

На правах рукописи



САБАНОВА МАРГАРИТА НИКОЛАЕВНА

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ
МЕДНОГО ШЛАКА В УСЛОВИЯХ ВОДОБОРОТА**

Специальность 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр и Сибайском филиале АО «Учалинский ГОК»

Научный руководитель – профессор, доктор технических наук
Шадрунова Ирина Владимировна

Официальные оппоненты: профессор, доктор технических наук
Иванков Сергей Иванович
главный научный сотрудник технологического
отдела ФГБУ «ВИМС»

доцент, кандидат технических наук
Юшина Татьяна Ивановна
заведующий кафедрой обогащения и переработки
полезных ископаемых и техногенного сырья
НИТУ «МИСиС»

Ведущая организация – ОАО «Институт «ГИНЦВЕТМЕТ»

Защита диссертации состоится «21» февраля 2017 г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д 002.074.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр Российской академии наук (ИПКОН РАН) по адресу: 111020, г. Москва, Крюковский тупик, д. 4; тел./факс 8 (495) 360-89-60.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПКОН РАН и на сайте www.ipkonran.ru.

Автореферат разослан « » 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Т.Н. Матвеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Истощение рудной базы меди в России, отсутствие новых разведанных рудных запасов при росте объемов ее потребления создают угрозу существования медной подотрасли. Острота и насущность этой проблемы заставляет уральские ГОКи изыскивать наиболее доступные источники медного сырья, альтернативные руде. Такими являются лежалые шлаки медеплавильных металлургических предприятий, которых на Урале накоплено свыше 110 млн. тонн, что соответствует объемам полезных ископаемых природных месторождений, поставленных на баланс. Среднее содержание металлов в шлаках составляет 1,4% меди, 3,5% цинка, до 45% железа, 1,0 г/т золота и 11 г/т серебра. Значительная часть шлака является труднообогатимой. Переработка труднообогатимого лежалого медного шлака с получением товарного продукта в условиях систематической недозагруженности обогатительных фабрик Урала решила бы часть экономических, экологических, социальных проблем малых промышленных моногородов.

Возрастающая в долларовом эквиваленте цена на медь делает извлечение меди из шлака экономически выгодным, стимулирует совершенствование существующих технологий обогащения для наиболее полного и менее затратного извлечения из шлака меди и сопутствующих драгметаллов. Наиболее распространенной технологией на сегодняшний день является флотация.

Теоретической основой исследований явились работы по:

- технологической минералогии металлургических шлаков (Ванюков А.В., Зайцев В.Я, Уткин Н.И., Котельникова А.Л., Митрофанов С. И., Санакулов К.С Вольский А.Н., Лоскутов Ф.М., Аветисян Х.К., Мостович В.Я., Аксой А.М, Эллюнд В., Хасси С.Д.) позволившие выявить состав, структуры шлака, технологические особенности, форму потерь меди со шлаками;
- технологии переработки шлаков флотацией (Митрофанов С. И., Ясюкевич С. И., Духанин И. Н., Чантурия В.А., Бочаров В.А., Шадрюнова И.В., Газалеева Г.И., Игнаткина В.А., Шабалина М.А.), послужившие основой для разработки технологических приемов интенсификации флотации шлаков в условиях водооборота;
- научно-методическому обоснованию механизма интенсификации флотации (Годен А.М., Эйгелис М.А, Тихонов О.Н., Митрофанов С.И., Хан Г.А, Полькин С.И.), позволившие выбрать и обосновать критерии интенсификации флотации лежалых медных шлаков.

Вопросам флотации лежалых медных шлаков на действующих обогатительных фабриках горнодобывающего комплекса уделено недостаточно внимания. Не изучены особенности флотации лежалого медного шлака в условиях действующего водооборота горно-обогатительного производства на технологических и техногенных водах, что при дефиците оборотной воды и современной негативной экологической ситуации в горнодобывающих районах является актуальной задачей, решение которой позволит повысить полноту использования шлаков, оптимизировать его переработку, а также вовлечь в технологический оборот ранее сбрасываемые в природную среду техногенные воды.

Целью работы является разработка способов интенсификации флотации медных шлаков в условиях замкнутого водооборота обогатительной фабрики, перерабатывающей медные и медноцинковые руды.

Идея работы заключается в использовании для достижения цели работы выявленных механизмов и закономерностей селективного флотационного разделения техногенных фаз медных шлаков в зависимости от их морфологических и структурных особенностей.

Задачи исследования:

- провести анализ теории и практики флотационной переработки медных шлаков в России и за рубежом;

- изучить характер минеральных ассоциаций, текстурно-структурные и вещественные особенности труднообогатимых медных шлаков, в сравнении со шлаками успешно флотуруемыми на обогатительных фабриках;

- разработать типизацию медных шлаков, связывающую их текстурно-структурные особенности с обогатимостью флотацией;

- изучить закономерности разделения минеральных фаз шлака в зависимости от способа кондиционирования оборотной воды и использования сочетаний реагентов основной флотации;

- обосновать параметры максимального извлечения меди из труднообогатимых медных шлаков;

- исследовать и описать механизм влияния физико-химических параметров водной фазы пульпы на интенсификацию извлечения меди из медных шлаков;

- разработать приемы технологических решений интенсификации флотации медных шлаков с вовлечением в процесс технологических и техногенных вод горно-обогатительного предприятия;

- оценить эколого-экономическую эффективность найденных технологических решений для эффективной флотации медных шлаков.

Объекты исследования: процесс флотации медного шлака в условиях оборотного водоснабжения обогатительной фабрики.

Материалы исследования

- технологические пробы медных шлаков медеплавильных предприятий Урала: ОАО «Медногорский медно-серный комбинат»(ММСК), Производство полиметаллов ОАО «Уралэлектромедь» г. Кировград (ППМУЭМ), ОАО «Карабашмедь» г. Карабаш, ОАО «Среднеуральский медеплавильный завод»г. Ревда (СУМЗ), ОАО «Святогор», г. Красноуральск.

-технологические и техногенные воды Сибайского филиала АО «Учалинский ГОК».

Методы исследования

В диссертационной работе использованы: теоретический анализ априорной информации, экспериментальные методы, включающие минераграфический, гранулометрический, седиментационный, рентгенофазовый, микроскопический (анализатор изображения Минерал С-7), электронно-микроскопический (JEOL JSM-6460 LV) анализы, рН-метрию, термогравиметрию, измерение электрокинетического потенциала, инфракрасную Фурье-спектроскопию (ИКФС, спектрометр Shimadzu IR-Affinity); лабораторные эксперименты на флотационных установках. Измерение контрольных параметров исследуемых процессов проводилось с использованием стандартных методик и аппаратуры в лабораториях ФГБОУ ВО «МГТУ», ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ). Экспериментальная проверка результатов и технологическое тестирование выполнялись в укрупненных лабораторных испытаниях в исследовательской лаборатории обогатительной фабрики Сибайского филиала АО «Учалинский ГОК». Обработка результатов выполнена с применением методов математической статистики с использованием Microsoft Excel.

Положения, выносимые на защиту:

1) Флотационная активность техногенных медьсодержащих фаз шлака определяется степенью раскристаллизованности и соотношением соединений железа в матрице - фаялита, ферритов, магнетита, пирита, зависящим от генезиса шлака.

2) Повышение флотационной активности медьсодержащих фаз труднообогатимого лежалого медного шлака фаялит-магнетито-пиритового типа достигается механохимической активацией при измельчении его в кислой технологической воде рН 5,5, способствующей повышению их гидрофобности и селективному агрегированию, сульфидизации окисленных форм меди, активации пиритовых медьсодержащих глобул, на фоне депрессии силикатов вследствие действия выделяющейся с поверхности фаялита кремниевой кислоты.

3) Комплекс технологических операций в установленной последовательности и условиях реализации, заключающейся в тонком измельчении исходного труднообогатимого лежалого медного

шлака фаялит-магнетито-пиритового типа в кондиционированной до кислой рН 5,5 ед. оборотной воде, флотации при нейтральных рН с подачей дополнительного собирателя - аэрофлота серии БТФ 1614 в соотношении 1:3 с бутиловым ксантогенатом калия (БКК), приводит к повышению извлечения меди на 10%, золота на 5%, серебра на 5% при сохранении качества медного продукта.

Достоверность результатов обеспечивается представительностью исходных данных; использованием сертифицированного оборудования, современных средств и методик проведения исследований, использованием метрологически достоверных и аттестованных методик выполнения измерений. Подтверждается согласованностью выводов теоретического анализа и данных эксперимента, сопоставимостью результатов физических и химических анализов; воспроизводимостью результатов цикловых и укрупненных лабораторных испытаний.

Научная новизна работы:

- разработана технологическая типизация медных шлаков, основанная на соотношении техногенных силикатных, оксидных, сульфидных соединений железа в шлаке;

- установлены причины потерь меди с отвальными хвостами при флотации медного шлака фаялит-магнетито-пиритового типа в оборотной воде обогатительной фабрики, заключающиеся в недораскрытии нераскristализованных медьсодержащих фаз шлака даже при измельчении до 100% класса минус 0,044 мм, наличии "пиритовых медьсодержащих глобул", депрессируемых в щелочной среде, наличии окисленных форм меди, требующих сульфидизации поверхности, наличия известкового налета на минералах шлака;

- выявлен комплексный механизм механохимической активации медьсодержащих фаз шлака фаялит-магнетито-пиритового типа при измельчении его при рН5,5, заключающийся в растворении известкового налета, разрыхлении поверхности и повышении контрастности поверхности частиц, сульфидизации окисленных минералов меди элементной серой, образующейся при разложении пирита, активации поверхности сульфидных фаз ионами меди;

- обнаружен в водной среде при рН 5,5-6 эффект пептизации силикатных тонкодисперсных частиц и агрегации медьсодержащих сульфидных тонкодисперсных частиц шлака. Предложен механизм, заключающийся в продуцировании при поверхностном растворении фаялита в кислой среде (рН5,5) метакремниевой кислоты H_2SiO_3 , продукты которой (мицеллы и ионы SiO_3^{2-}) за счет физической адсорбции во внешней обкладке на поверхности силикатных составляющих шлака, приводят к увеличению отрицательного ζ – потенциала его поверхности, способствуя их депрессии и пептизации;

- установлены новые зависимости изменения величины ζ -потенциала и адсорбции собирателя бутилового ксантогената калия на поверхности частиц тонкодисперсного шлака фаялит-магнетито-пиритового типа в зависимости от рН водной фазы;

- установлены параметры (ионный состав, рН) кондиционирования оборотной воды, позволяющие реализовывать технологическое решение интенсификации флотации медного шлака в условиях водооборота.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, проведении теоретического анализа, разработке стратегии исследования, разработке типизации медных шлаков, изучении механизма интенсификации флотации медьсодержащих фаз шлака, непосредственном участии в научных экспериментах, обработке, интерпретации и апробации результатов исследования, разработке режима, организации и проведении экспериментальных исследований и лабораторных испытаний, анализе и обобщении полученных результатов и обосновании выводов, подготовке публикаций.

Практическая значимость диссертации состоит в разработке способа кондиционирования оборотной (технологической) воды с использованием кислой техногенной (подотвальной) для ин-

тенсификации извлечения меди из шлака, разработке реагентного режима флотации, что позволило повысить извлечение в концентрат меди на 10%, золота на 5,0%, серебра на 5,0% при сохранении качества медного продукта, а так же в снижении экологической нагрузки на окружающую среду и уменьшении затрат на очистку вод, за счет вовлечения кислой подотвальнoй воды в общий водооборот обогатительной фабрики.

Реализация результатов работы. Способы интенсификации флотации лежалого труднообогатимого медного шлака с вовлечением в процесс технологических вод горно-обогатительного предприятия, использованы при выполнении прикладных научных исследований, выполняемых в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (Соглашение о предоставлении субсидии от 20.10.2014г. №14.604.21.0128).

Предложенный режим флотации шлака апробирован в условиях исследовательской лаборатории Сибайского филиала Учалинского горно-обогатительного комбината. Полученные данные подтверждены протоколом технического совещания по результатам укрупненных лабораторных испытаний.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах ИПКОН РАН, на международных совещаниях «Плаксинские чтения» (г. Екатеринбург, Россия 2011, г. Алматы, Казахстан 2014), на научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2015, 2016), 10-й Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 2013), на X Конгрессе обогатителей стран СНГ (Москва, 2015), на X Уральской горно-промышленной декаде (Екатеринбург, 2012), на Международном Конгрессе "Техноген-2012" (Екатеринбург, 2012), на Международной научно-практической конференции «Создание высокоэффективных производств на предприятиях горно-металлургического комплекса» (УГМК-Холдинг В.Пышма 2013).

Полнота изложения материала по теме диссертационной работы отражается в опубликованных 14 научных работах, в том числе рекомендованных ВАК РФ изданиях – 6 из них 2 в базе цитирования Scopus, в прочих печатных изданиях–8.

Объём и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 152 наименований, содержит 165 страниц машинописного текста, одного приложения, 56 рисунков и 48 таблиц.

Автор выражает признательность и глубокую благодарность научному руководителю диссертационной работы доктору технических наук, профессору И.В.Шадруновой, доктору технических наук Н.Н.Ореховой за помощь и поддержку на протяжении всей работы.

Автор выражает благодарность сотрудникам отдела обогащения УГМК-Холдинг за помощь и поддержку на протяжении всей работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечена актуальность работы, сформулированы цель исследований, суть научной проблемы и защищаемые положения.

В первой главе дана ресурсная характеристика медных шлаков и сделан обзор теории и практики их флотации. Сформулированы стратегия и задачи исследования.

Во второй главе изучены технологические особенности медных шлаков различного генезиса, определены их основные отличительные свойства, дано определение понятию «пиритовая медьсодержащая глобула», представлена разработанная типизация медных шлаков уральского региона.

В третьей главе дан анализ переработки медного шлака в условиях обогатительной фабрики на оборотной воде, охарактеризованы технологические воды горно-обогатительного производства, представлены результаты изучения флотации шлака в зависимости от физико-химических параметров используемых технологических вод и точек подачи, разработана методика кондиционирования оборотной воды.

В четвертой главе изучен механизм и выдвинута гипотеза интенсификации флотации труднообогатимого лежалого медного шлака, представлены результаты потенциометрического, термографического и спектроскопического изучения состояния поверхности медного шлака в зависимости от pH.

В пятой главе представлено технологическое решение вопроса интенсификации флотации труднообогатимого лежалого медного шлака, приведены сравнительные показатели флотации с традиционным и предложенным решением, проведен расчет экономической целесообразности его внедрения.

Методики выполнения экспериментальной части работы представлены в главах, соответствующих описанию результатов эксперимента.

1. Флотационная активность техногенных медьсодержащих фаз шлака предопределяется степенью раскристаллизованности и соотношением соединений железа в матрице - фаялита, ферритов, магнетита, пирита, зависящим от генезиса шлака.

В работе изучены медные шлаки: ОАО «Медногорский медно-серный комбинат» (ММСК) (г. Медногорск), «Баймакский медеплавильный завод» (БМЗ) (г. Баймак), ЗАО «Карабаш-медь» (КМ) (г. Карабаш), ППМ ОАО «Уралэлектромедь» (УЭМ) (г. Кировград), ОАО «Святогор» (СГ) г. Красноуральск и ОАО «Среднеуральский медеплавильный завод» (СУМЗ) г. Ревда.

Медные шлаки - железосодержащий продукт. Содержание железа общего в них более 30-35%. Содержание основных элементов медных шлаков представлено в табл. 1.

Таблица 1. Содержание основных химических элементов в медных шлаках

Предприятие	Название сырья	Содержание основных химических элементов, %					
		Cu	Zn	S	Fe _{общ}	SiO ₂	Al ₂ O ₃
УЭМ	Конвертерный шлак	4,0	5,69	2,32	35,69	24,30	3,91
	Отвальный шлак	0,8	5,1	1,19	34,8	28,10	3,08
СУМЗ	Конвертерный шлак	2,8	3,1	2,1	31,4	25,60	2,4
	Отвальный шлак	0,71	3,5	1,8	30,3	24,10	3,1
КМ	Конвертерный шлак	2,24	3,74	2,22	34,6	27,3	3,64
	Отвальный шлак	0,45	3,16	1,48	30,8	34,9	5,33
СГ	Конвертерный шлак	3,14	5,1	2,0	38,6	30,8	4,1
	Отвальный шлак	0,76	4,2	1,97	40,2	32,53	4,93
ММСК	Конвертерный шлак (богатый)	3,0	3,82	2,05	41,87	23,18	3,34
	Конвертерный шлак (бедный)	2,0	4,24	2,09	43,89	23,25	3,06
	Отвальный шлак	0,56	2,81	1,72	35,2	29,60	5,53
БМЗ	Отвальный шлак	0,31	1,73	1,07	38,91	33,30	3,0

Выделено три подгруппы по раскристаллизованности: А - раскристаллизованный; Б - частично раскристаллизованный; В – нераскристаллизованный шлак.

Предполагая, что флотационные свойства медных шлаков, как техногенных образований обусловлены морфологическими и морфометрическими параметрами, неразрывно связанными с процессами, продуцирующими и кондиционирующими шлак, извлечение меди соотнесено с видом плавки, стадией получения, способом охлаждения, формой нахождения, содержанием меди, структурой и сроком хранения шлаков (табл. 2).

Таблица 2. Комплексная характеристика медных шлаков уральского региона

Шлак	Стадии получения	Пла- виль- ный аг- регат	Массо- вая доля меди, %	Предпри- ятие Урала	Форма нахо- жде- ния*	Способ охлаж- дения **	Струк- тура ***	Направление утилизации шлака	Спо- собы обед- нения ****	Показате- ли флота- ции
Отвальный	медная плавка в печи на штейн и шлак	шахтная печь	0,75-1,0	УЭМ	ТЛ	МО	Р	В отвал	Ф	ϵ_{Cu} -60%
			0,42-0,8	ММСК	ТЛ	НП	Р	В отвал	Ф	ϵ_{Cu} -45%
			0,28-0,6	БМЗ	Г	НП	НР	В отвал лежа- лый	НО	-
		отража- тельная печь	0,46-0,52	СГ	Г	НП	НР	В отвал	НО	-
			0,8	КМ (старые)	Г	НП	НР	В отвал лежа- лый	НО	-
		автоген- ная печь	0,5	КМ (новые)	ТЛ	МО	Р	В отвал	Ф	ϵ_{Cu} -60%.
			0,9-0,7	СУМЗ	ТЛ	МО	Р	В отвал	Ф	ϵ_{Cu} -60%
электри- ческая печь	В уральском регионе не применяется									
Оборотный	конвертирование штейна	конвер- тер	2,5-6,5	УЭМ	ТЛ	МО	Р	В отвал	Ф	ϵ_{Cu} -85-90%
			1,3-3,5	ММСК	ТЛ	НП	НР	В отвал	ПМ иФ	ϵ_{Cu} <70%.
			2,5-4,0	СГ	ТЛ	МО	Р	В отвал	Ф	ϵ_{Cu} -80-85%
			3,5-6,0	КМ	ТЛ	МО	Р	В отвал	Ф	ϵ_{Cu} -70-75%
			3,5-4,5	СУМЗ	ТЛ	МО	Р	В отвал	Ф	ϵ_{Cu} -70-80%

* ТЛ – твердый литой; Г – гранулированный.

** МО – медленно охлажденный; НП – нет подготовки (быстро охлажденный)

*** Р – раскристаллизованный ; НР – нераскристаллизованный.

**** Ф – флотация; НО – не обедняют; ПМ – пирометаллургия

В результате анализа (табл. 2) медные шлаки подразделены на три группы по обогатимости флотацией (табл. 3): первая группа, извлечение меди из которых более 80% - легкообогатимые; вторая группа, извлечение меди из которых 70-80%-среднеобогатимые; третья группа, извлечение меди из которых менее 70% -труднообогатимые.

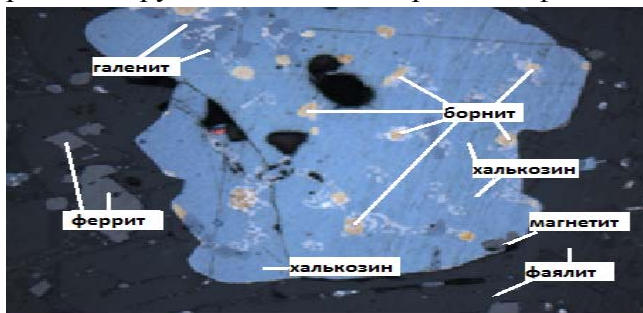
Определено, что труднообогатимые шлаки получены в результате шахтной плавки, быстро охлаждены, нераскристаллизованные, лежалые. Из табл. 2 следует, что нельзя однозначно утверждать, что именно нераскристаллизованность шлаков соответствует плохой их обогатимости флотацией. Частично раскристаллизованные шлаки так же флотируются с низкими показателями извлечения.

Таблица 3. Группы медных шлаков уральского региона по обогатимости флотацией

Показатели	Медный шлак				
	1	2	3		
Группа	1	2	3		
Категория обогатимости флотацией	легко	средне	трудно		
Извлечение в группе	более 80%	более 70%	менее 70%.		
Вид шлака	оборотный	оборотный	оборотный	отвальный	отвальный
Форма нахождения	ТЛ	ТЛ	ТЛ	ТЛ	Г
Извлечение меди флотацией	80-90%	70-80%	60-69%	45-60%	до 10%*
Среда флотации	Оборотные воды ОФ				н/д
	рН 8-10	рН 7-9	рН 10-12	рН10-12	рН10
Охлаждение	медленное		быстрое		быстрое принудительное
Подгруппа	А		Б		В

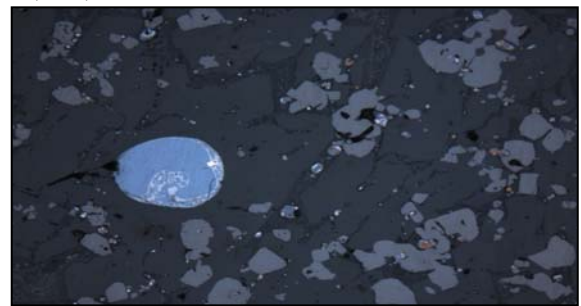
*данные лабораторного эксперимента

Установлено, что минеральный состав матрицы (вмещающей фазы) шлаков первой группы простой (рис. 1) и состоит из фаялита (Fe_2SiO_4), ферритов цинка и магния ($(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$), шлакового стекла $(\text{Si}, \text{Al}, \text{Ca}, \text{Fe})_x\text{O}_y$. Медь представлена борнитом (Cu_5FeS_4), халькозином (Cu_2S), ковеллином (CuS), анилитом (Cu_7S_4). Встречаются сфалерит с примесью железа, галенит, касситерит. Обнаружены также минеральные фазы оксидов Zn, Pb, Ni.



400 мкм

а

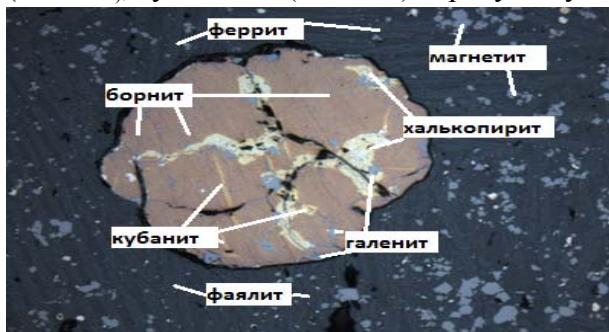


400 мкм

б

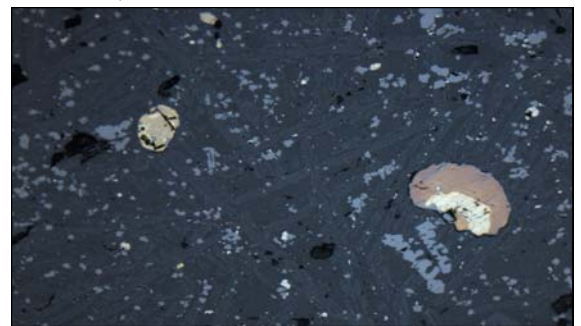
Рисунок 1 - Агрегаты сульфидных твердых растворов в шлаке: а – оборотный; б – отвальный. Зерна халькозина правильной формы с включениями борнита. По шлаковому полю зерна феррита и фаялита. Отраженный свет, николи параллельны

Минеральный состав матрицы медных шлаков второй группы (рис. 2) также простой и состоит из фаялита, ферритов, магнетита (Fe_3O_4), алюмосиликатов. Медь представлена борнитом, халькопиритом (CuFeS_2), кубанитом (CuFe_2S_3). Присутствуют фазы оксидов Zn, Cu и Pb.



100 мкм

а



100 мкм

б

Рисунок 2 - Агрегаты сульфидных твердых растворов в шлаке: а – оборотный; б – отвальный. Вкраплений борнита с включениями халькопирита и галенита правильной формы. По шлаковому полю вкрапления магнетита. Отраженный свет, николи параллельны.

Основными фазами матрицы шлаков третьей группы (рис. 3, 4, 5) являются фаялит, магнетит (Fe_3O_4), феррит и сульфиды железа-пирит, пирротин. Минеральный состав матрицы сложный. В значительном количестве присутствуют кальций-железистые алюмосиликаты и сплавы металлов. Медь представлена в основном сульфидами: халькопиритом, борнитом, халькозином. Кроме того, присутствуют оксиды меди: куприт (Cu_2O) и тенорит (CuO). В значительном количестве определяется металлическая медь.

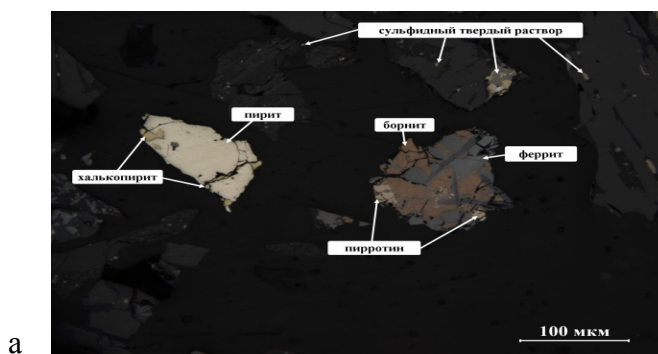
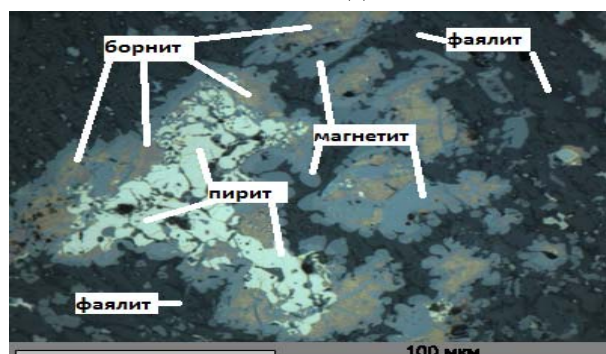
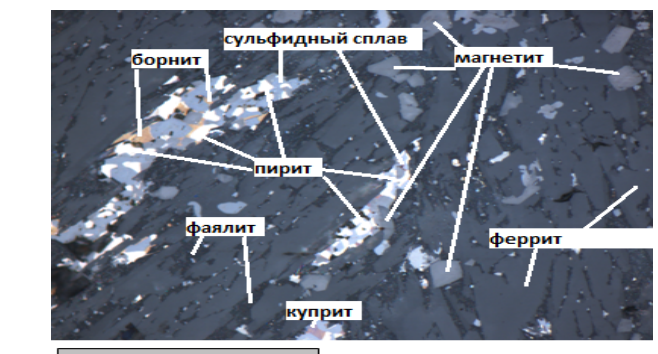
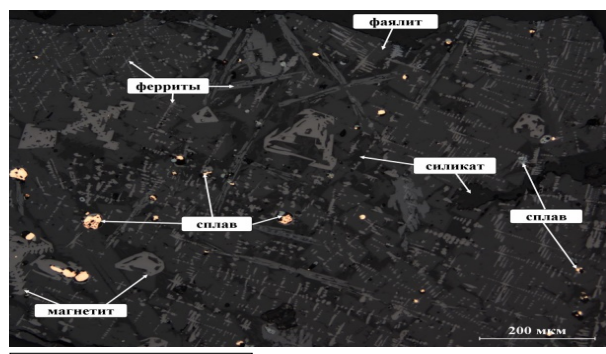


Рисунок 3 - Особенности строения и взаимоотношение минеральных фаз в оборотном шлаке:
 а - электронный микроскоп, изображение в обратно-отраженных электронах;
 б - отраженный свет, николи параллельны

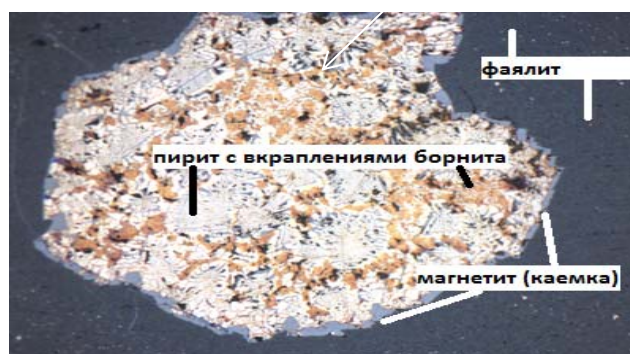


100 мкм

а 100 мкм

б

Рисунок 4 - Агрегаты сульфидных твердых растворов в отвальном шлаке виде:
 а - корольков; б - неправильной формы. Отраженный свет, николи параллельны



100 мкм

а 100 мкм

б

Рисунок 5 - Агрегаты сульфидных твердых растворов в отвальном шлаке: а) зерно пирита правильной формы с примесью меди (борнит) окаймлено магнетитовой ипителью; б) сплав (борнито-пиритовое зерно). По шлаковому полю зерна фаялита. Отраженный свет, николи параллельны

Отличительной особенностью труднообогащаемого по меди медного шлака является наличие сульфидов железа – пирита, пирротина, значительное присутствие окисленных форм соединений меди. Характерно присутствие «пиритовых медьсодержащих глобул» (рис. 6) и сложных сростков,

по типу твердых растворов, соединений меди и железа (рис. 7). Кроме того, шлак третьего типа в своем составе имеет известковые включения и покрыт известковым налетом (рис. 8).



50мкм

Рисунок 6 - Сложный сульфидный сросток - «пиритовая медьсодержащая глобула»: в центре пиритового зерна находится королек металлической меди размером 3 мкм. Пиритовое зерно окаймлено магнетитовой «лентой»

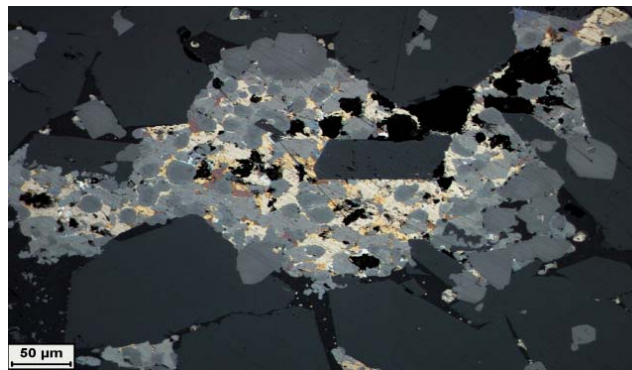


Рисунок 7 - Сложный сросток пирита с включениями халькопирита, борнита, каймой магнетита, включениями ферритов, стекла и халькозина

В зависимости от техногенных минералов, преобладающих в матричной основе, медные шлаки разделены на три типа (таб. 4): фаялит-ферритовый, фаялит-феррито-магнетитовый, фаялит - магнетито-пиритовый.

Сопоставление типов шлаков с группами обогащения флотацией (таб. 3) показало, что легкообогащаемый по меди шлак относится к типу с фаялит – ферритовой матрицей, полнокристаллической однотонной структурой, с преобладанием медных минеральных зерен размерностью до 500 мкм с круглым фактором формы до 0,85 не имеющим в составе сульфидов железа, с преобладанием силикатов и оксидов железа в форме ферритов. Среднеобогащаемый относится к типу с фаялит-феррито-магнетитовой матрицей с полнокри-



Рисунок 8 - Шлаковая глыба в разрезе с густым известковым налетом.

сталлической равномерной структурой, преобладанием медных минеральных зерен, размерностью до 400 мкм с круглым фактором формы до 0,8, не имеющим в составе сульфидов железа, преобладанием силикатов железа и оксидов железа, представленных ферритом и магнетитом. Труднообогащаемый относится к типу с фаялит-магнетито–пиритовой матрицей, с мелкозернистой неравномерной, вплоть до скрытокристаллической, структурой, преобладанием медных минеральных зерен размерностью от 10 до 70 мкм с круглым фактором формы до 0,55, имеющим в составе кроме силикатов и оксидов железа еще и сульфиды железа, с преобладанием силикатов и оксидов железа, состоящих из ферритов и магнетита, и в основной своей массе представлен лежалым шлаком, в котором присутствует сульфидная, оксидная, металлическая формы меди, и при переработке по классической технологии флотации медного сырья показывает самое низкое извлечение меди.

Таблица 4. Типизация медных шлаков

Тип шлака	Фаялит-ферритовый		Фаялит-феррито-магнетитовый		Фаялит-магнетито-пиритовый	
Значения классификационных признаков	Фаялит более 25% феррит более 25% магнетит менее 15%; пирит отсутствует		Фаялит более 25% феррит более 25% магнетит более 15%; пирит отсутствует		Фаялит более 25% феррит более 25% магнетит более 15%; пирит присутствует	
Примеры	ОАО ППМ «УЭМ», г. Кировград Отвальный шлак шахтной печи конвертерный шлак	ОАО «СУМЗ», г. Ревда Отвальный шлак автогенной печи (Ванюкова), конвертерный шлак	ОАО «Святогор», г. Красноуральск Отвальный шлак отражательной печи, конвертерный шлак	ЗАО «Карабашимедь», г. Карабаши Отвальный шлак шахтной печи, конвертерный шлак	ОАО «ММСК», г. Медногорск Отвальный шлак шахтной печи, конвертерный шлак	Баймакский МПЗ, г. Баймак Отвальный шлак шахтной печи
Вид шлака по типу плавильного агрегата						
ОФ, перерабатывающая шлак	ППМ ОАО «УЭМ»	ОАО «СУМЗ»	ОАО «Святогор»	ЗАО «Карабашимедь»; ООО «АГК»	СФ «УГОК» 2010-2011 гг.	-
Исследования флотации	«Уралмеханобр», ППМ ОАО «УЭМ»	ОАО «СУМЗ»	«РИВС», «Уралмеханобр»	Нет данных	СФ ОАО УГОК	Нет данных
Группы по обогатимости флотацией	1	1	2	2	3	3

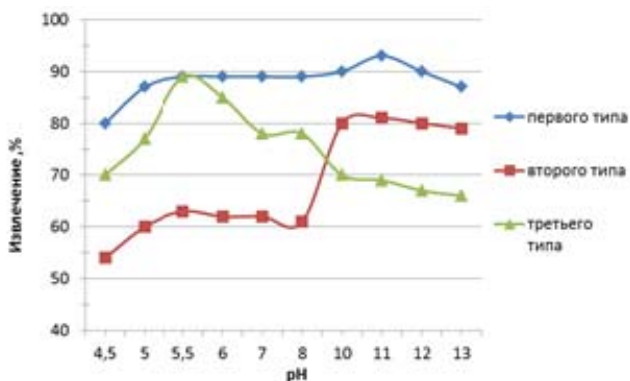


Рисунок 9 - Влияние pH воды на извлечение меди при флотации трех типов медного шлака

с pH 5-7,5, а максимальные показатели получены при pH 5,5. Таким образом, очевидно, что щелочная (pH \square 8) обратная вода обогатительных фабрик удовлетворяет требованиям максимального извлечения меди из шлака первого фаялит-ферритового и второго фаялит-феррито-магнетитового типов, но не удовлетворяет требованиям максимального извлечения меди из шлака третьего фаялит-магнетито-пиритового типа.

2. Повышение флотационной активности медьсодержащих фаз труднообогатимого легалого медного шлака фаялит-магнетито-пиритового типа и извлечения меди в концентрат достигается механохимической активацией при измельчении его в кислой технологической воде pH 5,5, способствующей повышению их гидрофобности и селективному агрегированию, сульфидизации окисленных форм меди, активации пиритовых медьсодержащих глобул, на фоне депрессии силикатов, вследствие действия выделяющейся с поверхности фаялита кремниевой кислоты.

Для изучения влияния pH водной фазы пульпы на флотацию шлака третьего фаялит-магнетито-пиритового типа, его измельчали до содержания класса минус 0,044 мм 95% и флотировали на оборотной (pH=11), технической (pH=7,9) и подотвальной (pH=5,5) водах.



Рисунок 10 – Пена на оборотной воде



Рисунок 11 – Пена на технической воде



Рисунок 12 – Пена на подотвальной воде

Установлено, что в диапазоне фактической рН оборотной воды (рН=11-13) показатели по извлечению меди низкие. Флотационная пена пышная, но не загруженная (рис. 10). Увеличение рН до 13 снижает извлечение меди. Использование свежей технической воды (рН=7,9) приводит к снижению выхода концентрата. При этом флотационная пена загружена, но пенный слой не выражен и напоминает пленку (рис. 11). Максимальное извлечение меди наблюдается при измельчении и флотации медного шлака в кислой (рН=5,5) подотвальной воде.

Флотационная пена загруженная, среднезернистая, мягкая (рис. 12). Выявленные закономерности были проверены с применением оборотной воды обогатительной фабрики. Установлено, что подача кондиционированной до слабокислых значений рН оборотной воды в измельчение увеличивает извлечение меди.

Наибольший выход концентрата получен при подаче воды рН 5,5. Минералогическое изучение концентратов выявило рост медьсодержащих частиц и «пиритовых медьсодержащих глобул», что позволяет предположить более эффективную их гидрофобизацию. Увеличение гидрофобности сульфидных частиц в кислой среде подтверждено результатами флотирования в трубке Халимонда.

Изучение адсорбции собирателя на поверхности частиц шлака по остаточной концентрации собирателя в пульпе показало, что при измельчении шлака в воде с рН 5,5 остаточная концентрация собирателя увеличивается (рис. 13). Снижение адсорбции коррелирует с повышением извлечения меди, золота, серебра в продукт. После измельчения в кислой среде получен прирост извлечения меди, золота, серебра при снижении расхода собирателя (табл. 5).

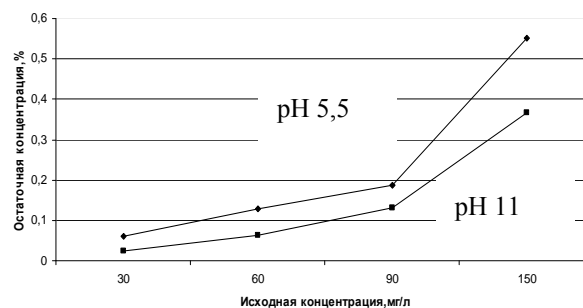


Рисунок 13 - Сорбционная кривая собирателя на шлаке при различных рН

Таблица 5. Результаты флотационных опытов

Наименование	Выход, %	β^{Cu} , %	β^{Au} , г/т	β^{Ag} , г/т	ϵ^{Cu} , %	ϵ^{Au} , %	ϵ^{Ag} , %	Условия
Сп продукт	14,17	10,55	1,43	46,4	73,97	48,57	62,99	рН-11 БКК400г/т
Хвосты	85,83	0,61	0,25	4,0	26,03	51,43	37,01	
Шлак	100	2,01	0,42	11,5	100,0	100,0	100,0	
Сп продукт	19,14	9,02	1,15	40,2	84,22	54,18	72,38	рН-5,5 БКК300 г/т
Хвосты	80,86	0,40	0,23	3,45	15,78	45,82	27,62	
Шлак	100	2,05	0,41	10,10	100,0	100,0	100,0	

Для объяснения механизма, способствующего повышению извлечения, изучены зависимости ионного состава жидкой фазы пульпы и состояния поверхности шлака от рН исходной воды в измельчении, с использованием термогравиметрического, ИК-спектроскопического, потенциометрического анализов. Изучена агрегация ингредиентов шлака.

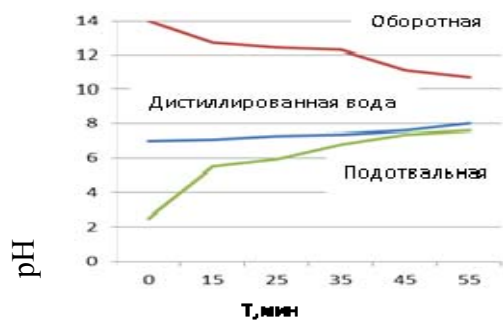
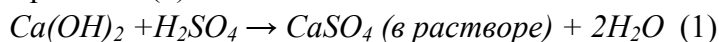


Рисунок 14- График зависимости изменения pH среды от времени измельчения шлака в разных водах

Измельчение шлака в кислой подотвальной воде (рис. 14) ведет к повышению pH до pH, ед нейтральных значений 7-7,4, в зависимости от времени измельчения. Что объясняется растворением известкового налета и образованием сульфата кальция $CaSO_4$ по реакции (1):



Концентрация $CaSO_4$ в водной части флотационной пульпы при pH 5-6,5 не превышает предел растворимости (2,4 г/дм³ или по Ca 0,7 г/дм³) (таб. 6), следовательно, $CaSO_4$ не выпадает в осадок.

Таким образом, поверхность разных фаз измельченного в кислой среде шлака становится более флотационно контрастной, разрыхляется, становясь восприимчивой к взаимодействию с составляющими пульпы. Изменение поверхности шлака в кислой среде подтверждается термогравиметрией.

Термогравиметрический анализ в среде аргона показывает, что процесс дегидратации шлака, измельченного в щелочной среде (рис. 15а), идет при нагреве от 66,4°C до 505,7°C. Дегидратация шлака, измельченного в кислой среде (рис. 15б), происходит от 90 до 417°C. Потеря массы шлака, измельченного в кислой среде, в два раза больше потери массы шлака измельченного в щелочной среде, что может свидетельствовать о большей гидратации вследствие разрыхления, разложения его поверхности.

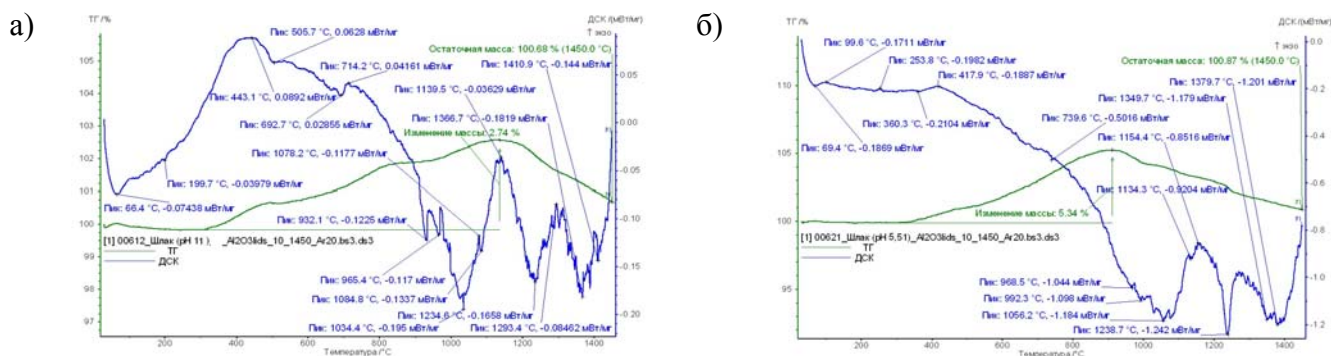


Рисунок 15 - Термогравиметрическая характеристика шлака фаялит-магнетито-пиритового типа измельченного при: а) pH 11; б) pH 5,5

Измельчение при pH 5,5 ед. приводит к резкому увеличению в водной фазе концентрации меди, цинка, железа, кальция, магния и оксида кремния, сульфатов (таб. 6).

Таблица 6. Концентрации элементов в жидкой фазе пульпы

pH	pH среды	SiO ₂ мг/дм ³	Cu мг/дм ³	Fe общ мг/дм ³	Ca мг/дм ³	Mg мг/дм ³	SO ₄ ²⁺ мг/дм ³
до измельчения							
11,0		35,4	0,1	0,175	404,7	2,54	2,0
после измельчения							
11,0	10,0	38,21	0,18	0,396	309,3	4,86	1,9
8,5	9,0	44,71	0,2	0,401	613,32	6,08	1,4
5,5	7,3	320,45	3,4	20,00	678,71	43,74	17,6
4,0	6,7	1609,21	6,9	192,90	945,89	49,81	23,8
2,5	6,1	2134,23	15,7	237,80	1130,25	64,40	31,5

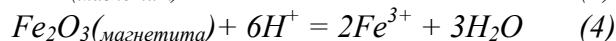
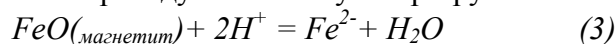
При попадании медного шлака в водную среду с pH 5,5-6,5, содержащую диссоциированную на ионы H_3O^+ , HSO_4^- и SO_4^{2-} серную кислоту, поверхностное растворение фаялита (Fe_2SiO_4) сопровождается разрушением поверхности с образованием метакремниевой кислоты по реакции 2:



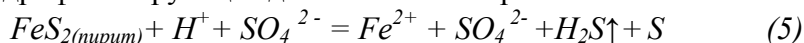
Кремниевая кислота H_2SiO_3 - очень слабая, непрочная, в воде малорастворимая, образует при концентрации больше 100мг/дм^3 коллоидные растворы. Роль компенсирующих ионов (K) (противоионов) могут выполнять ионы водорода или железа. Образуются мицеллы состава



Свежеобнаженная поверхность частиц магнетита в водной среде растворяется с переводом в жидкую фазу ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} . Переходу способствует и разрушение поверхности по реакциям 3-4:



Известно, что основной сульфид колчеданных руд пирит в кислой среде образует сульфат железа (II) с выделением сероводорода по реакции (5). При этом образуется элементарная сера, способная оказывать гидрофобизирующее действие на поверхность:



На основании классической теории модификации поверхности сульфидных и окисленных минералов руд, выдвинута гипотеза о механохимической активации поверхности техногенных минеральных фаз медного шлака фаялит-магнетито-пиритового типа, возникающей при его измельчении при рН 5,5. Активация сохраняется в последующем за измельчением приеме флотации, и тем самым способствует повышению извлечения меди. Данная гипотеза подтверждается теоретическими и

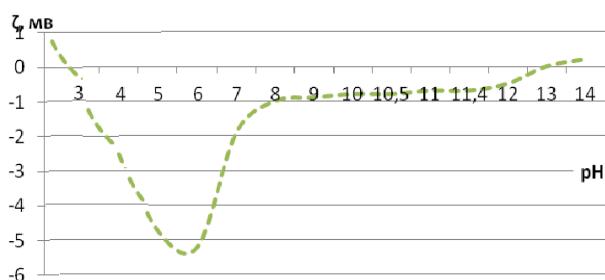


Рисунок 16 - Влияние рН пульпы на электрокинетический потенциал медного шлака фаялит-магнетито-пиритового типа

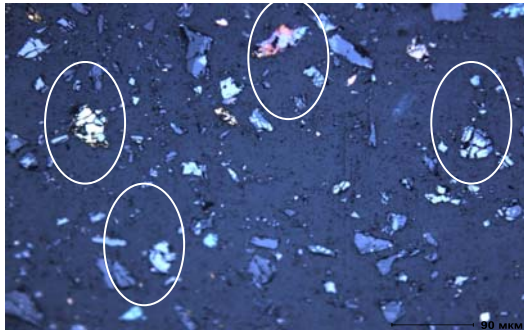
экспериментальными данными. Введение в систему (измельченный шлак-щелочная обратная вода) подкислителей до достижения среды рН 5,5 (рис. 16), приводит к резкому увеличению (скачку) ζ – потенциала. Эксперимент по осаждению тонкоизмельченного шлака в водной среде показывает, что при рН 5-6 идет процесс дефлокуляции (пептизации) частиц, скорость осаждения (v) падает (табл. 7), система переходит в устойчивое состояние.

Таблица 7. Зависимость скорости осаждения частиц от дзета-потенциала

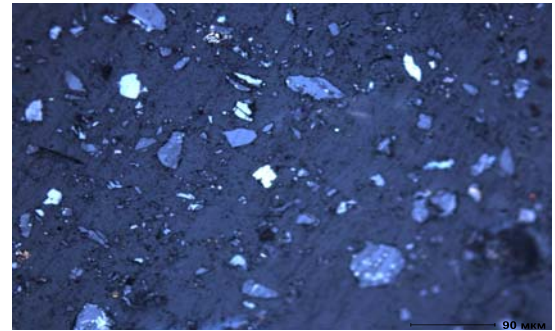
ζ , мВ	v , мм/сек	рН
-0,5	12	12
-0,7	10	11
-1,0	3	8
-5	2	6
-5,5	1,2	5,5
-5	нет видимого осаждения	5

При этом на фоне стабилизации системы в песках (осадке) при рН 5,5 микроскопическим анализом зафиксировано увеличение количества агрегатов-флокул. (рис. 17). Эти флокулы преимущественно содержат медьсодержащие сульфидные фазы, что свидетельствует о селективной флокуляции сульфидов при пептизации силикатов.

Модификация поверхности частиц шлака, способствующая интенсификации флотации шлака в кислых средах подтверждается результатами инфракрасной спектроскопии (ИКС-Фурье) (рис. 18).



pH 5,5 Выделены агрегаты



pH 11

Рисунок 17- Микрофотографии песков седиментационного анализа при разных pH (увеличение.200)

Характеристическая полоса валентных колебаний O-Si-O в области $600-800\text{ см}^{-1}$ и $1300-1800\text{ см}^{-1}$ при pH 11 (спектр 2) сглаживается на спектре шлака измельченного при pH 5,5 (спектр 1), что может служить доказательством выделения кремниевой кислоты с поверхности шлака в раствор при pH 5,5. Кроме того, пик колебаний групп OH характерных для адсорбированных на шлаке молекул воды в области $2750-3000\text{ см}^{-1}$ (спектр 2) исчезает после измельчения шлака в среде с pH 5,5 (спектр 1), что свидетельствует о большей гидрофобизации поверхности шлака при измельчении его в кислой среде.

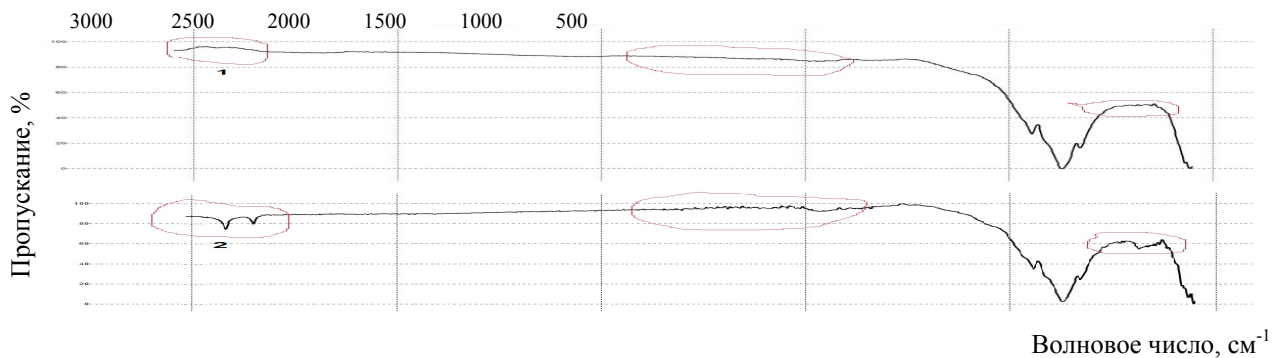


Рисунок 18- ИКС-Фурье шлака после измельчения в среде 1) pH 5,5; 2) pH 11

Установлено, что из параметров ионного состава щелочной оборотной воды значимыми для флотационной активности шлака являются концентрация ионов меди и общая жесткость (рис. 19а,г). Концентрация ионов железа (19,б) и ионов цинка (19,в) в диапазоне значений концентраций (pH 11), возможных при флотации, не влияет на извлечение меди.

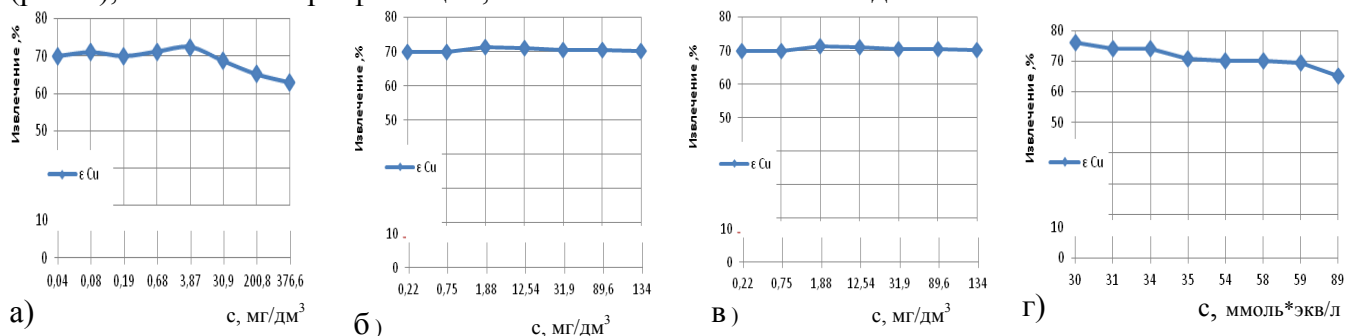


Рисунок 19 - Влияние концентрации а) меди, б) цинка, в) железа и г) жесткости в оборотной воде на извлечение меди в концентрат при флотации медного шлака третьего типа

Увеличение концентрации ионов меди в оборотной воде с 0,04 до 3,78 мг/л приводит к увеличению извлечения меди на 3% (рисунок 19,а). Последующее увеличение концентрации ионов меди приводит к снижению выхода медного концентрата и извлечения в него меди, что визуально сопровождается нарушением пенообразования. Увеличение общей жесткости с 30 до 89 ммоль*экв/л

приводит к снижению извлечения меди с 75 до 64% (рис. 19,г). На основании полученных результатов дополнительными критериями кондиционирования воды выбраны следующие: повышение концентрации меди не более 3-4 мг/л и снижение общей жесткости до 30 ммоль*экв/л. Поисковые исследования влияния способа снижения рН оборотной воды до флотационного оптимума на извлечение меди показали, что наиболее эффективным (рис. 20) является подкисление оборотной воды серной кислотой (прирост по извлечению 3,2%) и сульфатом железа (II) (прирост извлечения 5,1%). Кроме того, определено, что аэрационная подготовка оборотной воды до нейтральных рН позволяет получить прирост по извлечению меди. В дальнейшем эксперименте требуемое значение рН оборотной воды достигалось несколькими способами: реagentным подкислением; аэрационной подготовкой; смешением оборотной и подотвальной вод; комбинацией смешения вод и реagentного подкисления. Более высокие показатели извлечения меди получены при комбинированном способе кондиционирования вод (рис.21), который состоял из нескольких этапов: 1 этап - аэрационная подготовка оборотной воды до рН 7,5 -8,5; 2 этап - смешение проаэрированной оборотной воды с подотвальной водой в определенном соотношении для уменьшения расхода подкислителя, снижения общей жесткости и повышения концентрации меди; 3 этап - подача серной кислоты в подготовленную на первых двух этапах воду до заданных значений рН.

В результате анализа вышепредставленных результатов механизм повышения извлечения меди из плохо раскристаллизованных, тонкоизмельченных фаялит-магнетито-пиритовых медных шлаков в пенный продукт флотации, наиболее выражено проявляющемся при измельчении при рН5,5, является комплексным и может быть описан следующими процессами:

- 1) Пептизация и депрессия фаялита за счет адсорбции продуцируемых при растворении фаялита продуктов метакремниевой кислоты в ДЭС.
- 2) Гидрофобизирующая модификация поверхности медистого пирита, адсорбирующемся на нем по средству сульфидом железа, который образуется при контакте ионов Fe^{2+} и продукта разложения свежееобнаженной поверхности пирита в кислой среде - сероводорода по реакции: $Fe^{2+} + H_2S \uparrow = FeS \downarrow + 2H^+$ (6)
- 3) Гидрофобизация поверхности окисленных медьсодержащих фаз элементной серой и сероводородом, образующимися при разложении поверхности пирита в кислой среде.
- 4) Активация ионами меди пиритных медьсодержащих глобул медистого пирита.
- 5) Повышение контрастности поверхности измельченных частиц шлака за счет растворения известкового налета.

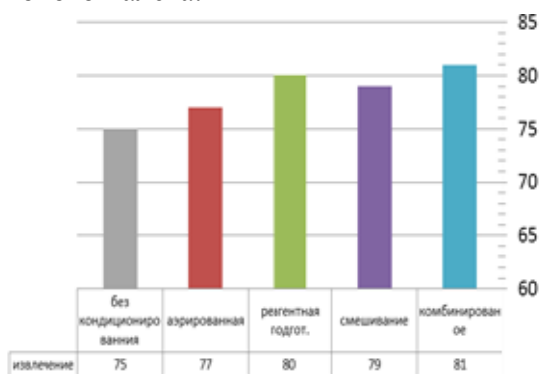


Рисунок 21 - Влияние способа кондиционирования оборотной воды на извлечение меди



Рисунок 20 - Влияние способа подкисления оборотной воды на извлечение меди в концентрат

Все это обеспечивает более селективное закрепление собирателя на подготовленных поверхностях медьсодержащих фаз, что подтверждается повышением извлечения меди в концентрат при снижении адсорбции ксантогената.

3. Комплекс технологических операций в установленной последовательности и условиях реализации, заключающейся в тонком измельчении исходного труднообогатимого

лежалого медного шлака фаялит-магнетито-пиритового типа в кондиционированной до кислой pH 5,5 ед. оборотной воде, флотации при нейтральных pH с подачей дополнительного к БКК собирателя-аэрофлота серии БТФ 1614 в соотношении 1:3, приводит к повышению извлечения меди на 10%, золота на 5%, серебра на 5% при сохранении качества медного продукта.

Изучена возможность интенсификации флотации шлака на кондиционированной оборотной воде с применением комбинации сульфидрильных реагентов-собирателей бутилового ксантогената калия (БКК) и аэрофлотов серии БТФ. Выбор дополнительного собирателя основан на возможности реагента проявлять свои собирательные свойства в кислых средах.

Сравнение, оценка и выбор оптимальных показателей реагентного режима флотации проводились по показателям эффективности обогащения, рассчитанной по формуле Хенкока–Луйкена.

$$E = Y_i(\beta_i - \alpha) / \alpha(100 - \alpha),$$

где Y_i – выход пенного продукта, %;

β_i – содержание меди в продукте;

α – содержание меди в исходном шлаке.

Флотация проведена в нейтральной среде при pH 6,5-7,5 с использованием комбинации собирателей БКК и БТФ. По результатам эксперимента (рис. 22) выбран дополнительный к БКК реагент БТФ 1614 при соотношении 3 части БКК, 1 часть БТФ.

Найденные технологические решения реализованы в укрупненных лабораторных испытаниях. Схема флотации шлака представлена на рис. 23.

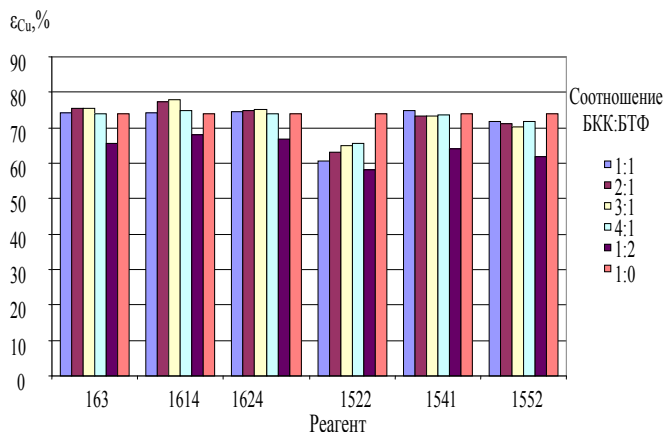


Рисунок 22- Извлечение меди в концентрат в зависимости от соотношения основного и дополнительного собирателей

Применение комплекса технологических операций в установленной последовательности: измельчение исходного шлака в кислой при pH 5,5, кондиционирование оборотной воды фабрики

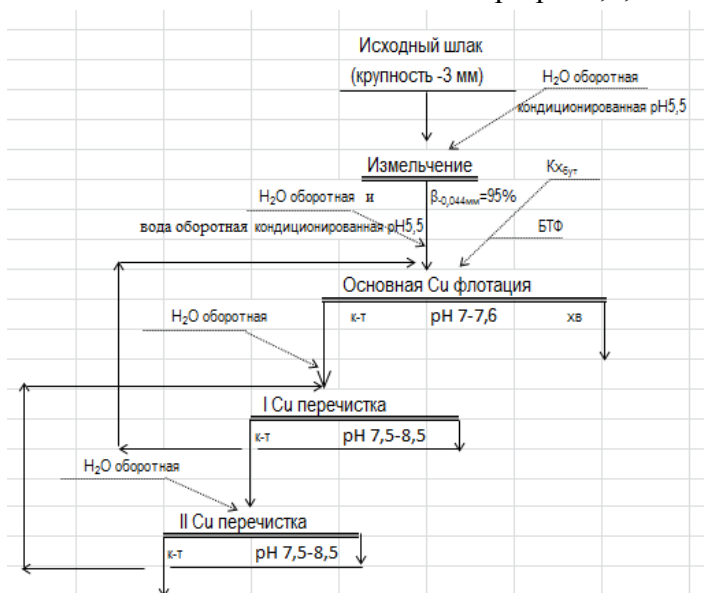


Рисунок 23 - Схема флотации шлака при укрупненных лабораторных испытаниях

подкислением, проведение основной, перечистной флотации в нейтральной (слабощелочной) среде с добавкой дополнительного собирателя аэрофлота серии БТФ 1614, приводит к повышению извлечения меди на 10,0%, золота на 5,0%, серебра на 5%, при сохранении качества медного продукта (табл. 8). Качественно-количественные схемы укрупненных лабораторных испытаний флотации труднообогатимого шлака фаялит-магнетито-пиритового типа представлены на рис. 24.

Таблица 8. Результаты замкнутых опытов при укрупненных лабораторных испытаниях

№ оп	Наименование	Выход, %	β^{Cu} , %	β^{Au} , г/т	β^{Ag} , г/т	ε^{Cu} , %	ε^{Au} , %	ε^{Ag} , %	Условия
1	Си продукт	10,63	13,04	1,50	53,30	69,21	39,79	50,52	Исходные
	хвост	89,37	0,69	0,27	6,21	30,79	60,21	49,48	
	шлак	100	2,00	0,4	11,22	100,0	100,0	100,0	
2	Си продукт	12,25	12,98	1,46	51,55	79,4	44,91	55,63	Рекомендуемые
	хвост	87,75	0,47	0,25	5,74	20,6	55,09	44,37	
	шлак	100	2,01	0,4	11,35	100,0	100,0	100,0	

Для реализации переработки труднообогатимого медного шлака, требующего для эффективной флотации создания слабокислой среды в измельчении, в условиях фабрики предложено осуществлять локальный сбор кислых подотвальных вод в специально для этого построенный отстойник с целью подачи их в качестве подкисляющей добавки к высокощелочной оборотной воде, и кондиционирование оборотной воды комбинированным способом перед подачей в измельчение и во флотацию в специально установленных для этого чанах-смесителях, которые снабжены датчиками pH и ОВП.

Предлагаемое решение позволит снизить техногенную нагрузку на природные водные объекты за счет снижения забора и сброса подотвальных вод, уменьшит экологические штрафы, ежегодно выплачиваемые предприятием.

Экономический эффект от реализации технологического решения по интенсификации процесса флотации труднообогатимого лежалого медного шлака в условиях обогатительной фабрики Сибайского филиала АО «Учалинский ГОК» составит 20 000 000 руб. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, предложено решение актуальной научной задачи интенсификации флотации труднообогатимого лежалого медного шлака в условиях водооборота обогатительной фабрики, перерабатывающей медные и медно-цинковые руды, заключающееся в установлении закономерностей флотируемости различных фаз шлака в условиях водооборота, раскрытии механизмов повышения извлечения меди в пенный продукт в слабокислой среде, определении оптимальных режимов подготовки и флотации шлака, обеспечивающих повышение извлечения меди и сопутствующих драгоценных металлов в концентрат.

Основные результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1) Анализ литературных источников, сопоставление априорных экспериментальных данных, мониторинг промышленной переработки шлаков различных металлургических предприятий в условиях водооборота показали, что при их флотации извлечение меди варьирует от 45% до 90%, и одним из основных параметров, влияющих на извлечение меди, является качество оборотной воды.

2) Показано, что медные шлаки могут быть разделены на легкообогатимые (извлечение меди более 80%), среднеобогатимые (извлечение меди более 70%), труднообогатимые (извлечение меди менее 70%). Установлено, что технология генезиса шлака, приводящая к возрастанию доли магнетита в шлаке более 15% и появлению пирита, способствует формированию средне- и труднообогатимого шлака. Впервые разработана типизация медных шлаков, в качестве классификационного признака, в которой заложено соотношение силикатных, оксидных, сульфидных соединений железа в матрице, влияющее на морфометрические и технологические свойства шлака.

3) Показано, что каждому типу шлака соответствует pH оборотной воды, при котором наблюдается максимальное извлечение меди в продукт. Для шлака фаялит-ферритового типа pH 11, для фаялит-феррито-магнетитового типа pH 10, фаялит-магнетито-пиритового типа pH 5,5. Показано, что при измельчении труднообогатимого шлака до 95% класса минус 0,044 мм в области pH 5,5 наблюдается максимальное извлечение меди, золота, серебра в продукт.

4) Установлено, что шлак третьего фаялит-магнетито-пиритового типа в щелочной среде является труднообогатимым. Он характеризуется мелкозернистой неравновесной, вплоть до скрытокристаллической, структурой, преобладанием медных минеральных зерен размерностью от 10 до 70 мкм с круглым фактором формы до 0,55, с преобладанием силикатов и оксидов железа, состоящих из ферритов и магнетита, и в основной своей массе представлен лежалым шлаком, в котором присутствует сульфидная, оксидная, металлическая формы меди. Отличительной особенностью труднообогатимого по меди шлака является наличие сульфидов железа – пирита, пирротина. Характерно присутствие пиритовых медьсодержащих глобул и сложных сростков, по типу твердых растворов, соединений меди и железа.

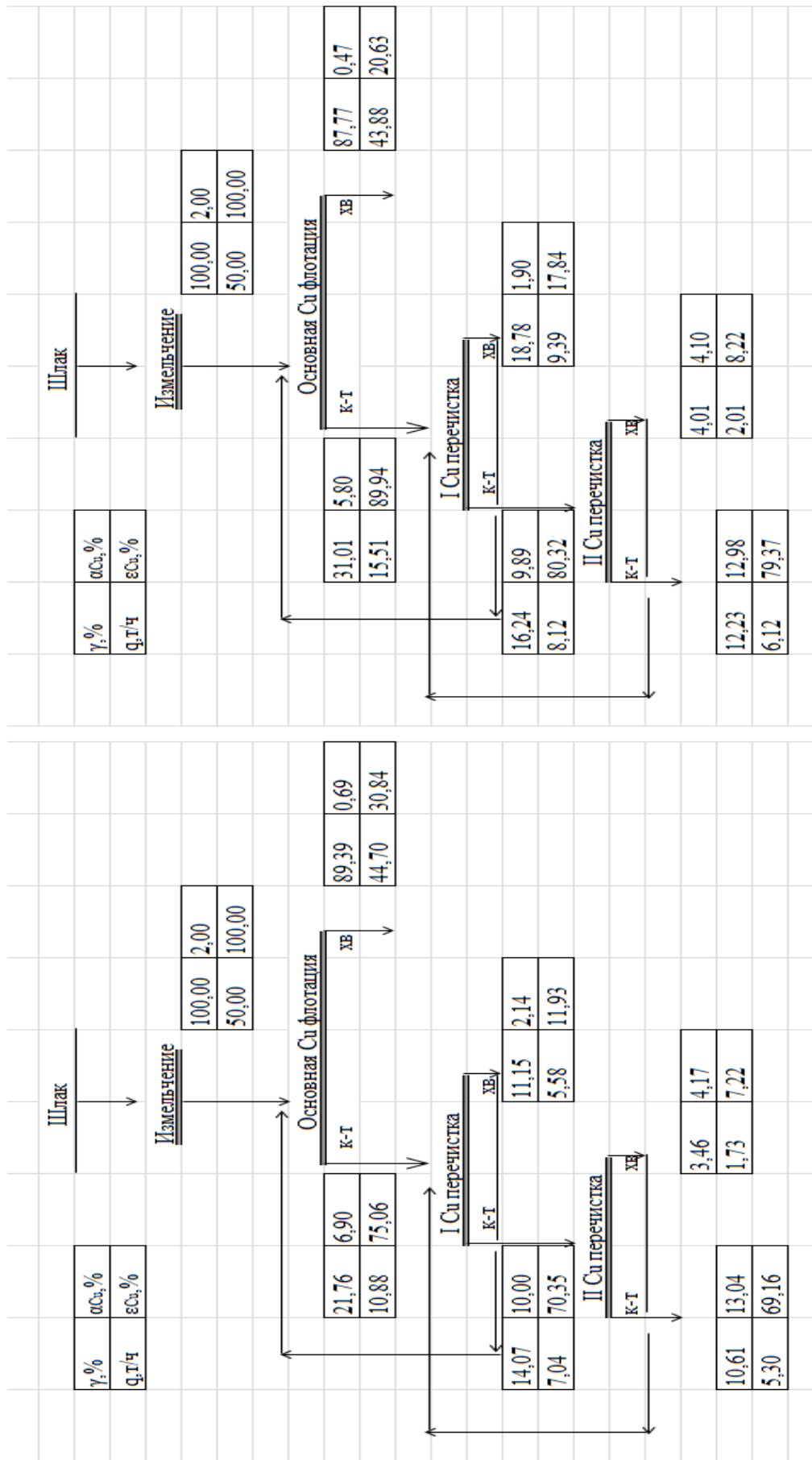
5) Обоснованы критерии и разработан комбинированный способ кондиционирования оборотной воды с использованием подотвальной кислой воды, который позволяет обеспечивать в процессе измельчения механохимическую активацию медьсодержащих фаз труднообогатимого шлака.

6) Выявлены и описаны закономерности влияния и механизм механохимической модификации поверхности разных фаз труднообогатимого шлака при измельчении в кислой среде. Механизм повышения извлечения меди при флотации плохо раскристаллизованных, тонкоизмельченных фаялит-магнетито-пиритовых медных шлаков является комплексным и заключается в следующем: пептизация и депрессия фаялита за счет адсорбции продуцируемых при растворении фаялита продуктов метакремниевой кислоты в ДЭС; гидрофобизирующая модификация поверхности «медистого пирита», адсорбирующемся на нем по сродству сульфидом железа, который образуется при контакте ионов Fe^{2+} и продукта разложения свежееобнаженной поверхности пирита в кислой среде – сероводорода; гидрофобизация поверхности окисленных медьсодержащих фаз элементной серой и сероводородом, образующимися при разложении поверхности пирита в кислой среде; активация ионами меди пиритовых медьсодержащих глобул «медистого пирита»; повышение контрастности поверхности измельченных частиц шлака за счет растворения известкового налета.

7) Определены параметры флотуемости, установлены количественные зависимости концентрирования меди, золота и серебра в продуктах разделения при использовании реагентов серии БТФ в качестве дополнительного собирателя к БКК.

8) Разработаны практические рекомендации по вовлечению труднообогатимого лежалого медного шлака фаялит-магнетито-пиритового типа в переработку в условиях водооборота обогатительной фабрики и комплекс технологических операций: комбинированное кондиционирование оборотной воды; тонкое измельчение исходного шлака в кондиционированной до кислой pH 5,5 ед. оборотной воде; флотация при нейтральных pH с подачей дополнительного собирателя - аэрофлота серии БТФ 1614 в соотношении 1:3 с БКК, - обеспечивающий повышение извлечения меди на 10%, золота на 5%, серебра на 5% при сохранении качества медного продукта.

9) Экономический эффект от реализации технологического решения по интенсификации процесса флотации труднообогатимого лежалого медного шлака в условиях обогатительной фабрики Сибайского филиала АО «Учалинский ГОК» составит 20 000 000 руб. в год.



А)

Б)

Рисунок 24. Качественно-количественная схема флотации труднообогатимого лежалого медного шлака фаялит-магнетито-пиритового типа в условиях водооборота обогатительной фабрики. А) исходный, Б) рекомендуемый режим

**Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях
по перечню, рекомендованному ВАК РФ**

1. **Сабанова М.Н.** Применение селективных собирателей при флотации медных шлаков// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №4. С. 415-419.
2. **Сабанова М.Н.** Комбинация реагентов-собирателей во флотационном процессе труднообогатимых шлаков медеплавильного производства. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 3 (98). С. 205-210
3. **Сабанова М.Н.** Влияния способа кондиционирования вод на флотацию пиритсодержащих шлаков медной плавки /Шадрунова И.В., Орехова Н.Н. //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №19. С. 41-45.
4. **Сабанова М.Н.** Флотация медных шлаков в условиях замкнутого водооборота обогатительной фабрики /Шадрунова И.В., Орехова Н.Н., Горлова О.Е. //Цветные металлы. 2014. № 10 (862). С. 16-24.
5. **Сабанова М.Н.** Типизация медных шлаков уральского региона, практика и перспективы флотационной переработки на действующих обогатительных фабриках /Савин А.Г., Шадрунова И.В., Орехова Н.Н. // Цветные металлы. 2013. № 8 (848). С. 14-19.
6. **Сабанова М.Н.** Изыскания путей повышения эффективности обогащения тонковкрапленных руд южно-уральского региона /Шадрунова И.В., Орехова Н.Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 6. С. 118-124.

Статьи в журналах

7. **Сабанова М.Н.** Технологическая минералогия медных шлаков /Орехова Н.Н., Горбатова Е.А./ Минералогия техногенеза. 2015. № 16. С. 107-114.

Материалы международных, всероссийских и региональных конференций

8. **Сабанова М.Н.** Флотационное обеднение шлака медной плавки в условиях существующего водооборота обогатительной фабрики, перерабатывающей медные и медно-цинковые руды /Шадрунова И.В., Орехова Н. //Фундаментальные основы технологий переработки техногенных отходов: материалы Международного конгресса «Техноген -2012». Екатеринбург: Изд-во « Форт-диалог-Исеть», 2012. – С. 391-395.
9. **Сабанова М.Н.** Переработка гидроминерального техногенного сырья медно-цинковой подотрасли /И.В.Шадрунова, Орехова Н.Н. //Фундаментальные основы технологий переработки техногенных отходов: материалы Международного конгресса «Техноген -2012». Екатеринбург: Изд-во «Форт-диалог-Исеть», 2012. – С.142-145.
10. **Сабанова М.Н.** Изучение вещественного состава шлака медеплавильного производства /Бикбулатова Д.У., Сырлыбаева Г.Ф. // Итоги X уральской горнопромышленной декады (УГПД-2012) г. Екатеринбург, 16-25 апреля 2012 года– С. 41-45.
11. **Сабанова М.Н.** Оценка технологических свойств шлаков медной плавки для их утилизации посредством флотации /Шадрунова И.В. // Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья Плаксинские чтения - 2014: Материалы международного совещания. под общей редакцией В.А. Чантурия, Т.В. Чекушиной. 2014. С. 86-90.
12. **Сабанова М.Н.** Типизация медных шлаков уральского региона / И.В. Шадрунова, Н.Н. Орехова//Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения-2013): материалы Международного совещания (16-19 сентября 2013 г.) / под общ. ред. академика РАН В.А. Чантурии; отв. редактор Т.В Чекушина; Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. С. 76-80.
13. **Сабанова М.Н.** Обоснование режима флотации пиритсодержащих медных шлаков в условиях водооборота /Шадрунова И.В. Орехова Н.Н. //Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья», Плаксинские чтения - 2015: Материалы международного совещания под общей редакцией В.А. Чантурия, Т.В. Чекушиной 21-26 сентября 2015 г. Иркутск С. 98-104.
14. **Сабанова М.Н.** Влияние водородного показателя пульпы на флотационное извлечение меди из шлаков медеплавильного производства /Шадрунова И.В. Орехова Н.Н.//Материалы X Конгресса обогатителей стран СНГ, г.Москва 17-19 февраля 2015г. С. 148-152.

Подписано в печать с оригинал-макета 17.11.2016 г. Формат 60x84 1/16. Бумага «Mega Copy Office». Печать офсетная. Набор компьютерный. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 236.

Издание ИПКОН РАН
111020 г. Москва, Крюковский тупик, д. 4

