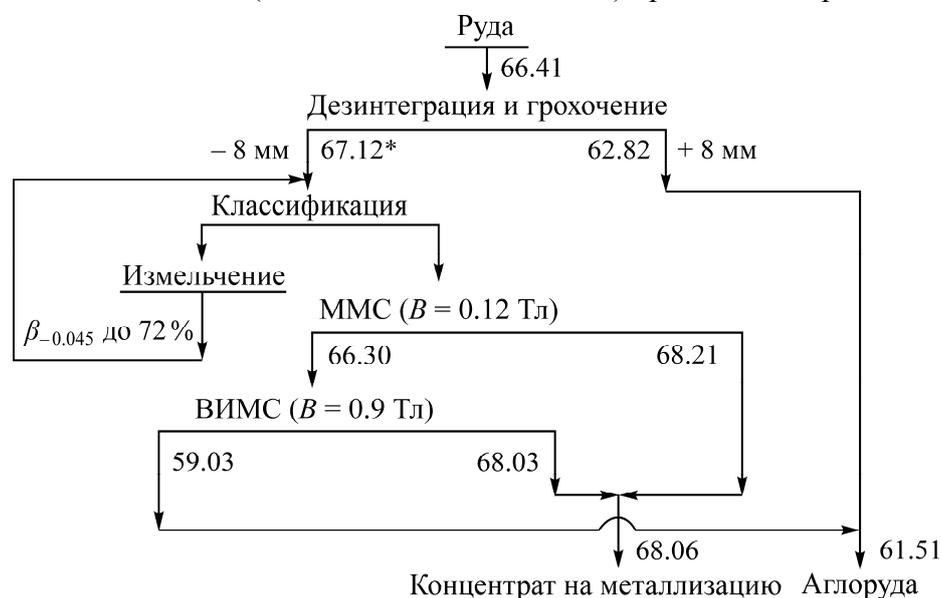


Рис. 4. Схема мокрого магнитного обогащения в слабом и сильном поле. Звездочкой показана массовая доля Fe<sub>общ</sub> в продукте

Первая стадия магнитной сепарации осуществлялась на лабораторном магнитном сепараторе ЭБМ-32/20 (ММС) с индукцией магнитного поля  $B = 0.12$  Тл, которая является защитной для извлечения из руды магнетита и его реликтов с целью предотвращения забивки магнитной сепарации в сильном поле (ВИМС). Продукт ММС подвергались ВИМС при  $B = 0.9$  Тл в зазоре

между пластинами и массовой доле твердого 25–30%. Предварительно выполнены исследования по влиянию индукции магнитного поля на показатели разделения. Установлено, что при изменении  $B$  от 0.3 до 1.0 Тл выход магнитного продукта снижается с 98.8 до 61.8%, при этом массовая доля  $Fe_{общ}$  в концентрате изменяется незначительно: при  $B=0.3$  Тл  $Fe_{общ}=68.03\%$ ,  $SiO_2=0.93\%$  и при  $B=1.0$  Тл  $Fe_{общ}=67.85\%$ ,  $SiO_2=1.23\%$ . Для дальнейших экспериментов принята индукция  $B=0.9$  Тл. При обогащении ММС при  $B=0.12$  Тл выход концентрата колебался от 0 до 15.1%, массовая доля  $Fe_{общ}$  в концентрате от 67.50 до 68.21%, а  $SiO_2$  — 1.30–1.59%. Выход объединенного концентрата составил до 74.80%, массовая доля  $Fe_{общ}$  до 68.06%, а  $SiO_2$  1.72%. Полученный высококачественный продукт удовлетворяет требованиям порошковой металлургии, аккумуляторного производства и др. Массовая доля  $Fe_{общ}$  в хвостах составила до 61.51%, и этот продукт можно использовать как агломерационное сырье.

Применение флотационного метода как основного метода обогащения железных руд связано с рядом сложностей и в первую очередь с необходимостью решения вопроса об очистке сточных вод. Для флотационного дообогащения концентрата ВИМС применялась обратная катионная флотация. В качестве реагента-собирателя использовался катионный собиратель РА-14 (TomaH, США), в качестве регулятора среды — раствор NaOH (рН среды варьировал от 8.0 до 10.5), депрессора оксидов железа — кукурузный модифицированный крахмал. Изменение рН не оказало заметного влияния на технологические показатели разделения. Установлено, что в зависимости от расхода катионного собирателя массовая доля  $Fe_{общ}$  в концентрате увеличивается незначительно на 0.1%, массовая доля  $SiO_2$  снижается на 0.02%. Низкая эффективность флотационного обогащения магнитного продукта связана с наличием в нем хлорита, который имеет тесное прорастание с рудными минералами (гематит, мартит) и не извлекается в пенный продукт (хвосты). Низкая эффективность флотационного метода обогащения концентрата позволяет рекомендовать этот метод для богатых железных руд месторождений региона.

## ВЫВОДЫ

Согласно результатам предварительных исследований, из природных богатых железных руд по простой технологии при сравнительно низких энергетических затратах можно получать высококачественную железорудную продукцию. Переработка богатых железных руд может проводиться по безотходной технологии, что значительно уменьшает отрицательное влияние на экологию региона. Следует особо подчеркнуть, что применение мокрых процессов разделения неизбежно приведет к значительным потерям товарной продукции, вызовет осложнения с ее обезвоживанием и сушкой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А. Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // ФТПРПИ. — 1999. — № 3. — С. 6–16.
2. Орлов В. П., Шевырев И. А., Соколов Н. А. Железные руды КМА. — М.: Геоинформмарк, 2001. — 616 с.
3. Князев В. Ф., Гиммельфарб А. И., Неменов А. М. Бескоксовая металлургия железа. — М.: Металлургия, 1972. — 272 с.
4. Гзогян Т. Н., Гзогян С. Р. Особенности вещественного состава богатых железных руд месторождений КМА // Научные ведомости БелГУ. Серия “Естественные науки”. — 2018. — Т. 42. — № 2. — С. 131–141.
5. Никулин И. И. Геология и генезис месторождений гипергенных железных руд (на примере Курской магнитной аномалии): автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. — М., 2017. — 41 с.

*Поступила в редакцию 21/XII 2018*

*После доработки 21/XII 2018*

*Принята к публикации 26/III 2019*