

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМ ОБОГАЩЕНИЯ ИЛЬМЕНИТ-ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ И ГЕМАТИТ-МАГНЕТИТОВЫХ РУД

А. Е. Пелевин¹, В. Н. Шигаева², К. А. Водовозов¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия,

² АО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия

Аннотация: Исследованы схемы обогащения ильменит-титаномагнетитовых и гематит-магнетитовых руд. Минеральный состав и физические свойства слабомагнитных рудных и породных минералов ильменит-титаномагнетитовых и гематит-магнетитовых руд показывают, что магнитные свойства ильменита и гематита и большинства породных минералов различаются незначительно. Поэтому с помощью одного магнитного метода сложно получить ильменитовый или гематитовый концентрат. Для обогащения этих типов руд следует применять комбинированные схемы с использованием магнитных, гравитационных, электрических и флотационных методов обогащения. Для повышения технологических показателей обогащения ильменит-титаномагнетитовых и гематит-магнетитовых руд также применяется тонкое грохочение. Выполненные лабораторные исследования показали, что количество применяемых методов обогащения для получения ильменитового или гематитового концентрата зависит от соотношения в руде рудных и породных минералов. При обогащении магнетит-гематитовой руды с высоким содержанием гематита и низким содержанием слабомагнитных породных минералов для получения гематитового концентрата можно использовать только высокоградиентную магнитную сепарацию. Для получения ильменитового или гематитового концентрата из ильменит-титаномагнетитовых и гематит-магнетитовых руд, содержащих высокое количество слабомагнитных рудных и породных минералов, следует использовать схему с двумя-тремя методами обогащения. При низком содержании в исходном продукте рудного слабомагнитного минерала и высоком количестве слабомагнитных породных минералов для получения концентрата необходимо использовать три-четыре метода обогащения.

Ключевые слова: Ильменит, гематит, минералы, магнитное обогащение, гравитационное обогащение, электрическое обогащение, тонкое грохочение, измельчение.

Для цитирования: Пелевин А. Е., Шигаева В. Н., Водовозов К. А. Совершенствование схем обогащения ильменит-титаномагнетитовых и гематит-магнетитовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-1. – С. 106–119. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_106.

Schemes of enrichment of ilmenite-titanomagnetite and hematite-magnetite ores

A. E. Pelevin¹, V. N. Shigaeva², K. A. Vodovozov¹

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, 620144, Russia

² JSC «Uralmekhanobr», Yekaterinburg, 620144, Russia

Abstract: Schemes of enrichment of ilmenite-titanomagnetite and hematite-magnetite ores have been researched. The mineral composition and physical properties of weakly magnetic ore and waste minerals ilmenite-titanomagnetite and hematite-magnetite ores show that the magnetic properties of ilmenite and hematite and most waste minerals do not differ significantly. Therefore, using a single magnetic method, it is difficult to obtain an ilmenite or hematite concentrate. For the enrichment of these types of ores, combined schemes should be used using magnetic, gravitational, electrical or flotation methods of enrichment. To improve the technological parameters of enrichment of ilmenite-titanomagnetite and hematite-magnetite ores, fine screening is also used. Performed laboratory research have shown that the number of enrichment methods used to obtain ilmenite or hematite concentrate depends on the ratio of ore and waste minerals in the ore. When enriching magnetite-hematite ore with a high content of hematite and a low content of weakly magnetic waste minerals, only high-gradient magnetic separation can be used to obtain a hematite concentrate. To obtain ilmenite or hematite concentrate from ilmenite-titanomagnetite and hematite-magnetite ores containing a high amount of weakly magnetic waste minerals, a scheme with two or three enrichment methods should be used. With a low content of a weakly magnetic ore mineral in the initial product and a high amount of weakly magnetic rock minerals, three or four enrichment methods must be used to obtain the concentrate.

Key words: Ilmenite, hematite, minerals, magnetic separation, gravity separation, electric separation, fine screening, grinding.

For citation: Pelevin A. E., Shigaeva V. N., Vodovozov K. A. Schemes of enrichment of ilmenite-titanomagnetite and hematite-magnetite ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12-1):106–119. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_106.

Введение

Магнитная сепарация применяется для обогащения сильномагнитных и слабомагнитных железосодержащих минералов. Магнитная восприимчивость сильномагнитного минерала магнетита (титаномагнетита) в 1000 раз больше магнитной восприимчивости слабомагнитных рудных и породных минералов. Поэтому при обогащении магнетитовых руд основным методом является магнитный метод [1]. В операциях повышения качества готового концентрата применяются флотационный метод и тонкое грохочение [2–4].

Магнитная восприимчивость слабомагнитных рудных минералов (ильменит и гематит) и многих породных минералов, содержащих железо, имеют один порядок. Это не позволяет получать готовые концентраты с применением только магнитного метода. Поэтому для обогащения слабомагнитных руд применяют комбинирован-

ные схемы обогащения, включающие несколько методов обогащения (магнитный, гравитационный, флотационный и электрический).

Применение тонкого грохочения в замкнутом цикле измельчения позволяет повысить технологические показатели получения не только магнетитового концентрата [5, 6], но и ильменитового или гематитового концентратов.

Целью выполненных исследований явилось совершенствование комбинированных схем обогащения ильменит-титаномагнетитовых и гематит-магнетитовых руд с получением ильменитового и гематитового концентрата на основании минерального состава и физических свойств минералов.

Методы и описание материалов

Методами исследований являлись анализ и обобщение информации, приведённой в научных источниках и полу-

ченной с помощью проведения экспериментов в лабораторных условиях.

Объектом исследований являлись малые технологические пробы титаномагнетит-ильменитовой разновидности руды месторождения Большой Сейим и титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения. Первая проба представлена вторыми половинками кернов. Вторая проба отобрана на обогатительной фабрике Качканарского горнообогатительного комбината и представляет собой суммарные хвосты мокрой магнитной сепарации (ММС) второй, третьей и четвёртой стадий (крупность $R_{95}=0,5$ мм). Минеральный состав обеих руд однотипен. Основными рудными минералами являются титаномагнетит и ильменит. Основными нерудными минералами являются пироксены, роговая обманка, плагиоклаз. Особенности руды месторождения Большой Сейим состоят в повышенном содержании плагиоклаза и роговой обманки. Особенностью руды Гусевогорского месторождения является непромышленное содержание ильменита (около 1%).

Гематитсодержащие руды были представлены малыми технологическими пробами разновидностей железистых кварцитов Сутарского месторождения. Исследована обогатимость магнетит-гематитовой разновидности руды и предполагаемой рудной шихты из минеральных разновидностей руды. Основными рудными минералами являются магнетит и гематит. Основными нерудными минералами являются кварц, амфиболы (грюнерит и куммингтонит), плагиоклаз, биотит и апатит. Особенность магнетит-гематитовой разновидности руды состоит в пониженном содержании слабомагнитных минералов (амфиболов и биотита).

Мокрая магнитная сепарация в слабом магнитном поле выполнена

на барабанном сепараторе 120Т-СЭМ. Высокоградиентная магнитная сепарация (ВГМС) в сильном поле выполнена на лабораторном сепараторе периодического действия с рифлёными пластинами от сепаратора Джонса фирмы Humboldt Wedag. Опыты выполнены при индукции магнитного поля 0,6 Тл (при выделении гематита) и 1,5 Тл (при выделении ильменита) в две операции (основная и контрольная). Замкнутые циклы измельчения первой, второй и третьей стадий схемы обогащения руды месторождения Большой Сейим моделировались сухим способом с помощью дискового истирателя и вибрационного сита. Измельчённый в истирателе продукт поступал на вибрационное сито. Надрешётный продукт сита смешивался с исходным продуктом и поступал опять в истиратель. Измельчение прекращалось при достижении крупности измельчённого продукта, равной 95% частиц с размером, меньшим размера отверстия сита. Гравитационное обогащение выполнено на концентрационном столе «МОЛМ» при «шламовом» режиме работы (ход деки 3–5 мм) и частоте колебаний деки 420 мин⁻¹. Обогащение на концентрационном столе выполнено в две операции (основная и перечистная).

Электрическое обогащение выполнено на барабанных коронно-электростатических сепараторах КЭС-26/30 и ЭС-2 при использовании трёх операций с выделением хвостов в каждой из них. От первой к третьей операции уменьшалось число оборотов барабана. Исходный черновой ильменитовый концентрат нагревался до 80°. Этим моделировалась его температура после сушки.

Физические свойства слабомагнитных минералов

В табл. 1 приведены физические свойства основных слабомагнит-

Таблица 1

Физические свойства основных слабомагнитных рудных и породных минералов ильменитсодержащих и гематитсодержащих руд

Physical properties of the main weakly magnetic ore and waste minerals ilmenite-containing and hematite-containing ores

Минералы	Плотность, кг/ м ³	Удельная магнитная восприимчивость, 10 ⁻⁷ м ³ /кг	Электрические свойства
Рудные минералы			
Гематит	4900–5100	1,4–22	проводник
Ильменит	4600–4800	1,6–96,0	проводник
Породные минералы			
Пироксен	3000–3500	1,5–5,6	непроводник
Куммингтонит (амфибол)	3100–3600	3,5	непроводник
Грюнерит (амфибол)	3100–3600	>3,5	непроводник
Роговая обманка (амфибол)	3000–3500	3,7	непроводник
Оливин	3000–4000 3200–3500	1,8	непроводник
Биотит	2700–3350	3–7,6	непроводник
Хлорит	2600–2850	0,5–3	непроводник
Гранаты	3300–4300	0,1-15	непроводник
Эпидот	3150–3400	0,2–2,4	непроводник
Шпинель (плеонаст)	3550–4000	слабомагнитный	непроводник (полупроводник)
Немагнитные породные минералы			
Кварц, серпентин, полевые шпаты, апатит	2500–2800	немагнитные, слабомагнитные при примесях Fe и при наличии вростков магнетита	непроводник

ных рудных и породных минералов ильменитсодержащих и гематитсодержащих руд. Величины магнитных свойств ильменита и гематита и многих породных минералов имеют один уровень. Это говорит о том, что с помощью только магнитного метода обогащения будет сложно получить гематитовый или ильменитовый концентрат [7, 8].

Плотности слабомагнитных рудных минералов (ильменит и гематит) выше, чем плотности слабомагнитных минералов, что говорит о применимости гравитационного метода обогащения [9]. Однако отношение плотностей рассматриваемых минералов меньше двух,

поэтому с помощью только гравитационного метода также будет сложно получить гематитовый или ильменитовый концентрат.

Согласно табл. 1 лучшим будет электрический метод обогащения. Однако электрический метод относится к сухим методам обогащения (это требует применения сушки), и его эффективность выше при высоком содержании рудного минерала в питании электрических сепараторов. Поэтому он применяется в основном в качестве последних доводочных операций обесшламленных черновых концентратов мокрого обогащения при крупности питания более 0,07 мм [10, 11].

В мировой практике в последних доводочных операциях схемы вместо электрической сепарации чаще применяется флотационный метод обогащения гематита [12, 13] и ильменита [14, 15]. В настоящей статье применение флотационного метода не рассмотрено.

Исходя из физических свойств слабромагнитных рудных и породных минералов ильменит-титаномагнетитовых и гематит-магнетитовых руд (см. табл. 1), для их обогащения следует применять комбинированные схемы с использованием магнитных, гравитационных, электрических и флотационных методов обогащения.

Принципы построения схем обогащения

Схемы обогащения ильменит-титаномагнетитовых и гематит-магнетитовых руд состоят из цикла получения титаномагнетитового или магнетитового концентрата и цикла получения ильменитового или гематитового концентрата.

В цикле получения титаномагнетитового или магнетитового концентрата по стандартной схеме с помощью ММС в слабом поле (0,16 Тл) получают железный концентрат, состоящий из сильномагнитных минералов титаномагнетита или магнетита. Хвосты ММС, в которые переходят слабромагнитные и немагнитные породные минералы и слабромагнитные рудные минералы (ильменит или гематит), поступают в цикл получения ильменитового или гематитового концентрата.

Принципиальная схема обогащения ильменит-титаномагнетитовых и гематит-магнетитовых руд приведена на рис. 1. В цикле получения ильменитового или гематитового концентрата используются схемы, в которых применяются от одного до четырёх методов обогащения (включая тонкое гидравлическое грохочение). Количе-

ство используемых методов обогащения зависит от крупности зёрен рудных слабромагнитных минералов, от их содержания в исходной руде и от минерального состава руды.

При обогащении богатых гематитовых руд (при низком содержании в руде амфиболов и других слабромагнитных минералов) для получения гематитового концентрата может применяться только ВГМС [16]. Если крупность гематита высокая (0,1–1 мм), то можно применять только гравитационное обогащение. Например, на Оленегорском ГОКе получают гематитовый концентрат (крупность более 0,071 мм) с помощью высокопроизводительных диафрагмовых отсадочных машин. Гематит крупностью менее 0,071 мм не извлекается в связи с усложнением схемы обогащения, несмотря на имеющиеся положительные результаты испытаний с применением винтовой сепарации. В гематит-магнетитовых рудах гематит часто имеет крупность менее 0,045 мм (Михайловский и Кимкано-Сутарский ГОКи). В этом случае необходимо применять не менее двух-трёх методов обогащения.

Аналогичные закономерности справедливы при обогащении ильменит-титаномагнетитовых руд. Чем ниже крупность ильменита и его содержание в исходной руде, тем больше методов обогащения следует использовать в схеме обогащения. При обогащении техногенных месторождений (отходов обогатительных фабрик) количество применяемых методов увеличивается в связи с низким содержанием полезного компонента в них, но может и уменьшаться при низких требованиях к извлечению полезного компонента.

Последовательность применяемых методов определяется прежде всего экономикой. Поэтому в первой операции схемы лучше использовать ВГМС

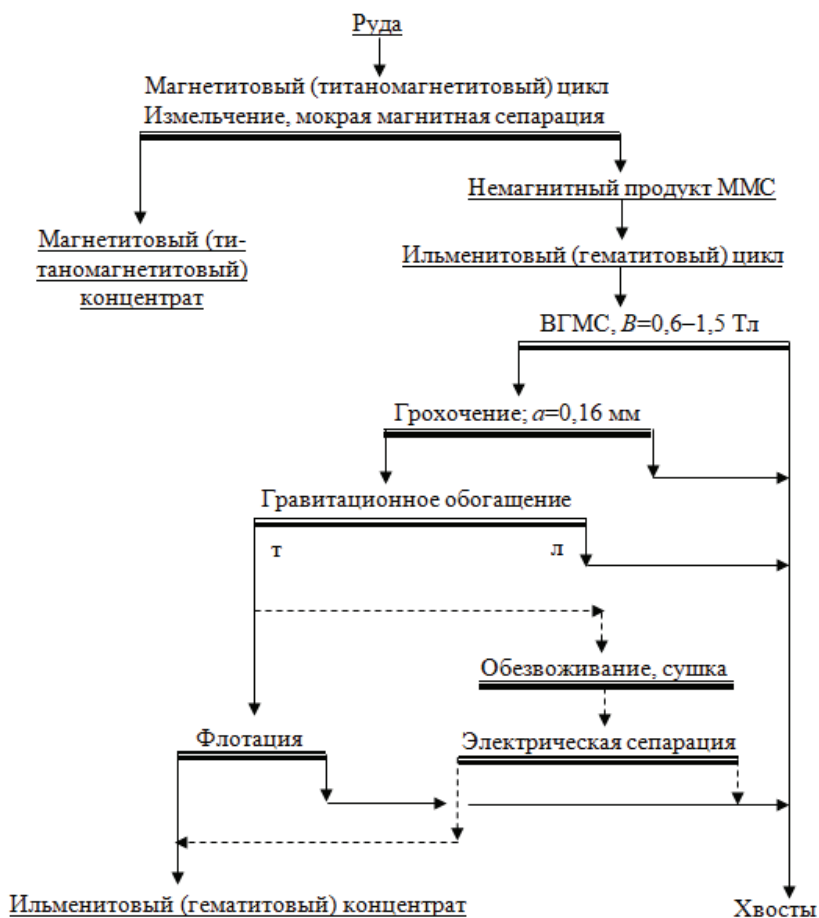


Рис. 1. Принципиальная схема обогащения ильменит-титаномагнетитовых и гематит-магнетитовых руд

Fig. 1. Schematic diagram of enrichment of ilmenite-titanomagnetite and hematite-magnetite ores

[17]. Высокоградиентные магнитные сепараторы имеют повышенную производительность. Кроме этого, они эффективно работают на разжиженных пульпах (содержание твёрдого в немагнитных продуктах ММС составляет менее 20–30%) и способны получать магнитный продукт с высокой плотностью. Основным назначением ВГМС является максимальное извлечение ильменита (гематита) и удаление в хвосты немагнитных (и весьма слабомагнитных) породных минералов. Кроме высокоградиентных сепараторов в схе-

мах обогащения находят применение сепараторы с магнитными системами из сплава Nd-Fe-B [18, 19].

В качестве следующей операции схемы рациональнее использовать тонкое грохочение для удаления крупных породных минералов и бедных сростков. Измельчаемость рудных минералов (ильменит, гематит) выше, чем у слабомагнитных породных минералов. Поэтому содержание полезного компонента в подрешётном продукте грохота повысится по сравнению с надрешётным продуктом, что

позволяет отнести тонкое грохочение к специальному методу обогащения. Не следует применять очень мелкие сита (менее 0,15 мм), так как это снизит производительность грохотов и срок службы просеивающих поверхностей.

Последние операции схемы (гравитационное, электрическое, флотационное обогащение) могут либо применяться последовательно, либо может применяться только один из методов. Недостатком применения электрической сепарации является применение сушки промпродукта и низкая производительность оборудования. К недостаткам применения флотации следует отнести повышен-

ные эксплуатационные затраты, связанные с использованием химических реагентов и более высокие экологические требования к хвостохранилищу. Гравитационные аппараты для обогащения промпродуктов с крупностью менее 0,071 мм имеют низкую производительность, но эффективно обесшламливают тяжёлый продукт, что положительно сказывается при последующем электрическом или флотационном обогащении.

Применение различных методов в схемах обогащения ильменит-титаномагнетитовых и гематит-магнетитовых руд определяется требуемым качеством получаемого концентрата и технико-экономическим сравнением вариантов.

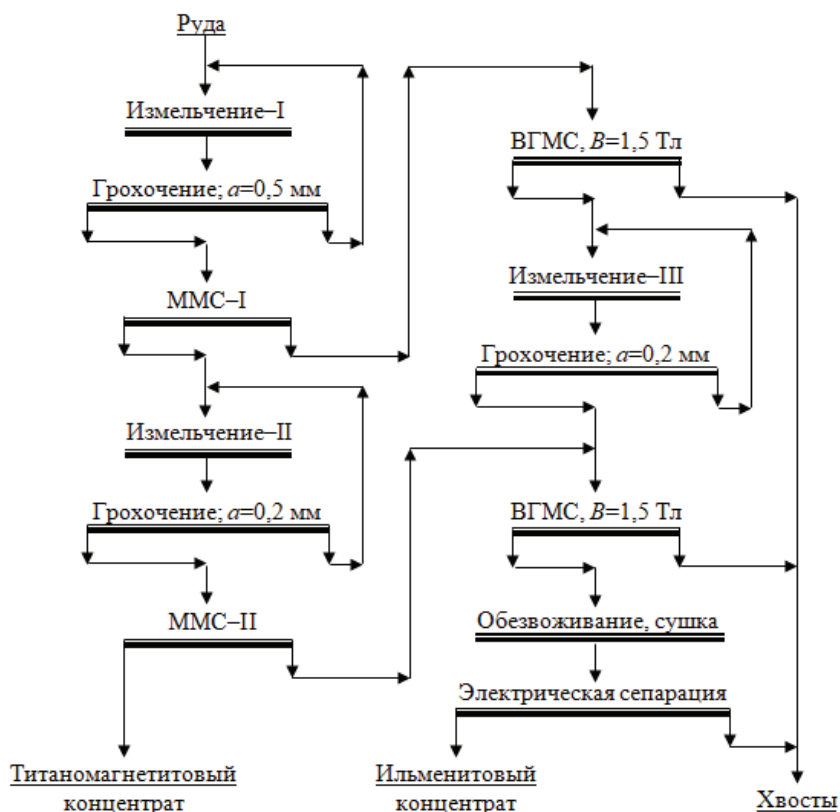


Рис. 2. Схема обогащения ильменит-титаномагнетитовой руды месторождения Большой Сейим

Fig. 2. Schematic of enrichment of ilmenite-titanomagnetite ore of the Bolshoy Seyim deposit

Обсуждение результатов совершенствования схем получения ильменитового концентрата

Для обогащения пробы титаномагнетит-ильменитовой разновидности руды месторождения Большой Сейим использована схема с двухстадиальным измельчением до крупности $R_{95}=0,5$ мм (первая стадия) и $R_{95}=0,2$ мм (вторая стадия). Учитывая высокое содержание ильменита в пробе (более 10%) и повышенный средний размер его вкрапленности (0,2 мм), принято два метода обогащения (магнитный в сильном поле и электрический). При этом ВГМС осуществлена в две стадии с последовательным уменьшением крупности питания (рис. 2).

Схема обогащения включала первую стадию ММС-I при крупности $R_{95}=0,5$ мм с выделением титаномагнетитового промпродукта и первого немагнитного продукта. Титаномагнетитовый промпродукт измельчался до крупности $R_{95}=0,2$ мм и поступал во вторую стадию ММС-II с получением титаномагнетитового концентрата и второго немагнитного продукта.

Первый немагнитный продукт ММС-I поступал в первую стадию ВГМС-I (крупность $R_{95}=0,5$ мм) с получением первого ильменитового промпродукта и немагнитного продукта (хвостов). Содержание TiO_2 в первом ильменитовом промпродукте по сравнению с рудой выросло на 14,7% (с 9,9 до 24,6%). Первый ильменитовый промпродукт измельчён в отдельной (ильменитовой) стадии до крупности $R_{95}=0,2$ мм. Измельчённый первый ильменитовый промпродукт и второй немагнитный продукт ММС-II поступали во вторую стадию ВГМС-II (крупность $R_{95}=0,2$ мм) с получением второго ильменитового промпродукта и немагнитного продукта (хвостов). Содержание TiO_2 во втором ильменито-

вом промпродукте по сравнению с первым ильменитовым промпродуктом выросло на 6,53% (с 24,6 до 31,13%).

Второй ильменитовый промпродукт подвергнут сушке и поступил в операцию электрической сепарации, в которой получен ильменитовый концентрат и хвосты. Содержание TiO_2 в ильменитовом концентрате по сравнению со вторым ильменитовым промпродуктом выросло на 17,8% (с 31,13 до 48,93%).

Технологический баланс обогащения пробы титаномагнетит-ильменитовой разновидности руды месторождения Большой Сейим приведён в табл. 2.

Применение магнитного метода (двух стадий ВГМС) не позволило получить ильменитовый концентрат, так как в магнитный продукт частично извлеклись слабомагнитные породные минералы (пироксены и роговая обманка). При электрической сепарации слабомагнитные породные минералы были удалены в хвосты.

Для обогащения пробы суммарных хвостов ММС-II-IV обогащения руды Гусевогорского месторождения выбрана схема обогащения без использования измельчения, применение которого резко снизит экономические показатели получения ильменитового концентрата. Это связано с низким содержанием ильменита (около 1%) в пробе. По этой же причине и в связи с низкой крупностью ильменита (менее 0,15 мм) выбрана комбинированная схема с четырьмя методами обогащения (см. рис. 1).

Применение ВГМС в первой операции схемы позволило увеличить содержание TiO_2 в магнитном продукте по сравнению с питанием только на 1,5% (с 1,03 до 2,53%). Но при этом в хвосты было удалено 70% исходного продукта. При тонком грохочении на сите 0,16 мм было удалено в хвосты

Таблица 2

Технологические балансы обогащения титаномагнетит-ильменитовой разновидности руды месторождения Большой Сейим и суммарных хвостов MMC-II-IV обогащения титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения
Technological balances of beneficiation of titanomagnetite-ilmenite variety of ore from the Bolshoy Seyim deposit and totals tailings WLIMS-II-IV of beneficiation of titanomagnet ore of the Gusevogorskoye deposit

Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		TiO ₂	Fe	TiO ₂	Fe
Титаномагнетит-ильменитовая разновидность руды месторождения Большой Сейим					
Титаномагнетитовый концентрат	12,85	5,90	61,37	7,66	33,99
Ильменитовый концентрат	13,42	48,93	36,52	66,34	21,13
Хвосты	73,73	3,49	14,12	26,00	44,88
Руда	100,00	9,90	23,20	100,00	100,00
Хвосты MMC-II-IV обогащения титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения					
Ильменитовый концентрат	0,48	48,67	–	22,68	–
Хвосты	99,52	0,80	–	77,32	–
Исходный – хвосты MMC-II-IV	100,00	1,03	–	100,00	–

50% от питания грохочения (в основном крупные сродки) при незначительном увеличении содержания TiO₂ в подрешётном продукте по сравнению с питанием (с 2,53 до 3,71%). Применение первых двух операций позволило снизить массу исходного продукта на 85%, что дало возможность применить в дальнейшем низкопроизводительное оборудование. В хвосты были удалены породные немагнитные минералы и основная масса слабомагнитных породных минералов с пониженной магнитной восприимчивостью и их сродки с титаномагнетитом.

Использование гравитационного обогащения (концентрации на столе) позволило получить низкокачественный ильменитовый концентрат с содержанием диоксида титана 40,5%. Выход тяжёлого продукта составил только 5%

от питания концентрационного стола. В лёгкий продукт были удалены слабомагнитные минералы и их богатые сродки с титаномагнетитом. Выход тяжёлого продукта от исходных хвостов MMC-II-IV составил всего 0,7%, что связано с низким содержанием ильменита в исходном продукте.

При использовании электрической сепарации получен высококачественный ильменитовый концентрат (48,67% TiO₂) при выходе 0,48% и извлечении TiO₂ в концентрат 22,68% (см. табл. 2). В руде Гусевогорского месторождения с ильменитом связано порядка 30% от всего содержащегося в ней титана, содержащегося. Исходя из этого и учитывая, что испытанная схема не включала измельчение, достигнутое извлечение TiO₂ в концентрат следует считать высоким [20].

Обсуждение результатов совершенствования схем получения гематитового концентрата

Питанием схем получения гематитового концентрата являлись немагнитные продукты второй и третьей стадии мокрой магнитной сепарации (суммарные хвосты ММС-II-III) цикла получения магнетитового концентрата.

Содержание гематита в исходных пробах руды Сутарского месторождения достаточно высокое: 11,12% в предполагаемой рудной шихте и 27,7% в магнетит-гематитовой разновидности руды. Поэтому принята простая схема, включающая тонкое грохочение (для удаления крупных частиц), высокоградиентную магнитную сепарацию и гравитационное обогащение. Крупность зёрен гематита менее 0,05 мм при их чешуеобразной форме, поэтому гравитационное обогащение выполнено на шламовом концентрационном столе. Результаты обогащения подрешётного продукта (фракции -0,16 мм) приведены в табл. 3.

При обогащении магнетит-гематитовой разновидности руды Сутарского месторождения с помощью ВГМС по простой схеме получен гематитовый концентрат с содержанием железа 60,87% (табл. 3), что соответствует требуемому качеству (60% Fe). Это стало возможным благодаря повышенному содержанию гематита и пониженному содержанию породных слабомагнитных минералов (амфиболы и биотит) в питании ВГМС. В хвосты ВГМС перешли немагнитные минералы кварц, плагиоклаз и апатит.

Использование ВГМС при обогащении рудной шихты Сутарского месторождения позволило получить бедный промпродукт с содержанием железа 28,21% (см. табл. 3). Низкое содержание железа в магнитном продукте ВГМС объясняется извлечением в него не только гематита, но и слабомагнитных породных минералов (амфиболы и биотит) и сростков немагнитных породных минералов с магнетитом. Применение ВГМС оправданно, так как

Таблица 3

Результаты получения гематитового концентрата из хвостов ММС-II-III
Results of obtaining hematite concentrate from WLIMS-II-III tailings

Продукт	Выход, %	Содержание Fe, %	Извлечение Fe, %
Магнетит-гематитовая разновидность			
Высокоградиентная сепарация, В=0,6 Тл			
Магнитный	51,7	60,87	92,80
Немагнитный	48,3	5,05	7,20
Исходный — хвосты ММС-II-IV	100,0	33,91	100,00
Предполагаемая рудная шихта из минеральных разновидностей			
Высокоградиентная сепарация, В=0,6 Тл			
Магнитный	26,1	28,21	40,34
Немагнитный	73,9	14,73	59,66
Исходный — хвосты ММС-II-IV	100,0	18,25	100,00
Концентрация на столе			
Магнитный	6,9	61,30	23,14
Немагнитный	19,2	16,34	17,20
Исходный — магнитный ВГМС	26,1	28,21	40,34

основная масса немагнитных породных минералов выделена в хвосты и снижена нагрузка на последующее низкопроизводительное оборудование.

Дальнейшее применение концентрата на столе позволило получить гематитовый концентрат с содержанием 61,3% Fe (см. табл. 3). Это стало возможным за счёт удаления в лёгкий продукт гравитационного обогащения основной массы слабомагнитных породных минералов и сростков немагнитных породных минералов с магнетитом [16].

Заключение

Для обогащения слабомагнитных ильменитсодержащих и гематитсодержащих руд необходимо применять комбинированные схемы обогащения, включающие несколько методов обогащения (магнитный, гравитационный, флотационный, электрический и тонкое гидравлическое грохочение).

Если руда характеризуется высоким содержанием слабомагнитных рудных минералов и низким содержанием слабомагнитных породных минералов, то для получения концентрата можно использовать только

высокоградиентную магнитную сепарацию. При этом необходимо обеспечить крупность исходного продукта, соответствующую крупности рудного минерала.

Для руд, содержащих высокое количество слабомагнитных рудных и породных минералов, в схеме производства концентрата надо использовать два-три метода обогащения. При низком содержании в исходном продукте рудного слабомагнитного минерала и высоком количестве слабомагнитных породных минералов для получения концентрата необходимо использовать три-четыре метода обогащения.

Конфликт интересов

Причины о наличии потенциальных для возникновения конфликта интересов отсутствуют.

Рукопись статьи можно отправлять для рецензирования любому специалисту в области обогащения полезных ископаемых.

Ситуация, сокрытие которой может подорвать репутацию автора ввиду наличия сомнения в его беспристрастности, отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Liamas-Bueno M., López-Valdivieso A., Corona-Arroyo M. A.* On the mechanisms of silica (SiO₂) re-recovery in magnetite ore low-magnetic-drum concentration // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019, vol. 36, pp. 131–138. DOI: 10.1007/s42461-018-0019-5.
2. *Сенченко А. Е., Куликов Ю. В., Токаренко А. В.* Технологические исследования — основа успешной модернизации производственной базы АО «Лебединский ГОК» // *Горный журнал*. — 2022. — № 6. — С. 59–67. DOI: 10.17580/gzh.2022.06.07.
3. *Rocha G. M., da Cruz M. V. M., Lima N. P., Lima R. M. F.* Reverse cationic flotation of iron ore by amide-amine: bench studies // *Journal of Materials Research and Technology* // 2022, vol. 18, pp. 223–230. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.02.039.
4. *Moraes M. N., Galery R., Mazzinghy D. B.* A review of process models for wet fine classification with high frequency screens // *Powder Technology*. 2021, vol. 394, pp. 525–532. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.08.078.
5. *Пелевин А. Е., Сытых Н. А.* Сравнение использования гидроциклонов и грохотов в замкнутом цикле измельчения титаномагнетитовой руды // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2022. — № 5. — С. 154–166. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_154.

6. Косой Г. М., Винников А. Я. Технологические испытания процесса тонкого гидравлического грохочения измельченных руд на многочастотном грохоте компании Kroosh Technologies // Цветные металлы. — 2021. — № 6. — С. 10–15. DOI: 10.17580/tsm.2021.06.01.

7. Nikolaeva N. V., Aleksandrova T. N., Afanasova A., Chanturiya E. L. Mineral and technological features of magnetite-hematite ores and their influence on the choice of processing technology // ACS Omega. 2021, vol. 6, no. 13. pp. 9077–9085. DOI: 10.1021/acsomega.1c00129.

8. Liu P. P., Liang J., Zhou M. F., Chen W. T. Micro-textures and chemical compositions of metamorphic magnetite and ilmenite: Insights from the Mianhuadi mafic complex in SW China // Journal of Asian Earth Sciences. 2020, vol. 192, no. 104264. DOI: 10.1016/j.jseas.2020.104264.

9. Nienaber E. C., Auret L. Experimental modelling and plant simulation of spiral concentrators: Comparing response surface methodology and extended Holland-Batt models // Minerals Engineering. 2019, vol. 141, no. 105833. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105833.

10. Yan X., Wang H., Peng Z., Hao J., Zhang G., Xie W., He Y. International Journal of Mining Science and Technology // Triboelectric properties of ilmenite and quartz minerals and investigation of triboelectric separation of ilmenite ore. 2018, vol. 28, iss. 2, pp. 223–230. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.01.003.

11. Урванцев А. И., Шихов Н. В., Зайцев Г. В. Результаты исследований и практика обогащения минерального сырья электрической сепарацией // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2005. — № 5. — С. 37–51.

12. Rocha G. M., de Assis Silva J., da Silva Ramos K., Lima R. Selective Flotation of Quartz from Hematite by Amide-Amine: Fundamental Studies // Mining Metallurgy & Exploration. 2021, vol. 38. pp. 2195–2207. DOI: 10.1007/s42461-021-00470-3.

13. Safari M., Hoseinian F. S., Deglon D., Leal Filho L. S., Souza Pinto T. C. Investigation of the reverse flotation of iron ore in three different flotation cells: Mechanical, oscillating grid and pneumatic // Minerals Engineering. 2020, vol. 150, 106283. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106283.

14. Zhao X., Meng Q., Zhang Y., Yuan Z., Xu Y., Li L. Surface adsorption investigation of dodecylbenzenesulfonate isopropanolamine a novel collector during flotation separation of ilmenite from titaugite // Minerals Engineering. 2022, vol. 180, 107499. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107499.


15. Cai J., Deng J., Yang H., Tong L., Wu D., Wen S., Liu Z., Zhang Y. A novel activation for ilmenite using potassium permanganate and its effect on flotation response // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2020, vol. 604, 125323. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.125323.

16. Пелевин А. Е. Получение гематитового концентрата из гематит-магнетитовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3–1. — С. 422–430. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-422-430.

17. Kuskov V. B., Lvov V. V., Yushina T. I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing // CIS Iron and Steel Review. 2021, vol. 21, pp. 4–8. DOI: 10.17580/cisr.2021.01.01.

18. Shen S., Yuan Z., Liu J., Meng Q., Hao H. Preconcentration of ultrafine ilmenite ore using a superconducting magnetic separator // Powder Technology. 2020, vol. 360, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.09.074.

19. Tripathy S. K., Singh V., Murthy Y. R., Banerjee P. K., Suresh N. Influence of process parameters of dry high intensity magnetic separators on separation of hematite // International Journal of Mineral Processing. 2017, vol. 160, pp. 16–31. DOI: 10.1016/j.minpro.2017.01.007.

20. Пелевин А. Е., Шугаева В. Н. Возможность получения ильменитового концентрата из отходов обогащения титаномагнетитовой руды // Обогащение руд. — 2022. — № 2. — С. 46–52. DOI: 10.17580/or.2022.02.08. 

REFERENCES

1. Liamas-Bueno M., López-Valdivieso A., Corona-Arroyo M.A. On the mechanisms of silica (SiO₂) re-recovery in magnetite ore low-magnetic-drum concentration. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019, vol. 36, pp. 131–138. DOI: 10.1007/s42461-018-0019-5.
2. Senchenko A. E., Kulikov Y. V., Tokarenko A. V. In-process testing – A framework for the effective production modernization at Lebedinsky GOK. *Gornyi Zhurnal*. 2022, no. 6, pp. 59–67. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.06.07.
3. Rocha G. M., da Cruz M. V. M., Lima N. P., Lima Rosa. Reverse cationic flotation of iron ore by amide-amine: bench studies. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022, vol. 18, pp. 223–230. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.02.039.
4. Moraes M. N., Galery R., Mazzinghy D. B. A review of process models for wet fine classification with high frequency screens. *Powder Technology*. 2021, vol. 394, pp. 525–532. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.08.078.
5. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Efficiency of screens and hydrocyclones in closed-cycle grinding of titanomagnetite ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5, pp. 154–166. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_154.
6. Kosoj G. M., Vinnikov A. Ya. Fine hydraulic screening of ground ores on a multi-frequency screen by kroosh technologies: In-process testing. *Tsvetnye Metally*. 2021, no. 6, pp. 10–15. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2021.06.01.
7. Nikolaeva N. V., Aleksandrova T. N., Afanasova A., Chanturiya E. L. Mineral and technological features of magnetite-hematite ores and their influence on the choice of processing technology. *ACS Omega*. 2021, vol. 6, no. 13. pp. 9077–9085. DOI: 10.1021/acsomega.1c00129.
8. Liu P. P., Liang J., Zhou M. F., Chen W. T. Micro-textures and chemical compositions of metamorphic magnetite and ilmenite: Insights from the Mianhuadi mafic complex in SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020, vol. 192, 104264. DOI: 10.1016/j.jseaes.2020.104264.
9. Nienaber E. C., Auret L. Experimental modelling and plant simulation of spiral concentrators: Comparing response surface methodology and extended Holland-Batt models. *Minerals Engineering*. 2019, vol. 141, 105833. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105833.
10. Yan X., Wang H., Peng Z., Hao J., Zhang G., Xie W., He Y. Triboelectric properties of ilmenite and quartz minerals and investigation of triboelectric separation of ilmenite ore. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28, iss. 2, pp. 223–230. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.01.003.
11. Urvantsev A. I., Shikhov N. V., Zaitsev G. V. Research results and practice of mineral raw material beneficiation by electric separation. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2005, no. 5, pp. 37–51. [In Russ].
12. Rocha G. M., de Assis Silva J., da Silva Ramos K., Lima R. Selective Flotation of Quartz from Hematite by Amide-Amine: Fundamental Studies. *Mining Metallurgy & Exploration*. 2021, vol. 38. pp. 2195–2207. DOI: 10.1007/s42461-021-00470-3.
13. Safari M., Hoseinian F. S., Deglon D., Leal Filho L. S., Souza Pinto T. C. Investigation of the reverse flotation of iron ore in three different flotation cells: Mechanical, oscillating grid and pneumatic. *Minerals Engineering*. 2020, vol. 150, 106283. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106283.
14. Zhao X., Meng Q., Zhang Y., Yuan Z., Xu Y., Li L. Surface adsorption investigation of dodecylbenzenesulfonate isopropanolamine a novel collector during flotation separation of ilmenite from titanite. *Minerals Engineering*. 2022, vol. 180, 107499. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107499.
15. Cai J., Deng J., Yang H., Tong L., Wu D., Wen S., Liu Z., Zhang Y. A novel activation for ilmenite using potassium permanganate and its effect on flotation response. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2020, vol. 604, 125323. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.125323.

16. Pelevin A. E. Production of hematite concentrate from hematite–magnetite ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3–1, pp. 422–430. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-422-430.

17. Kuskov V. B., Lvov V. V., Yushina T. I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing. *CIS Iron and Steel Review*. 2021, vol. 21, pp. 4–8. DOI: 10.17580/cisr.2021.01.01.

18. Shen S., Yuan Z., Liu J., Meng Q., Hao H. Preconcentration of ultrafine ilmenite ore using a superconducting magnetic separator. *Powder Technology*. 2020, vol. 360, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.09.074.

19. Tripathy S. K., Singh V., Murthy Y. R., Banerjee P. K., Suresh N. Influence of process parameters of dry high intensity magnetic separators on separation of hematite // *International Journal of Mineral Processing*. 2017, vol. 160, pp. 16–31. DOI: 10.1016/j.minpro.2017.01.007.

20. Pelevin A. E., Shigaeva V. N. The potential of obtaining ilmenite concentrate from titanomagnetite ore tailings. *Obogashchenie Rud.* 2022, no. 2, pp. 46–52. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2022.02.08.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пелевин Алексей Евгеньевич — докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых, <https://orcid.org/0000-0001-6063-3932>. Российская Федерация. ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации), г. Екатеринбург, 620144, ГСП, ул. Куйбышева, 30, УГГУ, кафедра обогащения полезных ископаемых (ОПИ). E-mail: a-pelevin@yandex.ru;

Шигаева Варвара Николаевна — старший научный сотрудник. Российская Федерация. АО «Уралмеханобр», 620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87;

Водовозов Константин Александрович — старший преподаватель кафедры обогащения полезных ископаемых. Российская Федерация. ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации), г. Екатеринбург, 620144, ГСП, ул. Куйбышева, 30, УГГУ, кафедра обогащения полезных ископаемых (ОПИ).

Для контактов: *Пелевин Алексей Евгеньевич*, e-mail: a-pelevin@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pelevin A. E., Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Mineral Processing at the Ural State Mining University. Ural State Mining University, 620144, 30, Kuibyshev st., Ekaterinburg, Russia;

Shigaeva V. N., Researcher, JSC «Uralmekhanobr», 620144, 87, Khokhryakova street, Ekaterinburg, Russia;

Vodovozov K. A., Senior lecturer of the Department of Mineral Processing at the Ural State Mining University. Ural State Mining University, 620144, 30, Kuibyshev st., Ekaterinburg, Russia.

For contacts: *Pelevin A. E.*, e-mail: a-pelevin@yandex.ru.

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 07.08.2023; принята к печати 10.11.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 07.08.2023; accepted for printing 10.11.2023.

