

МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО. ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 622.7

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-64-75

Особенности технологических свойств медно-цинковых руд глубоких горизонтов Тарньерского месторождения

Мамонов С. В.^{1,2*}, Гарифулин И. Ф.¹, Дресвянкина Т. П.¹,
Горайчук П. К.¹, Синьков И. С.¹

¹АО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия

²Технический университет УГМК, г. Верхняя Пышма, Россия

*e-mail: mamonov_sv@umbr.ru

Реферат

Введение и цель работы. Медно-цинковые руды глубоких горизонтов Тарньерского месторождения являются весьма сложным объектом для флотационного обогащения. Сложность обогащения данных руд обусловлена особенностями их вещественного состава – высоким содержанием пирротина. Из анализа литературных данных следует, что снизить отрицательное влияние пирротина на процесс селективной флотации руд цветных металлов возможно следующими путями: кондиционирование пульпы кислородосодержащим газом; подача в процесс флотации сочетания слабых селективных собирателей и бутилового ксантогената калия; аэрационное кондиционирование пульпы в высокощелочной среде при температуре 35–40 °С; использование разных видов энергетических воздействий.

Актуальность исследования. Однозначного и универсального подхода к проблеме селективной флотации сульфидов цветных металлов и пирротина в настоящее время не существует. В связи с этим решение задачи по переработке сульфидных руд с повышенным содержанием пирротина является весьма сложным и актуальным направлением, требующим всестороннего исследования.

Методология проведения исследований заключалась в анализе и обобщении научно-технической информации, в проведении экспериментов флотационными методами обогащения с использованием современных автоматизированных лабораторных флотационных машин типа ФМП-Л, реализации замкнутых флотационных опытов по принципу непрерывного технологического процесса, изучении вещественного состава продуктов обогащения посредством современных методов количественного химического и рентгенофазового анализов.

Вывод. Получение кондиционных медного и цинкового концентратов при обогащении пирротинсодержащей медно-цинковой руды глубоких горизонтов Тарньерского месторождения возможно по технологии флотации с применением пероксида водорода. По данной технологии получен медный концентрат с содержанием меди 19,33 % при ее извлечении 76,05 % (+5,16 % к базовому фабричному режиму) и кондиционный цинковый концентрат с содержанием цинка 50,14 % (+4,84 % к базовому фабричному режиму) при его извлечении 65,80 % (+29,53 % к базовому фабричному режиму).

Ключевые слова: Тарньерское месторождение; медно-цинковая руда; пирротин; пероксид; медный концентрат; цинковый концентрат.

Введение. Медно-цинковые руды глубоких горизонтов Тарньерского месторождения являются весьма сложным объектом для флотационного обогащения. Сложность обогащения данных руд обусловлена особенностями их веществен-

ного состава: повышенное содержание меди, ассоциированной с ее вторичными сульфидами (21,49 %); наличие труднофлотированного цинка, связанного с гидроксидами железа и марганца, окисленными минералами и сульфатами (11,71 %); присутствие близких по флотационным свойствам сульфидов меди, цинка и железа; эмульсионная вкрапленность сульфидов-носителей меди и цинка друг с другом, сульфидами железа и нерудными минералами; низкая раскрываемость ценных минералов в процессе измельчения [1]. Кроме приведенных факторов, отрицательно влияющих на процесс флотационного обогащения тарньерских руд, немаловажную роль играет высокое содержание в них пирротина (32 %).

В работе [2] отмечено, что с углублением открытой добычи руды Тарньерского месторождения массовая доля пирротина в ней увеличивается с 5 % (по данным 2007 г.) до 42–50 % (по данным 2012–2013 г.г.). При этом также отмечается, что при высокой массовой доле пирротина в исходной руде (более 20–25 %) получение кондиционных медного и цинкового концентратов становится невозможным. Это подтверждается результатами обогащения руды Тарньерского месторождения на обогатительной фабрике за последние периоды его отработки открытым способом (рис. 1): качество медного и цинкового концентратов, а также извлечение цинка в одноименный концентрат постоянно снижались. Показано, что в последний месяц переработки руды массовая доля меди в медном концентрате составляла 12 % при ее извлечении 81,5 %, массовая доля цинка в цинковом концентрате – 44 % при его извлечении 67,6 %.

Сложность в получении кондиционных концентратов из данного вида сырья вызвана тем, что пирротин, как и сульфиды меди, цинка и железа (пирит), флотировается в присутствии сульфгидрильных собирателей и активируется ионами меди, находящимися в пульпе [3]. Снизить флотированность пирротина возможно путем подбора оптимального режима его депрессии и улучшения ионного состава жидкой фазы пульпы. По сравнению с другими сульфидами железа, пирротин легко разрушается при измельчении с образованием шламов с развитой площадью поверхности; легко окисляется, поглощая кислород из жидкой фазы пульпы и замедляя окисление сульфидов меди и цинка до стадии, необходимой для их флотации. В результате такого окисления накапливается значительное количество восстановителей, являющихся депрессорами для ряда сульфидов и поглотителями кислорода (водорастворимого закисного железа Fe^{2+} , сероводорода HS^- и низших окислов серы SO_3^{2-} , $S_2O_3^{2-}$) [4].

Для устранения вредного воздействия ионов-восстановителей в технологические схемы обогащения сульфидных пирротинсодержащих руд включают операции, способствующие их окислению в щелочной среде (длительная аэрация пульпы с воздухом, подогрев пульпы водяным паром) [3–5].

В работе [6] отмечено, что по сравнению с традиционной фабричной технологией применение в процессе флотационного обогащения пирротинсодержащих руд Тарньерского месторождения операции кондиционирования пульпы кислородосодержащим газом в эжектирующем устройстве колонной флотомашины позволяет одновременно повысить содержание меди в медном концентрате на 5,21 % (с 14,31 до 19,52 %), извлечение меди в медный концентрат на 6,34 % (с 76,67 до 83,01 %), содержание цинка в цинковом концентрате на 14,68 % (с 36,78 до 51,46 %), извлечение цинка в цинковый концентрат на 6,39 % (с 81,33 до 87,72 %).

Авторы работ [7] отмечают, что технологический режим, предусматривающий операцию аэрации пульпы и подачу в процесс флотации сочетания слабых селективных собирателей (диметилдителиокарбамата, Берафлот 3035, ИТК или МТФ) и бутилового ксантогената калия, позволяет значительно снизить флотированность сульфидов железа, улучшить качество концентратов и повысить извлечение меди

и цинка в одноименные концентраты. Снижению флотационной активности пирротина при разделении сульфидных руд способствует также подача в процесс флотации комплексообразователей типа триэтилентетрамина в сочетании с метабисульфитом натрия [8] или диэтилентриамина в сочетании с диоксидом серы и пенообразователя [9].

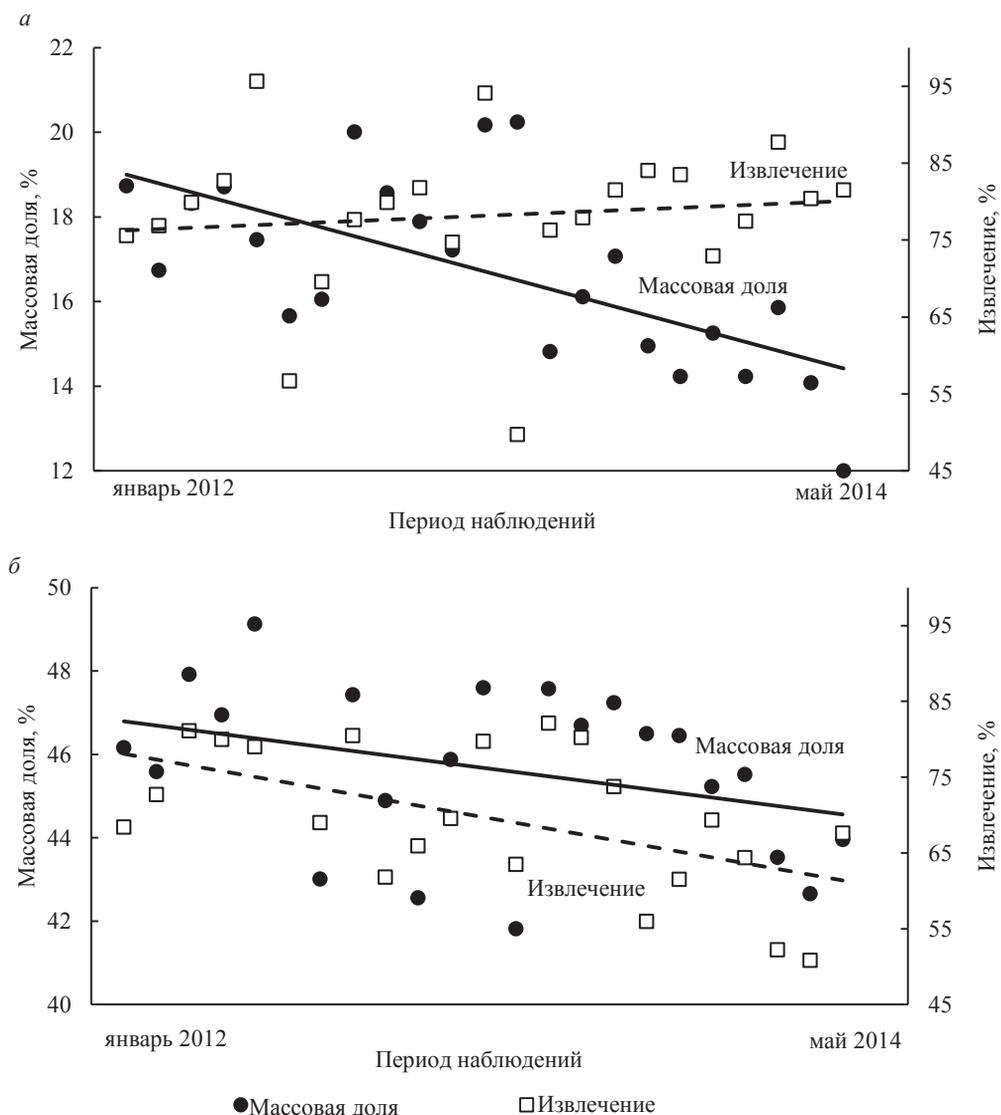


Рисунок 1. Показатели переработки руды Тарньерского месторождения на обогатительной фабрике за период с января 2012 г. по май 2014 г: *a* – массовая доля меди и ее извлечение в медный концентрат; *б* – массовая доля цинка и его извлечение в цинковый концентрат
 Figure 1. Processing indicators for the Tarnier deposit ore at the beneficiation plant for the period from January 2012 to May 2014: *a* – copper mass fraction and its extraction into copper concentrate; *б* – zinc mass fraction and its extraction into zinc concentrate

Для повышения контрастности минеральных поверхностей разделения халькопирита от пирротина в работе [10] предложено использовать селективный реагент БТФ-15221, селекцию вести с активированным углем при расходе 50 г/т и три-

натрийфосфатом натрия с расходом 45 г/т в щелочной среде ($\text{pH} = 10,2$, создаваемой гидроокисью натрия) после термообработки пульпы при температуре 45 °С.

В работе [11] приведена технология флотационного обогащения медно-цинковых пирротинсодержащих руд с применением в цинковом цикле флотации аэрационного кондиционирования пульпы в высокощелочной среде, создаваемой известью, и с подогревом пульпы острым паром до температуры 35–40 °С. Однако при высоком (более 30–40 %) содержании пирротина в исходной руде применение указанных операций не позволяет полностью депрессировать пирротин, который флотируется вместе с цинковыми минералами и снижает содержание цинка в цинковом концентрате. Отмечается высокая эффективность процесса окисления пирротина: в потоке газовой смеси $\text{O}_2\text{--N}_2$ при температуре 550 °С [12]; в растворе хлорного железа FeCl_3 при температуре 100 °С, концентрации Fe^3 150 г/л и продолжительности обработки 2 ч [13]; в процессе измельчения руды в сильнощелочной среде ($\text{pH} = 11$, создаваемой NaOH) в присутствии серосодержащих анионов и металлического железа [14].

Процесс механической активации флотационных пульп [15], содержащих пирротин и пентландит с близкими флотационными свойствами, в щелочной среде (создаваемой известью) способствует инверсии гидрофобно-гидрофильных поверхностных свойств разделяемых минералов: поверхность пентландита освобождается от гидратных образований гидроксидов железа, поверхность пирротина пассивируется за счет цементационного механизма действия извести. В дальнейшем предварительная агитация пульпы с диметилдителиокарбаматом натрия в щелочной среде в условиях отсутствия окисления пульпы кислородом воздуха увеличивает степень сорбции реагента, что повышает эффективность подавления флотации пирротина.

Для повышения контрастности технологических свойств пирротина и пентландита и их предварительной подготовки к последующему процессу селективной флотации используются разные виды энергетических воздействий: электрохимическая, электроимпульсная, магнитно-импульсная СВЧ-обработка; воздействие ускоренными электронами, мощными наносекундными электромагнитными импульсами (МЭМИ) и др. [16–19].

В результате электромагнитной импульсной обработки минералов электродный потенциал пирротина вследствие образования оксидов (гидроксидов) и сульфатов железа сдвигался в сторону отрицательных значений, что приводит к снижению сорбции ксантогената и уменьшению флотационного извлечения минерала, тогда как электродный потенциал пентландита приобретал более положительные значения за счет дополнительного образования элементной серы, что приводит, наоборот, к увеличению сорбции ксантогената и повышению извлечения сульфида никеля.

Таким образом, однозначного и универсального решения проблемы по селективной флотации сульфидов цветных металлов и пирротина в настоящее время не существует. Для конкретного типа руды требуется индивидуальная отработка реагентного и технологического режимов. В связи с этим решение задачи по переработке сульфидных руд с повышенным содержанием пирротина является весьма сложным и актуальным направлением, требующим всестороннего исследования.

Методология проведения исследований заключалась в анализе и обобщении научно-технической информации, проведении экспериментов флотационными методами обогащения с использованием современных автоматизированных лабораторных флотационных машин типа ФМП-Л, реализации замкнутых флотацион-

ных опытов по принципу непрерывного технологического процесса, изучении вещественного состава продуктов обогащения посредством современных методов количественного химического и рентгенофазового анализов.

Порядок проведения исследований. Проведены исследования обогатимости руды Тарньерского месторождения по коллективно-селективной схеме флотации, действующей на обогатительной фабрике. Схема включает: измельчение исходной руды до крупности 70 % класса $-0,071$ мм; операцию межстадиальной флотации; доизмельчение хвостов межстадиальной флотации до крупности не менее 85 % класса $-0,071$ мм; основную и контрольную коллективные флотации с получением грубого коллективного концентрата, коллективного промпродукта и хвостов коллективной флотации, которые являются отвальными хвостами; доизмельчение концентрата коллективной флотации до крупности 95 % класса $-0,045$ мм; перемешивание доизмельченного коллективного концентрата; сгущение коллективного концентрата в присутствии гидросульфида натрия; агитацию с цинковым купоросом; основную разделительную флотацию в слабощелочной среде с получением грубого медного концентрата и хвостов, которые являются питанием цинкового цикла; медную перемешивающую разделительную флотацию с получением медного концентрата; I–II перемешивающие цинковые флотации с получением цинкового концентрата; цикл промпродуктовой флотации, питанием которой являются концентрат контрольной коллективной флотации, хвост медной перемешивающей разделительной флотации и хвост первой цинковой перемешивающей флотации.

По фабричной схеме с применением фабричной номенклатуры реагентов получены: медный концентрат с массовой долей меди 19,54 % при извлечении 70,89 %; цинковый концентрат с массовой долей цинка 45,30 % при извлечении 36,27 %. Отмечено, что фабричная схема и фабричная номенклатура реагентов при обогащении пирротинсодержащей медно-цинковой руды Тарньерского месторождения не позволяют получить цинковый концентрат с требуемой массовой долей цинка (более 50 %) и с приемлемым уровнем извлечения.

С целью снижения доли пирротина, затрудняющего процесс флотации, проведены исследования по мокрой магнитной сепарации (ММС) руды и промежуточных продуктов ее обогащения. Установлено, что наибольшее извлечение пирротина в магнитный продукт происходит при напряженности магнитного поля 240 кА/м. Однако, при использовании ММС в схеме обогащения руды отмечаются существенные потери меди и цинка с магнитной фракцией: медь теряется до 30,4 %, цинк – до 27,5 %. По результатам исследований отмечено, что применение ММС с целью снижения доли пирротина в руде нецелесообразно при столь высоких сопутствующих потерях ценных компонентов.

Результаты и обсуждение. С целью повышения технологических показателей обогащения медно-цинковой руды Тарньерского месторождения проведены исследования по поиску эффективной технологии депрессии пирротина. По результатам исследований установлено:

– для эффективной селекции коллективного концентрата на медный и цинковый концентраты, коллективный концентрат должен содержать около 3–5 % меди, 14–15 % цинка при извлечении данных металлов в коллективный концентрат на уровне 90 %;

– технологический режим, предусматривающий продувку пульпы чистым кислородом перед операцией коллективной перемешивающей флотации с последующим проведением коллективной флотации при подаче кислорода вместо воздуха, позволяет получить коллективный концентрат с извлечением меди 95,3 %, цинка – 87,4 %, но с низким содержанием цинка в нем – 8,9 %;

– применение режима с повышением щелочности пульпы, создаваемой известью, до содержания свободного оксида кальция 1350–1400 г/м³ в жидкой фазе пульпы, позволяет получить коллективный концентрат с высоким извлечением меди и цинка – более 96,0 %, но с низким содержанием цинка в нем – 8,4 %;

– технологический режим, предусматривающий увеличение щелочности пульпы до содержания свободного оксида кальция 1600–1650 г/м³ в жидкой фазе пульпы и подачу в процесс флотации гидроксида натрия, позволяет получить коллективный концентрат с содержанием цинка 10,9 % при заметном снижении извлечения в него цинка – до 83,4 %;

Таблица 1. Показатели флотации меди и цинка в отдельных операциях технологической схемы обогащения руды Тарньерского месторождения в зависимости от расхода пероксида водорода

Table 1. Copper and zinc flotation indicators in separate operations of the beneficiation flowsheet of the Tarnier deposit ore depending on hydrogen peroxide consumption

Расход H ₂ O ₂ , г/т	Показатель				Продолжительность флотации, мин
	Массовая доля, %		Извлечение, %		
	медь	цинк	медь	цинк	
<i>Концентрат перечистной коллективной флотации</i>					
0	4,32	10,89	91,95	83,41	15
200	4,55	13,21	88,21	85,32	9
300	5,29	16,44	90,13	92,67	9
400	5,41	15,93	90,25	92,44	9
<i>Концентрат первой перечистной медной флотации</i>					
0	6,31	–	64,13	–	8
50	7,50	–	59,33	–	5
100	8,41	–	65,02	–	5
150	8,52	–	64,85	–	5
<i>Концентрат второй перечистной медной флотации</i>					
0	9,56	–	38,71	–	8
50	11,50	–	32,18	–	5
100	12,22	–	38,44	–	5
150	12,35	–	38,13	–	5
<i>Концентрат основной цинковой флотации</i>					
0	–	33,61	–	59,89	8
100	–	40,89	–	57,32	5
150	–	42,15	–	60,27	5
200	–	42,33	–	60,33	5
<i>Концентрат перечистной цинковой флотации</i>					
0	–	48,62	–	33,69	5
50	–	52,61	–	30,88	3
100	–	55,32	–	35,09	3
150	–	55,40	–	35,01	3

– обработка концентрата основной коллективной флотации сульфидом натрия и подача в операцию перечистной коллективной флотации слабого собирателя (аэрофлота) приводит к резкому снижению извлечения в коллективный концентрат как меди (до 75,4 %), так и цинка (до 48,7 %);

– применение режима с подогревом пульпы до 40 °С позволяет получить качественный коллективный концентрат с содержанием цинка 18,7 %, но с неудовлетворительным извлечением в него цинка – 64 %; увеличение продолжительности перечистой флотации на 50 % приводит к увеличению извлечения цинка до 80,5 % при одновременном снижении содержания цинка в коллективном концентрате – до 11,3 %;

– использование режима, сочетающего подогрев пульпы до 40 °С и подачу сульфида натрия, позволяет получить коллективный концентрат с содержанием цинка 14,7 % при недостаточно высоком извлечении – 76,9 %; кроме того, для достижения указанного извлечения требуется продолжительное время флотации, отличающееся более чем в 2 раза от базового;

– применение режима, сочетающего подогрев пульпы до 40 °С и подачу гидроксида натрия, позволяет получить качественный коллективный концентрат с содержанием цинка 18,4 %, при недостаточно высоком извлечении в него цинка – 77,7 %.

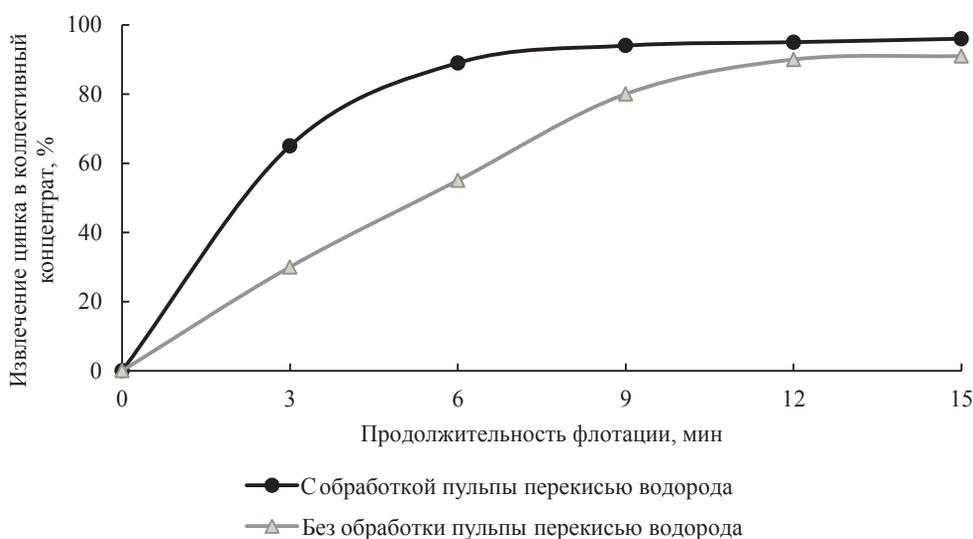


Рисунок 2. Влияние обработки пульпы перекисью водорода на кинетику флотации цинка в коллективный концентрат

Figure 2. Effect of hydrogen peroxide pulp processing on the kinetics of zinc flotation into collective concentrate

Таким образом, результаты исследований показали, что технологии обогащения пирротинсодержащих медно-цинковых руд Тарньерского месторождения, предусматривающие применение во флотационном процессе чистого кислорода, высокой щелочности, селективных собирателей, теплового аэрационного кондиционирования, депрессоров железосодержащих минералов, не позволяют получить медные и цинковые концентраты требуемого качества и извлечения. Основная причина неудовлетворительных результатов – высокая активность пирротина.

В работе [20] представлены результаты изучения мономинеральных фракций теннантита, халькопирита и пирита методами беспенной флотации при использовании бутилового ксантогената, МТФ и пероксида водорода. Авторами отмечено, что подача в процесс флотации пероксида водорода способствует окислению пирита с образованием гидрофильных соединений (гидрофильных пленок гидроксида железа) и, как следствие, снижению его флотационной активности.

Также отмечено, что обработка пульпы H_2O_2 и дальнейшая флотация сульфидов меди бутиловым ксантогенатом способствует увеличению флотационной активности халькопирита.

Пероксидная технология исследована в процессе флотации руды Тарньерского месторождения. Пероксид водорода подавали в перечистную операцию цикла коллективной флотации, в первую и вторую перечистные операции цикла медной флотации и в основную и перечистную операции цикла цинковой флотации. В табл. 1 приведены результаты сравнительных исследований (опыты выполнены в открытом цикле) по отдельным операциям схемы флотационного обогащения медных и цинковых минералов из пирротинсодержащей руды в зависимости от расхода пероксида водорода. Результаты сравнительных исследований свидетельствуют о том, что подача H_2O_2 в процесс флотации приводит к повышению содержания меди и цинка, а также к повышению уровня их извлечения в ряде соответствующих операций обогащения пирротинсодержащей медно-цинковой руды. Оптимальный расход пероксида водорода составляет (от исходной руды): в коллективную перечистную операцию флотации – от 200 до 300 г/т; в первую перечистную медную флотацию – от 50 до 100 г/т; во вторую перечистную медную флотацию – от 50 до 150 г/т; в основную цинковую флотацию – от 100 до 150 г/т; в перечистную цинковую флотацию – от 50 до 100 г/т.

Таблица 2. Сравнительные показатели обогащения руды Тарньерского месторождения, полученные по технологии с подачей и без подачи пероксида водорода
Table 2. Comparative indicators of Tarnier deposit ore beneficiation obtained according to the technology with and without hydrogen peroxide

Показатель	Технология обогащения	
	С подачей пероксида водорода	Без подачи пероксида водорода
Содержание меди в медном концентрате, %	19,33	19,54
Содержание цинка в цинковом концентрате, %	50,14	45,30
Извлечение меди в медный концентрат, %	76,05	70,89
Извлечение цинка в цинковый концентрат, %	65,80	36,27

Обработка пульпы H_2O_2 при расходе 300 г/т с последующей подачей активатора $CuSO_4$ с расходом 100 г/т позволяет увеличить скорость флотации цинковых минералов в коллективной перечистке (рис. 2), сократить продолжительность операции перечистой флотации на 40 %, получить качественный коллективный концентрат (содержание меди – 4–5 %, цинка – 15–16 %) при высоком извлечении в него меди и цинка (90–92 %).

Проведены сравнительные исследования по принципу непрерывного технологического процесса флотации сульфидной пирротинсодержащей медно-цинковой руды по существующей схеме обогащения как с традиционным (фабричным) реагентным режимом, не предусматривающим подачу H_2O_2 , так и с подачей пероксида водорода. По результатам исследований (табл. 2) отмечено, что технология обогащения сульфидной пирротинсодержащей медно-цинковой руды Тарньерского месторождения с подачей пероксида водорода за счет депрессии пирротина и, как следствие, ускорения флотации медных и цинковых минералов в операциях коллективного и селективного циклов позволяет повысить извлечение меди в медный концентрат на 5,16 % и извлечение цинка в цинковый концентрат на 29,53 % при одновременном получении кондиционного цинкового концентрата.

Выводы. Медно-цинковые руды глубоких горизонтов Тарньерского месторождения являются весьма сложным объектом для флотационного обогащения. Сложность обогащения данных руд обусловлена высоким содержанием флотационно активного пирротина.

Ни один из ранее известных и опробованных в настоящей работе способов селективного разделения пирротина, халькопирита и сфалерита, основанных на применении во флотационном процессе: окислительных процессов на основе кислорода; высокой щелочности, создаваемой известью и гидроксидом натрия; селективных собирателей; теплового аэрационного кондиционирования; депрессоров сульфидов железа, – не позволил получить медные и цинковые концентраты требуемого качества при приемлемом извлечении в них целевых металлов. Основная причина неудовлетворительных результатов – высокая флотационная активность пирротина.

Получение кондиционных медного и цинкового концентратов при обогащении пирротинсодержащей медно-цинковой руды глубоких горизонтов Тарньерского месторождения возможно по технологии флотации с применением пероксида водорода. По данной технологии, за счет депрессии пирротина и, как следствие, ускорения флотации медных и цинковых минералов в операциях коллективного и селективного циклов, получен медный концентрат с содержанием меди 19,33 % при ее извлечении 76,05 % (+5,16 % к базовому фабричному режиму) и кондиционный цинковый концентрат с содержанием цинка 50,14 % (+4,84 % к базовому фабричному режиму) при его извлечении 65,80 % (+29,53 % к базовому фабричному режиму).

Федеральной службой по интеллектуальной собственности выдано положительное решение о выдаче патента на разработанную технологию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мамонов С. В., Волкова С. В., Горайчук П. К., Дресвянкина Т. П., Синьков И. С. Особенности вещественного состава медно-цинковых руд глубоких горизонтов Тарньерского месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 3. С. 71–81. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-3-71-81
2. Паньшин А. М., Мальцев В. А., Видуецкий М. Г., Пургин А. П., Гарифулин И. Ф. Применение пневматических флотомашии серии КФМ при обогащении упорных медно-цинковых, медных руд и цинковых кеков // Цветные металлы. 2013. № 11. С. 22–29.
3. Абрамов А. А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. Кн. 2, т. 3. М.: МГТУ, 2005. 470 с.
4. Митрофанов С. И. Селективная флотация. М.: Недра, 1967. 584 с.
5. Григорьева В. А., Бодуэн А. Я. Перспективы переработки упорного золотосульфидного сырья // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2023. № 6. С. 22–34.
6. Способ флотационного обогащения пирротинсодержащих руд: пат. 2475308 Рос. Федерация. № 2011134367/03; заявл. 16.08.2011; опубл. 20.02.2013. Бюл. № 5. 9 с.
7. Бочаров В. А., Игнаткина В. А. Технологические свойства пирротина массивных руд цветных металлов // Цветные металлы. 2015. № 8. С. 29–34.
8. Kelebek S., Tukul C. The effect of sodium metabisulfite and triethylenetetramine system on pentlandite-pyrrhotite separation // International Journal of Mineral Processing. 1999. Vol. 57. No. P. 135–152.
9. Kelebek S., Wells P. F., Fekete S. O. Differential flotation of chalcopyrite, pentlandite and pyrrhotite in Ni-Cu sulphide ores // Canadian Metallurgical Quarterly. 1996. Vol. 35. No. 4. P. 329–336
10. Шепета Е. Д., Рябой В. И. Поиск решений повышения контрастности минеральных поверхностей сульфидных минералов в цикле медной селекции // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья: матер. междунар. конф. «Плаксинские чтения». 2021. С. 312–316.
11. Абдрахманов И. А., Ягудин Р. А., Зимин А. В., Калинин Е. П., Немчинова Л. А. Повышение технологических показателей цинкового цикла на обогатительной фабрике ОАО «Учалинский ГОК» // Горный журнал. 2010. № 10. С. 47–51.
12. Asaki Z., Mori S., Ikeda M., Kondo Y. Oxidation of pyrrhotite particles falling through a vertical tube // Metallurgical Transactions B (Process Metallurgy). 1985. Vol. 16. No. 3. P. 627–638.

13. Efendiyeva S. G., Jafarova S. T., Gahramanova Y. B., Abbasova N. I., Qurbanova L. M. Comparative leaching of filizchay ore and pyrrhotinized products obtained from it in the presence $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ and FeCl_3 // Azerbaijan Chemical Journal. 2022. No. 1. P. 60–63.

14. Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Абрютин Д. В., Каюмов А. А., Каюмова (Корж) В. Р. О регулировании электродных процессов для формирования контрастных технологических свойств сульфидов // ГИАБ. 2022. № 10. С. 39–50.

15. Лесникова Л. С. Повышение степени разделения пентландит-пирротиновых продуктов селективной флотации сульфидных медно-никелевых руд: дисс. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2018. 124 с.

16. Хабарова И. А., Бунин И. Ж. Повышение контрастности физико-химических и флотационных свойств пирротина и пентландита при воздействии высоковольтных наносекундных импульсов // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: матер. XXIV междунар. науч.-техн. конф. 2019. С. 375–379.

17. Хабарова И. А., Бунин И. Ж. Изменение структурных и физико-химических свойств халькопирита и пирротина в условиях электромагнитных импульсных воздействий // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: матер. XXIV междунар. науч.-техн. конф. 2021. С. 91–95.

18. Bunin I. Zh., Khabarova I. A. Effect of high-voltage nanosecond pulses on physical-chemical and technological properties of pyrrhotite and pentlandite // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020 online). Tomsk, 2020. P. 276–279.

19. Bunin I. Zh., Anashkina N. E., Khabarova I. A., Ryazantseva M. V. Effect of atmospheric pressure repetitively pulsed high-voltage nanosecond discharges on physical and chemical properties of sulfide minerals // Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2023: Conference proceedings. 2023. P. 369–378.

20. Игнаткина В. А., Аксенова Д. Д., Каюмов А. А., Ергешева Н. Д. Пероксид водорода в реактивных режимах флотации колчеданных медных руд // ФТПРПИ. 2022. № 1. С. 139–152.

Поступила в редакцию 14 июня 2024 года

Сведения об авторах:

Мамонов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, заведующий отделом обогащения (наука) АО «Уралмеханобр»; заведующий кафедрой обогащения полезных ископаемых Технического университета УГМК. E-mail: mamonov_sv@umbr.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8347-5252>

Гарифулин Игорь Фагамьянович – ведущий научный сотрудник отдела аудита и технологического сопровождения АО «Уралмеханобр». E-mail: garifulin_if@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0005-1557-3973>

Дресвянкина Татьяна Павловна – ведущий научный сотрудник лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья АО «Уралмеханобр». E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0006-2681-2690>

Горайчук Павел Константинович – инженер лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья АО «Уралмеханобр». E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0005-6247-8928>

Синьков Иван Сергеевич – инженер лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья АО «Уралмеханобр». E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0000-8972-466X>

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-64-75

Processing properties of copper-zinc ore of the Tarnier deposit deep horizons

Sergei V. Mamonov^{1,2}, Igor F. Garifulin¹, Tatiana P. Dresviankina¹, Pavel K. Goraichuk¹, Ivan S. Sinkov¹

¹ AO Uralmekhanobr, Ekaterinburg, Russia.

² UMMC Technical University, Verchnyaya Pyshma, Russia.

Abstract

Introduction and research objective. Copper-zinc ore of Tarnier deposit deep horizons is a difficult object for flotation due to high content of pyrrhotite. Literature analysis shows that it is possible to reduce the negative impact pyrrhotite has on non-ferrous metals selective flotation by the following methods: by conditioning pulp with oxygen-containing gas; feeding a combination of weak selective collecting agents and potassium butyl xanthate into the flotation process; using

aeration conditioning of pulp in a strongly alkaline medium at a temperature of 35–40 °C; using different types of energy impacts.

Research relevance. There is currently no unambiguous and universal approach to the problem of selective flotation of non-ferrous metal sulfides and pyrrhotite. Therefore, solving the problem of processing sulfide ores with a high content of pyrrhotite is a very complex and relevant line that requires comprehensive research.

Methods of research consisted of analyzing and summarizing scientific and technical information, conducting experiments using flotation methods and up-to-date FMP-L automated laboratory flotation machines, implementing closed flotation experiments based on the continuous process principle, studying the material composition of concentrates using advanced methods of quantitative chemical and X-ray phase analysis.

Conclusion. It is possible to obtain prime copper and zinc concentrates when processing pyrrhotite-containing copper-zinc ore from the Tarnier deposit deep horizons using flotation technology based on hydrogen peroxide. According to this technology, copper concentrate with a copper content of 19.33% was produced under its extraction of 76.05% (+5.16% to the basic plant mode) as well as the prime zinc concentrate with a zinc content of 50.14% (+4.84% to the basic plant mode) under its extraction of 65.80% (+29.53% to the basic plant mode).

Keywords: Tarnier deposit; copper-zinc ore; pyrrhotite; peroxide; copper concentrate; zinc concentrate.

REFERENCES

1. Mamonov S. V., Volkova S. V., Goraichuk P. K., Dresviankina T. P., Sinkov I. S. Peculiarities of material composition of copper-zinc ores of deep horizons of the Tarnier deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 3: 71–81 (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2024-3-71-81
2. Panshin A. M., Maltsev V. A., Viduetskii M. G., Purgin A. P., Garifulin I. F. Use of pneumatic flotation machines KFM during the concentration of refractory copper-zinc ores, copper ores and zinc cakes. *Tsvetnye metally = Non-Ferrous Metals Journal*. 2013; 11: 22–29. (In Russ.)
3. Abramov A. A. *The technology of processing and beneficiating the ores of non-ferrous metals*. Book 2, vol. 3. Moscow: MSMU Publishing; 2005. (In Russ.)
4. Mitrofanov S. I. *Selective flotation*. Moscow: Nedra Publishing; 1967. (In Russ.)
5. Grigoreva V. A., Boduen A. Ia. Prospects for refractory gold-sulfide ore processing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023; 29(6): 22–34. (In Russ.) Available from: doi: 10.17073/0021-3438-2023-6-22-34
6. Viduetskii M. G., Maltsev V. A., Garifulin I. F., Sokolov V. M., Topaev G. D., Bondarev A. A. *A method of flotation beneficiation for pyrrhotite-containing ores*. Patent RF no. 2475308; 2013. (In Russ.)
7. Bocharov V. A., Ignatkina V. A. Technological properties of pyrrhotite of massive non-ferrous metal ores. *Tsvetnye metally = Non-Ferrous Metals Journal*. 2015; 8: 29–34. (In Russ.)
8. Kelebek S., Tukul C. The effect of sodium metabisulphite and triethylenetetramine system on pentlandite-pyrrhotite separation. *International Journal of Mineral Processing*. 1999; 57: 135–152.
9. Kelebek S., Wells P. F., Fekete S. O. Differential flotation of chalcopyrite, pentlandite and pyrrhotite in Ni-Cu sulphide ores. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 1996; 35(4): 329–336
10. Shepeta E. D., Riaboi V. I. Search for an increase in the contrast of mineral surfaces of sulfide minerals in the cycle of copper selection. In: *Problems of comprehensive and environmentally safe processing of natural and technogenic mineral raw materials: Proc. of the Internat. Conf. Plaksin readings 2021*. p. 312–316. (In Russ.)
11. Abdrakhmanov I. A., Iagudin R. A., Zimin A. V., Kalinin E. P., Nemchinova L. A. Increase of technological parameters of zinc cycle at concentration plant of “Uchalinsky Mining and Concentrating Plant”. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2010; 10: 47–51. (In Russ.)
12. Asaki Z., Mori S., Ikeda M., Kondo Y. Oxidation of pyrrhotite particles falling through a vertical tube. *Metallurgical Transactions B (Process Metallurgy)*. 1985; 16(3): 627–638.
13. Efendiyeva S. G., Jafarova S. T., Gahramanova Y. B., Abbasova N. I., Qurbanova L. M. Comparative leaching of filizchay ore and pyrrhotitized products obtained from it in the presence $Fe_2(SO_4)_3$ and $FeCl_3$. *Azerbaijan Chemical Journal*. 2022; 1: 60–63.
14. Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Abriutin D. V., Kaiumov A. A., Kaiumova (Korz) V. R. Adjustment of electrode processes to build up contrast processing characteristics of sulfides. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2022; 10: 39–50. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236_1493_2022_10_0_39

15. Lesnikova L. S. *Increasing the ratio of separation of pentlandite-pyrrhotite products of sulfide copper-nickel ores selective flotation: PhD in Eng. Diss.* Irkutsk; 2018. (In Russ.)

16. Khabarova I. A., Bunin I. Zh. Contrast enhancement of physico-chemical and flotation properties of pyrrhotite and pentlandite on exposure to high-voltage nanosecond pulses. In: *Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials: Proc. 14th International Sci.-Tech. Conf.* 2019. p. 375–379. (In Russ.)

17. Khabarova I. A., Bunin I. Zh. Changing structural and physical-chemical properties of chalcopyrite and pyrrhotite in the conditions of electromagnetic impulse. In: *Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials: Proc. 14th International Sci.-Tech. Conf.* 2021. p. 91–95. (In Russ.)

18. Bunin I. Zh., Khabarova I. A. Effect of high-voltage nanosecond pulses on physical-chemical and technological properties of pyrrhotite and pentlandite. In: *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2020 online)*. Tomsk, 2020. P. 276–279.

19. Bunin I. Zh., Anashkina N. E., Khabarova I. A., Ryazantseva M. V. Effect of atmospheric pressure repetitively pulsed high-voltage nanosecond discharges on physical and chemical properties of sulphide minerals. In: *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2023: Conference proceedings*. 2023. P. 369–378.

20. Ignatkina V. A., Aksenova D. D., Kaiumov A. A., Ergesheva N. D. Hydrogen peroxide in reagent regimes in copper sulphide ore flotation. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2022; 1: 139–152. (In Russ.)

Received 14 June 2024

Information about the authors:

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

Igor F. Garifulin – leading researcher, Department of Audit and Engineering Support, AO Uralmekhanobr. E-mail: garifulin_if@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0005-1557-3973>

Tatiana P. Dresviankina – leading researcher, Laboratory of Non-Ferrous Metals and Technogenic Raw Materials Beneficiation, AO Uralmekhanobr. E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0006-2681-2690>

Pavel K. Goraichuk – engineer, Laboratory of Non-Ferrous Metals and Technogenic Raw Materials Beneficiation, AO Uralmekhanobr. E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0005-6247-8928>

Ivan S. Sinkov – engineer, Laboratory of Non-Ferrous Metals and Technogenic Raw Materials Beneficiation, AO Uralmekhanobr. E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0000-8972-466X>

Для цитирования: Мамонов С. В., Гарифулин И. Ф., Дресвянкина Т. П., Горайчук П. К., Синьков И. С. Особенности технологических свойств медно-цинковых руд глубоких горизонтов Тарньерского месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 5. С. 64–75. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-64-75

For citation: Mamonov S. V., Garifulin I. F., Dresviankina T. P., Goraichuk P. K., Sinkov I. S. Processing properties of copper-zinc ore of the Tarnier deposit deep horizons. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 5: 64–75 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-64-75