

УДК 622.765

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ РУД КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА



Е. В. ЧЕРНОУСЕНКО,
научный сотрудник,
chern@goi.kolasc.net.ru



Т. Н. ПЕРУНКОВА,
ведущий технолог



А. В. АРТЕМЬЕВ,
научный сотрудник



Г. В. МИТРОФАНОВА,
ведущий научный сотрудник,
канд. техн. наук

Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

Введение

На Кольском п-ве сосредоточены месторождения важнейших видов минерального сырья, обеспечивающих потребность государства в цветных, черных и редких металлах, фосфатах. В технологиях переработки руд цветных металлов, фосфорсодержащих руд флотационный процесс играет ведущую роль. Однако естественное истощение сырьевой базы обуславливает необходимость вовлечения в переработку руд более бедных, тонковкрапленных, переменного минерального состава. Традиционные схемы переработки и реагентные режимы оказываются недостаточно эффективными при обогащении такого вида сырья, что предопределяет необходимость поиска новых технологических решений [1, 2] и расширения ассортимента применяемых флотореагентов.

В Горном институте КНЦ РАН работы в направлении совершенствования флотационных технологий ведут со дня его основания.

Проведенные исследования и их результаты

Одним из объектов исследований являются сульфидные медно-никелевые руды Печенгского рудного поля, перерабатываемые АО «Кольская ГМК». При довольно стабильном содержании полезных компонентов (ПК) в руде, поступающей в настоящее время на обогатительную фабрику (0,5–0,6 % Ni и ~0,2 % Cu), прослеживается увеличение доли труднообогатимых тонковкрапленных руд. При флотационном обогащении такого сырья наблюдается снижение технологических показателей [3].

Представлены результаты технологических исследований бедного труднообогатимого никель- и фосфорсодержащего сырья. Показано, что оптимизация режима измельчения труднообогатимой тонковкрапленной медно-никелевой руды и использование реагентов-диспергаторов позволяет повысить извлечение цветных металлов в концентрат при снижении их содержания в хвостах флотации. Предложены новые комплексообразующие собиратели с гидроксаматной и гидразидной группировками и реагентные режимы на их основе для флотации сульфидных руд цветных металлов. Показана возможность их использования взамен реагента азрофлот с улучшением технологических показателей. Установлена высокая эффективность применения реагентов на основе полиалкилбензолсульфонатов и гидроксамовых кислот при обратной флотации нефелина из апатит-нефелиновой руды с высоким содержанием титансодержащих минералов. Показана высокая эффективность применения анионного полиакриламидного флокулянта в технологиях водоочистки на обогатительных фабриках, перерабатывающих апатит-нефелиновые руды.

Ключевые слова: флотация, медно-никелевые руды, апатит-нефелиновые руды, водоочистка, комплексообразующие собиратели, флокулянты.

DOI: 10.17580/gzh.2020.09.09

Исследования, проведенные на пробе тонковкрапленной медно-никелевой руды, характеризующейся мелкой первичной вкрапленностью (0,4–0,6 мм), существенной долей труднораскрываемой эпигенетической вкрапленности, значительной серпентинизацией и замещением сульфидных вкрапленников магнетитом, показали целесообразность более тонкого измельчения на стадии подготовки руды к флотации. Традиционный режим измельчения, предполагающий содержание класса –0,071 мм в готовом продукте на уровне 80 %, характеризуется невысокой степенью раскрытия сульфидных минералов (около 60 %). Показано, что увеличение содержания класса –0,071 мм до 97 % (88 % класса –0,045 мм) в 1,5 раза повышает степень раскрытия сульфидов [4]. Такое изменение режима измельчения обеспечило повышение извлечения никеля в коллективный черновой концентрат с 70 до 78 % при снижении содержания в хвостах с 0,18 до 0,149 %.

Известно, что флотация тонкоизмельченного минерального сырья сопряжена со снижением селективности и эффективности процесса разделения [5]. Среди методов, позволяющих оптимизировать флотацию тонких частиц, рассматривают предварительную флокуляцию, изменение гидродинамических условий флотации, использование реагентов-диспергаторов [6, 7]. Для исследуемой пробы медно-никелевой руды была показана эффективность использования в качестве диспергаторов карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ), гексаметафосфата натрия (ГМФ) и жидкого стекла (ЖСт), применение которых обеспечило дополнительное повышение извлечения цветных металлов не только в черновой, но и в готовый концентрат при проведении перечистных операций [2].

Для труднообогатимых руд особенно актуальным становится поиск новых собирателей. Перспективным направлением в области флотации сульфидных руд цветных металлов является использование собирателей с комплексообразующими свойствами [8, 9]. К таковым относятся алкил- и арилгидроксамовые кислоты, успешно использованные при флотации окисленных медных руд [10], гидразиды карбоновых кислот, предложенные для экстракционного и флотационного извлечения цветных металлов [11].

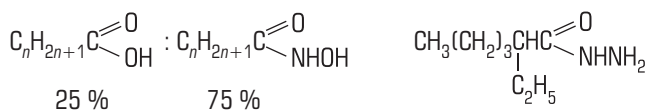
На пробе труднообогатимой тонковкрапленной медно-никелевой руды были опробованы две разновидности комплексообразующих реагентов с гидроксаматной и гидразидной группировками – моно- и бифункциональные.

I – реагент ГК – смесь алкил(C₇-C₈)гидроксамовых и алкил(C₇-C₈)карбоновых кислот, взятых в массовом соотношении 3:1 (аналог реагента ИМ-50). Синтез алкилгидроксамовых кислот осуществлен по известной методике [12];

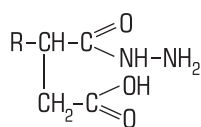
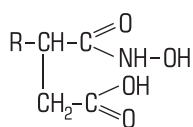
II – реагент Г-18i – гидразид 2-этилгексановой кислоты синтезирован и предоставлен для исследований лабораторией органической комплексообразующих реагентов Института технической химии УрО РАН;

III – реагент SLR-1 – моно-N-гидроксиамид 2-этилгексенлянтранной кислоты;

IV – реагент SLR-2 – моногидразид 2-этилгексенлянтранной кислоты – SLR-2 (где R – 2-этилгексенил):

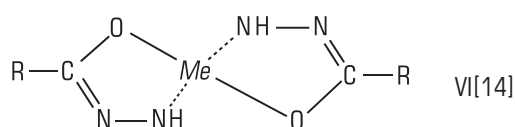
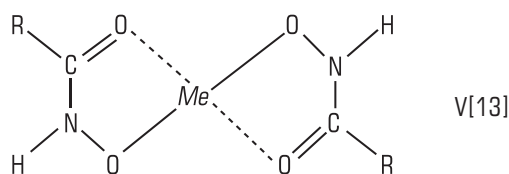


где n = 7,8 I



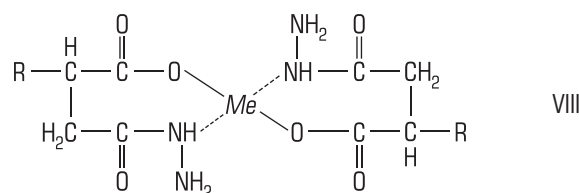
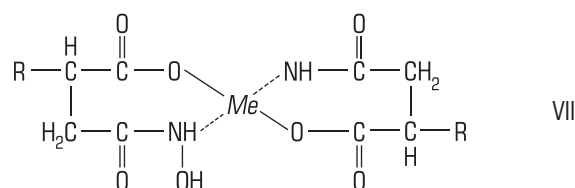
Реагенты SLR-1 и SLR-2 были синтезированы путем реакции соответствующего алкенилянтранного ангидрида с азотсодержащим основанием.

Атомы O и N в функциональных группировках этих реагентов обеспечивают возможность образования хелатных комплексов с переходными металлами, в том числе с Ni и Cu. Согласно литературным данным, реализуется следующая структура образуемых в объеме раствора комплексов монофункциональных производных (V и VI):



где Me – Cu или Ni.

Структура комплексных соединений бифункциональных реагентов с ионами Ni и Cu была установлена на основе ИК-спектров (VII и VIII):



где Me – Cu или Ni.

Было показано, что оптимальный диапазон pH для флотации комплексообразующими реагентами находится в щелочной области. Флотационные опыты проводили в открытом цикле, включающем основную и контрольную флотации, на руде, измельченной до крупности 97 % класса –0,071 мм [2]. Необходимое значение pH создавали с помощью кальцинированной соды (Na₂CO₃), подаваемой в измельчение. В качестве активатора сульфидных минералов использовали медный купорос в количестве 30 г/т. Ксантогенат в количестве 130 г/т подавали в измельчение и 45 г/т – в контрольную флотацию.

Полученные результаты показали, что комплексообразующие реагенты способны обеспечить получение сравнимых показателей по извлечению ценных компонентов в черновой концентрат. Собственные пенообразующие свойства этих реагентов позволяют проводить флотацию без дополнительных реагентов-вспенивателей.

Для реагента Г-18i требуется несколько больший суммарный расход реагентов (табл. 1), но при его использовании в последующих перечисленных операциях для получения концентрата

Таблица 1. Показатели флотации труднообогатимой руды с получением чернового концентрата с использованием азрофлота (Af) и монофункциональных реагентов (Kx)

Продукт	Выход	Содержание, %		Извлечение, %		Расход реагентов, г/т
		Ni	Cu	Ni	Cu	
Черновой концентрат	35,93	1,15	0,51	81,10	86,91	Kx – 175 Af – 123
Хвосты	64,07	0,150	0,043	18,90	13,09	
Исходный	100	0,509	0,211	100	100	
Черновой концентрат	38,41	1,08	0,465	81,64	86,82	Kx – 149 ГК – 149
Хвосты	61,59	0,151	0,044	18,36	13,18	
Исходный	100	0,507	0,206	100	100	
Черновой концентрат	32,52	1,26	0,56	80,58	86,74	Kx – 175 Г-18i – 136
Хвосты	67,48	0,146	0,041	19,42	13,26	
Исходный	100	0,507	0,209	100	100	

Таблица 2. Показатели флотации труднообогатимой руды с получением черного концентрата с использованием азрофлота и бифункциональных реагентов

Продукт	Выход	Содержание, %		Извлечение, %		Расход реагентов, г/т
		Ni	Cu	Ni	Cu	
Черновой концентрат	40,02	1,00	0,432	82,49	87,85	Kx – 175 Af – 158
Хвосты	59,98	0,141	0,040	17,51	12,15	
Исходный	100	0,483	0,197	100	100	
Черновой концентрат	35,71	1,11	0,470	81,05	85,82	Kx – 175 SLR-1 – 158
Хвосты	64,29	0,144	0,042	18,95	14,18	
Исходный	100	0,489	0,190	100	100	
Черновой концентрат	39,98	0,993	0,427	83,03	87,52	Kx – 175 SLR-2 – 158
Хвосты	60,02	0,135	0,040	16,97	12,48	
Исходный	100	0,478	0,195	100	100	

с содержанием ~7 % Ni требуется меньший расход депрессора КМЦ. Реагент ГК при флотации данной пробы медно-никелевой руды показал высокие пенообразующие свойства, что обусловило повышение выхода черного концентрата и, как следствие, снизило эффективность перечистных операций.

При сравнении бифункциональных реагентов видно (табл. 2), что для реагента SLR-2 характерна более высокая селективность к никельсодержащим минералам в сравнении с SLR-1 и азрофлотом. По результатам флотационных испытаний были определены наиболее эффективные соотношения собирателей, что позволило получить прирост извлечения никеля в готовый концентрат и снижение его содержания в хвостах флотации (рис. 1).

Таким образом, азотсодержащие комплексообразующие реагенты можно рассматривать как перспективные собиратели для флотации сульфидных руд цветных металлов, использование которых взамен азрофлота позволяет повысить извлечение никеля в концентрат.

Апатитсодержащие руды Кольского п-ва являются главной сырьевой базой России для производства фосфорсодержащих минеральных удобрений. Высокая потребность промышленности в этом сырье определяет необходимость рассмотрения перспективы вовлечения в переработку месторождений, характеризующихся низким содержанием ПК. Флотационное обогащение такого типа руд требует применение новых, селективно действующих реагентов-собирателей, депрессоров и т. п. [15, 16]. Так, в качестве реагентов для флотации апатита разными исследователями были предложены реагенты из класса производных аминокислот [17], алкиларилсульфонатов [18], оксиэтилированных алкиловых эфиров фосфорной кислоты [19]. В качестве перспективного объекта для получения апатита рассматривается апатит-нефелиновая руда месторождения

Партомчорр. Особый интерес представляет собой руда верхних горизонтов этого месторождения, характеризующаяся высоким содержанием сфена и титаномагнетита. В результате ранее проведенных исследований была показана возможность комплексного обогащения апатит-нефелиновых руд с выделением пяти основных минералов, входящих в состав руды, в отдельные концентраты [20]. Однако повышенное содержание темноцветных минералов в руде верхних горизонтов обуславливает необходимость введения в реагентные режимы флотационных циклов технологической схемы более селективных собирателей, обеспечивающих максимальную эффективность разделения минеральных комплексов.

Собиратели с различными функциональными группировками испытали в лабораторных флотационных опытах на пробе апатит-сфеновой руды (6,5 % P₂O₅) месторождения Партомчорр, минеральный состав которой приведен в табл. 3. Схема обогащения включала последовательное выделение апатита, титаномагнетита, нефелина и концентрата темноцветных минералов с последующим разделением на сфеновый и эгириновый. Флотационные опыты проводили с использованием технической воды (содержание ионов Ca²⁺ 8–10 мг/л) апатит-нефелиновой обогатительной фабрики на руде, измельченной до содержания класса –0,071 мм ~45,5 %. Для выделения сильно- и слабомагнитных минералов использовали магнитную сепарацию при различной напряженности магнитного поля.

Ввиду низкого содержания в руде P₂O₅ для флотации апатита совместно с талловыми маслами использовали селективно действующий реагент Phospholan PE 65 (AkzoNobel, ныне Nouryon). Такой реагентный режим позволил получить в замкнутом цикле, имитирующем фабричные условия проведения флотации, апатитовый концентрат с содержанием 39,25 % P₂O₅ при извлечении 88,6 %.

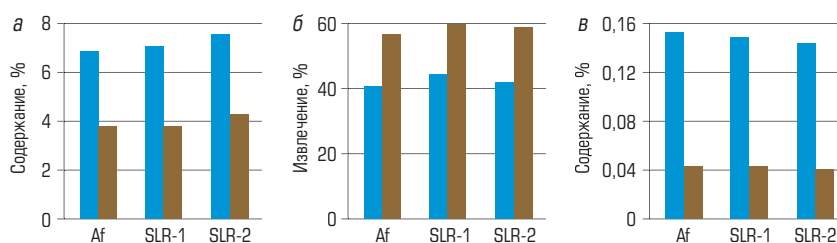


Рис. 1. Показатели получения концентрата Ni (1) и Cu (2) при использовании реагентов азрофлота и комплексообразующих реагентов:

а – содержание ПК в концентрате; б – извлечение ПК в концентрат; в – содержание ПК в хвостах

Таблица 3. Минеральный состав пробы апатит-сфеновой руды месторождения Партомчорр, % (масс.)

Апатит	Нефелин	Полевые шпаты	Пироксены*	Сфен	Титаномагнетит	Ильменит	Слюда**	Другие***
16,5	35,5	4	16	15,5	9,5	1	1,5	0,5

* С учетом небольшого количества амфиболов.
 ** Представлена преимущественно лепидомеланом и биотитом с преобладанием первого.
 *** Гидрослюда, цеолиты, кальцит, лампрофиллит; эвдиалит, энigmatит – единичные зерна.

После выделения магнитной сепарацией титаномагнетита проводили обратную флотацию нефелина с концентрацией темноцветных минералов в пенном продукте. С целью повышения селективности разделения минеральных комплексов по сравнению с традиционно используемой собирательной смесью (СС): 30 % хвойного таллового масла (ХТМ) + 70 % листового таллового масла (ЛТМ) были испытаны реагентные режимы с использованием смеси из 60 % СС и 40 % ПАБСК (полиалкилбензолсульфокислота), а также смеси из 90 % реагента ИМ-50 (смесь алкилгидроксамовых и алкилкарбоновых кислот) и 10 % ДТМ (дистиллированное талловое масло). Во всех опытах для создания оптимального значения pH ($pH = 10-11$) использовали NaOH, для активации темноцветных минералов – 25 г/т хлорида кальция ($CaCl_2$). Питание нефелиновой флотации характеризовалось содержанием, %: 0,23 P_2O_5 ; 16,60 $Al_2O_{3\text{общ}}$; 4,97 Fe_2O_3 ; 1,98 FeO; 8,99 TiO_2 .

Результаты испытаний, проведенных в открытом цикле с применением основной, контрольной флотаций и двух перечистных операций пенного продукта, показали (табл. 4), что использование реагентов ПАБСК и ИМ-50 обеспечивает более полное разделение минералов. Их селективное действие и более высокая прочность закрепления на темноцветных минералах позволяют минимизировать потери темноцветных минералов в перечистных операциях. При практически одинаковом во всех реагентных режимах извлечении TiO_2 в суммарный пенный продукт основной и контрольной флотаций (~93,5 %) использование ПАБСК и ИМ-50 обеспечивает после цикла перечистных операций более высокое качество коллективного концентрата при более высоком извлечении (см. табл. 4). При этом применение стандартной смеси талловых масел (СС) приводит к значительным потерям нефелина с пенным продуктом основной флотации.

Дальнейшая доводка камерного продукта нефелиновой флотации в сильном магнитном поле при напряженности $6,5 \cdot 10^5$ А/м обеспечила получение нефелинового концентрата с содержанием 28,6–28,8 % Al_2O_3 с выходом около 84 % от операции.

Сфеновый концентрат был получен при разделении коллективного концентрата темноцветных минералов методом магнитной сепарации. При напряженности магнитного поля $6,5 \cdot 10^5$ А/м в магнитную фракцию переходит эгирин (8,48 % TiO_2 ; 11,14 % Fe_2O_3 ; 4,62 % FeO). На второй стадии сепарации при более высокой напряженности магнитного поля $9,8 \cdot 10^5$ А/м в магнитной фракции концентрируется сфен (36,23 % TiO_2). Такое высокое качество сфенового концентрата, полученного с использованием во флотационном цикле селективно действующих собирателей, позволяет применять его для последующей переработки, исключая стадию химической очистки.

На обогатительных фабриках, в том числе по переработке апатит-нефелиновых руд, применяют системы оборотного

Таблица 4. Результаты флотационного разделения нефелина и темноцветных минералов в открытом цикле

Продукт	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %			Расход собирателя, г/т
		Al_2O_3	TiO_2	$Fe_{\text{общ}}$	Al_2O_3	TiO_2	$Fe_{\text{общ}}$	
Пенный продукт II перечистки	32,9	5,26	18,11	7,66	19,5	67	45,6	СС – 550
Камерный продукт	26,9	25,42	2,16	3,73	41,5	6,5	18,1	
Пенный продукт II перечистки	32,3	2	22,14	8	5,2	79,7	46,9	СС – 300 ПАБСК – 200
Камерный продукт	41,3	26,13	1,44	3,21	67,6	6,6	24,0	
Пенный продукт II перечистки	33,1	3,42	20,15	7,33	7,7	85,2	49,6	ИМ-50 – 1000 ДТМ – 100
Камерный продукт	50,1	24,92	1,1	3,67	78,4	6,5	34,7	

Таблица 5. Характеристика слива сгустителя, скрубберной и оборотной вод (на примере ОФ «Олений Ручей»)

Компонент	Содержание Ca^{2+} , мг/л	Содержание взвешенных частиц, г/л
Слив сгустителя	52,2	27,363
Скрубберная вода	11,7	0,728
Оборотная вода	13,2	0,853

водоснабжения. Для очистки от взвешенных частиц и стабилизации ионного состава оборотной воды используют хвостохранилища, занимающие большие площади. Совершенствование технологий водоподготовки является актуальной задачей, решение которой носит не только технологический, но и природоохранный характер. Перспективным направлением решения этого вопроса является повторное использование фабричных вод (без сброса в хвостохранилище) после их предварительной очистки [21].

В процессе многочисленных исследований показано, что основными примесями, влияющими на технологические показатели получения кондиционного апатитового концентрата, являются взвешенные частицы и ионы кальция [22].

Из данных табл. 5 видно, что наиболее «загрязненным» является слив сгустителя апатитового концентрата, что определило выбор этого объекта для разработки способа водоочистки.

Для очистки сточных вод в промышленности широко используют органические реагенты-флокулянты (анионные, катионные и неионогенные) [23], выбор которых зависит от характеристики дисперсной фазы и состава дисперсной среды.

Минералогический анализ твердой фазы слива сгустителя показал, что на 90 % он представлен шламами апатита. Ввиду этого выбор оптимального типа флокулянта проводили на основе оценки его взаимодействия с поверхностью апатита. В качестве потенциальных реагентов были рассмотрены реагенты компании SNF – анионный (AN 956 SH) и катионный (FO 4700 SH) полиакриламиды с высокой степенью ионности.

В процессе обогащения частицы минерала взаимодействуют с различными реагентами и ионами, присутствующими в оборотной воде. Кислотно-основные свойства поверхности частиц апатита в присутствии в растворе катионов кальция и железа

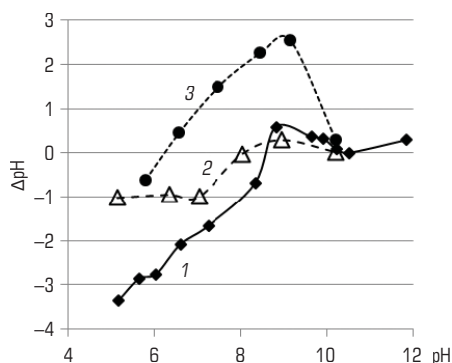


Рис. 2. Суспензионный эффект дисперсии апатита (1) в присутствии 40 мг/л Ca^{2+} (2) и 40 мг/л Fe^{2+} (3)

оценивали по смещению изoadсорбционной точки (ИАТ). Положение ИАТ определяли по величине суспензионного эффекта ($\Delta\text{pH} = 0$) при различных значениях pH среды [24].

Положение ИАТ апатита при $\text{pH} = 8,7$ говорит о преобладании на поверхности минерала основных центров. Катионы кальция и железа (или их заряженные гидроксокомплексы) (рис. 2) взаимодействуют с основными центрами поверхности апатита, смещая ИАТ в сторону кислых значений pH. Адсорбированные на поверхности ионы металлов создают предпосылки для взаимодействия частиц апатита с анионным флокулянт.

Измерение вязкости раствора флокулянтов при различных значениях pH показало, что в щелочной области ($\text{pH} = 7,5\div 10$) анионный флокулянт находится в наиболее ионизированном состоянии, т. е. его молекула максимально развернута из-за взаимного отталкивания одинаково заряженных частей молекулы. Это способствует эффективной мостиковой флокуляции в диапазоне значений pH, соответствующих характеристикам фабричных вод. Для катионного флокулянта более эффективной оказывается кислая область pH [25].

Высокая эффективность анионного флокулянта подтверждена результатами осветления модельной суспензии апатита в оборотной воде реагентами AN 956 SH и FO 4700 SH при расходе 0,3 мг/л. Преимущество анионного флокулянта в большей степени проявляется на первых минутах осветления, степень очистки воды от взвешенных веществ при его использовании составила 95,5 % (рис. 3).

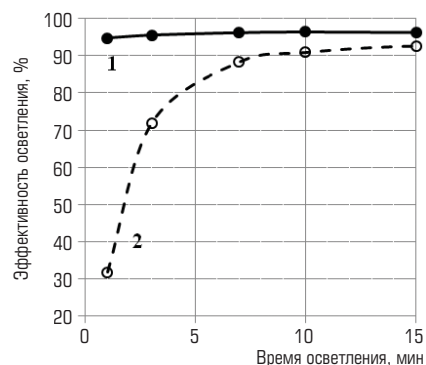


Рис. 3. Эффективность осветления модельной суспензии апатита анионным (1) и катионным (2) флокулянтами

Заключение

Проведены детальные исследования технологических свойств бедных и труднообогатимых медно-никелевых и апатит-нефелиновых руд Кольского п-ва, выполнен поиск новых эффективных реагентов и реагентных режимов.

Разработаны технологические решения по повышению эффективности флотационного обогащения тонковкрапленных медно-никелевых руд, включающие снижение крупности измельчения и использование реагентов-диспергаторов.

В качестве собирателей для флотации сульфидных медно-никелевых руд предложены моно- и бифункциональные комплексобразующие реагенты с гидроксаматной и гидразидной функциональными группировками. Показана перспективность их использования в сочетании с ксантогенатом взамен реагента азрофлот.

Разработаны реагентные режимы флотации темноцветных минералов в цикле нефелиновой флотации в схеме обогащения апатит-сфеновой руды месторождения Партомчорр. Показано, что использование реагентов ПАБСК и ИМ-50 обеспечивает высокую селективность разделения минеральных комплексов.

Обоснована и экспериментально подтверждена эффективность использования анионного полиакриламидного флокулянта для очистки технологических вод обогатительных фабрик, перерабатывающих апатит-нефелиновые руды.

Предложенные технологические решения и реагентные режимы позволяют повысить эффективность работы предприятий, перерабатывающих медно-никелевые и апатит-нефелиновые руды.

Библиографический список

1. Терещенко С. В., Марчевская В. В., Шибеева Д. Н., Аминов В. Н. Ресурсосберегающая технология обогащения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива // Обогащение руд. 2018. № 3. С. 32–38. DOI: 10.17580/or.2018.03.06
2. Черноусенко Е. В., Алексеева С. А., Рухленко Е. Д., Митрофанова Г. В. Перспективы вовлечения в переработку труднообогатимых медно-никелевых руд и складированных отходов // Горный журнал. 2020. № 3. С. 45–50. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.08
3. Лихачева С. В., Нерадовский Ю. Н., Васильева О. А. Мониторинг природных технологических структурно-текстурных особенностей медно-никелевых руд Печенги в процессе обогащения на ОФ АО «Кольская ГМК» // Цветные металлы и минералы: сб. докл. Девятого междунар. конгресса. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2017. С. 1251–1253.
4. Черноусенко Е. В., Нерадовский Ю. Н., Каменева Ю. С., Вишнякова И. Н., Митрофанова Г. В. Повышение эффективности флотационного обогащения труднообогати-

5. Collins Mudenda, Bupe G. Mwanza, M'hango Kondwani. Analysis of the Effects of Grind Size on Production of Copper Concentrate: A Case Study of Mining Company in Zambia // International Conference on Chemical Processes and Green Energy Engineering. – Harare, 2015. P. 74–79.
6. Вигдергауз В. Е., Шрадер Э. А., Саркисова Л. М., Кузнецова И. Н. Интенсификация флотации тонких классов сфалерита с применением флокулянтов // ГИАБ. 2013. № 3. С. 150–154.
7. Zhou Weiguang, Ou Leming, Feng Qiming, Zhang Guofan, Lu Yiping et al. Flotation of ultra-fine scheelite particles assisted by nanobubbles // Proceedings of the XXVIII International Mineral Processing Congress. – Quebec, 2016.
8. Zhou P., Lewis A., Nordberg H. Tecflore-TM – novel chemistry for new sulfide collectors // XXIX International Mineral Processing Congress. – Moscow, 2018.

9. Гусев В. Ю., Радусhev А. В., Чеканова Л. Г., Байгачёва Е. В., Манылова К. О., Гоголишвили В. О. Азопроизводные фенола и 1-нафтаола как собиратели для флотации сульфидных руд цветных металлов // Журнал прикладной химии. 2018. Т. 91. № 4. С. 503–512.
10. Daixiong Chen, Jun Xiao, Chunming He, Xiaodong Li. Copper oxide flotation using the combined collectors of benzohydroxamic acid and butyl xanthate // Proceedings of the XXVIII International Mineral Processing Congress. – Quebec, 2016.
11. Тимошенко Л. И., Чеканова Л. Г., Маркосян С. М., Байгачева Е. В. Реагенты класса гидразидов для флотационного обогащения вкрапленных медно-никелевых руд // Химическая технология. 2014. Т. 15. № 8. С. 488–492.
12. Пилипенко А. Т., Зулфигаров О. С. Гидроксамовые кислоты. – М.: Наука, 1989. – 311 с.
13. Радусhev А. В., Чеканова Л. Г., Гусев В. Ю. Гидразиды и 1,2-диацилгидразины. Получение, свойства и применение в процессах концентрирования металлов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 140 с.
14. Rappoport J. F., Liebman J. F. (Eds.). The Chemistry of Hydroxylamines, Oximes and Hydroxamic Acids. Patai Series: The Chemistry of Functional Groups. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2009. Part. 1. – 1078 p.
15. Корнеева У. В., Марчевская В. В. Проблемы обогащения апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений // Будущее Арктики начинается здесь: сб. матер. II Всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Апатиты: Изд-во филиала МАГУ в г. Апатиты, 2018. С. 53–62.
16. Jafari M., Chehreh Chelgani S., Pourghahramani P., Ebadi H. Measurement of collector concentrations to make an efficient mixture for flotation of a low grade apatite // Measurement. 2018. Vol. 121. P. 19–25
17. Gorochovceva N., Klingberg A., Lannefors J. Development of anionic collectors for direct flotation of apatite from complex siliceous ores with a focus on sustainability // Proceedings of the XXVII International Mineral Processing Congress. – Santiago, 2014. P. 68–78.
18. Иванова В. А., Гершенкоп А. Ш., Шлыкова Г. А., Мухина Т. Н. Применение полиалкилбензолсульфонатов для флотации апатита и выделения алюмосиликатных концентратов // Проблемы освоения минерально-сырьевых ресурсов Кольского региона и использования подземного пространства для захоронения отходов. – Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1999. С. 182–190.
19. Лавриненко А. А., Шрадер Э. А., Харчиков А. Н., Кунилова И. В. Флотиремость апатита из бадделеит-apatит-магнетитовой руды // ФТПРПИ. 2013. № 5. С. 157–165.
20. Гершенкоп А. Ш., Улезко А. А., Алейников Н. А., Ефимова Н. С. Комплексное обогащение апатито-нефелиновой руды Партомчоррского месторождения // Комплексное обогащение фосфорсодержащего сырья. – Апатиты, 1977. С. 39–44.
21. Баранов В. Ф. Системы сгущения и складирования отвальных хвостов (обзор мировой практики) // Обогащение руд. 2009. № 3. С. 43–48.
22. Голованов В. Г., Петровский А. А., Брыляков Ю. Е. Внедрение оборотного водоснабжения на АНОФ-2 // Горный журнал. 1999. № 9. С. 48–50.
23. Гандурина Л. В. Очистка сточных вод с применением синтетических флокулянтов. – М.: Изд-во ЗАО «ДАР/ВОДГЕО», 2007. – 198 с.
24. Иконникова К. В., Иконникова Л. Ф., Минакова Т. С., Саркисов Ю. С. Теория и практика рН-метрического определения кислотно-основных свойств поверхности твердых тел: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2011. – 85 с.
25. Ишанходжаева М. М., Мхитарян Е. Л. Физическая химия. Полиэлектролиты. – СПб.: СПбГУРП, 2015. – 40 с. [ГЖ](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 9, pp. 66–72
DOI: 10.17580/gzh.2020.09.09

Improvement of flotation technologies for the Kola Peninsula ore

Information about authors

E. V. Chernousenko¹, Researcher, chern@goi.kolasc.net.ru

T. N. Perunkova¹, Leading Technologist

A. V. Artemiev¹, Researcher

G. V. Mitrofanova¹, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences

¹Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract

The paper presents the results of technological studies on poor and rebellious nickel and phosphorus mineral raw materials.

The authors have found that optimized regime of rebellious finely disseminated copper–nickel processing with reagents–dispersers allows increasing recovery of nonferrous metals into concentrate and decreasing their content in flotation tailings. The authors propose new complexing collectors with hydroxamate and hydrazide groupings and, on their basis, the reagent regimes for flotation of sulphide nonferrous ore. The potential application of these reagents instead of Aeroflot with improvement of technological parameters has been shown.

The authors have defined high efficiency of the reagents based on polyalkyl benzene sulfonates and hydroxamic acids in reverse flotation of nepheline from apatite–nepheline ore with a high content of titanium-bearing minerals. The specific action of these reagents and the strength of the dark-colored mineral attachment ensure high selectivity of separation.

The paper demonstrates high efficiency of anionic polyacrylamide flocculant in water treatment technologies at apatite–nepheline dressing plants.

Keywords: flotation, copper–nickel ore, apatite–nepheline ore, water treatment, complexing collectors, flocculants.

References

1. Tereshchenko S. V., Marчевskaya V. V., Shibaeva D. N., Aminov V. N. Resource-saving dressing technology for apatite-nepheline ores of the Khibiny massif. *Obogashchenie Rud.* 2018. No. 3. pp. 32–38. DOI: 10.17580/or.2018.03.06
2. Chernousenko E. V., Alekseeva S. A., Rukhlenko E. D., Mitrofanova G. V. Prospects for feasibility of processing of refractory copper–nickel ores and waste stockpiles. *Gornyi Zhurnal.* 2020. No. 3. pp. 45–50. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.08
3. Likhacheva S. V., Neradovskiy Yu. N., Vasileva O. A. Monitoring of natural technological structural and texture features of copper-nickel ores of Pechenga in the process of enrichment at the enrichment plant of the Kola Mining and Metallurgical Company. *Non-Ferrous Metals and Minerals: Proceedings of the Ninth International Congress.* Krasnoyarsk: Science and Innovation Center Publishing House, 2017. pp. 1251–1253.

4. Chernousenko E. V., Neradovskiy Yu. N., Kameneva Yu. S., Vishnyakova I. N., Mitrofanova G. V. Increasing efficiency of Pechenga rebellious copper–nickel sulphide ore flotation. *Journal of Mining Science.* 2018. Vol. 54, Iss. 6. pp. 1035–1040.
5. Collins Mudenda, Bupe G. Mwanza, M'hango Kondwani. Analysis of the Effects of Grind Size on Production of Copper Concentrate: A Case Study of Mining Company in Zambia. *International Conference on Chemical Processes and Green Energy Engineering.* Harare, 2015. pp. 74–79.
6. Vigdergauz V. E., Shrader E. A., Sarkisova L. M., Kuznetsova I. N. Fine-size wild lead flotation stimulation using flocculants. *GIAB.* 2013. No. 3. pp. 150–154.
7. Zhou Weiguang, Ou Leming, Feng Qiming, Zhang Guofan, Lu Yiping et al. Flotation of ultra-fine scheelite particles assisted by nanobubbles. *Proceedings of XXVIII International Mineral Processing Congress.* Quebec, 2016.
8. Zhou P., Lewis A., Nordberg H. Tecflote-TM – novel chemistry for new sulfide collectors. *XXIX International Mineral Processing Congress.* Moscow, 2018.
9. Gusev V. Yu., Radushev A. V., Chekanova L. G., Baygacheva E. V., Manylova K. O., Gogolishvili V. O. Azo derivatives of phenol and 1-naphthol as flotation collector of sulfide ore of non-ferrous metals. *Russian Journal of Applied Chemistry.* 2018. Vol. 91, No. 4. pp. 573–582.
10. Daixiong Chen, Jun Xiao, Chunming He, Xiaodong Li. Copper oxide flotation using the combined collectors of benzohydroxamic acid and butyl xanthate. *Proceedings of XXVIII International Mineral Processing Congress.* Quebec, 2016.
11. Timoshenko L. I., Chekanova L. G., Markosyn S. M., Baygacheva E. V. Agents from the class of hydrazides for beneficiation of impregnated copper-nickel ores by flotation. *Khimicheskaya tekhnologiya.* 2014. Vol. 15, No. 8. pp. 488–492.
12. Piliipenko A. T., Zulfigarov O. S. Hydroxamic acids. Moscow: Nauka, 1989. 311 p.
13. Radushev A. V., Chekanova L. G., Gusev V. Yu. Hydrazides and 1,2-diacyl hydrazines. Production, properties and use in concentration of metals. Yekaterinburg: Uro RAN, 2010. 140 p.
14. Rappoport J. F., Liebman J. F. (Eds.). The Chemistry of Hydroxylamines, Oximes and Hydroxamic Acids. Patai Series: The Chemistry of Functional Groups. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2009. Part. 1. 1078 p.
15. Korneeva U. V., Marчевskaya V. V. Khibiny apatite–nepheline ore processing problems. *Future of the Arctic Starts Here: Proceedings of II All-Russian Conference with International Participation.* Apatity: MAGU's Division in Apatity, 2018. pp. 53–62.
16. Jafari M., Chehreh Chelgani S., Pourghahramani P., Ebadi H. Measurement of collector concentrations to make an efficient mixture for flotation of a low grade apatite. *Measurement.* 2018. Vol. 121. pp. 19–25.
17. Gorochovceva N., Klingberg A., Lannefors J. Development of anionic collectors for direct flotation of apatite from complex siliceous ores with a focus on sustainability. *Proceedings of XXVII International Mineral Processing Congress.* Santiago, 2014. pp. 68–78.
18. Ivanova V. A., Gershenkop A. Sh., Shlykova G. A., Mukhina T. N. Use of polyalkylbenzolsulfonates in apatite flotation and for aluminosilicate concentrate recovery. *The Problems of Mineral Raw Materials Resources Development in the Kola Region and of Utilization of Underground Space for*

Waste Disposal. Apatity : Kolskiy nauchnyi tsentr RAN, 1999. pp. 182–190.
 19. Lavrinenko A. A., Shrader E. A., Kharchikov A. N., Kunilova I. V. Apatite flotation from brazilite-apatite-magnetite ore. *Journal of Mining Science*. 2013. Vol. 49, No. 5. pp. 811–818.
 20. Gershenko A. Sh., Ulezko A. A., Aleynikov N. A., Efimova N. S. Complex enrichment of apatite-nepheline ore of Partomchorrsk deposit. *Complex enrichment of phosphorus-containing raw materials*. Apatity, 1977. pp. 39–44.
 21. Baranov V. F. Final tailings thickening and disposal systems (world practice review). *Obogashchenie Rud*. 2009. No. 3. pp. 43–48.

22. Golovanov V. G., Petrovskiy A. A., Brylyakov Yu. E. Introduction of recycling water supply at apatite-nepheline processing plant 2. *Gornyi Zhurnal*. 1999. No. 9. pp. 48–50.
 23. Gandurina L. V. Wastewater treatment by synthetic flocculants. Moscow : DAR/VODGEO, 2007. 198 p.
 24. Ikonnikova K. V., Ikonnikova L. F., Minakova T. S., Sarkisov Yu. S. Theory and practice of pH metering-based determination of acid-base surface properties of solids : Teaching aid. Tomsk : Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2011. 85 p.
 25. Ishankhodzhaeva M. M., Mkhitarian E. L. Physical chemistry. Polyelectrolytes. Saint-Petersburg : SPbGTURP, 2015. 40 p.

УДК 622.341.1:622.7

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МАГНЕТИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ НА ОСНОВЕ МАГНИТНО-ГРАВИТАЦИОННОЙ СЕПАРАЦИИ



А. С. ОПАЛЕВ,
 зам. директора по научной работе, канд. техн. наук,
 opalev@goi.kolasc.net.ru

Горный институт Кольского научного центра РАН,
 Апатиты, Россия

Введение

Эффективная работа железорудных предприятий в условиях мировой конкуренции и растущих требований экологической безопасности требует от производителей не только поиска направлений снижения затрат на производство конечной продукции, но и диктует необходимость перехода от выпуска рядовых железорудных концентратов (ЖРК) с содержанием $Fe_{\text{общ}}$ 66–68,5 %, необходимых для доменного производства, к производству высококачественных концентратов (ВКК) с содержанием 69,5–70,5 % железа и 2,5 % SiO_2 для прямого получения металла. При этом повышение качества продукции необходимо осуществлять на фоне общего снижения качества добываемых руд при существенном повышении себестоимости их добычи. Основным решением проблемы повышения качества производимых ЖРК является внедрение рациональных энергосберегающих технологических схем обогащения с использованием мирового опыта эксплуатации современного высокоэффективного технологического оборудования [1–3].

Существующие технологические схемы магнитного обогащения железистых кварцитов на большинстве ГОКов построены по принципу стадийного выделения хвостов и получения готового концентрата в последней стадии обогащения, при этом общее число стадий может достигать 4–5. Главным недостатком таких схем является нерациональное использование энергии измельчающего оборудования, поскольку при данной организации

Рассмотрены проблемы повышения качества железорудных концентратов на предприятиях отрасли по переработке железистых кварцитов. Обозначены два пути решения проблемы: традиционный, связанный с дораскрытием рудной фазы путем применения сверхтонкого измельчения, ультратонкого грохочения и обратной флотации, и инновационный, основанный на стадийном выводе высококачественного концентрата с использованием магнитно-гравитационной сепарации. Проанализированы некоторые аспекты внедрения инновационной технологии получения высококачественного концентрата с содержанием $Fe_{\text{общ}}$ не менее 70 %, а также приведены основные этапы промышленного освоения магнитно-гравитационной сепарации на предприятиях отрасли.

Ключевые слова: железистые кварциты, магнетит, концентрат, сродсток, магнитно-гравитационная сепарация, стадийный вывод, инновационная технология, сепаратор МГС-2.0, промышленное освоение.

DOI: 10.17580/gzh.2020.09.10

массопотоков магнетитсодержащий промпродукт последовательно проходит через все стадии измельчения. При совместном измельчении частиц магнетита и его сродстков с породообразующими минералами энергия измельчения распределяется пропорционально содержанию этих фракций в измельчаемом материале, что приводит к низкой степени раскрытия сродстков и существенному переизмельчению магнетита. Следствием нерационального использования энергии измельчения являются высокие потери тонких фракций магнетита с отвальными хвостами и низкое качество концентрата из-за разубоживания его нераскрытыми сродсками. Таким образом, решение проблемы повышения качества ЖРК, производимых из железистых кварцитов, требует не только совершенствования технологических схем обогащения в части повышения эффективности рудоподготовительных операций – измельчения и классификации, но и поиска высоко-селективных методов отделения раскрытой рудной фазы от ее сродстков с кварцем и силикатами.