

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

КАЮМОВ АБДУАЗИЗ АБДУРАШИДОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФЛОТАЦИИ ТЕННАНТИТА ИЗ
КОЛЧЕДАННОЙ МЕДНО-ЦИНКОВОЙ РУДЫ НА ОСНОВЕ СЕЛЕКТИВНЫХ
РЕАГЕНТНЫХ РЕЖИМОВ ФЛОТАЦИИ

Специальность 25.00.13 - «Обогащение полезных ископаемых»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – Игнаткина Владислава Анатольевна,
д. т. н., доцент, профессор кафедры
«Обогащение и переработка полезных ископаемых
и техногенного сырья НИТУ «МИСиС»

Москва - 2019

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Медь является высоколиквидным цветным металлом, уровень потребления которого служит показателем производственно-технического потенциала страны. Многообразие минеральных форм меди в сульфидных рудах месторождений РФ, тонкая вкрапленность и тесное взаимопроращение сульфидов цветных металлов и сульфидов железа определяет труднообогатимость сульфидных руд, и осложняет получение кондиционных концентратов с требуемым извлечением целевых минералов по классическим схемам и реагентным режимам флотации. В настоящее время в перерабатываемых колчеданных медно-цинковых рудах Уральского региона, кроме основного сульфида меди – халькопирита (CuFeS_2), все чаще встречаются минералы группы блеклых руд - теннантит $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$, тетраэдрит ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$). В сравнении с халькопиритом массовая доля меди в теннантите выше более чем на 15 %.

Флотация тонковкрапленных колчеданных медно-цинковых руд проводится с использованием в качестве собирателя бутилового ксантогената в высокощелочной известковой среде. Бутиловый ксантогенат обеспечивает флотацию халькопирита и других сульфидов цветных металлов; высокощелочная известковая среда - низкую флотоактивность пирита. При данном реагентном режиме теннантит демонстрирует низкую флотоактивность в сравнении с халькопиритом и теряется с хвостами флотации. В низкощелочной среде бутиловый ксантогенат не обеспечивает контрастность флотации между теннантитом, другими сульфидами меди и пиритом. В связи с этим разработка новых технологических приемов, реагентных режимов флотации тонковкрапленных колчеданных медно-цинковых руд способствующих повышению контрастности технологических свойств сульфидов цветных металлов и сульфидов железа остаются актуальной научно-практической задачей. Проблема изучения причинно-следственных связей с целью регулирования контрастности технологических свойств разделяемых сульфидов является актуальной проблемой.

Теннантит представляет собой недостаточно изученный объект исследований как с позиции изучения его отдельных поверхностных свойств (Sasaki K., Petrus H.T.B.M., Fullston D., Ralston J. и др.), так и практики флотации (Кисляков Л. Д., Нагирняк Ф. И., Соложенкин П.М., Ягудина Ю.Р., Бочаров В.А., Игнаткина и др.).

Многолетними исследованиями (Пшеничный Г.Н., Мозгова Н.Н., Филимонов С. В., Спиридонов Э.М, Филимонов В. Н., Корюкин Б. М., Копылов В. М. и др.) сульфидных руд Узельгинского месторождения Уральского региона показано, что руды данного месторождения труднообогатимы, характеризуются неравномерной вкрапленностью сульфидов меди, сфалерита в руде от ед. мкм до десятых долей мм; тонким взаимопроращением сульфидов меди

с сульфидами железа и породными минералами, а присутствие в ряде рудных тел месторождения теннантита, в еще большей степени затрудняет достижение требуемых технологических показателей.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00393 «Фундаментальные исследования направленного формирования технологических свойств минералов цветных и благородных металлов и условий их разделения при селективном массопереносе из упорных сульфидных руд», 2014-2016 г.), Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-05-00890 «Изучение механизма направленного формирования физико-химических и технологических свойств трудноразделяемых минералов массивных пирротин-пиритных медно-цинковых руд», 2017-2019 г., проект № 18-35-00213 «Экспериментальное изучение механизма повышения контрастности флотоактивности минералов группы блеклых руд при разработке селективных реагентных режимов флотации из упорных колчеданных медно-цинковых руд», 2018-2020 г., и договоров на выполнение НИР с АО «Учалинский ГОК» (хоз/дог. № 050/16-615).

Цель работы

Повышение эффективности селективной флотации теннантита из труднообогащаемой колчеданной медно-цинковой руды Узельгинского месторождения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ состояния проблемы переработки сульфидных руд, содержащих медно-мышьяковистые минералы;
- изучение вещественного состава теннантитсодержащей колчеданной медно-цинковой руды, структуры и состава теннантита в пробе руды, а также мономинеральной фракции теннантита Узельгинского месторождения;
- исследование смачиваемости, условий флотоактивности мономинеральных фракций (рН, продолжительности кондиционирования, концентрации тиосульфат-ионов) теннантита, пирита, халькопирита, сфалерита сульфгидрильными собирателями, которые используются в практике флотации сульфидов меди, такие как: диизобутиловый дитиофосфат; тионокарбаматы - ИТК, Aero 5100, Aero 9863, в сравнении с бутиловым ксантогенатом;
- исследование кинетики адсорбции сульфгидрильных собирателей – диизобутилового дитиофосфата, ИТК на теннантите и пирите в статических условиях в сравнении с бутиловым ксантогенатом;

- исследование влияния соотношения компонентов композиции ионогенного (ДТФ) и неионогенного (ИТК) сульфгидрильных собирателей на флотоактивность теннантита и пирита;
- разработка реагентного и схемного режима селективной флотации труднообогатимой теннантитсодержащей колчеданной медно-цинковой руды Узельгинского месторождения на основе установленных параметров и условий проведения флотации.

Научная новизна

1. Обнаружен нанографит на поверхности теннантита Узельгинского месторождения, который объясняет его высокую удельную поверхность (6-13 м²/г); аполярный нанографит имеет сродство с молекулярной формой сульфгидрильного собирателя и предопределяет использование в сочетании сульфгидрильной композиции неионогенного компонента – тионокарбамата (ИТК).
2. Экспериментально установлено, что компоненты композиции ИТК, ДТФ обеспечивают наибольшую разницу в энергии активации активированной адсорбции на теннантите ($E_a^{\text{ИТК}} = 18,4$ и $E_a^{\text{ДТФ}} = 12,82$ КДж/моль) и пирите ($E_a^{\text{ИТК}} = 25,24$ и $E_a^{\text{ДТФ}} = 29,14$ КДж/моль), в сравнении с бутКх ($E_a^{\text{FeS}_2} = 4,94$ и $E_a^{\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}} = 9,17$ КДж/моль).
3. Установлены факторы, негативно влияющие на контрастность флотоактивности мономинеральной фракции теннантита по сравнению с другими сульфидами меди и пиритом: продолжительность кондиционирования сульфгидрильных собирателей с теннантитом, высокая концентрация тиосульфат-ионов (более 300 мг/л) и высокая щелочность (pH>10) пульпы.

Практическая значимость и реализация результатов работы

Установлено, что снижение технологических показателей флотации теннантитсодержащей колчеданной медно-цинковой руды в высокощелочной известковой среде (pH>10) с применением бутилового ксантогената являются следствием отличия поверхностных и технологических свойств теннантита от других сульфидов Узельгинского месторождения. Разработаны реагентный режим и технологическая схема флотации теннантитсодержащей колчеданной медно-цинковой руды с использованием сульфгидрильного собирателя М-ТФ (ТУ 2452-011-40065452-2012) в низкощелочной среде.

Укрупненными лабораторными испытаниями разработанной технологии флотации с М-ТФ теннантитсодержащей колчеданной медно-цинковой руды Узельгинского месторождения показан прирост извлечения цветных металлов по сравнению с реагентным режимом с

бутиловым ксантогенатом в высокощелочной известковой среде: меди – с 68 до 81,8% при массовой доле меди 18 % в медном концентрате; цинка – с 50,0 до 70,6% при массовой доле цинка 44% в цинковом концентрате. Реагентный и схемный режимы флотации с М-ТФ применяются при флотации труднообогатимой теннантитсодержащей колчеданной медно-цинковой руды на Учалинской обогатительной фабрике.

Методы исследований

В работе использованы следующие классические и современные инструментальные методы исследования: рентгенодифракционный анализ (D2 Phaser, Bruker, USA); рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (рентгеновский фотоэлектронный спектрометр PHI Versa Probe II 5000 фирмы Physical Electronics, USA); измерение удельной поверхности мономинералов методом низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ) (Nova 2200E, Quantachrome instruments, USA); рентгенофлуоресцентная спектрометрия (ElvaX Light SDD); ультрафиолетовая спектроскопия (спектрофотометр UV-VIS-NIR Cary 6000i, Agilent, USA); метод потенциометрии, включающая изучение кинетики адсорбции на автоматизированной установке, а также для контроля pH и Eh; измерение краевого угла смачивания (CAM 101 KSV Instruments Ltd., Finland); инфракрасная спектроскопия многократно нарушенного полного внутреннего отражения (ИКС МНПВО, спектрофотометр Specord M80 (*Карл Цейс-Йена*, Германия) с программным обеспечением «Soft Spectra»; просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ, электронный микроскоп JEM-2100 высокого разрешения, фирмы JEOL с энергодисперсионной приставкой микрорентгеноспектрального анализа INCAx-sight Energy «OXFORD instruments», Япония); минералогический анализ (Mineral Liberation Analyzer system Quanta 650, FEI, Australia); беспенная флотация мономинералов (трубка Халлимонда), пенная флотация мономинералов и рудного материала; химические методы анализа; методы математической обработки экспериментальных данных.

Обоснованность и достоверность, результатов и выводов диссертационной работы подтверждаются использованием комплекса классических и современных физико-химических методов исследований, значительным объемом полученных экспериментальных данных, сопоставимостью установленных закономерностей на мономинералах с результатами укрупненных лабораторных исследований на руде, промышленных испытаний. Результаты экспериментов обработаны методами математической статистики при доверительной вероятности не менее 95%.

Положения, выносимые на защиту:

- Результаты изучения теннантита Узельгинского месторождения, позволили установить, что особенности технологических свойств теннантита, связаны как с отличным кристаллохимическим составом, так и наличием на поверхности теннантита нанографита и силикатных соединений.
- Выявлены факторы (состояние поверхности, pH, тип собирателя, продолжительность контакта, и предельная концентрация тиосульфат-ионов) и установлены параметры (кондиционирование с собирателем в течение 10 мин, pH – 8-8,5, концентрация тиосульфат-ионов не более 300 мг/л), при которых повышается контрастность флотации теннантита от пирита и сфалерита.
- Результаты изучения вещественного состава, которые показали, что труднообогатимость руды Узельгинского месторождения связана с высокой долей теннантита, наличием в руде высокоактивного мельниковита и тонкой дисперсностью целевых минералов.
- Разработанный реагентный и схемный режимы флотации теннантитсодержащей колчеданной медно-цинковой руды Узельгинского месторождения, включающий частично коллективно-селективную схему флотации с использованием сульфгидрильного собирателя М-ТФ в низкощелочной среде, обеспечивают извлечение меди в концентрат на уровне 82 % при массовой доле меди не менее 18%; извлечение цинка в цинковый концентрат составляет 70 % с массовой долей цинка 44 %.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных международных конференциях, симпозиумах и совещаниях, таких как: «Плаксинские чтения» 2016 (г. Санкт-Петербург), 2017 (г. Красноярск), 2018 (г. Москва), «Уральская горнопромышленная декада» 2016, 2019 (г. Екатеринбург), «Конгресс обогатителей стран СНГ» 2017, 2019 г. Москва; «XIX International Mineral Processing Congress» (IMPC), 2018, г. Москва, «Неделя горняка» 2016, 2017, 2018 г. Москва.

Публикации

По теме диссертации опубликованы 23 работы, из которых 9 статей в рекомендованных изданиях ВАК, включая 6 статей в изданиях, входящих в базы WoS и Scopus, 1 патент РФ и 13 тезисов докладов опубликованных в сборниках материалов совещаний и конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников из 123 наименований и 1 приложения. Диссертация содержит 168 страниц текста, включая – 22 таблицы, 78 рисунков.

Личное участие автора состоит в анализе информации по теме диссертации, планировании и проведении экспериментов, обработке полученных экспериментальных данных, обобщении результатов исследований, участие в проведении укрупнено-лабораторных исследований и в промышленных испытаниях; в написании научных статей, докладов и диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследований, основная идея, практическая значимость и реализация результатов работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ состояния проблемы переработки медных сульфидных руд с мышьяксодержащими сульфидами меди и тенденции их переработки.

Значительная часть исследований теннантита посвящены изучению его генетических особенностей, морфологии, состава и физико-химических свойств. Отмечается повышение флотоактивности теннантита диэтилдитиофосфатом в кислой среде при pH – 4 (Т. Hirajima, Н. К. Sasaki, 2011), однако рекомендации по условиям флотации теннантита из руды отсутствуют.

Несмотря на многочисленные исследования, проблема повышения контрастности флотации сульфидов меди, от сульфидов железа и сфалерита до сих пор остается актуальной.

При изучении механизма взаимодействия сульфгидрильных собирателей с сульфидными минералами внесли большой вклад: Плаксин И.Н., Шафеев Р.Ш., Каковский И.А., Митрофанов С.И., Классен В.И., Мокроусов В.А., Конев В.А., Богданов О.С., Чантурия В.А., Рябой В.И., Матвеева Т.Н., Абрамов А.А., Plackowski S., O'Connor C.T., Bradshaw D.J. , Chandra A.P., Forsling W., Forssberg, E., Leppinen J.O., Fuerstenau M.C. и др.

Во второй главе приведены объекты, методы и методики исследований, подготовки образцов мономинеральных фракций сульфидных минералов, а также результаты изучения характеристик сульфидных минералов, которые использовались в исследованиях.

Объекты исследований – мономинеральные фракции теннантита, халькопирита, пирита, сфалерита (таблица 1), проба теннантитсодержащей колчеданной медно-цинковой руды Узельгинского месторождения; сульфгидрильные собиратели - бутиловый ксантогенат (бутКх), диизобутиловый дитиофосфат (ДТФ), изопропиловый дитиофосфат (ИДФ), О-изопропил-N-

метилтионокарбамат (ИТК), М-ТФ (композиция дитиофосфата и тионокарбамата с преобладанием доли тионокарбамата), малополярные сульфгидрильные собиратели Aero 5100 и Aero 9863 (Solvey), представляющие собой смесь тионокарбаматов, которые используются в практике флотации сульфидных руд цветных металлов.

В изучаемой теннантитсодержащей колчеданной медно-цинковой руде массовая доля меди и цинка составляют 1,77 и 1,98 %. Фазовый состав минеральных соединений меди – в основном первичные сульфиды меди (теннантит, халькопирит) с массовой долей 1,40 % при распределении 84,6%, небольшое количество вторичных сульфидов меди (халькозин, ковеллин, борнит) и свободной окисленной (малахит, азурит, хризоколл, брошантит, куприт). Фазовый состав минеральных соединений цинка – в основном цинк сульфидный (ZnS) с массовой долей 0,9 % при распределении 46,5% и ферриты цинка (ZnS·FeS) с массовой долей 1,0 % с распределением 51,3 % и небольшое количество свободно окисленной и в виде сложных силикатов. В руде обнаружен графит.

Основным рудным минералом в руде является пирит (89,0%). Теннантит является основным концентратом меди (распределено более 84,0%). Минеральными формами цинка являются ферриты цинка ZnS·FeS и сфалерит (ZnS). Среди породообразующих минералов, составляющих в сумме 5,01%, преобладают карбонаты, и кварц с массовой долей 2,60 и 1,91%.

Отличительной особенностью пирита данного месторождения является развитие по нему мельниковита – порошковатых скоплений пирита в ассоциации с галенитом и блеклыми рудами (рисунок 1, а).

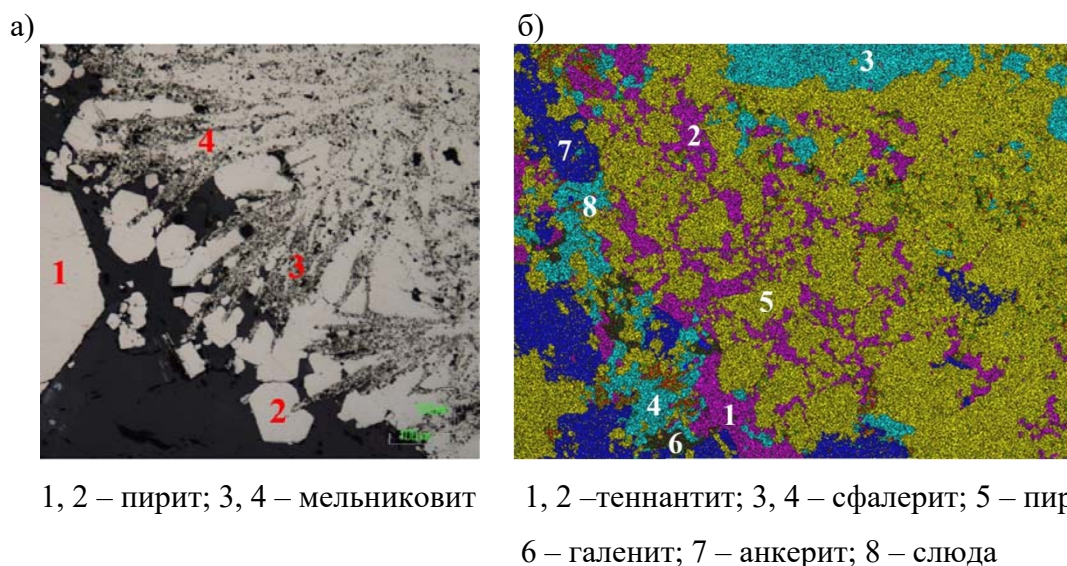


Рисунок 1 – Пирит, замещенный лучистыми агрегатами мельниковита (а) и тончайшие срастания теннантита с пиритом (б)

Степень замещения поверхности пирита мельниковитом различная – от слабой ($> 10\%$) до весьма значительной ($< 70\%$). Установлено тесное сростание теннантита с пиритом и породными минералами (рисунок 1, б) по результатам минералогического анализа.

Высокая доля теннантита в руде и его тонкое взаимопрораствание с пиритом, сфалеритом и породными минералами указывают на труднообогатимость руды.

Методы исследований – рентгенодифракционный анализ, использовался для решения задач, связанных с определением типа и количественно-фазового состава теннантита; рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) для изучения зарядового состояния идентифицированных элементов и анализ примесей на теннантите; измерение удельной поверхности мономинералов методом БЭТ; рентгенофлуоресцентная спектрометрия – качественный и количественный экспрессный анализ состава исходного материала и продуктов обогащения; ультрафиолетовая спектроскопия для контроля концентраций флотационных реагентов при адсорбционных и флотационных исследованиях; метод потенциометрии включающая изучение кинетики адсорбции в статических условиях, и для контроля pH и Eh; измерения краевого угла смачивания для оценки смачиваемости поверхности минералов; инфракрасная спектроскопия, метод многократно нарушенного полного внутреннего отражения (ИКС МНПВО) для изучения различий в поверхностных соединениях изучаемых минералов; использовался также метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) для решения задач связанных с определением толщины и структуры органической пленки на поверхности изучаемых мономинералов, идентификация элементного состава, как самих образцов, так и пленок, определение фазового состава мономинералов с помощью электронографии; минералогические анализы руды для определения расчётного минерального и элементного состава, изучение распределения элементов по минералам; определение распределения минералов по сросткам; беспенная флотация мономинералов, пенная флотация мономинералов и рудного материала; химические методы анализа – йодометрическое титрование для контроля концентрации тиосульфат-ионов.

Таблица 1 – Основные характеристики мономинеральных образцов сульфидных минералов

Минерал	Крупность, мкм	Массовая доля минералообразующих элементов, %						Удельная поверхность, м ² /г
		Cu / Cu _{стех.}	As / As _{стех.}	Fe / Fe _{стех.}	Zn / Zn _{стех.}	S / S _{стех.}	др.при-меси	
теннантит	-40 +10	47,62/ 51,56	19,00/ 20,26	н.а.	н.а.	31,18/ 28,18	2,20	6,0-13,0
халькопирит		32,84/ 34,63	н.а.	30,88/ 30,43	н.а.	35,62/ 34,94	0,66	0,845
сфалерит		1,00	н.а.	3,72	65,00/ 67,10	30,28/ 32,90	0,20	0,814
пирит		0,18	н.а.	45,90/ 46,55	н.а.	53,82/ 53,45	0,10	0,440

По результатам рентгенодифракционного анализа установлен отличный кристаллохимический состав теннантита Узельгинского месторождения, которому соответствует формула $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{12}$, что отличается от известной формулы $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$.

Определены удельные поверхности изучаемых сульфидных минералов. Установлена высокая удельная поверхность теннантита Узельгинского месторождения составляющая в диапазоне 6-13 м²/г; для сульфидов – пирита, халькопирита и сфалерита характерна удельная поверхность менее 1 м²/г (таблица 1). Расчетная удельная поверхность теннантита составляет 0,326 м²/г.

На рисунке 2 приведены результаты РФЭС и микрорентгеноспектрального анализов исходного теннантита.

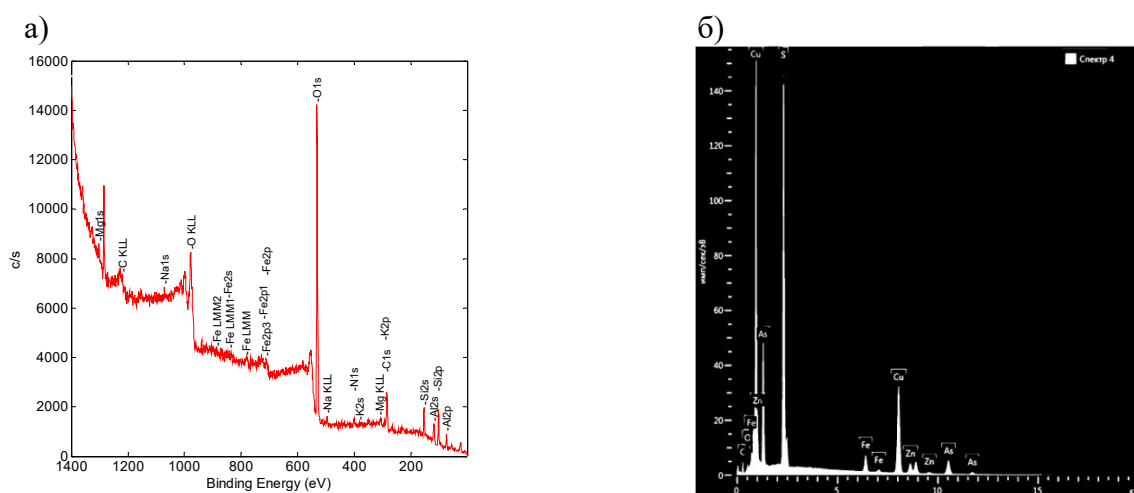


Рисунок 2 – Обзорные спектры РФЭС (а) и микрорентгеноспектрального анализа (б) теннантита Узельгинского месторождения

Методом РФЭС на поверхности теннантита обнаружены силикатные соединения (SiO_2) и отсутствие атомов Cu, As, S на глубине 2 нм, в то время как микрорентгеноспектральный анализ фиксирует атомы Cu, As, S в объеме, что свидетельствует о преимущественной силикатной «шубе» на теннантите, указывающие на его сложный поверхностный состав, отличные технологические свойства и труднообогатимость руды.

В третьей главе представлены закономерности влияния бутилового ксантогената, диизобутилового дитиофосфата, ИТК, Аеро 5100, Аеро 9863 на смачиваемость, адсорбцию, и флотоактивность мономинерального теннантита, пирита, халькопирита и сфалерита и продукты беспенной флотации изученные на ПЭМ.

Методом просвечивающей электронной микроскопии на поверхности теннантита, выделенного в концентрат беспенной флотации, установлен графит (рисунок 3).

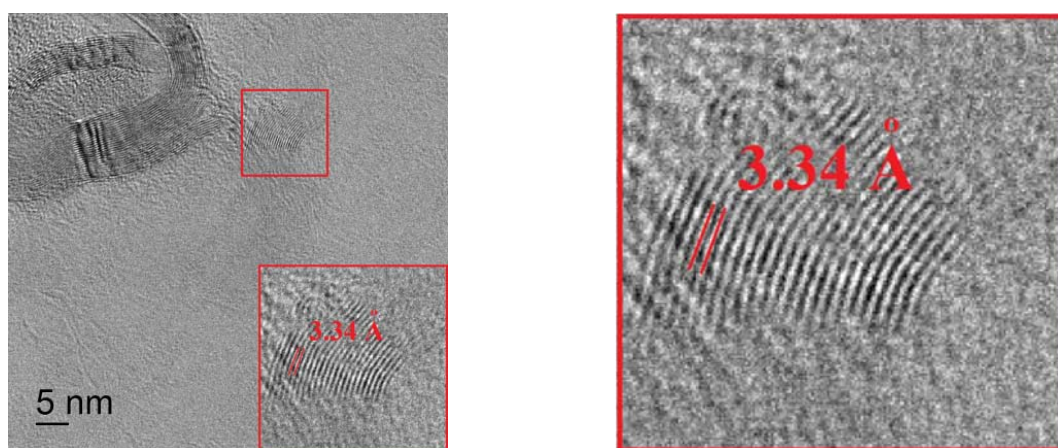
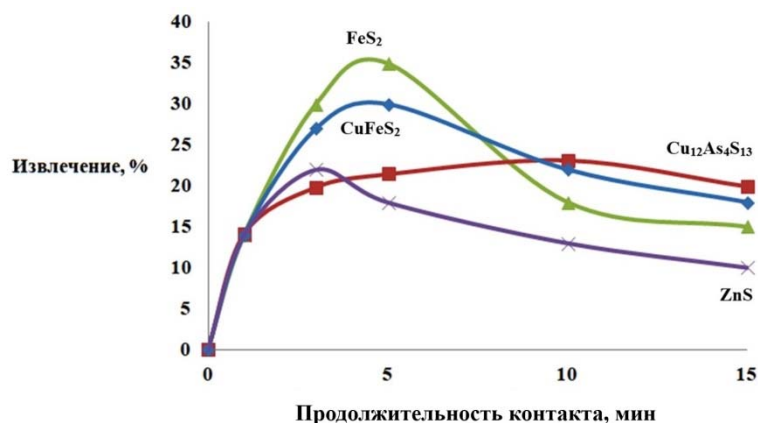


Рисунок 3 – Изображение ПЭМ графита на поверхности теннантита, сфлотированного в концентрат (-40+10 мкм)

Графит на поверхности теннантита объясняет высокую удельную поверхность мономинеральной фракции теннантита ($6-13 \text{ м}^2/\text{г}$), а силикатная «шуба» обнаруженная при РФЭС анализе может играть роль подложки в образовании графита на теннантите Узельгинского месторождения. Таким образом, присутствие графита на поверхности теннантита предопределяет использование малополярных сульфгидрильных собирателей в связи со сродством аполярного графита с низкорастворимым (малополярным) собирателем (ИТК).

Изучено влияние продолжительности перемешивания бутКх на флотоактивность теннантита в сравнении с халькопиритом, пиритом и сфалеритом (рисунок 4).

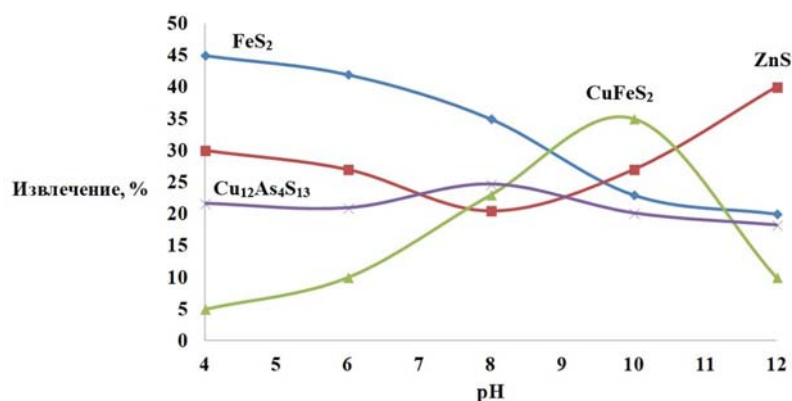


$$d = -40+10 \text{ мкм}, C_{\text{бутКх}} = 10^{-4} \text{ М}, \text{pH}_{\text{исх.}} = 8 (\text{NaOH}), \text{T:Ж} - 1:100$$

Рисунок 4 – Зависимость извлечения теннантита от продолжительности перемешивания с бутКх в сравнении с халькопиритом, пиритом и сфалеритом в условиях беспенной флотации

Установлено, что при монопузырьковой флотации в трубке Халлимонта наибольшее извлечение теннантита (25 %) достигается при большей продолжительности (10 мин) перемешивании с собирателем, чем для пирита, халькопирита и сфалерита, для которых требуется меньшее время контакта (3-5 мин). Во флотационном процессе более длительная продолжительность контакта собирателя с минералами руды может быть обеспечена подачей более устойчивых к окислению собирателей (ИТК, ДТФ), чем бутиловый ксантогенат, в зумпф гидроциклона или в процесс измельчения.

На рисунке 5 приведена зависимость флотоактивности теннантита, в сравнении с халькопиритом, пиритом и сфалеритом от $\text{pH}_{\text{исх.}}$ (4, 6, 8, 10, 12) с использованием бутилового ксантогената, время перемешивания для всех сульфидов составляет 10 минут.



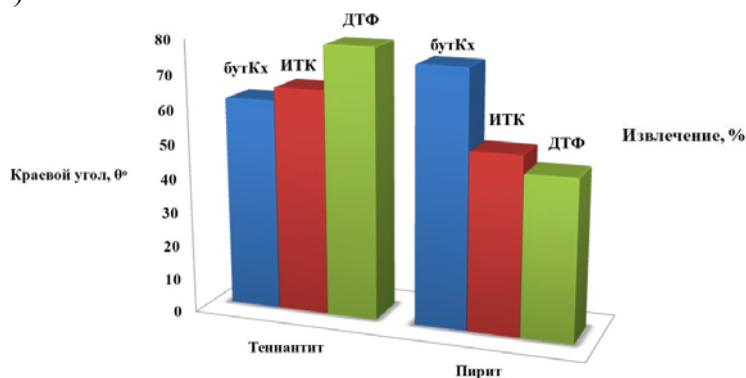
$$d = -40+10 \text{ мкм}, C_{\text{бутКх}} = 10^{-4} \text{ М}, \text{T:Ж} - 1:100$$

Рисунок 5 – Зависимость извлечения сульфидных минералов от $\text{pH}_{\text{исх.}}$ (4 – H₂SO₄; 6, 8, 10, 12 – NaOH) в условиях беспенной флотации с бутКх

Как видно из рисунка 5 в диапазоне $pH_{исх.}$ 4-12 наибольшая разница во флотации теннантита по сравнению с пиритом ($pH = 4$), халькопиритом ($pH = 9-10,5$) и сфалеритом ($pH = 12$) достигается в слабощелочной известковой среде при $pH = 8$.

На рисунке 6 приведены результаты экспериментальных измерений краевого угла смачивания на шлифах теннантита и пирита, обработанных сульфгидрильными собирателями – бутКх, ДТФ, ИТК, $C_{исх.} = 10^{-4}$ М, $pH_{исх.} = 8$ ($Ca(OH)_2$), продолжительность контакта капли воды с обработанной поверхностью составляет 3 мин, а также зависимости извлечения теннантита в сравнении с пиритом, халькопиритом и сфалеритом в слабощелочной среде при использовании бутКх, ДТФ, ИТК, Аеро 9863, Аеро 5100 ($d = -40+10$ мкм, $C_{бутКх} = 20$ мг/л, $pH_{исх.} = 8$ ($Ca(OH)_2$), Т:Ж - 1:100

а)



б)

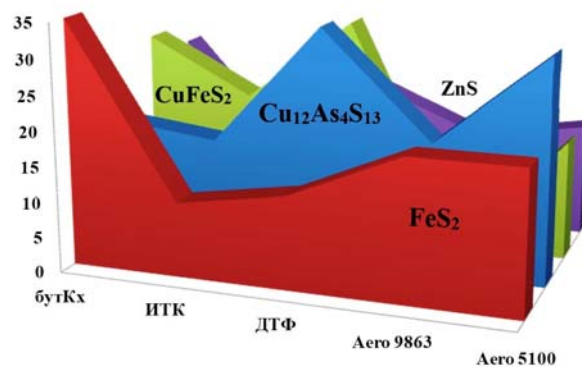


Рисунок 6 – Краевой угол смачивания на теннантите и пирите с бутКх, ИТК, ДТФ (а) и зависимость извлечения теннантита (б) в сравнении с пиритом, халькопиритом и сфалеритом в слабощелочной среде при использовании бутКх, ДТФ, ИТК, Аеро 9863, Аеро 5100 в условиях беспенной флотации

Установлено, что в слабощелочной известковой ($pH_{исх.} = 8$) среде ИТК и ДТФ создают большую разницу величины краевого угла смачивания между теннантитом и пиритом в сравнении с бутКх (рисунок 6, а).

Флотируемость теннантита, пирита, халькопирита, сфалерита с использованием разных сульфгидрильных собирателей образуют следующие ряды (рисунок 6, б):

- для теннантита: ДТФ > Аеро 5100 > бутКх > Аеро 9863 > ИТК;

- для пирита: бутКх > Аеро 9863 ≥ Аеро 5100 > ДТФ > ИТК;

- для халькопирита: ДТФ > бутКх > ИТК > Аеро 5100;

- для сфалерита: бутКх > ДТФ > Аеро 5100 > Аеро 9863 > ИТК, что свидетельствует, что наибольшая разница в извлечении между теннантитом, халькопиритом и пиритом со сфалеритом достигается с использованием ДТФ или ИТК, в сравнении с бутКх, Аеро 9863, Аеро

5100. Таким образом, наибольшая разница в смачиваемости и флотоактивности между теннантитом, пиритом и сфалеритом достигается при использовании ДТФ и ИТК в сравнении с бутКх.

В статических условиях выполнены исследования кинетики адсорбции сульфгидрильных собирателей – бутКх, ДТФ, ИТК на теннантите и пирите в слабощелочной среде ($pH_{исх.} \sim 8$). Константа скорости адсорбции собирателя определялась графическим методом, как угол наклона прямой в координатах $\ln(A - A_i) = f(t)$.

В таблице 2 представлены величины константы скорости адсорбции бутКх, ДТФ, ИТК на поверхности теннантита и пирита.

Таблица 2 – Константы скорости адсорбции сульфгидрильных собирателей на поверхности теннантита и пирита

Минерал	Собиратель	Константа скорости адсорбции, моль/(м ² ·с)			
		T = 20 °C	T = 30 °C	T = 40 °C	T = 50 °C
Теннантит	бутКх	0,0051	0,0052	0,0060	0,0072
	ДТФ	0,0084	0,0091	0,0120	0,0132
	ИТК	0,0038	0,0041	0,0068	0,0070
Пирит	бутКх	0,0085	0,0090	0,0095	0,0103
	ДТФ	0,0023	0,0053	0,0067	0,0072
	ИТК	0,0027	0,0051	0,0067	0,0071

Константа скорости адсорбции бутилового ксантогената выше на пирите в сравнении с теннантитом (таблица 2), в случае использования диизобутилового дитиофосфата константа скорости адсорбции выше на теннантите в 3,6 раза по сравнению с пиритом, в случае ИТК константа скорости адсорбции на теннантите выше в 1,5 раза.

В таблицах 3-4 представлены параметры кинетики адсорбции собирателей на поверхности теннантита и пирита.

Таблица 3 – Уравнения Аррениуса и энергия активации активированной адсорбции собирателей на теннантите и пирите

Собиратель	$k = k_0 \cdot e^{-E_a/RT}$		E_a , КДж/моль	
	Теннантит	Пирит	Теннантит	Пирит
бутКх	$k = 7,9 \cdot e^{-1103,7/T}$	$k = 9,6 \cdot e^{-594,7/T}$	9,17	4,94
ДТФ	$k = 15,75 \cdot e^{-1542,9/T}$	$k = 10,05 \cdot e^{-3506,8/T}$	12,82	29,14
ИТК	$k = 10,10 \cdot e^{-2214,2/T}$	$k = 10,01 \cdot e^{-3037/T}$	18,40	25,24

Показано (таблица 3) что наибольшие значения энергии активации активированной адсорбции ДТФ и ИТК приходится на пирит, лимитирующая стадия находится в переходной

области. На теннантите адсорбция собирателей лимитируется внешней диффузией и определяется доставкой собирателя к поверхности минерала.

На рисунке 7 приведены ИК спектры исходного теннантита и сфлотированного в концентрат трубки Халлимонда с бутКх, ДТФ, ИТК, Аеро 5100. ИКС МНПВО теннантита с диизобутиловым дитиофосатом показали присутствие слабых характеристических полос в области $1057, 1009 \text{ см}^{-1}$, которые относятся к колебаниям связей в группе O-P=S ДТФ, так как сдвиг в высокочастотную область от $1000, 948 \text{ см}^{-1}$, в результате координация протекает через серу; полоса при 668 см^{-1} отнесена к связи S-P=O , поскольку сдвиг в низкочастотную область от 684 см^{-1} , то координация через кислород. Присутствует дисульфид 466 см^{-1} (S-S).

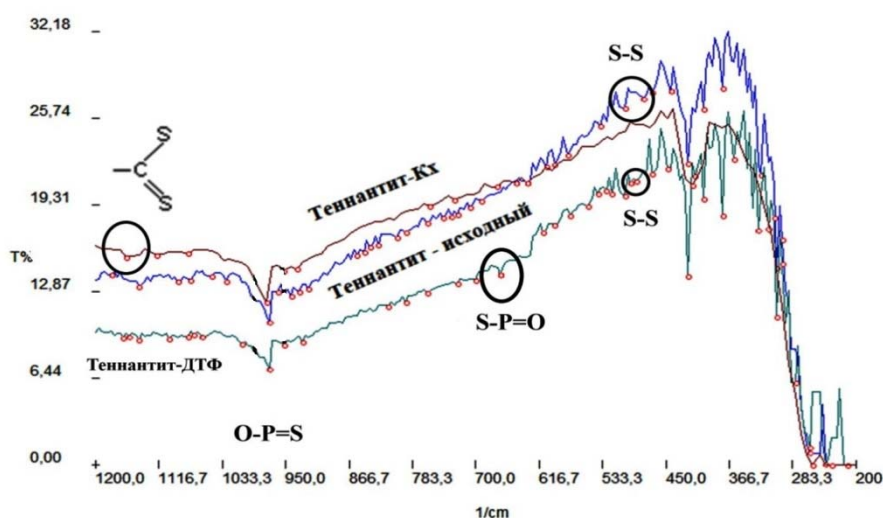


Рисунок 7 – ИК спектры МНПВО исходного теннантита и сфлотированного с бутКх и ДТФ

Бутиловый ксантогенат (рисунок 7) координирует через серу 1160 и 1121 см^{-1} (сдвиг от 1142 и 1071 см^{-1}), а также присутствует дисульфид 467 см^{-1} .

На рисунке 8 приведены ИК спектры МНПВО теннантита с ИТК и Аеро 5100.

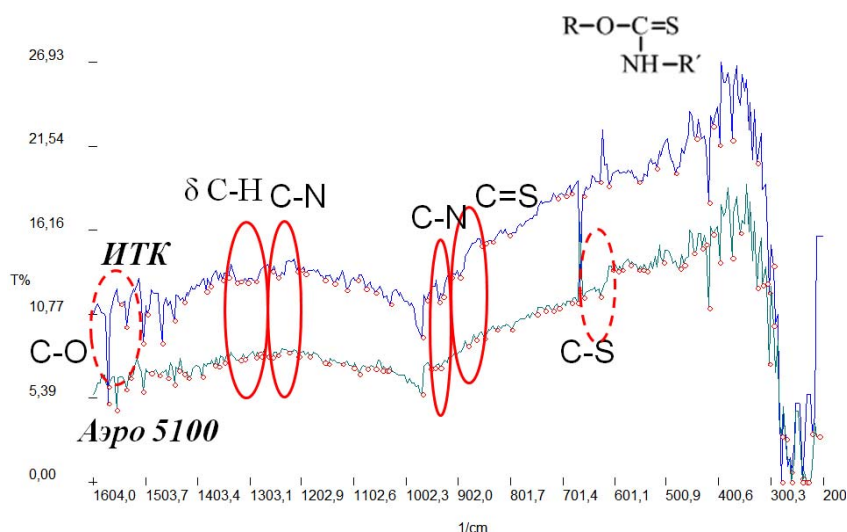


Рисунок 8 – ИК спектры МНПВО теннантита сфлотированного с ИТК и Аэро 5100

ИК спектры МНПВО подтверждают, что тионокарбаматы закрепляются на поверхности теннантита хемосорбционно и физически. Таким образом, на основании анализом ИК спектров МНПВО теннантита исходного и сфлотированного с использованием сульфгидрильных собирателей – бутКх, ДТФ, ИТК, Аэро 5100 установлено, что на поверхности теннантита закрепляется как бутКх, так ДТФ, но так как сдвиг характеристических полос больше у ДТФ, то можно предположить более интенсивное взаимодействие теннантита с ДТФ.

Представленные результаты исследований продемонстрировали, что самостоятельно ИТК в слабощелочной среде оказывает недостаточное собирательное действие к теннантиту и занимает промежуточное место в рядах флотируемости, с другой стороны флотируемость пирита с ИТК минимальная в сравнении с бутиловым ксантогенатом. С другой стороны, тионокарбаматы закрепляются на нанографите теннантита за счет адгезии.

В четвертой главе приведены результаты флотационных исследований с использованием, как компонентов, так и композиции неионогенного (ИТК) с ионогенными (ДТФ, бутКх) сульфгидрильными собирателями для повышения контрастности флотации между теннантитом и пиритом (рисунок 9).

В таблице 4 приведены константы скорости флотации теннантита и пирита с бутКх, ДТФ, ИТК.

Таблица 4 – Константа скорости флотации пирита и теннантита (по Белоглазову)

СобираТЕЛЬ	Константа скорости флотации, мин ⁻¹	
	Пирит	Теннантит
бутиловый ксантогенат	0,44	0,30
диизобутиловый дитиофосфат	0,17	1,15
ИТК	0,20	0,42

Как видно из таблицы 4 диизобутиловый дитиофосфат и ИТК обеспечивают наибольшую разницу константы скорости флотации теннантита (1,15 мин⁻¹) и пирита (0,17 мин⁻¹) в сравнении с бутКх (0,30 и 0,44 мин⁻¹).

На рисунке 9 представлены зависимости извлечения теннантита и пирита от доли ИТК в смеси с бутКх или ДТФ в диапазоне создаваемой рН_{исх.} – 4 (H₂SO₄) 6, 8, 10, 12, 12,5 Ca(OH)₂, методом беспенной флотации, C_{исх} = 10⁻⁴ М.

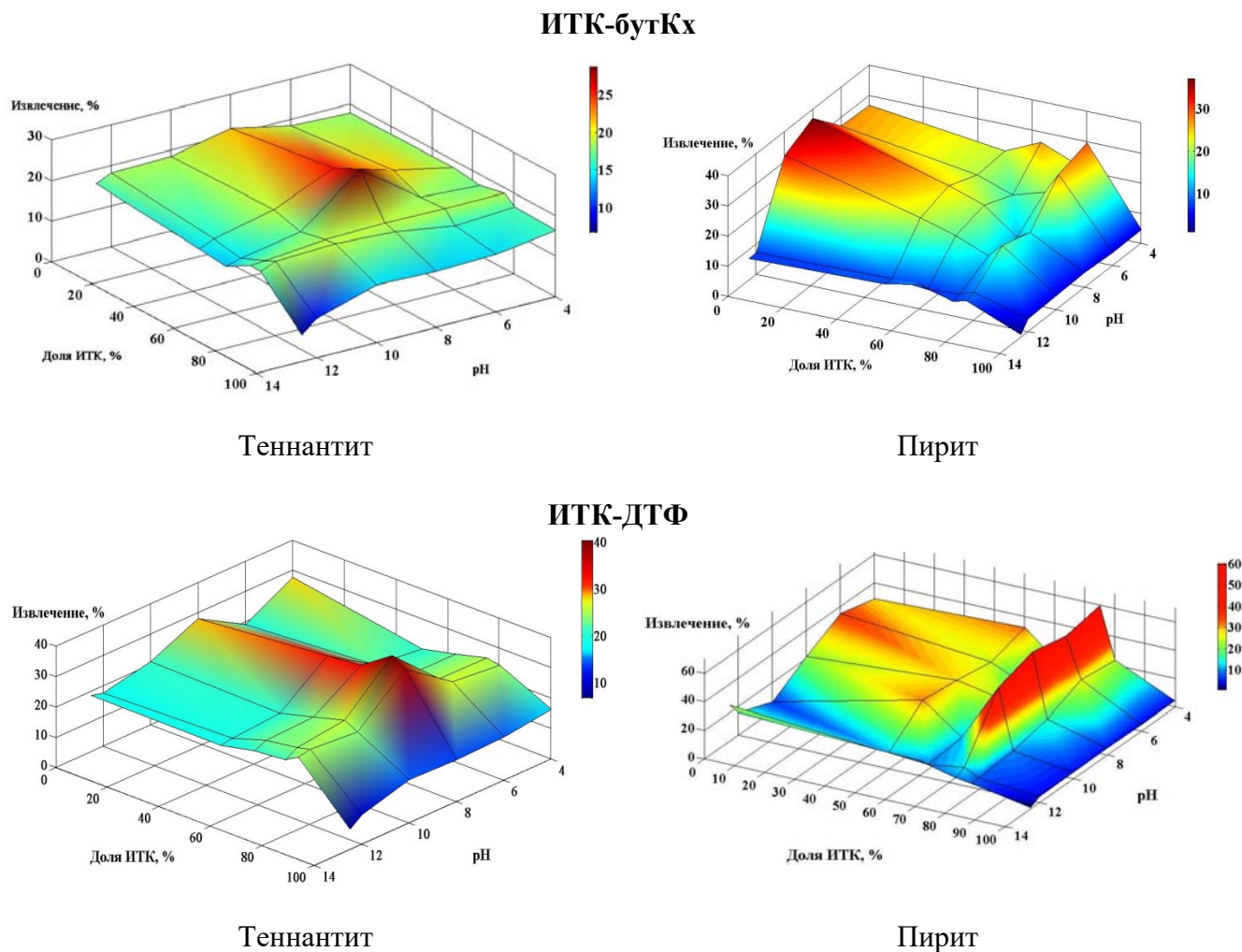
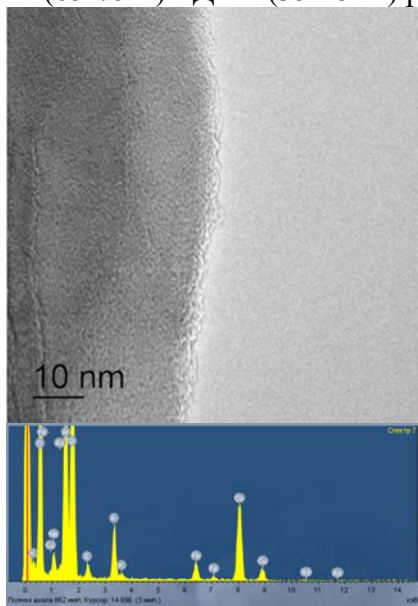


Рисунок 9 – Флотируемость теннантита и пирита от доли ИТК в смеси с бутКх или ДТФ в диапазоне рН в условиях беспенной флотации

Установлено, что композиция собирателей ИТК-ДТФ обеспечивает наибольшую флотоактивность теннантита на широком диапазоне исследуемой рН при соотношении ИТК (65-75%) : ДТФ (35-25%), когда флотоактивность пирита наименьшая. Показано, что изменение соотношения компонентов смеси приведет к ухудшению контрастности флотации минералов с существенным повышением флотоактивности пирита (рисунок 10).

На рисунке 10 приведены изображения ПЭМ поверхности теннантита, сфлотированных композицией собирателей ИТК-ДТФ при разной доле ИТК.

ИТК (65-75%) - ДТФ (35-25 %) рН – 8



ИТК (50%) - ДТФ (50 %) рН – 8

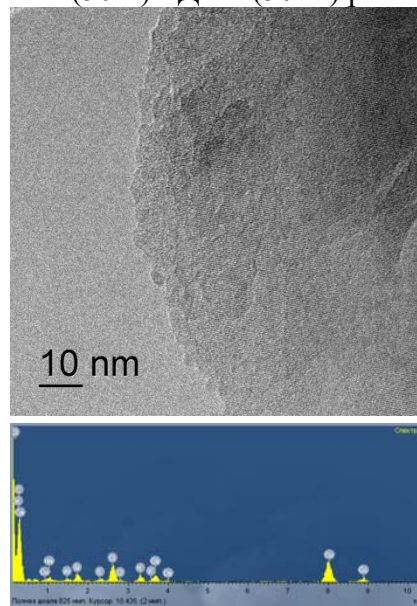


Рисунок 10 – Изображения ПЭМ пленок на поверхности теннантита от доли ИТК в смеси с ДТФ

Анализ изображений пленок на поверхности теннантита полученных на ПЭМ показал, что равномерная пленка собирателя получена при использовании композиции собирателей ИТК (65-75%) - ДТФ (35-25%) в сравнении с ИТК (50%) - ДТФ (50%), что согласуется с флотоактивностью теннантита.

Изучено влияние тиосульфат-ионов на адсорбцию и флотируемость теннантита (рисунок 11).

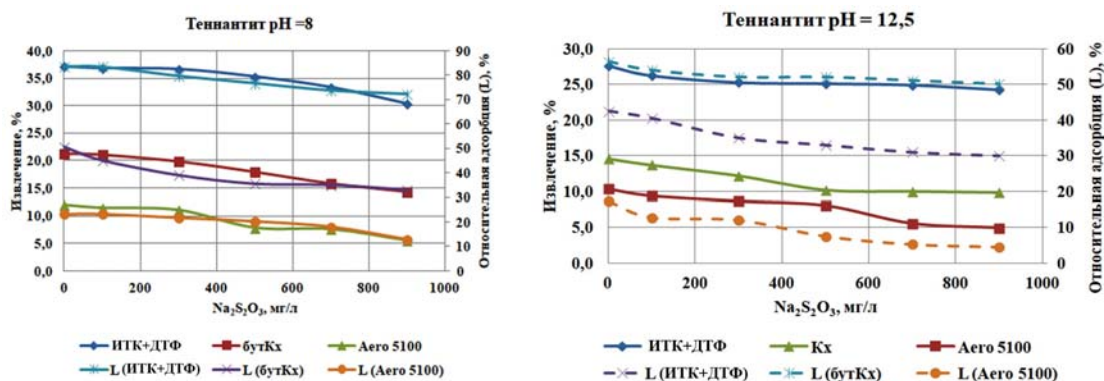


Рисунок 11 – Влияние тиосульфат-ионов на адсорбцию бутКх, ИТК, ДТФ, Аеро 5100 и извлечение теннантита при $\text{pH}_{\text{исх.}} = 8$ (а) и 12,5 (б)

Установлено, что в большей степени адсорбция и флотируемость теннантита в присутствии тиосульфатных ионов выше при использовании ИТК+ДТФ при $\text{pH}_{\text{исх.}} = 8$. Наблюдается закономерное снижение адсорбции и флотируемость теннантита при концентрации тиосульфат-ионов более 300 мг/л. Адсорбция и флотоактивность теннантита сохраняется при концентрации тиосульфат-ионов 300 мг/л.

В пятой главе приведены результаты технологических флотационных исследований на пробе теннантитсодержащей колчеданной медно-цинковой руде Узельгинского месторождения, по которым разработаны реагентный и схемный режимы флотации.

Изучено условие раскрытия целевых сульфидных минералов при измельчении, при котором установлено, что тонкие свободные зерна медных минералов (теннантита, халькопирита) могут быть выделены при измельчении не более 60% класса -71 мкм.

На рисунке 12 приведена схема лабораторных флотационных опытов по сравнению флотационной активности ряда сульфгидрильных собирателей на показатели межциклового (м/ц) медной флотации. Для предварительных тестовых исследований тонина помола принята 70% класса -71 мкм.

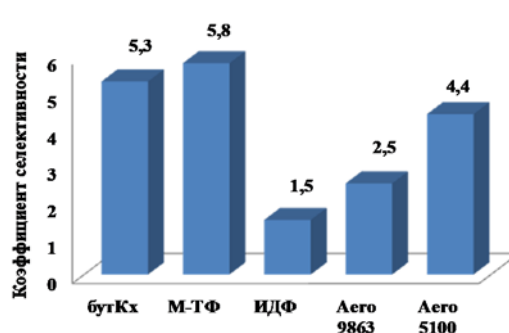
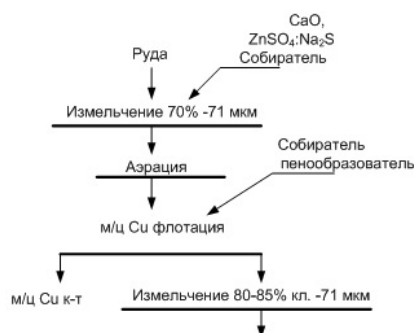


Рисунок 12 – Принципиальная схема межциклового медной флотации и диаграмма селективности действия сульфгидрильных собирателей по отношению к сульфидам меди при $\text{pH} = 8$

Оценка селективности действия собирателей по отношению к медным минералам выполнена с расчетом коэффициента селективности по В.И. Трушлевичу. Выстраивается следующий ряд испытанных сульфгидрильных собирателей по селективности их действия к минералам меди: М-ТФ ($S=5,8$) > бутКх ($S=5,3$) > Aero 5100 ($S=4,4$) > Aero 9863 ($S=2,5$) > ИДФ ($S=1,5$).

Изучено влияние аэрации на показатели флотации (рисунок 13).

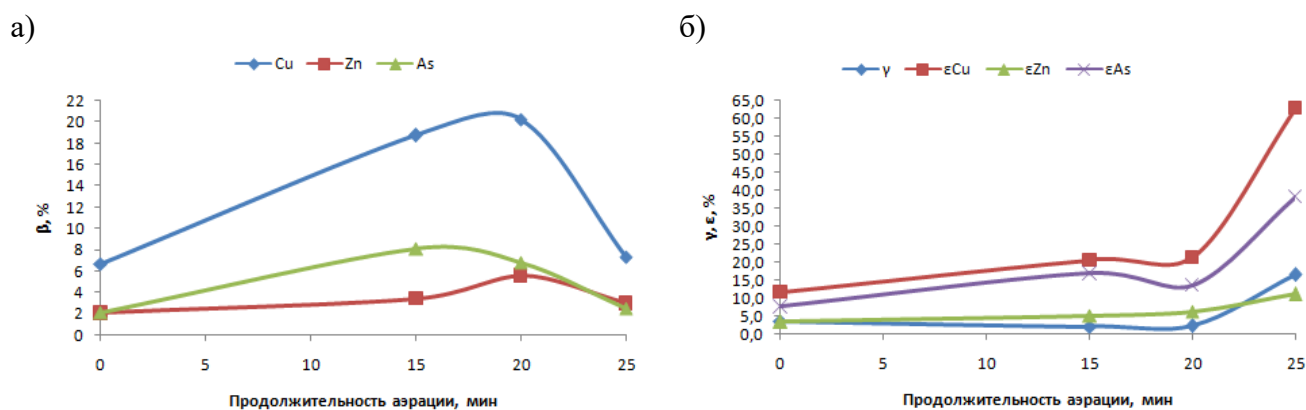


Рисунок 13 – Влияние продолжительности аэрации на показатели межцикловой медной флотации

Установлено, что аэрация повышает извлечение меди в м/ц медный концентрат (рисунок 13, б); в то время как на качество медного концентрата влияет продолжительность аэрации, проходя через максимум (рисунок 13, а) – 18 минут. Аэрация способствует снижению флотоактивности мельниковита (тонкодисперсный пирит); избыточная аэрация приводит к увеличению выхода концентрата, что возможно за счет повышения флотоактивности пирита.

Изучено влияние тонины помола на показатели флотации межцикловой медной флотации, при котором получен кондиционный медный концентрат с массовой долей меди 21 % при загрузлении помола до 50 % класса -71 мкм с предварительной аэрацией пульпы.

Анализ полученных результатов флотационных исследований показал необходимость проведения дополнительных исследований по схеме включающей получение второго медного концентрата в рудном цикле. В таблице 5 приведены результаты флотации с получением двух медных концентратов в рудном цикле.

Продукт	Выход, %	Массовая доля, %			Извлечение, %			Условия опыта
		Cu	As	Zn	Cu	As	Zn	
1 м/ц Cu к-т	2,1	20,26	6,81	5,55	21,3	13,6	6,2	Без перечистки 2 Cu к-та
2 Cu к-т	6,3	12,46	4,18	3,39	39,0	24,8	11,3	
1 м/ц Cu к-т	3,5	20,94	6,52	5,13	38,2	23,4	8,4	С перечисткой 2 Cu к-та
2 Cu к-т	1,2	19,93	6,14	4,46	13,1	7,9	2,6	

В межциклового концентрат (массовая доля меди 20,2-20,9%) извлекается 21,3-38,2% сульфидов меди (теннантита). Массовая доля меди во втором медной концентрате увеличивается с введением в схему перераспределительной операции. По разработанным реагентным и схемным режимам получен суммарный кондиционный медный концентрат с массовой долей меди 20,68 % при извлечении меди 51,3 % сульфидов меди (теннантит).

Принципиальная схема флотации труднообогатимой теннантитовой колчеданной медно-цинковой руды Узельгинского месторождения представлена на рисунке 14.

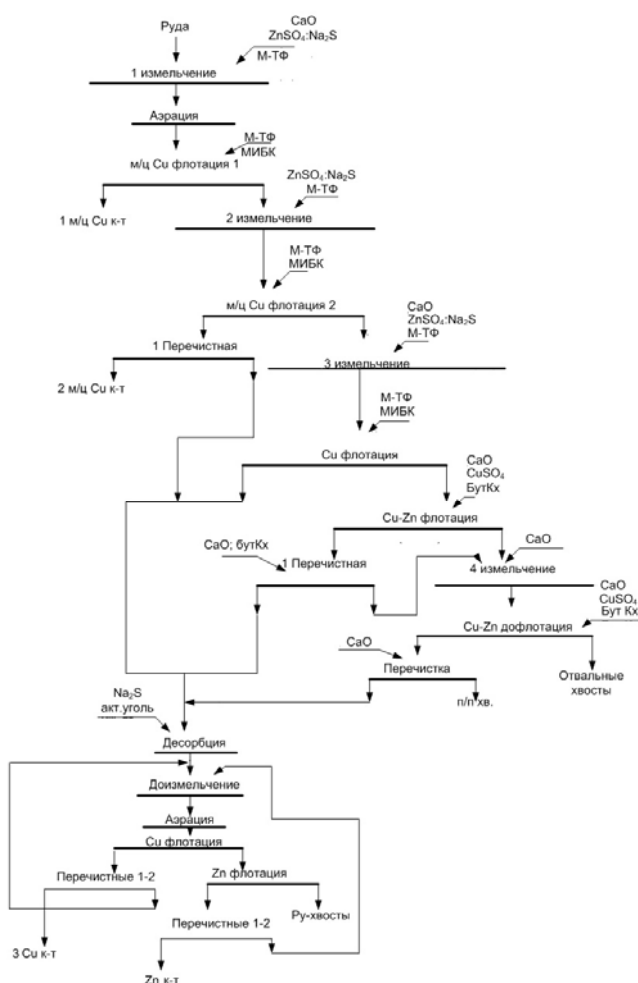


Рисунок 14 – Принципиальная разработанная схема флотации труднообогатимой теннантитсодержащей колчеданной медно-цинковой руды Узельгинского месторождения

Показатели флотации по фабричной технологической схеме и разработанному режиму с М-ТФ приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты флотации теннантитсодержащей колчеданной медно-цинковой руды Узельгинского месторождения по фабричной технологической схеме и разработанному режиму с М-ТФ

Наименование продукта	Выход, %	Массовая доля, %			Извлечение, %		
		Cu	Zn	As	Cu	Zn	As
Режим ОФ с бутКх							
Cu концентрат	7,2	18,65	4,93	5,97	68,0	17,1	42,1
Zn концентрат	4,6	3,02	29,36	2,44	7,0	64,8	11,0
Отвальные хвосты	88,2	0,56	0,43	0,54	25,0	18,1	46,9
Руда	100,0	1,98	2,08	1,02	100,0	100,0	100,0
Разработанный режим с М-ТФ							
Cu концентрат	9,1	18,67	3,48	5,61	81,8	14,9	54,3
Zn концентрат	3,4	1,87	44,17	1,69	3,1	70,6	6,1
Отвальные хвосты	87,5	0,36	0,35	0,43	15,1	14,5	39,6
Руда	100,0	2,08	2,13	0,97	100,0	100,0	100,0

Сравнение результатов флотации, полученных по разработанному реагентному и схемному режиму с М-ТФ в сравнении с фабричной технологической схемой флотации показывают прирост извлечения меди в общий медный концентрат на 13,8% (с 68,0 до 81,8%) при сопоставимом качестве медного концентрата – 18,65% (бутКх) и 18,67%. В случае М-ТФ основное извлечение меди получено в межцикловые медные концентраты 46,2% при качестве 19,80%. При использовании бутилового ксантогената извлечение в суммарный межцикловой медный концентрат составило 26,2% при качестве 20,28%.

Технологическая схема ОФ с бутиловым ксантогенатом позволила получить цинковый концентрат приемлемого качества только в рудном цикле (извлечение цинка 50% с массовой долей цинка 41,76%). В общем цинковом концентрате массовая доля цинка составляет 29,36% при извлечении 64,8%. По разработанной схеме с М-ТФ получен цинковый концентрат с извлечением 70,6% с массовой долей цинка 44,17%.

Укрупненный экономический расчет показал целесообразность использования разработанного реагентного и схемного режима обогащения труднообогатимой теннантитсодержащей колчеданной медно-цинковой руды Узельгинского месторождения, ожидаемый экономический эффект от повышения извлечения меди в товарный концентрат составляет 26 % прироста прибыли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе, на основании выполненных исследований, разработаны научно-обоснованные реагентный и схемный режимы флотации с собирателем М-ТФ в низкощелочной среде, обеспечивающие повышение эффективности селективной флотации теннантита из труднообогатимой теннантитсодержащей колчеданной медно-цинковой руды Узельгинского месторождения.

1. Установлен отличный кристаллохимический состав теннантита ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{12}$) Узельгинского месторождения от общеизвестной формулы $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$, наличие графита и силикатных соединений на поверхности теннантита, которые влияют на его флотационные свойства, и являются причиной потерь теннантита при флотации в высокощелочной среде с бутиловым ксантогенатом.

2. Флотационными исследованиями на мономинералах установлено, что индивидуально ДТФ и ИТК в слабощелочной известковой среде обеспечивают наибольшую разницу флотируемости между теннантитом, пиритом и сфалеритом.

Экспериментальными исследованиями установлено, что в слабощелочной известковой ($\text{pH}_{\text{исх.}}=8$) среде при обработке шлифов сульфидов ИТК и ДТФ достигается большая разница в величине краевого угла смачивания между теннантитом и пиритом в сравнении с бутКх.

Адсорбционные исследования в статических условиях показали, что константа скорости адсорбции диизобутилового дитиофосфата и ИТК ($0,0023-0,0027$ моль/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)) на пирите в 3,6 раз ниже чем у бутилового ксантогената ($0,0085$ моль/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)). Константа скорости адсорбции ДТФ и ИТК ($0,0084-0,0038$ моль/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)) на теннантите выше в 3,6 и 1,5 раза, чем на пирите ($0,0023-0,0027$ моль/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)).

Адсорбция ДТФ и ИТК на теннантите лимитируется внешней диффузией ($E_a = 12,82$ и $18,40$ КДж/М); на пирите адсорбция ДТФ и ИТК ($E_a = 29,14$ и $25,24$ КДж/М) лимитируется переходной областью.

3. Установлено влияние на адсорбцию мольной доли ИТК в смеси с бутКх или ДТФ в условиях беспенной флотации. Прирост суммарной адсорбции с увеличением доли ИТК в смеси с ДТФ происходит за счет адсорбции обоих собирателей на теннантите, в отличие от композиции ИТК-бутКх, где прирост суммарной адсорбции с увеличением доли ИТК происходит за счет большей адсорбции ИТК в сравнении с бутКх.

Установлено повышение контрастности флотации между теннантитом и пиритом при доле ИТК 65-75 % в смеси с ДТФ (флотоактивность теннантита в 5 раз выше, чем пирита). При доле ИТК 65-75 % в смеси с ДТФ на ПЭМ установлена равномерная пленка собирателя по

контуру поверхности теннантита сфлотированного в концентрат, равномерность пленки повышает вероятность закрепления минерала при столкновении с пузырьком воздуха.

4. Установлено, что при концентрации тиосульфат-ионов более 300 мг/л флотоактивность теннантита снижается в среднем в 2 раза.

5. Флотационными исследованиями на руде установлено:

- продолжительность кондиционирования с собирателем и аэрация в низкощелочной среде способствуют повышению флотоактивности теннантита при поддержании низкой флотоактивности пирита и его разновидности мельниковита.

- в присутствии в жидкой фазе пульпы тиосульфат-ионов (концентрация 1000 мг/л и более) подавляется флотация теннантита.

- коэффициент селективности по В.И. Трушлевичу в слабощелочной среде выше для М-ТФ (5,8), в сравнении с, бутКх (5,3), ИДФ (1,5) и длинноцепочечными тионокарбаматами Аеро 5100 (4,4), Аеро 9863 (2,5).

6. Апробация разработанного реагентного и схемного режимов с М-ТФ в укрупнено-лабораторном масштабе на рудах Узельгинского месторождения, показали прирост извлечения меди с 68 % до 81,8 % с массовой долей меди 18,68 %, извлечение цинка в цинковый концентрат составляет 70,6% при массовой доле 44,17 %.

7. Оценка ожидаемого экономического эффекта от внедрения разработанного реагентного и схемного режима с М-ТФ для труднообогатимой теннантитсодержащей колчеданной медно-цинковой руды показала прирост прибыли на 26 % в сравнении с реагентным режимом с бутиловым ксатогенатом за счет повышения извлечения меди в товарный медный концентрат.

Основные положения диссертационной работы опубликованы

Научные статьи в издании, рекомендованном перечнем ВАК РФ , WoS, Scopus

1. Бочаров, В.А. Флотационное обогащение блеклых руд / В.А. Бочаров, В.А. Игнаткина, А.А. Каюмов // журнал «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых». – 2015. – № 3. – С. 130-137. / Bocharov, V.A. Fahl Ore Flotation / V.A. Bocharov, V. A. Ignatkina, A. A. Kayumov // Journal of Mining Science. – 2015. – Vol. 51. – Issue 3. – PP. 573-579.

2. Игнаткина, В.А. Рациональная переработка упорных медьсодержащих руд / В.А. Игнаткина, В.А. Бочаров, А.Р. Макавецкас, А.А. Каюмов, Д.Д. Аксенова, Л.С. Хачатрян, Ю.Ю. Фищенко // Известие вузов «Цветная металлургия». – 2018. – № 3. – С. 6-18 / Ignatkina, V.A. Rational Processing of Refractory Copper-Bearing Ores / V. A. Bocharov, A. R. Makavetskas,

A. A. Kayumov, D. D. Aksenova, L. S. Khachatryan, Yu. Yu. Fishchenko // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2018. – Vol. 59. – Issue 4. – PP. 364-373.

3. Каюмов, А. А. Влияние тиосульфата натрия на флотуемость теннантита и пирита / А. А. Каюмов, Д. Д. Аксенова, М. А. Белокрыс, П. Р. Малофеева, В.Р. Корж // Цветные металлы. – 2019. – № 3. – С. 7-12.

4. Игнаткина, В. А. Флотоактивность пирита при разделении массивных сульфидных руд / В. А. Игнаткина, В. А. Бочаров, А. А. Каюмов, М. Аксенова // Цветные металлы. – 2017. – № 9. – С. 8-14.

5. Бочаров, В.А. Фракционное концентрирование на основе распределения минералов по крупности в схемах флотации массивных колчеданных руд цветных металлов / В.А. Бочаров, В.А. Игнаткина, А.А. Каюмов // Цветные металлы. – 2016. – № 6. – С. 21-28.

Другие научные публикации

6. Каюмов, А. А. Исследование флотационных свойств мономинеральных фракций сульфидов цветных металлов с использованием различных сульфгидрильных собирателей с разной молекулярной структурой / А. А. Каюмов, В. А. Игнаткина, В. А. Бочаров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 11. – С. 226-237.

7. Игнаткина, В.А. Электрокинетический потенциал поверхности ультратонких сульфидов и флотоактивность минералов / В.А. Игнаткина, В.А. Бочаров, Д.Д. Аксенова, А.А. Каюмов // Известие вузов Цветная металлургия. – 2017. – № 1. – С. 4-11 / Ignatkina, V. A. Zeta potential of the surface of ultrafine sulfides and floatability of minerals / V. A. Ignatkina, V. A. Bocharov, D. D. Aksenova, A. A. Kayumov // Russian Journal of Non-Ferrous metals. – 2017. – Vol. 58. – Issue 2. – PP. 95-100.

8. Игнатов, Д.О. Селективное разделение мышьяксодержащих сульфидных минералов / Д.О. Игнатов, А.А. Каюмов, В.А. Игнаткина // Цветные металлы. – 2018. – №7. – С. 32-38.

9. Ignatkina, V. A., Bocharov, V. A., Khachatryan, L. C., Kayumov, A. A., Sharipov, R.H., Lukyantseva, M.V., Altynamanov, D.M. and Zakopaylo, V.V. Flotation of tennantite from pyrite copper-bearing ores: International Mineral Processing Congress. – Moscow. – 2018. – PP. 1434-1442.

10. Игнаткина, В.А. Научные основы выбора и опыт использования сульфгидрильных собирателей в технологических схемах селективной флотации сульфидов упорных руд цветных металлов / В.А. Игнаткина, В.А. Бочаров, А.А. Каюмов // Цветная металлургия – 2015. – № 5. – С. 9-15.

11. Каюмов А.А., Аксенова Д.Д., Васильева О.П., Игнаткина В.А., Бочаров В.А. Изучение флотационных и адсорбционных свойств теннантита с использованием различных сульфгидрильных собирателей: материалы XXI международной научно-технической

конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», Екатеринбург. – 2016. – С. 51-55.

12. Игнаткина В.А., Бочаров В.А., Аксенова Д.Д., Каюмов А.А., Милович Ф.О., Иванова П.Г. Изучение механизма действия сочетания сульфгидрильных собирателей с поверхностью сульфидов с применением комплекса инструментальных методов исследований: материалы международного совещания «Плаксинские чтения - 2016», Санкт-Петербург. – С. 94-96.

13. Игнаткина В.А., Бочаров В.А., Каюмов А.А. Флотируемость сульфидов цветных металлов из колчеданных мышьяковистых руд: материалы международного совещания «Плаксинские чтения - 2016», Санкт-Петербург. – С. 503-506.

14. Игнаткина В.А., Бочаров В.А., Каюмов А.А., и др. Особенности взаимодействия сульфгидрильных собирателей с мышьяксодержащими сульфидными минералами: материалы XI конгресса обогатителей стран СНГ, М: МИСиС, 13-15 марта 2017. – С. 228-232.

15. Каюмов А.А., Игнаткина В.А., Бочаров В.А., и др. Флотируемость теннантита при разных режимах флотации: материалы XI конгресса обогатителей стран СНГ, М: МИСиС. – 2017. – С. 318-321.

16. Игнаткина В.А., Бочаров В.А., Хачатрян Л.С., Каюмов А.А.. Селективные реагентные режимы флотации упорных колчеданных медьсодержащих руд с повышенным содержанием минералов блеклых руд: материалы международного совещания «Плаксинские чтения - 2017», Красноярск. – С. 161-163.

17. Каюмов А.А., Игнаткина В.А., Бочаров В.А. Изучение кинетики флотации теннантита при разных реагентных режимах флотации: материалы международного совещания «Плаксинские чтения - 2017», Красноярск. – С. 202-205.

18. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Каюмов А.А. К вопросу рационального природопользования упорных колчеданных медно-цинковых руд: материалы международного совещания «Плаксинские чтения - 2018», Москва. – С. 50-54.

19. Каюмов А.А., Игнаткина В.А., Бочаров В.А., Аксенова Д.Д., Белокрыс М.А., Малофеева П.Р. Изучение влияния тиосульфата натрия на флотоактивность сульфидных минералов: материалы международного совещания «Плаксинские чтения - 2018», Москва. – С.50-54.

20. Каюмов А.А., Аксенова Д.Д., Белокрыс М.А., Корж В.Р., Малофеева П.Р. Изучение Кинетики флотации смеси сульфидных минералов: материалы XII конгресса обогатителей стран СНГ, М: ИТЕП. –2019. – С. 350-356.

21. Каюмов А.А., Игнаткина В.А., Бочаров В.А., Аксенова Д.Д., Белокрыс М.А., Малофеева П.Р. Окислительно-восстановительный потенциал при флотации теннантита и

пирита в присутствии тиосульфата натрия: материалы: XXIV международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», Екатеринбург. – 2019. – С. 57-60.

22. Каюмов А.А., Игнаткина В.А., Бочаров В.А., Аксенова Д.Д., Белокрыс М.А., Малофеева П.Р. Повышение флотоактивности сульфидов цветных металлов в присутствии тиосульфата натрия: материалы международного совещания «Плаксинские чтения - 2019», Иркутск. – С.184-186.

Патент на изобретение:

23. Патент RU 2016119778 С1. Способ флотационного разделения минералов тяжелых металлов / Игнаткина В.А., Бочаров В.А., Каюмов А.А. Опубл. 29.06.2017, – Бюл. № 19.

Выражаю благодарность д.т.н., профессору В.А. Бочарову за консультации; к.т.н. Л.С. Хачатрян, исследователям Центра ресурсосберегающих технологий переработки минерального сырья и Научно-исследовательского центра коллективного пользования «Материаловедение и металлургия» НИТУ «МИСиС» за содействие в проведении исследований.