УДК 622.7 DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-45-56

Технологические особенности обогатимости сульфидно-магнетитовых руд скарново-магнетитового месторождения Песчанское

Мамонов С. В.[1, 2]*, Волкова С. В.[1], Таланцева А. С.[1], Ефремова Т. А.[1]
[1] Научно-исследовательский и проектный институт «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия
[2] Технический университет УГМК, г. Верхняя Пышма Свердловской обл., Россия
e-mail: mamonov_sv@umbr.ru

Реферат

Введение. *В магнетитовом известково-скарновом месторождении Песчанское выделяют Западно-Песчанскую рудную залежь, отличающуюся от иных рудных тел повышенным содержанием меди и благородных металлов. В связи с тем что технология переработки магнетитовых руд Песчанского месторождения на предприятии недропользователя настроена на получение только железного концентрата, разработка комплексной технологии переработки сульфидно-магнетитовых руд является актуальной задачей.*

Целью работы *являются изучение вещественного состава и обогатимости сульфидно-магнетитовой руды Западно-Песчанской рудной залежи и разработка комплексной технологии ее переработки, обеспечивающей получение золотосодержащего, медного и железного концентратов.*

Методология *проведения исследований заключалась в изучении вещественного состава сульфидно-магнетитовой руды посредством количественного химического анализа с использованием эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой Arcos, атомно-абсорбционного спектрометра Solaar, анализатора серы CS-800, системы автоматического титрования Titration Excellence T-70, сканирующего спектрофотометра Specord 250 Plus; химического фазового анализа на формы соединений железа, меди, золота, серебра и серы; минералогического анализа с использованием оптического микроскопа Axio Imager A1m и автоматизированного анализатора «Минерал С7». Технологические исследования выполнены с помощью различных методов обогащения: рентгенорадиометрической сепарации на сепараторе СРФ1-100Л; сухой магнитной сепарации на магнитном сепараторе ПБС-90/25; гравитации на центробежном концентраторе KC-MD3 и концентрационном столе СКЛ-0,2; флотации на флотомашинах серии ФМП-Л; мокрой магнитной сепарации на электромагнитном сепараторе ЭБМ-32/20.*

Область применения результатов *– переработка комплексных сульфидно-магнетитовых руд.*

Выводы. *Приведены результаты изучения вещественного состава и технологических свойств сульфидно-магнетитовой руды Западно-Песчанской залежи Песчанского скарново-магнетитового месторождения. Установлено, что исследуемую руду рационально перерабатывать по комплексной гравитационно-флотационно-магнитной технологии, позволяющей получать: гравитационный золотосодержащий концентрат с массовой долей золота 50 г/т при извлечении 27 %; медный концентрат с массовой долей меди 23,71 %, золота – 18,9 г/т и серебра – 60,0 г/т при извлечении 93,6, 42,9 и 54,6 % соответственно; магнетитовый концентрат с массовой долей железа 66,5 %, серы – 0,7 % при извлечении железа общего 76,6 %.*

Ключевые слова: *сульфидно-магнетитовая руда; Западно-Песчанская залежь; Песчанское месторождение; рентгенорадиометрическая сепарация; сухая магнитная сепарация; флотация; центробежная концентрация; мокрая магнитная сепарация; комплексная технология; обогатимость.*

Введение. Железорудные месторождения промышленного значения весьма разнообразны. Они известны в эндогенных, экзогенных и метаморфогенных комплексах пород. С учетом генезиса принято выделять следующие основные промышленные типы месторождений: магматические, метасоматические (контактово-

метасоматические), гидротермальные, вулканогенно-осадочные, осадочные морские и континентальные, метаморфизованные железистые кварциты, коры выветривания, гипергенные (*Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Железные руды. Утверждены распоряжением МПР России от 05.06.2007 г. № 37-р. 40 с.*), [1].

Железорудные месторождения каждой генетической группы подразделяются на классы, или формации. Например, в метасоматических месторождениях выделяют: магнетитовые известково-скарновые, магнетитовые магнезиально-скарновые, скаполит-альбитовые, магнетитовые и гематитовые водносиликатные.

К магнетитовым известково-скарновым железорудным месторождениям относится Песчанское месторождение [1]. Песчанское месторождение находится в 10 км южнее г. Краснотурьинска. Оно состоит из Северо-Песчанского, Западно-Песчанского, Южно-Песчанского и Ново-Песчанского участков. Месторождение приурочено к западному контакту Песчанского диоритового массива, представляющего собой северо-западную часть ауэрбахопского интрузивного комплекса и прорывающего осадочные и вулканогенно-осадочные толщи кобленцского яруса нижнего девона.

На месторождении разведано 17 рудных залежей, в шести заключены основные запасы месторождения, остальные являются забалансовыми из-за небольших размеров. Основные залежи имеют размеры по длине и ширине несколько сотен метров, а по мощности – 40–80 м. Все залежи не выходят на поверхность и выявлены в результате геофизических поисков. По падению рудные залежи прослежены до глубины 900 м.

На месторождении выделяют магнетитовые, сульфидно-магнетитовые и скарново-магнетитовые руды. Среднее содержание железа 48,5–54 %, серы – 2–3 %, фосфора – 0,037 %. Западно-Песчанская рудная залежь отличается повышенным содержанием халькопирита, среднее содержание меди – 0,61 % [1].

Сульфидно-магнетитовые руды магнетитовых месторождений являются комплексными, их переработка подразумевает получение как железных концентратов, так и концентратов цветных металлов [2–9].

Результаты исследований и обсуждение. В АО «Уралмеханобр» проведены исследования обогатимости сульфидно-магнетитовой руды Западно-Песчанской залежи Песчанского скарново-магнетитового месторождения.

Вещественный состав. Сульфидно-магнетитовая руда Западно-Песчанской залежи содержит: 0,64 % меди, 35,7 % железа общего, 2,90 % серы общей, 1,2 г/т золота и 2,8 г/т серебра. Из легирующих примесей присутствует диоксид титана в количестве 0,2 %, оксид марганца – 0,19 %, оксид ванадия – менее 0,05 %, оксид хрома – 0,073 %. Из вредных примесей диагностируется оксид фосфора в количестве 0,094 % и мышьяк в количестве 0,0066 %.

Медь в сульфидно-магнетитовой руде на 65,63 % представлена первичными и на 34,37 % – вторичными сульфидами.

Сульфидная сера на 53,48 % ассоциирована с пиритом; с халькопиритом и вторичными минералами меди связано 20,93 и 4,07 % серы. Сера на 21,52 % связана с пирротином, двумя его разновидностями – гексагональной и моноклинной, отличающимися структурой кристаллической решетки. При этом 15,12 % пирротина представлено моноклинной модификацией, которая обладает магнитными свойствами, соизмеримыми с магнетитом.

Железо общее на 79,27 % представлено магнетитом, на 15,85 % связано с труднорастворимыми силикатами и на 4,88 % – с карбонатами, пирротином, гематитом и железом металлическим.

Результаты рационального анализа золота в исследуемой руде показали, что доля благородного металла, извлекаемого цианированием, составляет 30,37 %. Доля золота, находящегося в ассоциации с сульфидами меди и железа, составляет 53,34 %, из них 25,19 % приходится на дисперсное и 28,15 % – на крупное золото. Доля золота, связанного с нерудными минералами, составляет 11,10 %, с сульфидами и теллуридами – 5,19 %.

Основная часть серебра – 83,23 % – связана с нерудными минералами; доля серебра, находящегося в ассоциации с пиритом и халькопиритом, составляет 16,77 %.

Сульфидно-магнетитовая руда сложена магнетитом – 39 %, пироксенами и амфиболами – 33 %, карбонатами – 10 %, полевым шпатом – 9 %, клинохлором – 5 %, пиритом – 2 %, пирротином – 1 % и халькопиритом – 1 %.

Магнетит в руде наблюдается в виде зерен и их скоплений, образующих сплошные массы. Максимальный размер зерен магнетита составляет 0,1 × 0,05 мм. В межзерновом пространстве магнетита нередко наблюдаются зерна халькопирита, пирита, пирротина и нерудных минералов.

Халькопирит встречается в руде в виде ксеноморфных зерен и тонких прожилок. Размер зерен халькопирита в среднем составляет 0,1 × 0,05 × 0,01 мм. Распределение халькопирита в руде неравномерное: наблюдаются фрагменты с редкой и густой вкрапленностью. Густовкрапленные выделения халькопирита содержат включения пирротина, магнетита и нерудных минералов; редковкрапленный халькопирит наблюдается в межзерновых пространствах магнетита и нерудных минералов.

Пирит представлен в виде зерен изометричной неправильной формы, редко наблюдаются зерна с характерной кристаллографической огранкой. Размер зерен пирита в среднем составляет 0,1 × 0,05 мм. Распределение зерен пирита в руде неравномерное. Пирит находится в срастании с зернами халькопирита, магнетита, пирротина и нерудных минералов.

Пирротин в руде представлен зернами ксеноморфной формы. Размер зерен пирротина – 0,2 × 0,1 мм, массивных выделений – 0,4 × 0,3 мм. Пирротин наблюдается в виде редкой и густой вкрапленности.

Рентгенорадиометрическая сепарация. Одной из целей рентгенорадиометрической сепарации (РРС) сульфидно-магнетитовой руды является выведение отвальных хвостов с низким содержанием меди и железа непосредственно на месторождении для снижения затрат на транспортировку и переработку руды на обогатительной фабрике в результате уменьшения объема перерабатываемой руды, вызванного удалением отвальных крупнокусковых хвостов [10–13].

На стадии предварительных исследований сульфидно-магнетитовой руды рентгенорадиометрической сепарацией анализ и выбор аналитического параметра проведены на основании изучения характеристических рентгеновских спектров отмытых от шламов 100 кусков выборки. Каждый кусок проанализирован на содержание меди и железа.

Предварительные исследования показали, что по однокомпонентному показателю контрастности по меди проба руды является высококонтрастной, по железу – низкоконтрастной, по значению многокомпонентной контрастности – контрастной.

В ходе анализа тесноты корреляционных связей между покусковым содержанием элементов надежных связей не выявлено, следовательно, при выборе алгоритма и вида аналитического параметра разделения необходимо учитывать содержание и меди, и железа (рис. 1). При этом следует отметить возможность выделения отвальных хвостов – наличие зоны с низким содержанием как меди, так и железа.

Примеры вторичных характеристических рентгеновских спектров, полученных на рентгенорадиометрическом сепараторе СРФ1-100Л, для кусков сульфидно-

магнетитовой руды, богатого и бедного по двум компонентам, представлены на рис. 2. Отчетливо прослеживается разница по интенсивности излучения железа и меди между бедным и богатым по содержанию ценных компонентов кусками.

На основании измерений спектров от отдельных кусков, а также изучения корреляционных связей между компонентами с целью выделения отвальных хвостов рекомендован следующий аналитический параметр, определяемый по выражению

$$H = \left(N_{\mathrm{Cu}} + N_{\mathrm{Fe}}\right)/N_S,$$

где H – спектральное отношение интенсивностей в спектральных областях: области вторичного характеристического рентгеновского излучения меди N_{Cu} и железа N_{Fe}, области рассеянного рентгеновского излучения N_S, у. ед.

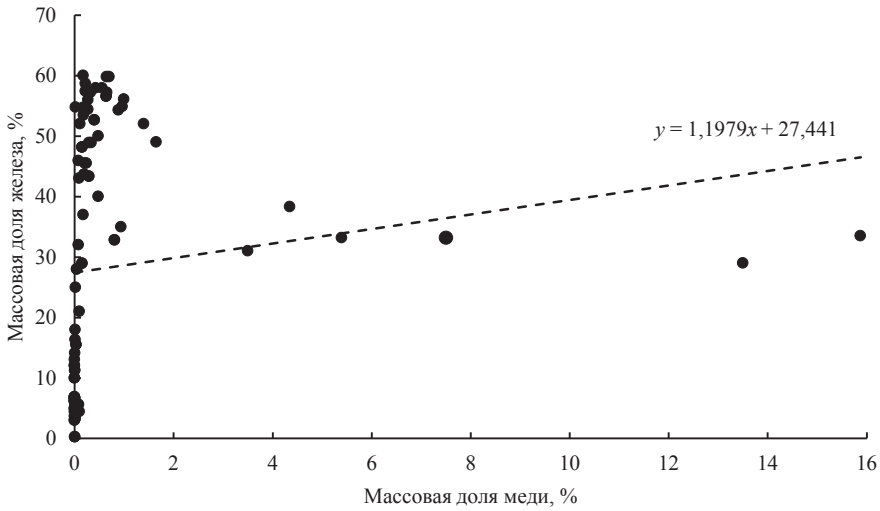

Рис. 1. Поле корреляции массовых долей железа и меди
Fig. 1. Correlation field of iron and copper mass fractions

После проведения предварительных исследований определена технологическая схема испытаний и различные режимы обогащения. Сепарации подверглись два класса крупности: –120+60 мм и –60+30 мм. Класс –30+0 мм – несортируемый. Выход несортируемого класса крупности составил 16,9 %.

При рентгенорадиометрической сепарации пробы сульфидно-магнетитовой руды относительно исходной руды выделено около 26 % хвостов с содержанием меди 0,076 %, железа – 9,14 %. Потери меди и железа с хвостами сепарации составили 3,6 и 6,8 % соответственно.

Анализ полученных результатов свидетельствует о возможности предварительного обогащения сульфидно-магнетитовой руды рентгенорадиометрическим методом. Однако целесообразность РРС руды необходимо подтвердить результатами опытно-промышленных испытаний на крупнотоннажной пробе с экономической оценкой результатов испытаний.

Сухая магнитная сепарация. Схема сухой магнитной сепарации (СМС) руды принята с учетом практики работы существующей дробильно-обогатительной фабрики АО «Богословское рудоуправление» и включает: дробление руды до крупности 25–0 мм; грохочение дробленой руды с выделением класса крупности –25+10 мм и –10+0 мм; СМС I каждого класса крупности при напряженности магнитного поля 80 кА/м, СМС II немагнитной фракции СМС I каждого класса круп-

ности при напряженности магнитного поля 110 кА/м. Суммарный железный концентрат состоит из магнитных фракций СМС I и СМС II.

СМС сульфидно-магнетитовой руды выполнена при следующих режимах: крупность руды – 25–0 мм; диаметр барабана (верхний/нижний) – 600/900 мм; количество приемов магнитной сепарации – 2; напряженность магнитного поля верхнего барабана – 80 кА/м; напряженность магнитного поля нижнего барабана – 120 кА/м; скорость вращения верхнего барабана – 80 об/мин; скорость вращения нижнего барабана – 21 об/мин.

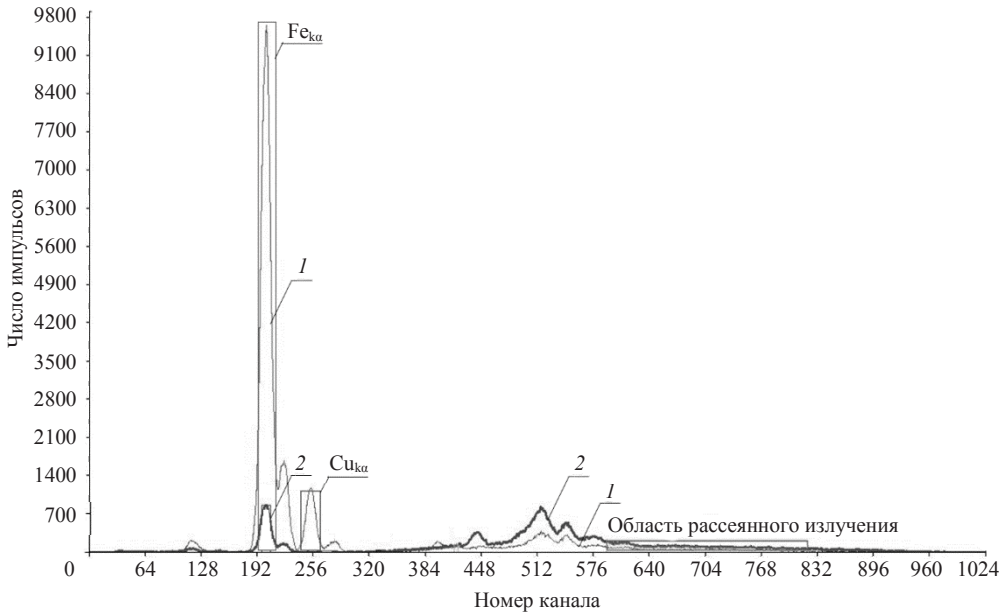

Рис. 2. Спектры вторичного характеристического рентгеновского излучения богатого – *1* и бедного – *2* кусков
Fig. 2. Spectra of secondary characteristic X-ray radiation of rich – *1* and bare – *2* lumps

Результаты исследований показали, что из сульфидно-магнетитовой руды посредством СМС возможно получение магнитного продукта с массовой долей железа общего 59,0 % при извлечении железа общего и железа магнетитового – 86 и 98 % соответственно. Массовая доля меди в магнитном продукте составила 0,64 %, золота – 1,1 г/т, серебра – 2,9 г/т с извлечением 57, 54 и 53 % соответственно.

Сухая магнитная сепарация может применяться при обогащении сульфидно-магнетитовой руды. Однако при этом будут наблюдаться существенные потери меди и благородных металлов с магнитным продуктом.

Центробежная концентрация. С целью определения возможности выведения золотосодержащего продукта из сульфидно-магнетитовой руды выполнен GRG-тест [14, 15].

Результаты GRG-теста сульфидно-магнетитовой руды показали, что центробежной концентрацией после трех стадий концентрирования можно вывести золотосодержащий продукт с массовой долей золота 29 г/т при извлечении 38,86 %. В том числе: на первой стадии центробежной концентрации извлечение золота в тяжелую фракцию составило 12,1 % при массовой доле золота 28 г/т, на второй стадии – 18,18 % при его массовой доле 39 г/т, в третьей стадии – 8,58 % при массовой доле 20 г/т. Суммарное извлечение серебра в тяжелую фракцию после трех стадий концентрирования составило 6 % при содержании 9 г/т.

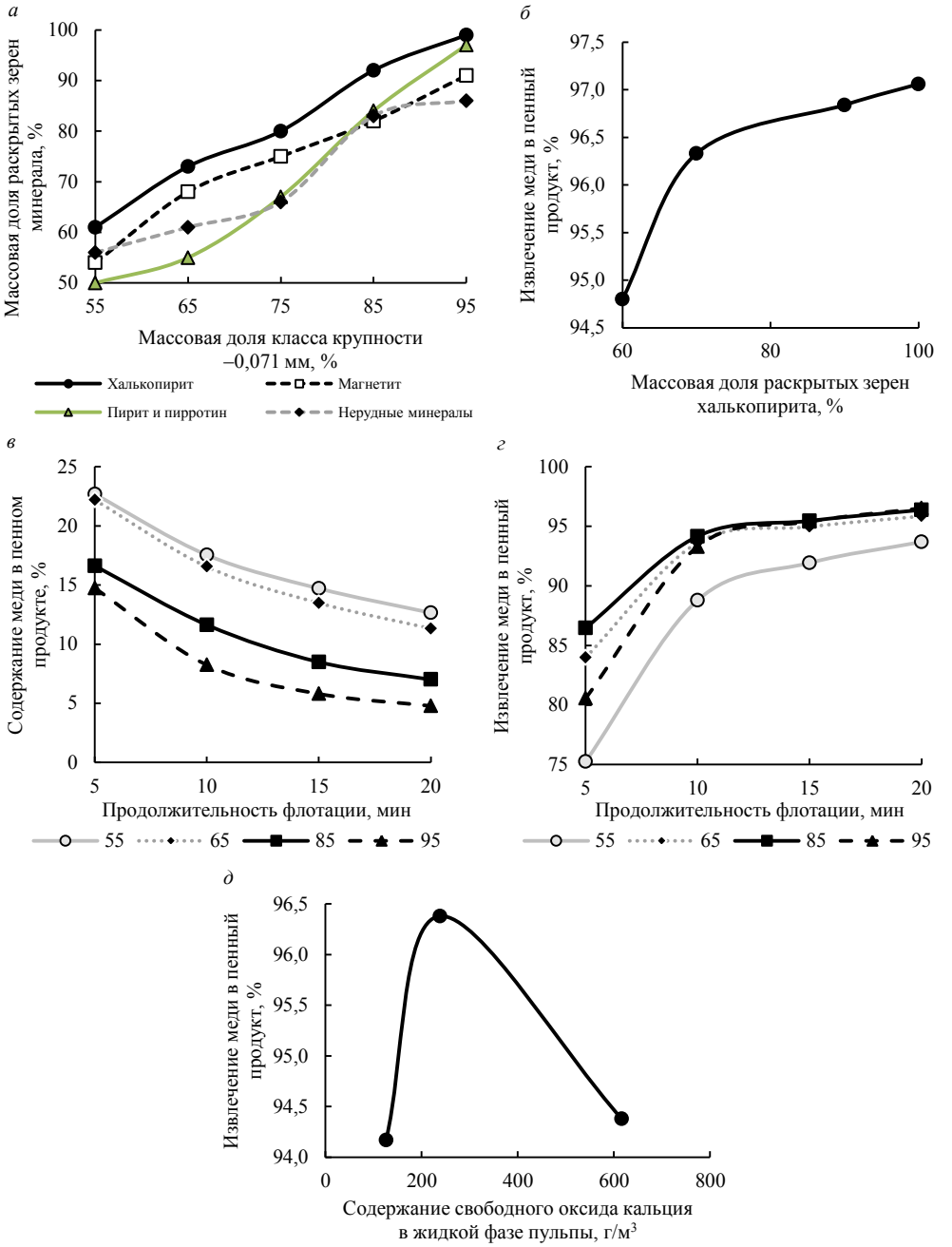

Рис. 3. Зависимости показателей флотационного обогащения сульфидно-магнетитовой руды: *а* – массовой доли раскрытых зерен минералов от массовой доли класса –0,071 мм в продукте измельчения; *б* – извлечения меди в пенный продукт от массовой доли раскрытых зерен халькопирита; *в* – содержания меди в пенном продукте от продолжительности флотации при разной тонине помола руды; *г* – извлечения меди в пенный продукт от продолжительности флотации при разной тонине помола руды; *д* – извлечения меди в пенный продукт от содержания свободного оксида кальция в жидкой фазе пульпы

Fig. 3. Dependences between the flotation concentration indicators of sulphide-magnetite ore: *a* – released mineral grains mass fraction and the mass fraction of the –0.071 mm class in the product of grinding; *б* – copper extraction into a froth product and released chalcopyrite grains mass fraction; *в* – copper content in the froth product and flotation time under different fineness of ore grinding; *г* – extraction of copper into the froth product and flotation time at different fineness of ore grinding; *д* – extraction of copper into the froth product and the content of free calcium oxide in the liquid phase of the pulp

Дальнейшая доводка суммарной тяжелой фракции центробежной концентрации на концентрационном столе показала возможность получения гравитационного золотосодержащего концентрата с содержанием золота 50 г/т при извлечении 27 %.

Флотация. В ходе проведения флотационных исследований изучены: раскрываемость основных рудных минералов в процессе измельчения, влияние на технологические показатели флотации степени раскрытия халькопирита, тонины помола, продолжительности флотации и щелочности пульпы.

При измельчении сульфидно-магнетитовой руды в первую очередь раскрываются зерна халькопирита, а затем магнетита, пирита, пирротина и нерудных минералов (рис. 3, *а*). При массовой доле 55 % класса крупности –0,071 мм халькопирит представлен свободными зернами на 61 %, 39 % приходится на зерна медного колчедана в многокомпонентных сростках. С увеличением тонины помола руды с 55 до 65 % класса крупности –0,071 мм происходит медленное высвобождение зерен халькопирита – с 61 до 73 %. При помоле руды до крупности 85 % класса –0,071 мм массовая доля раскрытых зерен медного колчедана составляет 92 %. Полное (100 %) раскрытие халькопирита наблюдается при крупности измельчения руды до 95–97 % класса –0,071 мм.

Увеличение массовой доли раскрытых зерен халькопирита в продукте измельчения способствует повышению извлечения меди в пенный продукт флотации (рис. 3, *б*). При этом относительно резкое увеличение извлечения меди в пенный продукт флотации (на 2 % – с 94 до 96 %) наблюдается при увеличении массовой доли раскрытых зерен медного колчедана с 60 до 70 %. Дальнейшее увеличение массовой доли раскрытых зерен халькопирита до 80 и 90 % способствует незначительному приросту извлечения меди в пенный продукт – на 0,5 и 0,2 % соответственно.

Относительно грубый помол руды перед флотационным обогащением позволяет получить пенный продукт с более высокой массовой долей меди в нем (рис. 3, *в*). Так, при одинаковой продолжительности флотации, равной 5 мин, массовая доля меди в пенном продукте при тонине помола руды 55 % класса –0,071 мм составляет 22,7 %; при 65 % класса –0,071 мм – 22,2 %; при 85 % класса –0,071 мм – 16,6 %; при 95 % класса –0,071 мм – 14,7 %. Снижение качества пенного продукта флотации при увеличении тонины помола руды связано с переизмельчением породных минералов и переходом их в концентрат.

Максимальное извлечение меди в пенный продукт наблюдается при флотации руды, измельченной до крупности 85 % класса –0,071 мм (рис. 3, *г*). При одинаковой продолжительности флотации, равной 10 мин, извлечение меди в пенный продукт при тонине помола руды 85 % класса –0,071 мм составляет 94,2 %; при 55 % класса –0,071 мм – 88,8 %; при 65 % класса –0,071 мм – 93,6 %; при 95 % класса –0,071 мм – 93,3 %.

С увеличением продолжительности флотации руды, измельченной до крупности 85 и 95 % класса –0,071 мм, извлечение меди в пенный продукт практически совпадает. Это подтверждается результатами изучения раскрытия халькопирита в процессе измельчения руды: при рассматриваемой тонине помола руды массовая доля свободных зерен халькопирита практически не отличается и составляет 92 и 99 % соответственно. Наименьшее извлечение меди в пенный продукт отмечается при флотации сульфидно-магнетитовой руды в крупности 55 % класса –0,071 мм.

Оптимальное содержание свободного оксида кальция в жидкой фазе пульпы при флотации сульфидно-магнетитовой руды составляет 224–252 г/м^3 пульпы. При этом содержании свободного оксида кальция в жидкой фазе пульпы наблюдается экстремум в извлечении меди в пенный продукт, равный 96,4 %. Снижение или увеличение щелочности пульпы приводит к снижению извлечения меди в пенный продукт на 2 %.

Подача 200 г/т медного купороса в операцию пирротиновой флотации позволяет максимально извлечь магнитный колчедан в пенный продукт пирротиновой флотации и снизить массовую долю серы в хвостах флотации с 2,04 до 0,98 %.

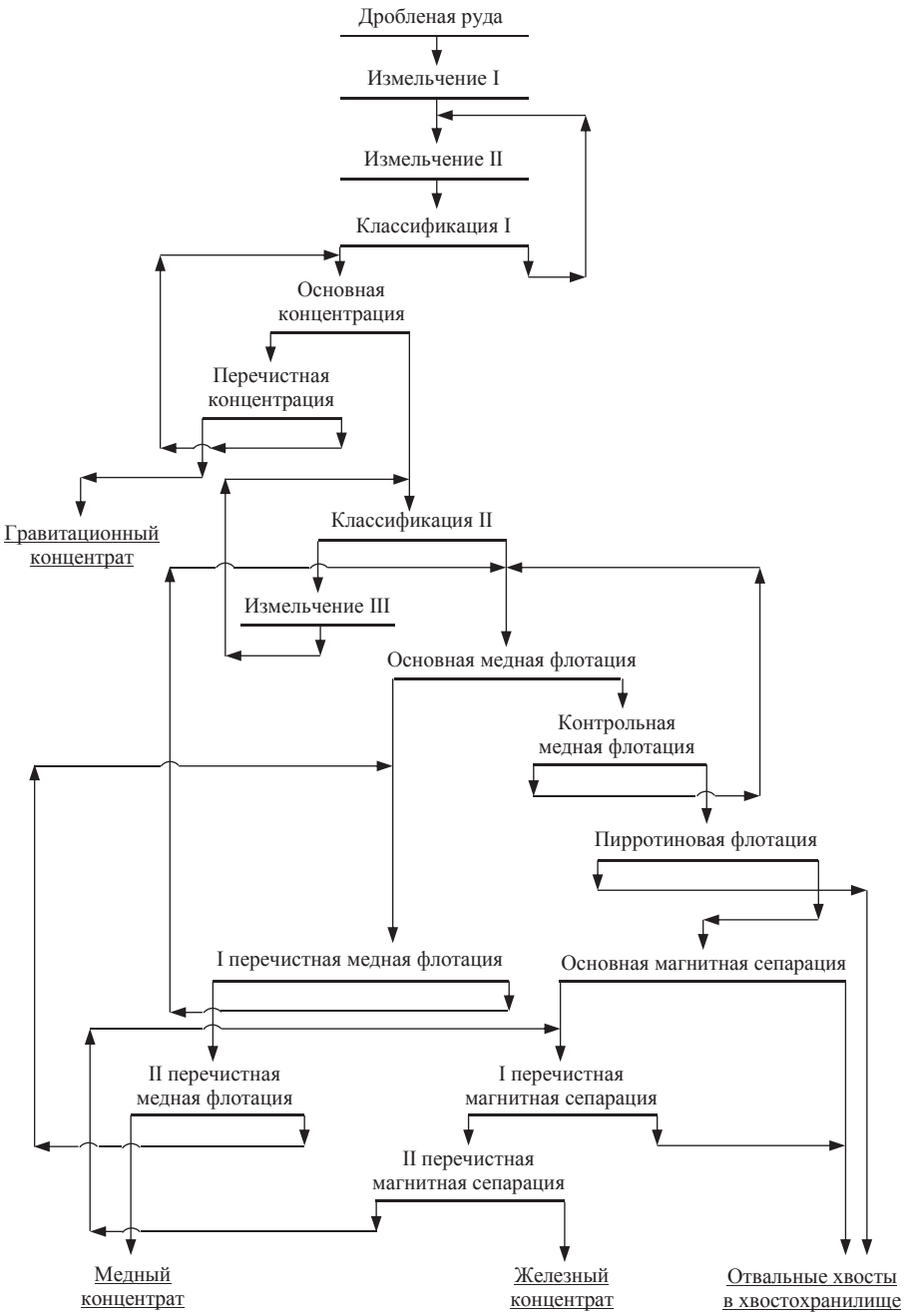

Рис. 4. Комплексная технология обогащения сульфидно-магнетитовой руды
Fig. 4. Integrated technology for sulphide-magnetite ore concentration

Дальнейшее увеличение расхода медного купороса до 500 г/т и более приводит к депрессии пирротина и увеличению содержания серы в камерном продукте пирротиновой флотации.

На основании выполненных исследований разработана флотационная схема обогащения сульфидно-магнетитовой руды, позволяющая получить медный концентрат с массовой долей меди 23,71 %, золота – 36,8 г/т и серебра – 80,0 г/т при извлечении 95,59; 67,00 и 63,84 % соответственно.

Мокрая магнитная сепарация (ММС). На хвостах флотации выполнен магнитный анализ при вариации напряженности магнитного поля от 64 до 160 кА/м. Из результатов магнитного анализа следует, что изменение напряженности магнитного поля от 64 до 160 кА/м приводит к снижению массовой доли железа в концентрате с 67,4 до 66,8 %. При этом извлечение железа в магнитную фракцию увеличивается с 89,7 до 90,5 %.

Проведено мокрое магнитное обогащение хвостов флотации по схеме, предусматривающей основную сепарацию и две перечистные операции сепарации грубого железного концентрата при напряженности магнитного поля 120 кА/м.

В результате ММС получен магнетитовый концентрат с массовой долей железа 66,5 % при выходе концентрата 54,1 % (от операции) и извлечении в него железа 89,7 % (от операции). Массовая доля серы в магнетитовом концентрате составила 0,7 %.

На основании проведенных исследований предложена комплексная технология переработки сульфидно-магнетитовой руды Северо-Песчанского месторождения (рис. 4).

Разработанная комплексная технология позволит получить:

– гравитационный золотосодержащий концентрат с массовой долей золота 50 г/т при извлечении 27 %;

– медный концентрат с массовой долей меди 23,71 %, золота – 18,9 г/т и серебра – 60,0 г/т при извлечении 93,6; 42,9 и 54,6 % соответственно;

– магнетитовый концентрат с массовой долей железа 66,5 %, серы – 0,7 % при извлечении железа общего 76,6 %.

Выводы. Предобогащение сульфидно-магнетитовой руды рентгенорадиометрической сепарацией позволяет выделять 26 % отвальных хвостов с массовой долей меди 0,076 %, железа 9,14 % при потерях с хвостами РРС меди 3,6 %, железа 6,8 %. Целесообразность РРС руды рационально подтверждать результатами опытно-промышленных испытаний на крупнотоннажной пробе.

Крупнокусковая сухая магнитная сепарация сульфидно-магнетитовой руды позволяет выделить магнетитовый продукт с массовой долей железа 59 % при извлечении железа общего 86 %. Однако при реализации СМС сульфидно-магнетитовой руды отмечаются высокие потери меди и благородных металлов. С магнетитовым продуктом теряется 57 % меди, 54 % золота и 53 % серебра при содержании 0,64 %, 1,1 г/т и 2,9 г/т соответственно.

Сульфидно-магнетитовую руду Западно-Песчанской залежи Песчанского скарново-магнетитового месторождения рационально перерабатывать по комплексной гравитационно-флотационно-магнитной технологии.

По данной технологии можно получить:

– гравитационный золотосодержащий концентрат с массовой долей золота 50 г/т при извлечении 27 %;

– медный концентрат с массовой долей меди 23,71 %, золота – 18,9 г/т и серебра – 60,0 г/т при извлечении 93,6; 42,9 и 54,6 % соответственно;

– магнетитовый концентрат с массовой долей железа 66,5 %, серы – 0,7 % при извлечении железа общего 76,6 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рудные месторождения СССР / под ред. В. И. Смирнова. Т. 1. М.: Недра, 1978. 352 с.

2. Мамонов С. В., Савин А. Г., Метелев А. А., Газалеева Г. И. Технология комплексной переработки сульфидно-магнетитовых руд // Обогащение руд. 2017. № 4. С. 12–17.

3. Mamonov S. V., Volkova S. V., Dresvyakyna T. P. Technology of complex processing of sulfide-magnretite ore // Int. min. proc. cong.: XXIX IMPC. 2019. P. 1075–1085.
4. Oliazadeh M., Vazirizadeh A. Removing impurities from iron ores: methods and industrial cases // Iron and Pyrometallurgy: XXVIII IMPC, 2016. Paper ID 711. P. 1–13.
5. Bhambhani T., Nagaraj D. R., Yavuzkan O. Improving flotation recovery of oxide copper minerals // Flotation non-sulphides: XXVIII IMPC, 2016. Paper D 469. P. 1–13.
6. Parsapour Gh. A., Tafvizi S. Darvish, Arghavani E., Akbari A., Banisi S. Modification of the sarcheshmeh copper complex flotation circuit in response to a reduction in freed grade // Plant: XXVIII IMPC, 2016. Paper ID 507. P. 1–7.
7. Shi Q., Chen Y., Feng Q., Zhang G. The effect of chlorite on the flotation of pyrrhotite // Int. min. proc. cong.: XXVIII IMPC, 2016. Paper ID 579. P. 1–10.
8. Matveyeva T. N., Ivanova T. A., Gromova N. K. Application of plant extracts as modifiers for selective flotation of sulfide minerals // Int. min. proc. cong.: XXVII IMPC, 2014. P. 117.
9. Шлапак В. Б., Кутемов Ю. П., Скорняков С. В., Семидалов С. Ю., Шанаурина Т. В. Промышленные испытания грохота «Стек-Сайзер-48» корпорации «Деррик» и его внедрение на обогатительной фабрике ООО «СП «Эконт» // Известия вузов. Горный журнал. 2007. № 1. С. 101–104.
10. Цыпин Е. Ф., Ефремова Т. А., Овчинникова Т. Ю. Экономическая эффективность предварительной концентрации с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 6. С. 66–74.
11. Цыпин Е. Ф., Овчинникова Т. Ю., Ефремова Т. А. Эффективность применения рентгенофлуоресцентной сепарации для предварительной концентрации руд // ГИАБ. 2020. № 3-1. С. 431–442.
12. Газалеева Г. И., Цыпин Е. Ф., Червяков С. А. Рудоподготовка: дробление, грохочение, обогащение. Екатеринбург: УЦАО, 2014. 914 с.
13. Кобзев А. С. Радиометрическое обогащение минерального сырья. М.: Горная книга, 2015. 125 с.
14. Сенченко А. Е., Федотов К. В., Федотов П. К., Бурдонов А. Е. Технологическая оценка обогатимости руды гравитационными методами // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 4. С. 262–280.
15. Федотов К. В., Тютюнин В. В. Обогащение в центробежных концентраторах. Иркутск: ИРНИТ, 2009. 120 с.

Поступила в редакцию 30 марта 2021 года

Сведения об авторах:

Мамонов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, заведующий отделом обогащения (наука) Научно-исследовательского и проектного института «Уралмеханобр», заведующий кафедрой обогащения полезных ископаемых Технического университета УГМК. E-mail: mamonov_sv@umbr.ru; https://orcid.org/0000-0001-8347-5252
Волкова Светлана Владимировна – старший научный сотрудник лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья Научно-исследовательского и проектного института «Уралмеханобр». E-mail: volkova_sv@umbr.ru
Таланцева Александра Станиславовна – инженер лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья Научно-исследовательского и проектного института «Уралмеханобр». E-mail: talantseva_as@umbr.ru
Ефремова Татьяна Александровна – научный сотрудник лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья Научно-исследовательского и проектного института «Уралмеханобр». E-mail: efremova_ta@umbr.ru; https://orcid.org/0000-0002-9917-6676

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-45-56

Technological characteristics of sulfide-magnetite ore washability at the magnetite skarn Peschanskoe deposit

Sergei V. Mamonov[1, 2], Svetlana V. Volkova[1], Aleksandra S. Talantseva[1], Tatiana A. Efremova[1]
[1] JSC "Uralmekhamobr", Ekaterinburg, Russia.
[2] UMMC Technical University, Verkhniaia Pyshma, Sverdlovsk region, Russia.

Abstract
Introduction. *In the magnetite lime-skarn Peschanskoe deposit, the Zapadno-Peschanskaya ore deposit is distinguished, which differs from other ore bodies by an increased content of copper and precious metals. Due to the fact that the technology of processing magnetite ores of the Peschanskoe deposit at the enterprise of the subsurface user is configured to receive only iron concentrate, the development of a comprehensive technology for processing sulfide-magnetite ores is an urgent task.*
Research aim *is to study the material composition and sulfide-magnetite ore concentration of the Zapadno-Peschanskaya ore deposit and to develop a comprehensive technology for its processing. The technology should ensure gold-containing, copper and iron concentrates production.*

Research methods *consisted in studying the material composition of sulfide-magnetite ore by means of quantitative chemical analysis using Arcos emission spectrometer with inductively coupled plasma, Solaar atomic absorption spectrometer, CS-800sulfur analyzer, Titration Excellence T-70 automatic titration system, and Specord 250 Plus scanning spectrophotometer; chemical phase analysis for the forms of iron, copper, gold, silver and sulfur compounds; mineralogical analysis using the Axio Imager A1m optical microscope and Mineral C7 automated analyzer. Technological research was carried out by various concentration methods: X-ray radiometric separation on the SRF1-100L separator; dry magnetic separation on the PBS-90/25 magnetic separator; gravity on the KC-MD3 centrifugal concentrator and the SKL-0.2 concentration table; flotation on the FMP-L series flotation machines; wet magnetic separation on the electromagnetic separator EBM-32/20.*
Scope of results. *The present research result can be used at complex sulfide-magnetite ores processing.*
Conclusions. *The results of the material composition research and technological properties of the sulfide-magnetite ore of the Zapadno-Peschanskaya deposit of the Peschanskoe skarnovo-magnetite deposit are presented. It is established that the researched ore can be efficiently processed using a complex gravity-flotation-magnetic technology, which allows to obtain: gravity gold-containing concentrate with a mass fraction of gold of 50 g/t at recovery of 27%; copper concentrate with a mass fraction of 23.71%, gold – 18.9 g/t and silver – 60.0 g/t when extracted, respectively, 93.6%, 42.9% and 54.6%; magnetite concentrate with a mass fraction of iron 66.5%, sulfur 0.7% with the recovery of total iron 76.6%.*

Keywords: *sulfide-magnetite ore; Zapadno-Peschanskaya deposit; Peschanskoye ore deposit; X-ray radiometric separation; dry magnetic separation; flotation; centrifugal concentration; wet magnetic separation; complex technology; washability.*

REFERENCES

1. Smirnov V. I. (ed.) *Ore deposits in the USSR*. Vol. 1. Moscow: Nedra Publishing; 1978. (In Russ.)
2. Mamonov S. V., Savin A. G., Metelev A. A., Gazaleeva G. I. The sulphidemagnetite ores integrated processing technology. *Obogashchenie Rud = Mineral Processing*. 2017; 4: 12–17. (In Russ.)
3. Mamonov S. V., Volkova S. V., Dresvyakyna T. P. Technology of complex processing of sulfide-magnetite ore. In: *Int. min. proc. cong.: XXIX IMPC*. 2019. P. 1075–1085.
4. Oliazadeh M., Vazirizadeh A. Removing impurities from iron ores: methods and industrial cases. In: *Iron and Pyrometallurgy: XXVIII IMPC, 2016*. Paper ID 711. P. 1–13.
5. Bhambhani T., Nagaraj D. R., Yavuzkan O. Improving flotation recovery of oxide copper minerals. In: *Flotation non-sulphides: XXVIII IMPC, 2016*. Paper D 469. P. 1–13.
6. Parsapour Gh. A., Tafvizi S. Darvish, Arghavani E., Akbari A., Banisi S. Modification of the sarcheshmeh copper complex flotation circuit in response to a reduction in freed grade. In: *Plant: XXVIII IMPC, 2016*. Paper ID 507. P. 1–7.
7. Shi Q., Chen Y., Feng Q., Zhang G. The effect of chlorite on the flotation of pyrrhotite. In: *Int. min. proc. cong.: XXVIII IMPC*, 2016. Paper ID 579. P. 1–10.
8. Matveeva T. N., Ivanova T. A., Gromova N. K. Application of plant extracts as modifiers for selective flotation of sulfide minerals. In: *Int. min. proc. cong.: XXVII IMPC, 2014*. P. 117.
9. Shlapak V. B., Kutemov Iu. P., Skorniakov S. V., Semidalov S. Iu., Shanaurina T. V. Field trials of Stak-Sizer-48 screen by Derrick and its implementation in OOO SP Ekont factory. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2007; 1: 101–104. (In Russ.)
10. Tsypin E. F., Efremova T. A., Ovchinnikova T. Iu. Economic efficiency of preconcentration with X-ray fluorescence separation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 6: 66–74. (In Russ.)
11. Tsypin E. F., Ovchinnikova T. Iu., Efremova T. A. Efficiency of x-ray radiometric separation in preliminary concentration of ore. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 3-1: 431–442. (In Russ.)
12. Gazaleeva G. I., Tsypin E. F., Cherviakov S. A. *Ore processing: breaking, screening, concentration*. Ekaterinburg: UTsAO Publishing; 2014. (In Russ.)
13. Kobzev A. S. *Radiometric separation of mineral raw material*. Moscow: Gornaia kniga Publishing; 2015. (In Russ.)
14. Senchenko A. E., Fedotov K. V., Fedotov P. K., Burdonov A. E. Technological evaluation of ore processibility gravitational methods. *Izvestiia Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2020; 4: 262–280. (In Russ.)
15. Fedotov K. V., Tiutiunin V. V. *Concentration in centrifugal concentrators*. Irkutsk: ISTU Publishing; 2009. (In Russ.)

Received 30 March 2021

Information about authors:

Sergei V. Mamonov – PhD (Engineering), Head of the Beneficiation Department (Science) of Uralmekhanobr, JSC, Head of the Mineral Processing Department, UMMC Technical University. E-mail: mamonov_sv@umbr.ru; https://orcid.org/0000-0001-8347-5252

Svetlana V. Volkova – senior researcher, Laboratory of Non-Ferrous Metals and Technogenic Raw Materials Processing, JSC Uralmekhanobr. E-mail: volkova_sv@umbr.ru
Aleksandra S. Talantseva – engineer, Laboratory of Non-Ferrous Metals and Technogenic Raw Materials Processing, JSC Uralmekhanobr. E-mail: talantseva_as@umbr.ru
Tatiana A. Efremova – researcher, Laboratory of Non-Ferrous Metals and Technogenic Raw Materials Processing, JSC Uralmekhanobr. E-mail: efremova_ta@umbr.ru; https://orcid.org/0000-0002-9917-6676

Для цитирования: Мамонов С. В., Волкова С. В., Таланцева А. С., Ефремова Т. А. Технологические особенности обогатимости сульфидно-магнетитовых руд скарново-магнетитового месторождения Песчанское // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 4. С. 45–56. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-45-56
For citation: Mamonov S. V., Volkova S. V., Talantseva A. S., Efremova T. A. Technological characteristics of sulfide-magnetite ore washability at the magnetite skarn Peschanskoe deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 4: 45–56 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-45-56