

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МАГНЕТИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ПРИ РАЗДЕЛЬНОМ ОБОГАЩЕНИИ ПРИРОДНЫХ ТИПОВ И РАЗНОВИДНОСТЕЙ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД

А. Е. Пелевин¹, С. В. Корнилков², А. Н. Дмитриев³, В. К. Багазеев¹

- ¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия;
² Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия;
³ Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

Аннотация: Исследования выполнялись с целью оценить возможность повышения качества концентратов с помощью технологии с отдельным обогащением природных типов и разновидностей железных руд. При отдельном обогащении малотитанистой и нормальнотитанистой разновидностей титаномагнетитовой руды Гусевогорского месторождения получен высококачественный концентрат (65,86% Fe) и концентрат среднего качества (62,52% Fe). Это позволяет предполагать, что отдельная переработка этих разновидностей приведет к повышению качества железного концентрата и суммарных технологических показателей обогащения, по сравнению с обогащением руды валовой добычи. Отдельное обогащение типов и разновидностей железистых кварцитов Сутарского месторождения позволило получить концентраты более высокого качества (66,6–68,36% Fe; 2,9–4,35% SiO₂), по сравнению с концентратом (65,43% Fe; 5,93% SiO₂), полученным из усредненной рудной шихты. При отдельном обогащении типов и разновидностей магнетитовой руды Гаринского месторождения получены суперконцентраты, пригодные для внедоменного получения железа (69,1–70,7% Fe; 0,42–0,89% SiO₂). Содержание железа в концентрате, полученном из рудной шихты, составило 68,65%. Применение технологии с отдельным обогащением типов и разновидностей руды позволяет повысить качество железного концентрата при использовании стандартной схемы обогащения без использования дообогащения рядового концентрата. Недостатком рассмотренной технологии для условий промышленного предприятия является сложность организации отдельной добычи и обогащения на фабрике природных типов и разновидностей руды.

Ключевые слова: содержание железа, диоксид кремния, железный концентрат, типы и разновидности руды, отдельное обогащение, выход концентрата, извлечение железа.

Для цитирования: Пелевин А. Е., Корнилков С. В., Дмитриев А. Н., Багазеев В. К. Повышение качества магнетитовых концентратов при отдельном обогащении природных типов и разновидностей железных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 306–317. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_306.

Quality improvement of magnetite concentrate in separate processing of different iron ore types and varieties

A. E. Pelevin¹, S. V. Kornilkov², A. N. Dmitriev³, V. K. Bagazeev¹

¹ Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia;

² Institute of Mining, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia;

³ Institute of Metallurgy, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract: The studies aimed to assess improvability of quality of concentration in separate processing of different types and varieties of iron ore. Separate processing of low-grade and standard-grade titaniferous ore from the Gusevogorskoe deposit produced high-quality concentrate (65.86% Fe) and mean-quality concentrate (62.52% Fe). It is assumable therefrom that separate processing can improve quality of iron concentrate and enhance total performance of concentration as against concentration of ROM ore. Separate processing of different types of Sutarskoe ferruginous quartzite produced higher quality concentrates (66.6–68.36% Fe; 2.9–4.35% SiO₂) as compared with the concentrate obtained from blended ROM ore (65.43% Fe; 5.93% SiO₂). Separate processing of different types of Garinskoe magnetite ore produces super concentrates suitable for nonblast-furnace iron-making (69.1–70.7% Fe; 0.42–0.89% SiO₂). The iron content of the concentrate obtained from ROM ore was 68.65%. Thus, separate processing of different iron ore types and varieties enables higher quality iron concentrate to be produced in the standard processing flowchart, without after-treatment of the concentrate. A shortcoming of the technology in terms of its full-scale application is difficult arrangement of individual separation processes for different ore types at a concentration factory.

Key words: iron content, silicon dioxide, iron concentrate, iron ore types and varieties, separate processing, concentrate yield, iron recovery.

For citation: Pelevin A. E., Kornilkov S. V., Dmitriev A. N., Bagazeev V. K. Quality improvement of magnetite concentrate in separate processing of different iron ore types and varieties. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11-1):306–317. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_306.

Введение

В России в основном перерабатываются три промышленных типа железных руд: железистые кварциты; магнетитовые скарновые руды и титаномагнетитовые руды. Промышленные типы руд отличаются генетическим типом и вещественным составом.

На конкретном месторождении выделяют природные типы и разновидности руды. Деление руды на природные типы и разновидности осуществляется по разным признакам, в основном по минеральному составу, по содержанию отдельных компонентов, по размеру рудных минералов, по физико-механическим свойствам [1, 2].

Большее распространение в промышленности получило выделение на одном месторождении технологических сортов, связанное с обогатимостью руды. Например, легкообогатимая и труднообогатимая руда (критерий — содержание железа в концентрате). Деление на технологические сорта осуществляется с помощью магнитного анализа с использованием трубчатого анализатора как на стадии геолого-технологического картирования месторождения, так и на стадии оценки обогатимости рудной шихты, поступающей на обогатительную фабрику. Магнитный анализ, в связи с оперативностью и простотой, нашёл широкое применение.

Деление на технологические сорта используется при формировании рудной шихты из различных технологических сортов и для прогнозирования получаемых технологических показателей последующего обогащения. Это связано с тем, что на большинстве железорудных горно-обогатительных комбинатах (ГОКах) применяется валовая добыча руды, усреднение и обогащение по одной технологической схеме всех типов и разновидностей руды одного месторождения, что позволяет стабилизировать технологию обогащения руды. Практика показывает, что при изменении доли определённых типов и разновидностей в рудной шихте приходится вносить изменения в технологический процесс, который в основном сводится к изменению производительности технологических секций фабрики. Это говорит о том, что природные типы и разновидности руды одного месторождения обогащаются по-разному, и лучше их обогащать отдельно.

Цель выполненных исследований

Оценить возможность повышения качества концентратов с помощью раздельного обогащения типов и разновидностей железных руд.

Объекты и методы исследований

Объектами исследований явились руды, представляющие три промышленных типа железных руд России: титаномагнетитовая руда Гусевогорского месторождения, железистые кварциты Сутарского месторождения и скарновая магнетитовая руда Гаринского месторождения.

Раздельное обогащение типов и разновидностей выполнено в лабораторных условиях по стандартным схемам обогащения железосодержащих руд, включающим дробление, стадийное

измельчение и магнитное обогащение с выделением хвостов после каждой стадии измельчения. Принятые схемы моделировали схемы получения магнетитового концентрата из типа и разновидности руды на промышленном предприятии или проектную схему. Дополнительно выполнено обогащение шихты из разновидностей руды по аналогичной схеме.

Измельчение руд осуществлено в шаровых мельницах объёмом 7 дм³. Перед измельчением в шаровой мельнице руда (промпродукт СМС) раздроблена до крупности 92–95% класса –3+0 мм. Сухое и мокрое магнитное обогащение выполнено с применением лабораторных барабанных сепараторов в слабом магнитном поле, чем моделировалось обогащение в промышленных сепараторах ПБС и ПБМ.

Результаты обогащения титаномагнетитовой руды и их обсуждение

Титаномагнетит, содержащийся в титаномагнетитовых рудах, имеет переменный состав по Fe, TiO₂ и V₂O₅. Кроме этого, титаномагнетит находится в сростании с ильменитом, плеонастом и реже с ульвошпинелью, представленными различными морфолого-генетическими типами (обособленными зёрнами и ламелями). Это предопределяет различную обогатимость природных разновидностей руды [3, 4].

Титаномагнетитовая руда Гусевогорского месторождения представлена двумя основными разновидностями руды – малотитанистой и нормальнотитанистой. Практикой обогащения руды на обогатительной фабрике Качканарского ГОКа установлено, что обогатимость малотитанистой разновидности более высокая по сравнению с обогатимостью нормальнотитанистой разновидности, что проявляется

в повышенном содержании Fe в концентрате при пониженном содержании TiO_2 .

В табл. 1 приведены результаты магнитного анализа проб малотитанистой и нормальнотитанистой разновидности руды.

В табл. 2 приведены результаты укрупнённых лабораторных испытаний по обогащению малотитанистой и нормальнотитанистой разновидностей руды (пробы отобраны в карьерах) и рудной шихты текущей добычи (проба отобрана на обогатительной фабрике). Схема лабораторных испытаний соответствовала схеме обогащения на обогатительной фабрике и состояла из трёх стадий измельчения и мокрой магнитной сепарации. При обогащении получены концентраты для производства окатышей.

Результаты магнитного анализа (табл. 1) и результаты обогащения (табл. 2), хотя и имеют небольшие отличия, но в целом совпадают и указывают на различную обогатимость природных разновидностей руды. Более высокую обогатимость имеет малотитанистая разновидность руды, поэтому эта раз-

новидность относится к легкообогащаемому технологическому типу.

Обогащение малотитанистой разновидности позволило получить высококачественный концентрат с повышенным содержанием Fe (65,86%) и с пониженным содержанием TiO_2 (2,32%). При обогащении нормальнотитанистой разновидности получен рядовой концентрат с содержанием железа 62,52%, но с повышенным содержанием диоксида титана (3,49%), что значительно снижает его качество.

При обогащении пробы руды валовой добычи получен концентрат с содержанием железа 62,50% как при обогащении нормальнотитанистой разновидности руды. Поэтому можно говорить о возможности повышения содержания железа в суммарном концентрате при раздельном обогащении малотитанистой и нормальнотитанистой разновидностей руды.

Исследования измельчаемости показали более высокую измельчаемость малотитанистой разновидности по сравнению с нормальнотитанистой разновидностью (коэффициент сравнительной измельчаемости составил

Таблица 1

Результаты магнитного анализа проб малотитанистой и нормальнотитанистой разновидности руды

Magnetic analysis of samples of low-grade and standard-grade titaniferous ore

Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение Fe, %
		Fe	TiO_2	
Малотитанистая разновидность (минерально-петрографический состав – пироксенит магнетитовый с прожилками плагиоклазитов и с примесью амфиболов, оливина и ильменита)				
Магнитный	15,2	66,10	1,79	63,19
Немагнитный	84,8	6,90	1,42	36,81
Исходный	100,0	15,90	1,48	100,00
Нормальнотитанистая разновидность (минерально-петрографический состав – диаллаговый пироксенит магнетитовый с примесью амфиболов, оливина и ильменита)				
Магнитный	17,2	62,60	2,28	64,71
Немагнитный	82,8	7,09	1,47	35,29
Исходный	100,0	16,64	1,61	100,00

Таблица 2

Результаты обогащения малотитанистой и нормальнотитанистой разновидностей руды Гусевогорского месторождения [5]

Processing data of Gusevogorskoe low-grade and standard-grade titaniferous ore [5]

Продукт	Выход, %	Содержание, %		—0,071 мм	Извлечение Fe, %	Коэффициентная сила, Э
		Fe	TiO ₂			
Малотитанистая разновидность						
Концентрат	15,52	65,86	2,32	93,2	64,29	82
Хвосты	84,48	6,72	1,33	—	35,71	—
Руда	100,00	15,90	1,48	—	100,00	—
Нормальнотитанистая разновидность						
Концентрат	18,75	62,52	3,49	91,7	70,45	93
Хвосты	81,25	6,05	1,18	—	29,55	—
Руда	100,00	16,64	1,61	—	100,00	—
Рудная шихта текущей добычи						
Концентрат	17,11	62,50	—	92,3	67,05	—
Хвосты	82,89	6,34	—	—	32,95	—
Руда	100,00	15,95	—	—	100,00	—

$k_{\text{изм}} = 1,1$). Это говорит о возможности увеличения производительности обогатительной фабрики при переработке малотитанистой разновидности руды, что подтверждено практикой работы Качканарского ГОКа.

Определение коэффциентной силы полученных концентратов показало пониженную магнитную жёсткость титаномагнетита малотитанистой разновидности руды, по сравнению с титаномагнетитом нормальнотитанистой разновидностью руды (табл. 2) [5]. Это способствует получению концентрата с большим содержанием железа из малотитанистой разновидности руды за счёт повышения эффективности классификации в гидроциклонах и обогащения в магнитных сепараторах (ниже будет отрицательное влияние магнитной флокуляции).

Различную обогатимость рассмотренных разновидностей титаномагнетитовой руды определяет их вещественный состав и физико-механические свойства. Нормальнотитанистая разновидность руды в основном представ-

лена диаллаговыми пироксенитами (реже верлитами) с повышенной долей амфиболов (роговой обманки) и оливинов по сравнению с малотитанистой разновидностью (табл. 1). Титаномагнетит с ильменитом в этой разновидности руды имеет пониженный размер зёрен, по сравнению с титаномагнетитом малотитанистой разновидности. Титаномагнетит характеризуется повышенным содержанием диоксида титана. Чем меньше зерно титаномагнетита, тем тоньше в нём включения ильменита. Поэтому даже при тонком измельчении сложно полностью выделить ильменит, находящийся в сростании с титаномагнетитом. Это приводит к повышенному содержанию диоксида титана в концентрате при обогащении нормальнотитанистой разновидности руды.

Малотитанистая разновидность руды в основном представлена пироксенитами с низкой долей амфиболов и оливинов. Титаномагнетит с ильменитом в этой разновидности руды имеет больший размер зёрен. Титаномагнетит

характеризуется пониженным содержанием диоксида титана. Это позволяет получать высококачественный концентрат из малотитанистой разновидности руды с повышенным содержанием железа и с низким содержанием диоксида титана.

Значительные отличия в обогатимости и измельчаемости малотитанистой и нормальнотитанистой разновидностей руды Гусевогорского месторождения позволяют предполагать, что раздельная переработка этих разновидностей приведёт к повышению качества железного концентрата и суммарных технологических показателей обогащения, по сравнению с обогащением руды валовой добычи.

Результаты обогащения железистых кварцитов и их обсуждение

Железистые кварциты Сутарского месторождения представлены в основном двумя природными типами — магнетитовым и гематитовым.

Магнетитовая руда по минеральному составу представлена в основном двумя разновидностями: силикат-магнетитовой (25%) и силикат-гематит-магнетитовой (57%). Гематитовая руда по минеральному составу представлена в основном магнетит-гематитовой (17%) и гематит-мартитовой (1%) разновидностями (в скобках приведена доля разновидности в руде). Испытания выполнены для четырёх разновидностей и для предполагаемой рудной

Таблица 3

Результаты обогащения разновидностей железистых кварцитов Сутарского месторождения и рудной шихты, составленной из разновидностей

Processing data of Sutarское ferruginous quartzite ROM ore mixture of different varieties

Продукт	Выход, %	Содержание, %			Извлечение Fe, %
		Feобщее	Feмагн	SiO ₂	
Магнетитовый тип руды, силикат-магнетитовая разновидность ($Fe_{\text{магн}}/Fe = 0,82$), $\beta - 45 = 98\%$					
Концентрат	41,28	66,87	-0,28	3,56	81,91
Хвосты	58,72	10,38		—	18,09
Исходная руда	100,00	33,70	27,60	—	100,00
Магнетитовый тип руды, силикат-гематит-магнетитовая разновидность ($Fe_{\text{магн}}/Fe = 0,61$), $\beta - 45 = 98\%$					
Концентрат	34,49	66,60	-0,25	4,35	69,60
Хвосты	65,51	15,31		—	30,40
Исходная руда	100,00	33,00	20,20	—	100,00
Гематитовый тип руды, магнетит-гематитовая разновидность ($Fe_{\text{магн}}/Fe = 0,40$), $\beta - 45 > 99\%$					
Концентрат	21,16	67,30	-0,45	3,61	40,34
Хвосты	78,84	26,71		—	59,66
Исходная руда	100,00	35,30	14,10	—	100,00
Гематитовый тип руды, гематит-мартитовая разновидность ($Fe_{\text{магн}}/Fe = 0,31$), $\beta - 45 > 99\%$					
Концентрат	17,30	68,36	-0,44	2,90	33,68
Хвосты	82,70	28,14		—	66,32
Исходная руда	100,00	35,10	10,90	—	100,00
Шихта из разновидностей руды ($Fe_{\text{магн}}/Fe = 0,62$), $\beta - 45 = 98,4\%$					
Концентрат	33,08	65,43	-0,60	5,93	64,48
Хвосты	66,92	17,82		—	35,52
Исходная руда	100,00	33,57	20,96	—	100,00

шихты из четырёх разновидностей согласно их доле в руде.

В табл. 3 приведены результаты укрупнённых лабораторных испытаний по обогащению разновидностей руды Сутарского месторождения и результаты обогащения рудной шихты, составленной из разновидностей. Схема обогащения состояла из трёх стадий измельчения и мокрой магнитной сепарации (ММС) и обесшламливания измельчённых продуктов второй и третьей стадий. При исследовании получался только магнетитовый концентрат. Получение гематитового концентрата в настоящей работе не рассмотрено.

Обогащение разновидностей магнетитовой руды позволило получить концентраты с содержанием железа 66,6–66,87% и с содержанием диоксида кремния 3,56–4,35%. Из разновидностей гематитовой руды получены более богатые концентраты с содержанием железа 67,3–68,36% и с более низким содержанием диоксида кремния 3,61–2,90%, но при меньшем выходе концентрата по сравнению с магнетитовым типом руды (табл. 3). Обогащение рудной шихты привело к получению концентрата с более низким содержанием железа (65,43%) и с более высоким содержанием диоксида кремния (5,93%) по сравнению со всеми испытанными разновидностями руды. Это говорит о более высокой обогатимости по магнетиту разновидностей руды по сравнению с рудной шихтой.

Различные результаты обогащения разновидностей руды Сутарского месторождения связаны со значительными отличиями в их минеральном составе. Получение железного концентрата из гематитового типа руды с большим содержанием железа и с пониженным содержанием диоксида кремния объясняется незначи-

тельным количеством в этом типе руды слабомагнитных породных минералов (биотит и амфиболы), а также лучшей измельчаемостью гематитовой руды. Выход магнетитового концентрата зависит от содержания в руде магнетита (от отношения $Fe_{\text{магн}}/Fe$). При снижении отношения $Fe_{\text{магн}}/Fe$ в разновидности руды выход железного концентрата и извлечение в него железа уменьшаются (табл. 3).

Содержание железа в хвостах обогащения в основном зависит от содержания гематита в разновидности руды (от отношения $Fe_{\text{магн}}/Fe$). Поэтому при обогащении гематитового типа руды содержание железа в хвостах обогащения (26,71–28,14%) значительно выше, чем при обогащении магнетитового типа руды (10,38–15,31%). Содержание железа магнетитового в хвостах обогащения также ниже при обогащении магнетитового типа (0,25–0,28%) по сравнению с гематитовым типом руды (0,44–0,45%). При этом максимальное значение содержания железа магнетитового в хвостах (0,6%) соответствует обогащению шихты из разновидностей руды (табл. 3). Это указывает на возможность снижения потерь железа магнетитового с хвостами при использовании технологии с отдельным обогащением природных типов руды, по сравнению с обогащением усреднённой руды валовой добычи.

Результаты обогащения магнетитовой руды и их обсуждение

Руда Гаринского месторождения в основном представлена одним природным типом — магнетитовая руда. Руда делится на богатые руды ($Fe > 50\%$), руды среднего качества (Fe от 30 до 50%) и бедные руды (Fe от 20 до 30%). Богатые руды разделяются на малофосфористые и сильнофосфо-

Таблица 4

Технологические балансы раздельного обогащения типов и разновидностей руды Гаринского месторождения и баланс обогащения рудной шихты
Circuit inventories of separate processing of Garinskoe ore varieties and ROM ore

Продукт	Выход, %	Содержание, %					Извлечение Fe, %
		Fe	S	P	SiO ₂	–71 мкм	
Богатый тип руды, малофосфористая (малосернистая) разновидность							
Концентрат	67,74	70,70	0,07	0,02	0,46	96,04	91,14
Хвосты ММС	19,92	15,92	2,45	0,64	–	–	6,04
Хвосты СМС	12,34	12,01	1,09	0,34	–	–	2,82
Всего хвосты	32,26	14,42	1,93	0,53	–	–	8,86
Руда	100,00	52,55	0,67	0,18	–	–	100,00
Богатый тип руды, сильнофосфористая (сильносернистая) разновидность							
Концентрат	56,57	70,40	0,10	0,02	0,42	99,16	78,57
Хвосты ММС	29,67	28,99	10,12	1,41	–	–	16,97
Хвосты СМС	13,76	16,5	6,52	0,56	–	–	4,47
Всего хвосты	43,43	25,02	8,98	1,14	–	–	21,43
Руда	100,00	50,69	3,96	0,51	–	–	100,00
Руда среднего качества							
Концентрат	42,72	69,10	0,04	0,02	0,89	97,03	76,17
Хвосты ММС	25,58	15,79	2,72	0,74	–	–	10,42
Хвосты СМС	31,7	16,4	1,32	0,44	–	–	13,41
Всего хвосты	57,28	16,12	1,95	0,57	–	–	23,83
Руда	100,00	38,76	1,13	0,34	–	–	100,00
Рудная шихта из трёх типов разновидностей (доля богатых руд 15%)							
Концентрат	49,38	68,65	–	–	–	95,07	83,21
Хвосты ММС	25,87	13,72	–	–	–	–	8,71
Хвосты СМС	24,75	13,30	–	–	–	–	8,08
Всего хвосты	50,62	13,51	–	–	–	–	16,79
Руда	100,00	40,74	–	–	–	–	100,00

ристые разновидности. При этом сильнофосфористая разновидность имеет повышенное содержание серы, по сравнению с малофосфористой разновидностью.

Схема укрупнённых лабораторных испытаний состояла из двух стадий сухой магнитной сепарации (СМС) после второй и третьей стадий дробления и двух стадий измельчения и мокрой магнитной сепарации. При СМС руды среднего качества (39% Fe) и богатых руд (51–54% Fe) и получен концентрат (аглоруды) с содержанием железа 49–58% и хвосты.

Основной целью исследований явилась оценка возможности получения суперконцентратов, пригодных для процесса внедомного получения железа за счёт раздельного обогащения технологических типов и разновидностей руды. Поэтому при обогащении аглоруды не выделялась в отдельный продукт, а поступала на двухстадийное измельчение и обогащение с получением магнетитового концентрата.

При обогащении богатых руд получены высококачественные концентраты с содержаниями железа и диоксида кремния 70,4–70,7 и 0,46–0,42%

соответственно. Из руды среднего качества также получен высококачественный концентрат с содержанием железа и диоксида кремния 69,1 и 0,89% соответственно. Выход концентрата больше при обогащении богатых руд, по сравнению с обогащением руды среднего качества (табл. 4).

Основные отличия полученных концентратов связаны с различным содержанием серы в них. Это связано с различным содержанием в типах и разновидностях руды пирита и пирротина. Максимальное содержание пирита и пирротина соответствует богатой сильнофосфористой (сильносернистой) руде, что предопределило повышенное содержание серы (0,1%) в концентрате, полученном из этого типа руды. Содержание фосфора (0,02%) во всех концентратах находится на одном уровне (табл. 4).

Раздельное обогащение технологических типов и разновидностей руды Гаринского обогащения позволило получить «суперконцентраты», пригодные для внедоменного получения железа.

Обогащение рудной шихты позволило получить более бедные хвосты (13,51% Fe) по сравнению с хвостами, выделенными при раздельном обогащении всех разновидностей руды (14,42 – 25,02% Fe). Однако содержание железа в концентрате при обогащении рудной шихты (68,65%) ниже содержания железа в концентратах, полученных при раздельном обогащении всех разновидностей руды (табл. 4).

В порядке обсуждения

Для повышения качества производимых железных концентратов разработаны и применяются технологические решения, в основном связанные с дообогащением рядового концентрата, полученного по стандартной техноло-

гии. Для реализации такой технологии можно использовать доизмельчение рядового концентрата с последующим магнитным обогащением [6], флотацию концентрата [7, 8], применение тонкого гидравлического грохочения [9 – 11], обогащение в переменном магнитном поле [12] и другие технико-технологические решения.

Применение технологии дообогащения рядового концентрата позволяет повысить качество концентрата вплоть до получения концентрата, пригодного для внедоменного получения железа. Но при этом неизбежно получается промпродукт (хвосты) с повышенным содержанием железа. При дополнительном обогащении такого промпродукта получают рядовой концентрат и хвосты с содержанием железа, значительно превышающим содержание железа в хвостах основного обогащения, что приводит к повышению потерь железа с хвостами. Это является общим недостатком всех технологий доводки рядового концентрата.

Рассмотренная технология с раздельной переработкой типов и разновидностей руды, отличающихся обогатимостью и измельчаемостью, позволяет повысить качество концентрата при использовании стандартной схемы обогащения без существенного снижения потерь железа с хвостами, что является достоинством этой технологии.

Большинство обогатительных фабрик имеют параллельно работающие технологические секции, на которых принципиально возможно перерабатывать различные разновидности руды одного месторождения. Также возможен вариант, при котором на обогатительной фабрике сорта и разновидности руды перерабатываются по очереди в течение различных промежутков времени. Такой вариант частично имеет

место на обогатительных фабриках при изменении доли типов руд с различной обогатимостью в рудной шихте.

На железорудных ГОКах принята валовая технология добычи и обогащения усреднённой рудной шихты. Это продиктовано объективными причинами, связанными горными работами и обогащением руды. В рамках одного месторождения очень сложно обеспечить параллельную добычу и стабильную подачу на обогатительную фабрику сортов и разновидностей руды с различной обогатимостью. При этом нужно ещё обеспечить объём добычи сортов и разновидностей руды (в том числе их соотношение), необходимый для получения требуемого количества концентрата. Возможен вариант с добычей руд с различной обогатимостью и их поставкой на обогатительную фабрику по очереди в течение различных промежутков времени. Однако это приведёт к значительному усложнению горных работ (к увеличению затрат на добычу руды). При этом обсуждать возможность применения технологии с раздельной добычей и обогащением сортов руды с различной обогатимостью можно только при условии, если данные гео-

логического картирования месторождения подтверждают такую возможность на длительный промежуток времени.

Товарной продукцией железорудных ГОКа является концентрат, агломерат и окатыши, стабильность содержания железа в которых определяет показатели доменного процесса. Применение технологии с раздельной добычей и обогащением разновидностей руды может привести к возможному увеличению колебаний содержания железа в концентрате, агломерате и окатышах. Для стабилизации содержания железа в концентрате потребуются существенные затраты на усреднение концентратов, полученных из разных сортов руды.

Технологию с раздельной переработкой типов и разновидностей руды, отличающихся обогатимостью и измельчаемостью, практически невозможно осуществить на существующих железорудных предприятиях. Это является основным недостатком рассматриваемой технологии.

Но, тем не менее, применение такой технологии позволяет повысить качество концентрата, и её можно рассматривать при проектировании новых предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железорудная база России / Под. ред. В. П. Орлова, М. И. Веригина, Н. И. Голикина. 2-е изд. — М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998. — 842 с.
2. Журавлёв С. И. Обогащение магнетитовых руд контактово- и гидротермально-метасоматического генезиса. — М.: Недра, 1978. — 152 с.
3. Ping-Ping Liu, Ju Liang, Mei-Fu Zhou, Wei Terry Chen. Micro-textures and chemical compositions of metamorphic magnetite and ilmenite: Insights from the Mianhuadi mafic complex in SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 192, May 2020, 104264.
4. Кантемиров В. Д., Титов Р. С., Яковлев А. М. Оценка влияния минерального состава титаномагнетитовой руды на результаты магнитного обогащения // Обогащение руд. — 2017. — № 4. — С. 36–41.
5. Корнилков С. В., Дмитриев А. Н., Пелевин А. Е., Яковлев А. М. Раздельная переработка руд Гусевогорского месторождения // Горный журнал. — 2016. — № 5. — С. 86–90. DOI: 10.17580/gzh.2016.05.12.
6. Немыкин С. А., Копанев С. Н., Мезенцева Е. В., Окунев С. М. Производство железорудного концентрата с повышенной долей полезного компонента // Горный журнал. — 2017. — № 5. — С. 27–31. DOI: 10.17580/gzh.2017.05.05.

7. Elves Matiolo, Hudson Jean BianquiniCouto, Neymayer Lima, Klaydison Silva, Amanda Soaresde Freitas. Improving recovery of iron using column flotation of iron ore slimes. *Minerals Engineering*, Vol. 158, 1 November 2020, 106608.

8. Abhyarthana Pattanaik, Venugopal Rayasam. Analysis of reverse cationic iron ore fines flotation using RSM-D-optimal design – An approach towards sustainability. *Advanced Powder Technology*, Vol. 29, Is. 12, December 2018, pp. 3404 – 3414.

9. Darius Markauskas, Harald Kruggel-Emden. Coupled DEM-SPH simulations of wet continuous screening. *Advanced Powder Technology*, Vol. 30, Is. 12, December 2019. pp. 2997 – 3009.

10. Исмагилов Р. И., Козуб А. В., Гридасов И. Н., Шелепов Э. В. Современные направления повышения эффективности переработки железистых кварцитов на примере АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» // *Горная промышленность*. – 2020. – № 4. – С. 98 – 103.

11. Пелевин А. Е., Сытых Н. А. Применение тонкого гидравлического грохочения для стадийного выделения титаномагнетитового концентрата // *Обогащение руд*. – 2021. – № 1. – С. 8 – 14. DOI: 10.17580/or.2021.01.02.

12. Пелевин А. Е. Повышение качества магнетитовых концентратов в переменном магнитном поле // *Обогащение руд*. – 2019. – № 6. – С. 19 – 24. DOI: 10.17580/or.2019.06.04. **ГИАБ**

REFERENCES

1. *Iron ore base of Russia*, Moscow, Geoinformmark, 1998. 842 p. [In Russ].

2. Zhuravljov S. I. *Enrichment of magnetite ores of contact-and hydrothermal-metasomatic genesis*, Moscow, Nedra, 1978. 152 p. [In Russ].

3. Ping-Ping Liu, Ju Liang, Mei-Fu Zhou, Wei Terry Chen. Micro-textures and chemical compositions of metamorphic magnetite and ilmenite: Insights from the Mianhuadi mafic complex in SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 192, May 2020, 104264.

4. Kantemirov V. D., Titov R. S., Jakovlev A. M. Assessment of the effect of mineral composition of titanium magnetite ore of gusevogorsk deposit on the results of magnetic concentration. *Obogashchenie Rud*. 2017, no 4, pp. 36 – 41. [In Russ].

5. Kornilkov S. V., Dmitriev A. N., Pelevin A. E., Yakovlev A. M. Separate processing of ore at Gusevogorsky deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2016. no. 5, pp. 86 – 90. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2016.05.12.

6. Nemykin S. A., Kopanev S. N., Mezentseva E. V., Okunev S. M. Iron concentrate production with the increased content of useful component. *Gornyi Zhurnal*. 2017. no. 5, pp. 27 – 31. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.05.05.

7. Elves Matiolo, Hudson Jean BianquiniCouto, Neymayer Lima, Klaydison Silva, Amanda Soaresde Freitas. Improving recovery of iron using column flotation of iron ore slimes. *Minerals Engineering*, Vol. 158, 1 November 2020, 106608.

8. Abhyarthana Pattanaik, Venugopal Rayasam. Analysis of reverse cationic iron ore fines flotation using RSM-D-optimal design An approach towards sustainability. *Advanced Powder Technology*, Vol. 29, Is. 12, December 2018, pp. 3404 – 3414.

9. Darius Markauskas, Harald Kruggel-Emden. Coupled DEM-SPH simulations of wet continuous screening. *Advanced Powder Technology*, Vol. 30, Is. 12, December 2019. pp. 2997 – 3009.

10. Ismagilov R. I., Kozub A. V., Gridasov I. N., Shelepov E. V. Advanced solutions applied by jsc andrei varichev mikhailovsky gok to improve ferruginous quartzite concentration performance. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2020. no. 4, pp. 98 – 103. [In Russ].

11. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Fine hydraulic screening for staged separation of titaniummagnetite concentrate. *Obogashchenie Rud.* 2021, no 1, pp. 8–14. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.01.02.

12. Pelevin A. E. Improving magnetite concentrate quality in an alternating magnetic field. *Obogashchenie Rud.* 2019, no. 6, pp. 19–24. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2019.06.04.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Алексей Евгеньевич Пелевин*¹ — докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры Обогащения полезных ископаемых, a-pelevin@yandex.ru;

*Корнилков Сергей Викторович*² — докт. техн. наук, профессор, главный научный сотрудник;

*Дмитриев Андрей Николаевич*³ — докт. техн. наук, профессор, главный научный сотрудник;

*Багазеев Виктор Константинович*¹ — докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры Горного дела;

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, 620144, ГСП, ул. Куйбышева, 30, Россия;

² Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия;

³ Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Pelevin A. E.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor at the Mineral Processing Department, e-mail: a-pelevin@yandex.ru;

*Kornilkov S. V.*², Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher;

*Dmitriev A. N.*³, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher;

*Bagazeev V. K.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor at the Department Mining;

¹ Ural State Mining University, ul. Kuibysheva 30, Yekaterinburg, 620144 Russia;

² Institute of Mining, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia;

³ Institute of Metallurgy, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 01.06.2021; получена после рецензии 01.07.2021; принята к печати 10.10.2021.

Received by the editors 01.06.2021; received after the review 01.07.2021; accepted for printing 10.10.2021.

