

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

ЕРГЕШЕВА НАЗЫМАРЗУ ДАУРЕНКЫЗЫ

ПОВЫШЕНИЕ КОНТРАСТНОСТИ ФЛОТАЦИИ СУЛЬФИДОВ СУРЬМЫ, ЖЕЛЕЗА И  
МЫШЬЯКА ИЗ ТРУДНООБОГАТИМЫХ ЗОЛОТОСУЛЬФИДНЫХ РУД С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЧЕТАНИЯ СУЛЬФИДРИЛЬНЫХ СОБИРАТЕЛЕЙ В  
ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Специальность 2.8.9 – «Обогащение полезных ископаемых»

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В.А. Игнаткина

Москва – 2025

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Организация рациональной переработки труднообогатимых золотосодержащих руд, упорных к процессу прямого цианирования, является одной из основных задач недропользования. Золотосульфидные руды, содержащие минералы сурьмы, мышьяка и железа, характеризуются упорностью к прямому цианированию и труднообогатимостью к селективному выделению товарных концентратов или продуктов. Это связано с тем, что сурьма и мышьяк, не взаимодействуя с цианидом в щелочных растворах, образуют оксидные и сульфоксидные пленки, которые адсорбируются на поверхности минералов, затрудняя доступ цианида к свободному золоту, золоту в открытых сростках, а также увеличивается расход цианида, кислорода на химические реакции с сульфоксидами в жидкой фазе пульпы. Закрытые сростки золота с антимонитом и арсенопиритом вскрываются перед цианированием разными металлургическими способами. Золото-сурьмяные руды характеризуются неравномерной вкрапленностью рудных минералов вплоть до твердых растворов сульфидов, присутствием разных минеральных форм сурьмы, мышьяка и железа с различными технологическими свойствами, что существенно затрудняет эффективное выделение золотоносных сульфидных минералов и золота в коллективный золотосульфидный концентрат с последующей селективной флотацией с получением сурьмяного и золотосульфидного концентратов.

Контрастность флотационных свойств разделяемых минералов при селекции достигается за счёт применения сочетания сульфгидрильных собирателей и модификаторов, которые повышают избирательность гидрофобизирующего действия сульфгидрильного собирателя по отношению к разделяемым сульфидам.

Разработка новых реагентных режимов флотации, позволяющих эффективно сфлотировать самородное золото и золото в открытых и закрытых сростках с сульфидами в золотосульфидные коллективные концентраты, которые затем можно селективно разделить с минимальными взаимопотерями между сурьмянистым концентратом (пенным продуктом) и золотосульфидным концентратом (камерный продукт) является актуальной научно-практической задачей.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект №22-27-00102 от 20.12.2021, проект 8654301) «Изучение механизма взаимодействия сульфгидрильных собирателей разной ионогенности с трудноокисляемыми сульфидами цветных металлов и сопутствующими сульфидами в контролируемых окислительно-

восстановительных условиях» и в рамках Договора НИР 159/23-615 от 08.08.2023 г. (тема 1654016).

**Цель исследований** – разработать эффективные реагентные режимы коллективной флотации сульфидов, селективной флотации сурьмы в пенный продукт при селекции (доводке) коллективного золотосульфидного концентрата на основании установленных закономерностей повышения флотуемости сульфидов, механизма действия сульфгидрильных собирателей в присутствии модификатора для обеспечения контрастности флотационных свойств антимонита от пирита и арсенопирита.

Для достижения цели диссертационного исследования были поставлены и решены следующие задачи:

- выполнен анализ состояния проблемы переработки золотосульфидных руд, содержащих минералы железа, мышьяка и сурьмы;
- исследовано комплексобразование железа (II), железа (III) и меди (II) с бутиловым ксантогенатом (бутКх) и диизобутиловым дитиофосфатом (ДТФ) в водных растворах для определения состава комплексов;
- изучено влияние сульфгидрильных собирателей, модификаторов (тиосульфат натрия, сернистый натрий, пероксид водорода) на флотуемость антимонита, арсенопирита, пирита, а также на кинетику флотации антимонита в смеси с пиритом и арсенопиритом;
- выявлен механизм взаимодействия сульфгидрильных собирателей, состоящих из ионогенных (ДТФ и бутКх) и неионогенных (ИТК, Z-200)) компонентов, в присутствии модификатора с поверхностью антимонита, арсенопирита и пирита на основе совокупности результатов исследований флотуемости, адсорбции, ИК-спектроскопии, измерения угла смачивания лежащей капли воды;
- исследован вещественный состав пробы золотосульфидной руды, содержащей сульфиды сурьмы, железа и мышьяка;
- разработаны технологическая схема и реагентный режим флотации труднообогатимой золотосульфидной руды на основе установленных закономерностей.

#### **Научная новизна**

1. Установлен эффект снижения флотуемости антимонита при достижении критической концентрации модификаторов (как окислителя, так и восстановителя) на уровне  $4,4 \cdot 10^{-3}$  моль/л, при которой достигается контрастность разделения антимонита от арсенопирита и пирита.

2. Экспериментально доказано что, при соотношениях 20:80 и 50:50 ионогенного (буТКх и ДТФ) и неионогенного (ИТК, Z-200) компонентов в сульфгидрильном собирателе достигается для пирита и арсенопирита максимальная флотуемость, а при соотношении 40:60 флотуемость наименьшая.

3. Предложен механизм взаимодействия сульфгидрильного собирателя в присутствии тиосульфата натрия с поверхностью антимонита, пирита, арсенопирита, заключающийся в преимущественном образовании гидроксидов железа на арсенопирите и полисульфидов на пирите, которые значительно снижают закрепление сульфгидрильных собирателей на поверхности арсенопирита и пирита; на поверхности антимонита установлено совместное закрепление тиосульфата, элементарной серы и сульфгидрильных собирателей, что и обеспечивает контрастность флотации антимонита в сравнении с арсенопиритом и пиритом.

### **Практическая значимость работы и реализация результатов**

Практическая значимость работы заключается в разработке реагентного режима флотации труднообогатимой золотосульфидной руды, содержащей золото преимущественно в закрытых сростках с сульфидами (пирит, арсенопирит, антимонит) и породными минералами. Укрупненно-лабораторными исследованиями в замкнутом режиме апробирована разработанная технология флотации, которая позволяет селективно извлечь антимонит в пенный продукт с минимальными потерями золота в нем (до 2 %) и получить золотосульфидный концентрат камерным продуктом с извлечением на уровне 80 % с содержанием золота более 40 г/т и массовой доле по сурьме 0,27 % (ТУ 48-16-6-75) за счет применения в реагентном режиме сульфгидрильного собирателя ЭСК 2 и модификатора тиосульфата натрия. Получено положительное решение от 13.01.2025 г. по заявке № 2024110625 от 18.04.2024 г. на выдачу патента на изобретение «Способ селективной флотации стибнита из золото-сульфидных руд». Разработанные реагентный режим и схема флотации применены для обоснования и расчета технико-экономических показателей флотационно-цианистой технологии переработки золотосульфидного месторождения и подготовки ТЭО кондиций.

### **Методы исследований**

В настоящей работе применены следующие методы и инструментальные средства исследований: метод молярных отношений Йоу и Джонса и метод изомолярных серий Жоба; ультрафиолетовая спектроскопия (спектрофотометр UV-VIS-NIR Cary 6000i, Agilent, USA); оптическая микроскопия (поляризационный микроскоп ECLIPSE LV100-POL, оптический стереомикроскоп SMZ-1500, оснащенный цифровой микрофотографической системой DS-5M-L1); беспенная и пенная флотация мономинералов и руды; контроль рН и

Eh (иономер И-160МИ); измерение краевого угла смачивания (CAM 101 KSV Instruments (Финляндия) с цифровой видеокамерой Fire Wire IEEE 1394 и программным обеспечением C200SW); инфракрасная спектроскопия (спектрофотометр Specord M80 (Германия), включая приставку МНПВО, с программным обеспечением Soft Spectra); метод низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ) (Nova 2200E, Quantachrome instruments, USA); сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) (сканирующий электронный микроскоп Quanta 600 (FEI Company), оснащенный системой энергодисперсионного микроанализа EDAX (ПО «Genesis»); рентгенофлуоресцентная спектроскопия (ElvaX Light SDD); методы химического и пробирного анализа; методы математической обработки экспериментальных данных.

**Обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов** диссертационной работы подтверждаются использованием широкого спектра методов химических, физических и физико-химических исследований процесса флотации и минерального вещества, обширным объемом полученных экспериментальных данных, согласованностью выявленных закономерностей на мономинералах с результатами технологических лабораторных исследований на руде. Результаты проведенных экспериментов обработаны с применением методов математической статистики с доверительной вероятностью не менее 95 %.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследования комплексобразования железа (II), железа (III) и меди (II) с бутКх и ДТФ в водных растворах методами молярных отношений Йоу и Джонса и изомолярных серий Жоба.
2. Результаты беспенной и пенной флотации мономинеральных фракций антимонита, пирита, арсенопирита; кинетики флотации 2-компонентных смесей мономинеральных фракций « $Sb_2S_3-FeAsS$ » и « $Sb_2S_3-FeS_2$ » с использованием сульфгидрильных собирателей и модификаторов.
3. Результаты изучения влияния соотношений в сульфгидрильном собирателе ионогенных и неионогенных компонентов на флотуемость мономинеральных фракций пирита и арсенопирита на основе комплексных исследований беспенной флотации, адсорбции собирателей с контролем pH и Eh.
4. Предложенный механизм действия сульфгидрильного собирателя с поверхностью антимонита, арсенопирита и пирита в присутствии тиосульфата натрия для повышения контрастности флотационных свойств поверхности разделяемых сульфидов.

5. Результаты технологических лабораторных исследований реагентного режима флотации пробы золотосульфидной руды, содержащей сульфиды сурьмы, железа и мышьяка.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на международных научных конференциях: «Уральская горнопромышленная декада» 2021, 2022 (г. Екатеринбург), «Плаксинские чтения» 2022 (г. Владивосток), «Неделя горняка» 2024 (г. Москва), XV International Mineral Processing and Recycling Conference (IMPRC) 2023 (г. Белград).

**Публикации.** По теме диссертации, опубликовано 11 работ, из которых 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, и входящих в базы WoS и Scopus и 5 тезисов докладов в сборниках материалов международных конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников из 166 наименования и 1 приложения. Диссертация содержит 135 страниц текста, включая – 15 таблиц, 59 рисунков и 166 источников списка литературы.

**Личное участие автора** заключается в методическом обосновании и проведении экспериментов, установлении закономерностей и механизма действия сульфидрильного собирателя в присутствии тиосульфата натрия, обработке полученных результатов, анализе и выводах по результатам. Автор участвовал в выполнении технологических исследований на руде, включая укрупнённо-лабораторные в замкнутом режиме, а также в подготовке научных статей, докладов; самостоятельно написана и оформлена диссертация.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** диссертации обоснована актуальность научно-практической проблемы, сформулированы цель и задачи работы, перечислены методы и инструменты исследований, научная новизна и практическая значимость результатов исследований, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен анализ современного состояния технологии переработки золотосульфидных руд, содержащих сульфиды сурьмы, железа и мышьяка. Особое внимание уделено физико-химическим и флотационным свойствам сульфидов и золота, механизмам взаимодействия флотореагентов с сульфидными минералами.

Проблемами флотации сульфидов и золота из коренных руд занимались чл.-кор. РАН Плаксин И.Н., д.т.н. Бочаров В. А., д.т.н. Митрофанов С.И., д.т.н. Каковский И. А.; акад. РАН Чантурия В. А., чл.-кор. РАН Александрова Т. Н., д.т.н. Соложенкин П. М.,

д.т.н., Адамов Э.В., д.т.н. Игнаткина В. А., д.т.н. Лодейщиков В. В., д.т.н. Морозов Ю. П., д.т.н. Седельникова Г. В., д.т.н. Федотов К. В., д.т.н. Матвеева Т. Н., O'Connor C. T., Dunne R. C., Bulatovic S. M., Bradshaw D.J., Plackowski S., Chandra A.P., Forsling W., Forssberg, E., Leppinen J.O., Fuerstenau M.C. и др.

Показано, что применение основных традиционных процессов переработки (гравитация, флотация, цианирование, либо их комбинирование) труднообогатимых золотосульфидных руд приводит к потерям золота, как при флотации, так и цианировании вследствие тонкой вкрапленности, тесного произрастания рудных и породных минералов, закрытых сростков золота с сульфидами, что требует разработки новых реагентных и схемных режимов флотации.

Обосновано, что разработка новых реагентных режимов для повышения извлечения всех золотоносных сульфидов и золота в коллективный сульфидный концентрат, используя новые сульфгидрильные собиратели, с последующей селекцией коллективного концентрата на сурьмяной и золотосульфидный концентраты на основе использования модификаторов для повышения контрастности флотационных свойств антимонита в сравнении с пиритом и арсенопиритом остается актуальной научно-практической проблемой.

**Во второй главе** рассмотрены объекты исследований, методы и методики изучения характеристик сульфидных минералов, исследований их взаимодействия с флотационными реагентами. Основное внимание уделено подготовке мономинеральных фракций к исследованиям. Объекты исследований:

- мономинеральные фракции  $Sb_2S_3$  (антимонит или стибнит),  $FeAsS$  (арсенопирит) и  $FeS_2$  (пирит) с крупностью фракций мономинералов, мм:  $-0,071+0,044$ ,  $-0,044+0,010$ ;
- золотосульфидная руда с содержанием золота 4,15 г/т, массовой долей мышьяка 0,83 %, сурьмы 0,062 %, железа 6,43 % и сульфидной серы 1,56 %.

Использованы известные сульфгидрильные собиратели:

- ионогенные: бутиловый ксантогенат (бутКх), дибутиловый и диизобутиловый дитиофосфат (ДТФ), диизобутиловый дитиофосфинат (ДИФ или Aerophine 3418А), диэтилдитиокарбамат натрия (ДЭДК));
- неионогенные О-изопропил-N-метилтионокарбамата (ИТК или ТК), О-изопропил-N-этилтионокарбамата (Z-200 или ТК).

Исследованы новые сочетания ионогенных и неионогенных сульфгидрильных компонентов в собирателях ЭСК (эффективное соотношение компонентов) на основе ДТФ и ТК. В качестве модификаторов – пероксид водорода ( $H_2O_2$ ), тиосульфат натрия ( $Na_2S_2O_3$ ), сернистый натрий ( $Na_2S$ ).

Применены следующие методы и методики: метод молярных отношений Йоу и Джобса и метод изомолярных серий Жоба для определения состава комплексных соединений ионов тяжелых металлов с сульфгидрильными собирателями; метод УФ спектроскопии для контроля концентрации сульфгидрильных собирателей, ионов тяжелых металлов; методы ИК спектроскопии и ИКС МНПВО для установления состава пленок объемных соединений, осадков и поверхностных соединений на антимоните; метод Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) для определения удельной поверхности фракции сульфидных минералов; методика адсорбционного исследования для количественной оценки закрепления сульфгидрильных компонентов на сульфидах; потенциометрический контроль рН и окислительно-восстановительного потенциала (ОВП или Eh); метод краевого угла смачивания для оценки смачиваемости водой поверхности шлифа антимонита после разной реагентной обработки поверхности минерала; методики беспенной (трубка Халимонда) и пенной флотации мономинералов для изучения флотируемости и флотоактивности сульфидных минералов при разных реагентных режимах; методика графического определения константы скорости флотации (константа Белоглазова) для смесей сульфидов; методы минералогических исследований для установления вещественного состава пробы руды; методики проведения технологических лабораторных флотационных исследований на обогатимость и разработки технологии флотации.

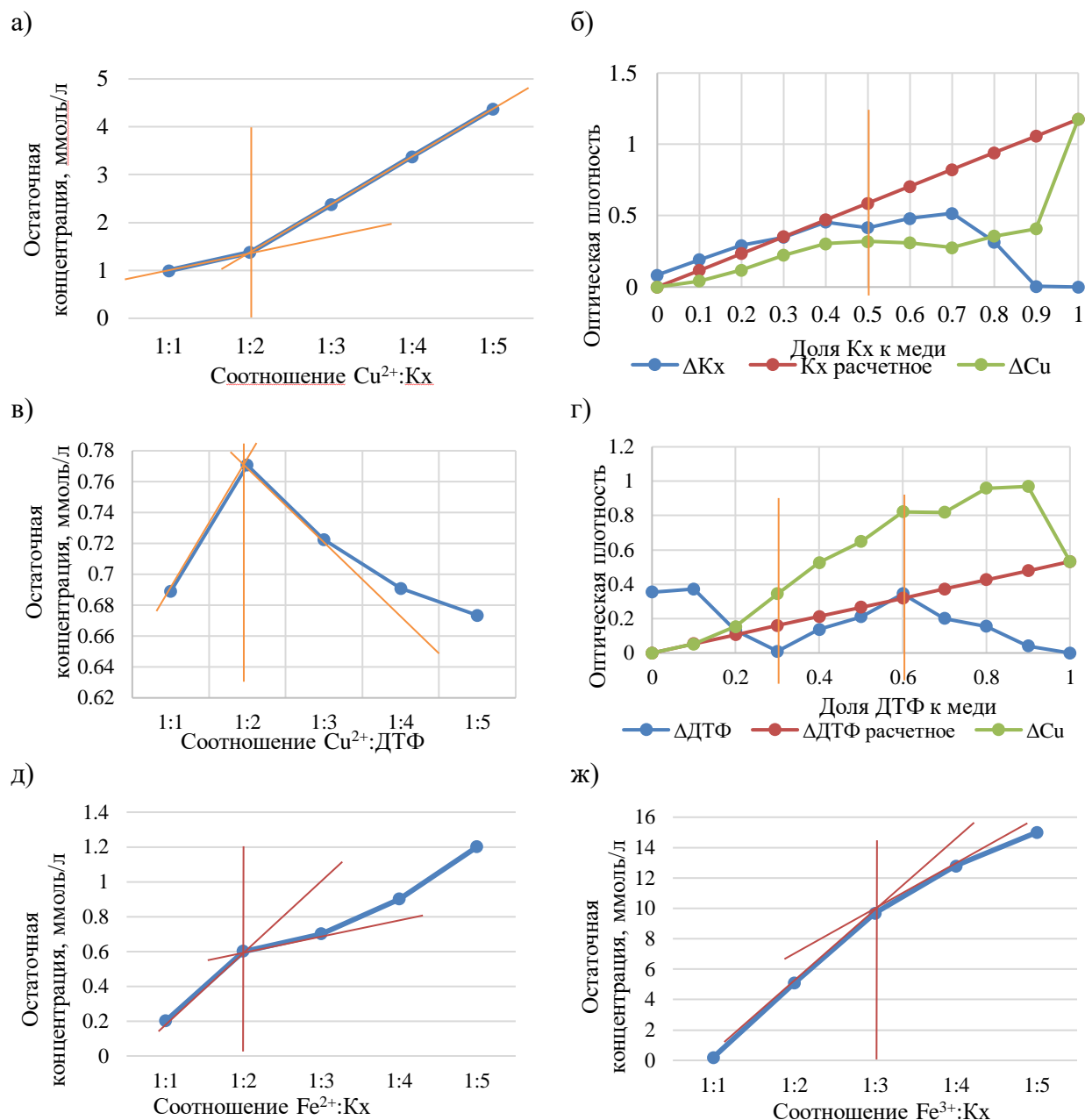
**Третья глава** посвящена изучению состава комплексных соединений, образующихся при взаимодействии солей железа (II), железа (III) и меди (II) с бутКх и ДТФ в водных растворах; механизму действия сульфгидрильных собирателей с мономинеральными фракциями антимонита, арсенопирита и пирита.

Катионы меди и железа являются активными центрами на поверхности сульфидов для взаимодействия с сульфгидрильными собирателями, кроме того, соли железа и меди применяются в качестве модификаторов в реагентных режимах.

Зависимости остаточной концентрации бутКх и ДТФ от соотношения концентрации комплексообразующего катиона металла к концентрации собирателя (лиганд) в водном растворе методом молярных отношений Йоу и Джобса приведены на рисунке 1 (а, в, д, ж). По точке перегиба на зависимости  $[\text{собиратель}]_{\text{ост}} = f([\text{Me}^{n+}]:n[\text{собиратель}])$  определено, что состав комплексов соответствует их стехиометрическому соотношению. Метод изомолярных серий Жоба позволяет установить состав устойчивого комплекса. Для меди с бутКх (рисунок 1, б) устойчивый комплекс образуется с Cu (I). Выявлено два пика на зависимости «медь с ДТФ» по методу Жоба (рисунок 1, г), что указывает на образование нескольких сложных комплексных соединений при соотношении  $[\text{Cu}]:[\text{ДТФ}] = 0,3:0,7$  (1:2)



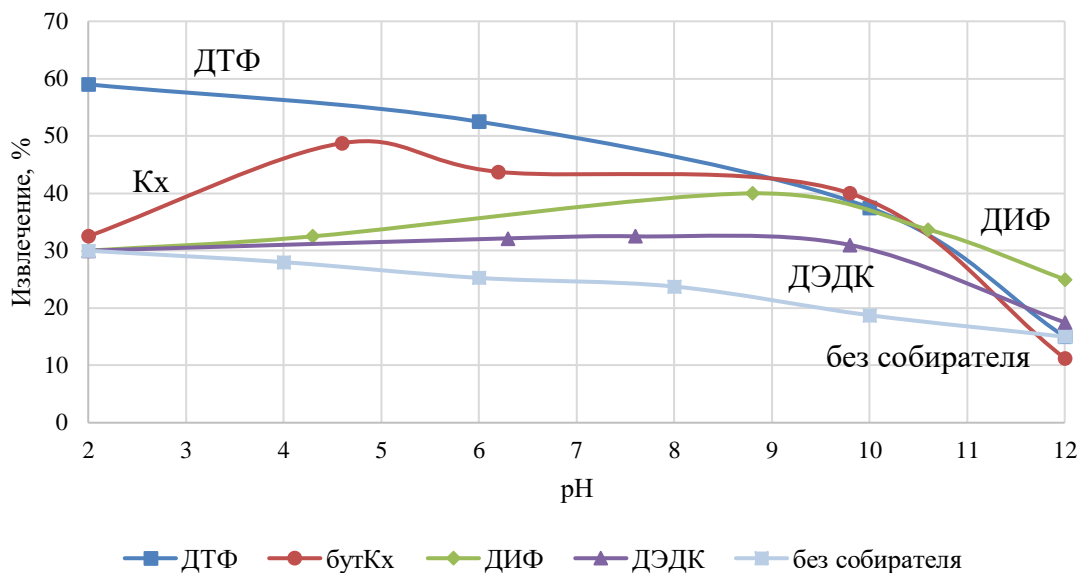
и 0,6:0,4 (1,5:1). Можно предположить, что образуются комплексы  $[\text{Cu}]:[\text{ДТФ}]$  следующего состава  $[\text{Cu}(\text{OH})_2(\text{S}_2\text{PO}_2(\text{C}_4\text{H}_9)_2)]$  и  $[\text{Cu}(\text{OH})(\text{S}_2\text{PO}_2(\text{C}_4\text{H}_9)_2)_2]$ . Для меди с ДТФ устойчивые комплексы образуются с  $\text{Cu}(\text{II})$ .



Условия опытов –  $C_{\text{бутКх}} = 10^{-3}$  моль/л (а);  $C_{\text{ДТФ}} = 10^{-4}$  моль/л;  $C_{\text{Cu}^{2+}} = 10^{-4}$  моль/л; буферный раствор №2 (смесь аминокислотной кислоты с хлоридом натрия в 0,1 н растворе соляной кислоты),  $\text{pH}=2,5$  для  $[\text{Fe}^{2+}]:[\text{Кх}]$  метод молярных отношений Йоу и Джобса: а, в, д, ж; метод изомолярных серий Жоба: б и г а – остаточной концентрации Кх от соотношения  $[\text{Cu}^{2+}]:[\text{Кх}]$ ; б – оптической плотности от объемной доли Кх к  $\text{Cu}$  от; в – остаточной концентрации ДТФ от соотношения  $[\text{Cu}^{2+}]:[\text{ДТФ}]$ ; г – оптической плотности от объемной доли ДТФ к  $\text{Cu}$ ; д – остаточной концентрации Кх от соотношения  $[\text{Fe}^{2+}]:[\text{Кх}]$ ; ж – остаточной концентрации Кх от соотношения  $[\text{Fe}^{3+}]:[\text{Кх}]$

Рисунок 1 – Зависимость остаточной концентрации (а, в, д, ж) и оптической плотности (б, г) собирателя от соотношения  $[\text{Me}]:[\text{собиратель}]$  в водном растворе буфера

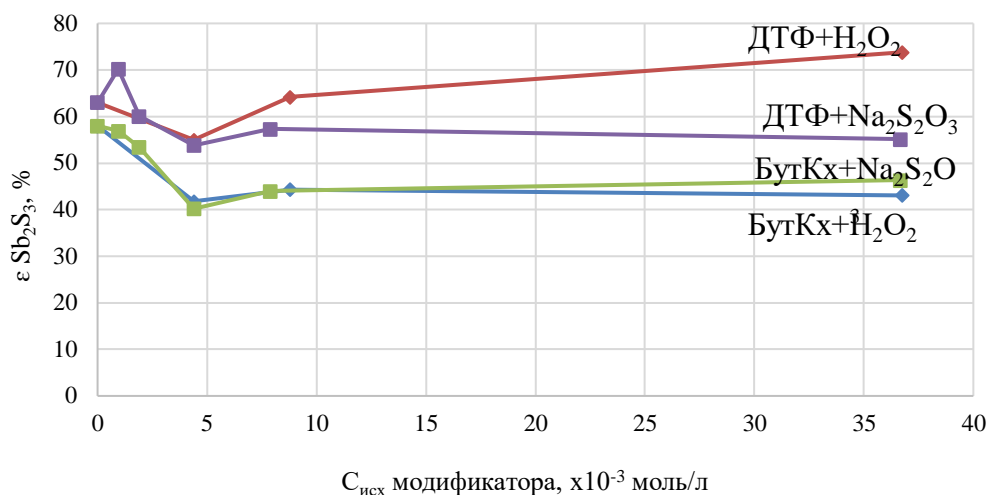
Согласно результатам беспенной флотации (рисунок 2) установлено, что наибольшее извлечение антимонита достигается с использованием ДТФ (до 60 %) при величинах рН <6. БутКх показывает сопоставимое с ДТФ извлечение ( $\approx 40\%$ ) при рН 8,5-9,5. В диапазоне рН = 9-10 ДИФ также демонстрирует извлечение на уровне 40 %. Флотируемость  $Sb_2S_3$  всеми сульфгидрильными собирателями снижается при рН > 10.



Крупность антимонита  $-0,044+0,010$  мм;  $C_{\text{собиратель}} = 10^{-4}$  моль/л;

Рисунок 2 – Зависимость флотируемости антимонита сульфгидрильными собирателями от рН,  $\varepsilon = (\varepsilon_{\text{ср.}} \pm 1,5) \%$

Результаты беспенной флотации в трубке Халимонда антимонита с использованием сульфгидрильных собирателей (бутКх и ДТФ) от концентрации модификаторов (рисунок 3) позволили установить эффект снижения извлечения антимонита при одной и той же молярной концентрации ( $4,4 \cdot 10^{-3}$  моль/л) для разных модификаторов. Извлечение антимонита ДТФ в присутствии окислителя или восстановителя снижается меньше (с 63 % до 52 %) по сравнению с бутКх (с 58 % до 40 %). Полученные результаты беспенной флотации свидетельствуют о лучшей флотируемости антимонита собирателем ДТФ, чем бутКх, что косвенно указывает на большее гидрофобизирующее действие ДТФ по отношению к антимониту.

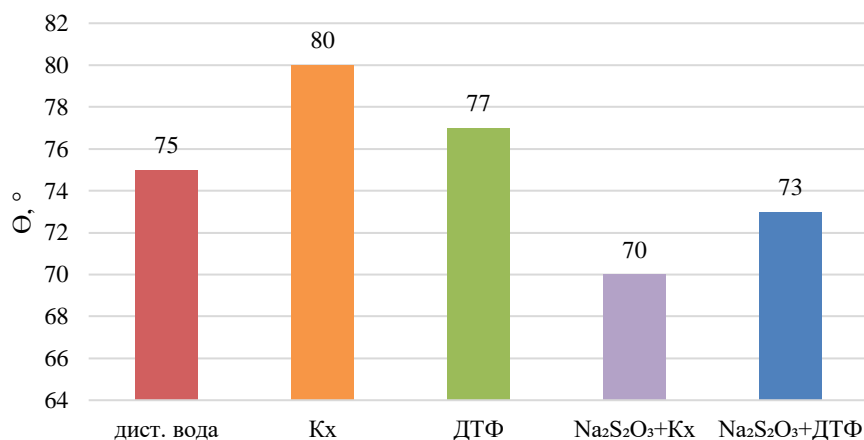


Крупность антимонита  $-0,044+0,010$  мм;  $C_{\text{собиратель}} = 10^{-4}$  моль/л, pH=5,5

Рисунок 3— Зависимость извлечения антимонита от концентрации модификаторов с собирателями,  $\varepsilon = (\varepsilon_{\text{ср.}} \pm 1,5)$  %

Реагентный режим «ДТФ+Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» демонстрирует повышенное извлечения ( $\varepsilon_{\text{Sb}_2\text{S}_3} = 70$  %) при низких концентрациях, что является следствием более гидрофобного слоя при закреплении собирателя в присутствии тиосульфата натрия.

Прямое исследование влияния сульфгидрильного собирателя и тиосульфата натрия на смачиваемость поверхности антимонита водой (рисунок 4) показало, что краевой угол смачивания выше после обработки бутКх (80°), чем ДТФ (77°). В присутствии тиосульфата натрия гидрофобизирующая способность ДТФ сохраняется в большей мере ( $\Theta$  снижается с 77° до 73°), чем для бутКх ( $\Theta$  снижается с 80° до 70°). Подтверждается, что ДТФ по отношению к антимониту обладает более высокими собирательными свойствами, по сравнению с бутКх.

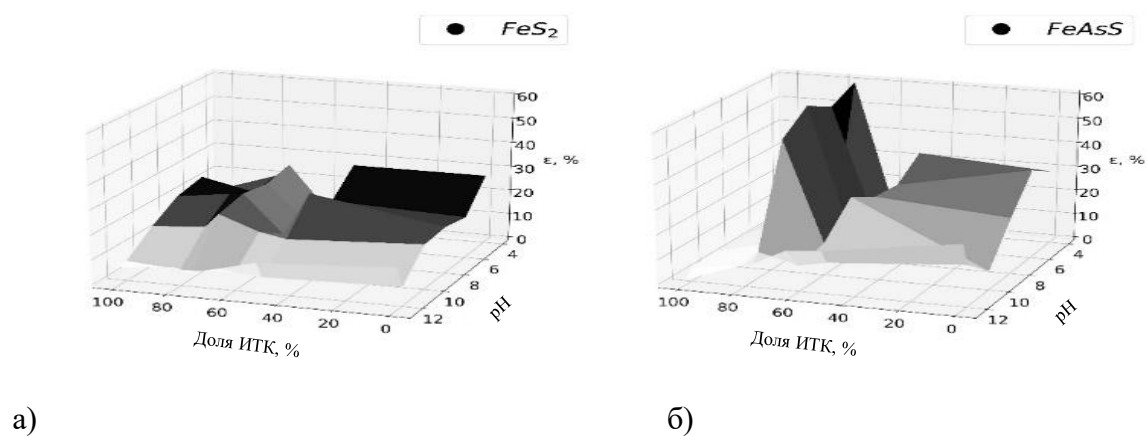


$C_{\text{БутКх}} = 10^{-4}$  моль/л,  $C_{\text{ДТФ}} = 10^{-4}$  моль/л,  $C_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} = 4,4 \cdot 10^{-3}$  моль/л, pH=5,5

Рисунок 4 – Влияние собирателей в присутствии модификаторов на краевой угол смачивания антимонита, ( $\Theta_{\text{ср.}} \pm 0,5$ ) град

**Четвертая глава** отражает результаты комплексных исследований на мономинеральных фракциях арсенопирита и пирита методами беспенной флотации, адсорбцией, ИКС МНПВО, потенциометрией; результаты кинетики флотации 2-х компонентных смесей сульфидов « $Sb_2S_3-FeAsS$ » и « $Sb_2S_3-FeS_2$ »; сформулирован механизм повышения контрастности флотации антимонита в сравнении с арсенопиритом и пиритом сульфгидрильными собирателями в присутствии тиосульфата натрия.

На рисунке 5 приведены диаграммы зависимости извлечения пирита и арсенопирита в трубке Халимонда от 2-х факторов – доли ИТК в сочетании (прием изомолярных серий) и рН в опыте.



Крупность пирита и арсенопирита  $-0,044+10$  мм;  $C_{\text{собиратель}} = 10^{-4}$  моль/л

Рисунок 5 – Влияние доли ИТК в композиции (сочетании смеси) с ДТФ на извлечение пирита (а) и арсенопирита (б) при большом диапазоне рН

Установлено, что соотношение ионогенного и неионогенного компонентов в сульфгидрильном собирателе способствует как повышению извлечения пирита и арсенопирита, так и снижению флотуемости (рисунок 5). Наблюдается прирост извлечения пирита при соотношении ИТК:ДТФ = 80:20 (ЭСК 1) и ИТК:ДТФ=50:50 (ЭСК2) в диапазоне рН 4-10; для арсенопирита существенно повышается извлечение при соотношении ИТК:ДТФ=80:20 (ЭСК 1) и в меньшей степени для соотношения ИТК:ДТФ=50:50 (ЭСК2). При соотношении ИТК:ДТФ =60:40 (ЭСК 3 или М-ТФ) подтверждено наименьшее значение извлечения как пирита, так и арсенопирита. Минимальное извлечение пирита в сочетании ИТК:бутКх, также соответствует соотношению ИТК: бутКх =60:40, но извлечение в концентрат для смеси с бутКх выше, чем для ИТК:ДТФ (9,5 % против 17 %).

На рисунке 6 представлены ИК-спектры МНПВО антимонита (концентрат беспенной флотации,  $-44 +10$  мкм) при разных реагентных режимах.

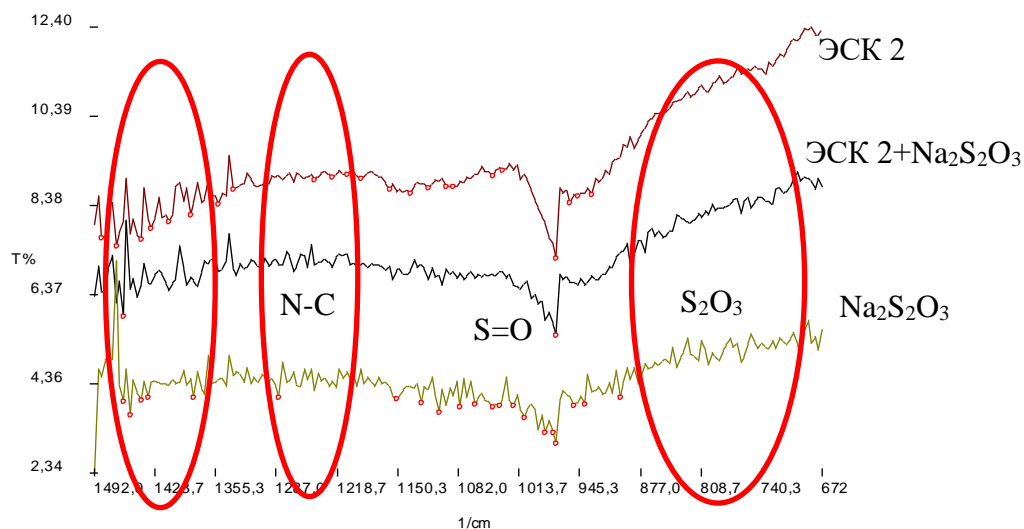
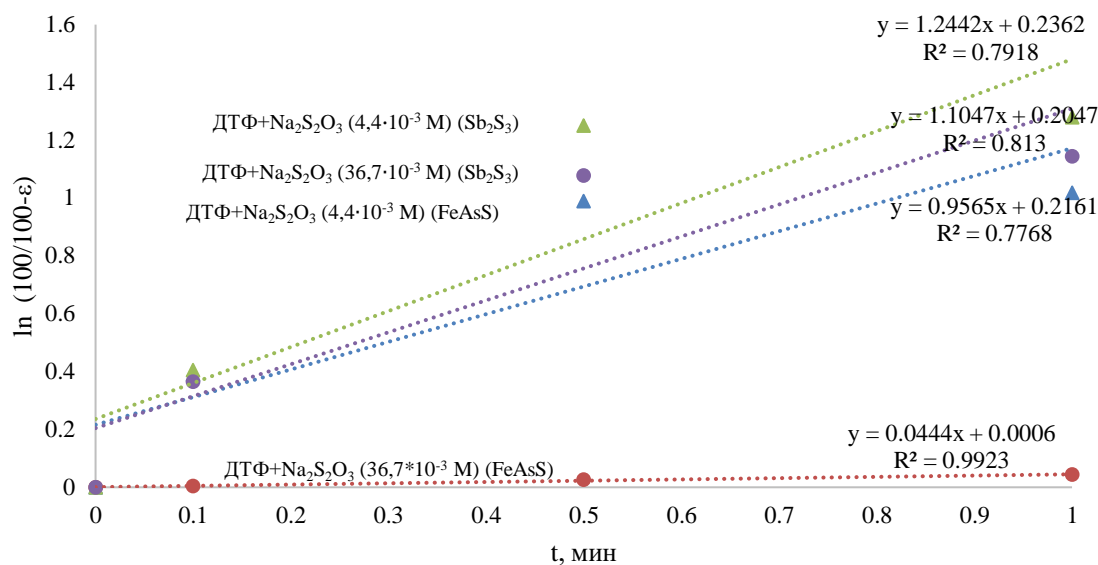


Рисунок 6 – ИК спектры отражения (МНПВО) антимонита, где 1 – ЭСК 2; 2 – смесь тиосульфата натрия с ЭСК 2 и 3 – тиосульфат натрия

На ИК-спектрах  $Sb_2S_3$ , сфлотированного собирателем ЭСК 2, наблюдаются характеристические полосы ТК  $1243\text{ см}^{-1}$  (N-C) и  $1524\text{ см}^{-1}$  (C=O); ДТФ  $1115, 1098\text{ см}^{-1}$  (O-P=S), дуплет при  $885$  и  $869$  ((O-P-S)  $\text{см}^{-1}$  сдвиг в сторону большей частоты от волнового числа в исходном собирателе ( $998, 838$  и  $810\text{ см}^{-1}$ ) указывает на закрепление ДТФ на антимоните через тионную и тиольную серу, с образованием координационного соединения. Индивидуально тиосульфат натрия закрепляется на антимоните, о чем свидетельствуют характеристические полосы при  $1122, 948$  (S=O)  $\text{см}^{-1}$ , а также остаются характеристические полосы стибнита при  $792$  и  $764\text{ см}^{-1}$ , соответствующие асимметричным колебаниям S=O стибнита, что указывает на некоторую окисленность поверхности антимонита. При совместном использовании в реагентном режиме ЭСК 2 и  $Na_2S_2O_3$ , согласно ИК спектру отражения, на поверхности антимонита остаются характеристические полосы собирателя ЭСК 2 ( $1224, 1087, 886$  и  $869\text{ см}^{-1}$ ) при несколько меньшем сдвиге для ТК и тионной серы ДТФ, а также полосы тиосульфата натрия, что свидетельствует о независимых активных центрах закрепления компонентов ЭСК 2 и тиосульфата.

На рисунке 7 приведены результаты исследования кинетики флотации на смеси сульфидов –“ $Sb_2S_3\text{-FeAsS}$ ” (а) и “ $Sb_2S_3\text{-FeS}_2$ ” (б).

а)



б)

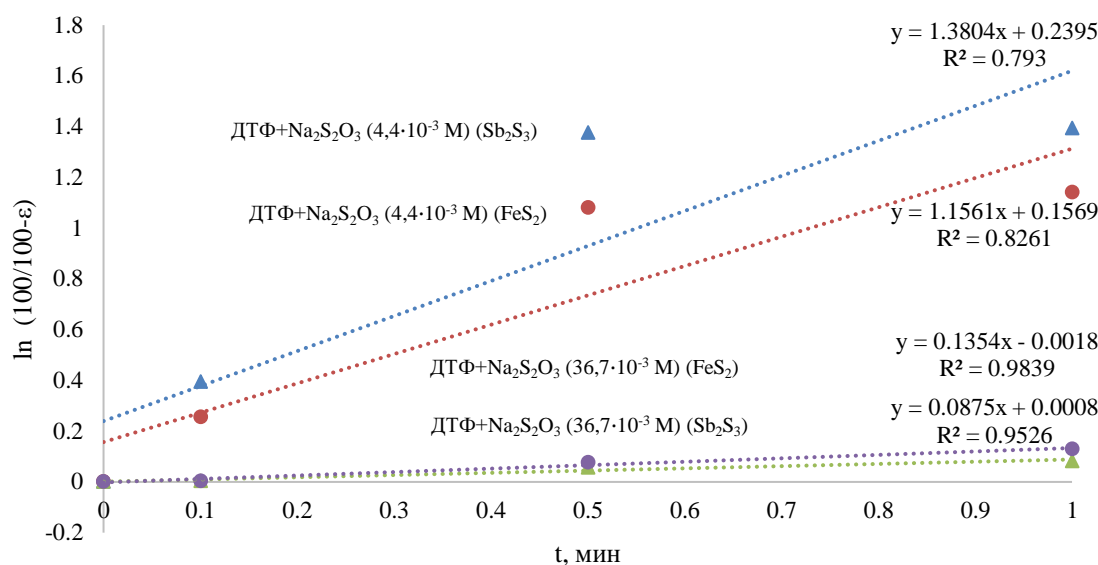


Рисунок 7 – Графический метод определения  $k$  ( $\text{мин}^{-1}$ ), где, а – смеси антимонит-арсенопирит “ $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-FeAsS}$ ”, б – смеси антимонит-пирит “ $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{-FeS}_2$ ”

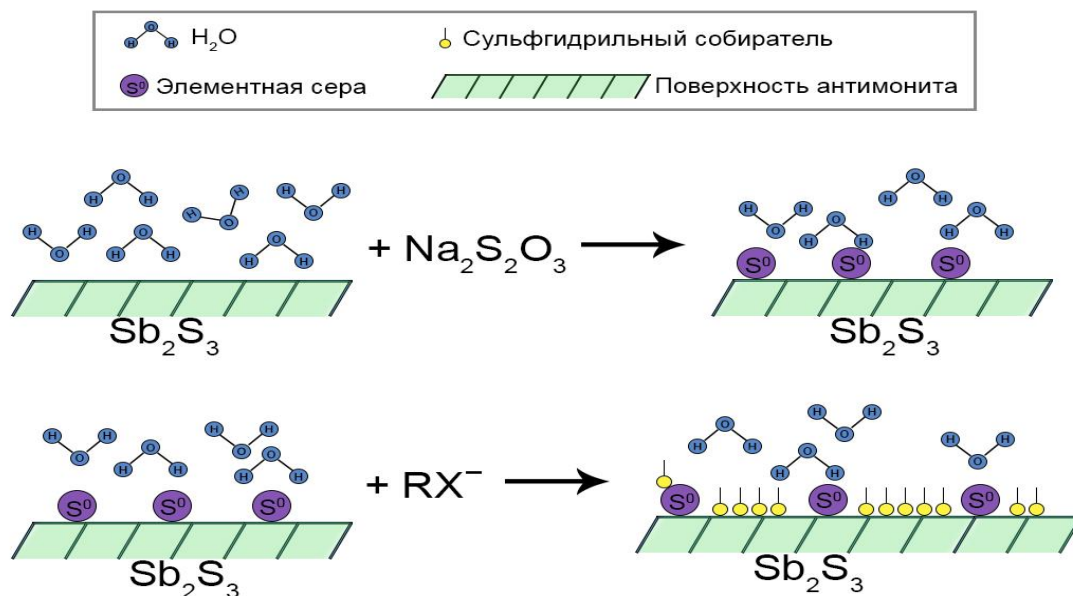
В таблице 1 приведены результаты графического определения константы скорости флотации Белоглазова сульфидов из 2-компонентной смеси при разных модификаторах в реагентном режиме пенной флотации.

Таблица 1 – Результаты кинетики флотации быстрофлотируемой фракции смесей антимонит-арсенопирит («Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-FeAsS») и антимонит-пирит («Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-FeS<sub>2</sub>»)

Режим	k, мин <sup>-1</sup>		R <sup>2</sup>	
	Sb	As	Sb	As
«Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> -FeAsS»				
Кх+Т-92+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (4,4·10 <sup>-3</sup> М)	1,574	1,257	0,772	0,786
ДТФ+Т-92+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (4,4·10 <sup>-3</sup> М)	1,380	0,910	0,714	0,600
Кх+Т-92+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (36,7·10 <sup>-3</sup> М)	1,481	1,175	0,713	0,739
ДТФ+Т-92+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (36,7·10 <sup>-3</sup> М)	1,562	1,546	0,813	0,786
Кх+Т-92+Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (4,4·10 <sup>-3</sup> М)	1,602	1,397	0,725	0,770
ДТФ+Т-92+ Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (4,4·10 <sup>-3</sup> М)	2,116	1,500	0,792	0,777
Кх+Т-92+ Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (36,7·10 <sup>-3</sup> М)	1,562	1,546	0,813	0,786
ДТФ+Т-92+ Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (36,7·10 <sup>-3</sup> М)	1,781	0,053	0,813	0,992
Режим	k, мин <sup>-1</sup>		R <sup>2</sup>	
	Sb	Fe	Sb	Fe
«Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> -FeS <sub>2</sub> »				
Кх+Т-92+Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (4,4·10 <sup>-3</sup> М)	3,998	2,599	0,803	0,687
ДТФ+Т-92+ Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (4,4·10 <sup>-3</sup> М)	2,454	2,068	0,793	0,826
Кх+Т-92+ Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (36,7·10 <sup>-3</sup> М)	1,467	1,545	0,839	0,786
ДТФ+Т-92+ Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (36,7·10 <sup>-3</sup> М)	0,135	0,180	0,953	0,984

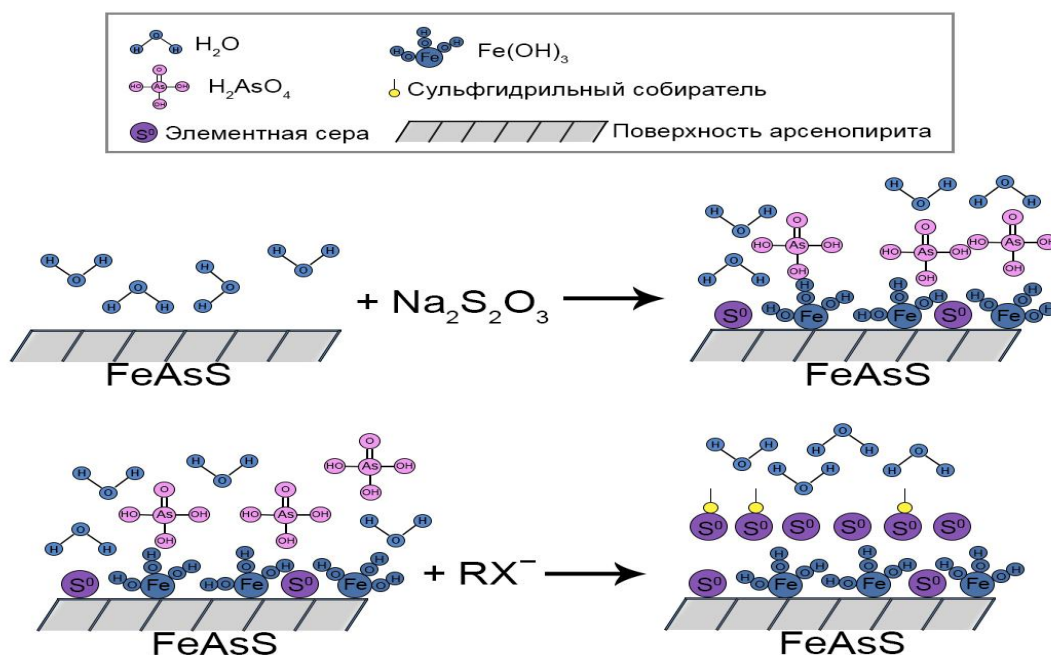
Согласно результатам исследований кинетики флотации 2-х компонентных смесей сульфидов (рисунок 7 и таблица 1) тиосульфат обеспечивает разницу в 1.4 раза в константах скорости флотации реагентного режима «ДТФ+Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» антимонита (k=2,116 мин<sup>-1</sup>) против арсенопирита (k=1,500 мин<sup>-1</sup>). Для смеси «Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-FeS<sub>2</sub>» константа скорости флотации выше в 1.5 для реагентного режима «бутКх+Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» k<sub>Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub></sub> = 3,998 мин<sup>-1</sup> и k<sub>FeS<sub>2</sub></sub> = (2,599 мин<sup>-1</sup>). По совокупности полученных результатов можно сделать вывод о том, бутКх лучший собиратель для пирита, а ДТФ для арсенопирита и антимонита. Наибольшую разницу в кинетике флотации при использовании ДТФ в качестве собирателя обеспечивает тиосульфат натрия.

Результаты выполненных исследований позволили сформулировать механизм взаимодействия сульфгидрильного собирателя с антимонитом в присутствии тиосульфата натрия (рисунки 8-10).



ионогенный сульфгидрильный собиратель ( $\text{RX}^-$ ), где X – солидофильная группа

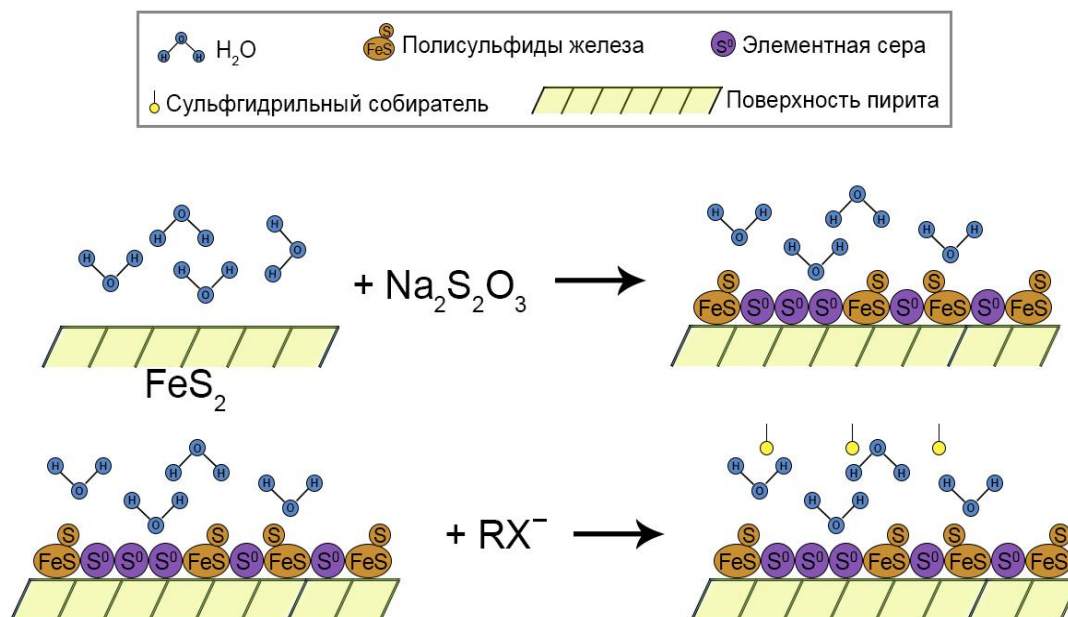
Рисунок 8 – Механизм взаимодействия антимонита с тиосульфатом натрия и сульфгидрильным собирателем



ионогенный сульфгидрильный собиратель ( $\text{RX}^-$ ), где X – солидофильная группа

Рисунок 9 – Механизм взаимодействия арсенопирита с тиосульфатом натрия и сульфгидрильным собирателем





ионогенный сульфгидрильный собиратель ( $\text{RX}^-$ ), где X – солидофильная группа

Рисунок 10 – Механизм взаимодействия пирита с тиосульфатом натрия и сульфгидрильным собирателем

Антимонит в водной среде окисляется, растворяется, в результате поверхностных реакций образуются ионы сурьмы, элементарная сера, другие активные центры на поверхности антимонита. На активных центрах поверхности антимонита закрепляются ионогенные сульфгидрильные собиратели за счет закрепления посредством координационного комплекса  $\text{Sb}(\text{RX})_3$ . Согласно ИК спектрам отражения, на антимоните также зафиксирована хемосорбция неионогенного сульфгидрильного компонента за счет донорно-акцепторного механизма с локально некомпенсированными дефектами поверхности. Таким образом, на поверхности антимонита сульфгидрильные собиратели и тиосульфат закрепляются на независимых активных центрах поверхности, конкуренция между ними за активные центры минимальна.

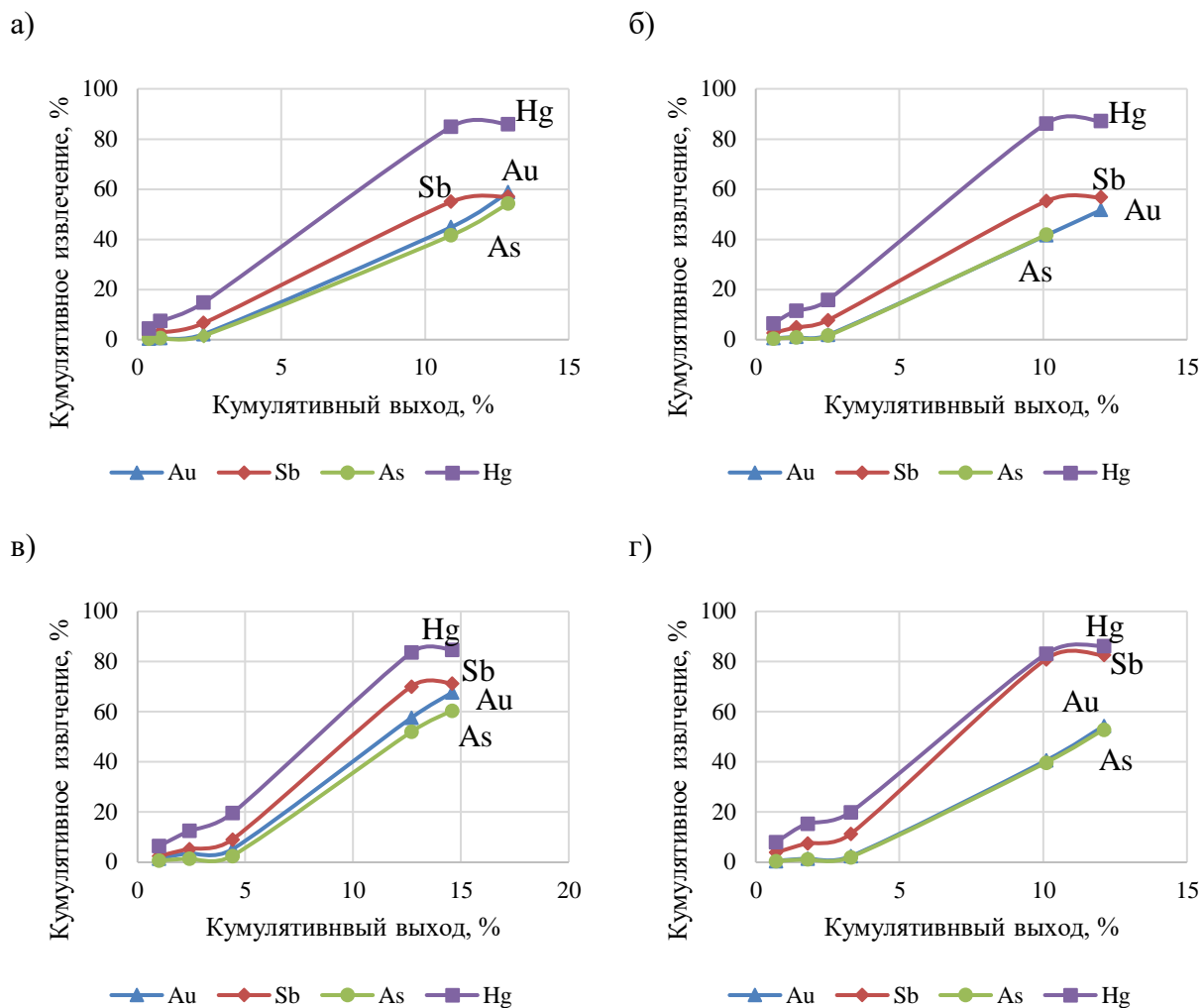
При взаимодействии арсенопирита и пирита с собирателем в присутствии тиосульфата натрия закрепление собирателя на поверхности затруднено вследствие конкурентных реакций с гидроксидами, гидроксокомплексами и полисульфидами железа. Снижение интенсивности окисления серы кристаллической решетки арсенопирита и пирита за счет применения тиосульфата также затрудняет хемосорбцию сульфгидрильного собирателя на активных центрах поверхности, что в совокупности препятствует гидрофобизации поверхности и приводит к снижению извлечения пирита, арсенопирита в пенный продукт флотации.

**В пятой главе** представлены результаты исследований вещественного состава пробы золотосульфидной руды одного из месторождений в Якутии. Руда относится к труднообогатимому и упорному к цианированию малосульфидному типу, из-за преобладания закрытых сростков золота с сульфидными минералами (распределено 75,5 % золота), закрытых сростков с породными минералами (23,3 %), неравномерной вкрапленности антимонита вплоть до эмульсионной, присутствия углеродистого материала. Исходное содержание золота 4,15 г/т.

В руде преобладают кварц (40,15 %), карбонаты (11,41 %) и слоистые силикаты (3,52 %). Сульфидные минералы составляют 4,21 %, включая арсенопирит (1,89 %) и пирит (2,24 %). Соотношение пирит:арсенопирит равен 1,2:1. Наибольшее количество сульфидных фаз (7,49 %) отмечено в классе флотационной крупности  $-0,074+0,044$  мм.

Установленные закономерности взаимодействия сульфгидрильных собирателей с поверхностью мономинеральных фракций антимонита, арсенопирита, пирита как индивидуально, так и в присутствии модификаторов апробированы при разработке схемы и реагентного режима флотации пробы золотосульфидной руды, содержащей золото преимущественно в закрытых сростках с сульфидами, главным образом с арсенопиритом и пиритом, а также руда содержит антимонит, который необходимо селективно удалить из золотосульфидного концентрата. Тестовые исследования показали, что эффективное извлечение сульфидов в коллективный концентрат достигается при естественной щелочности ( $\text{pH} = 7-8$ ), без добавления регуляторов среды. В качестве активатора флотации сульфидов использован медный купорос в соотношении к удельному расходу собирателя 2:1.

Методом фракционного съема пены в течение 25 минут выполнены исследования обогатимости руды флотацией с использованием разных образцов сульфгидрильного собирателя (рисунок 11 (а, б, в, г)). В данной серии опытов использованы следующие сульфгидрильные собиратели – Aerophine 3418А (ДИФ); ЭСК (представляет собой смесь ДТФ и ТК в определенном соотношении) – ЭСК1 (20:80), ЭСК2 (50:50), ЭСК3 (40:60).



удельный расход собирателя 33 г/т

Рисунок 11 – Кривые обогатимости пробы руды флотацией: а –Аерофине 3418А; б – ЭСК1; в – ЭСК2; г – ЭСК3

ЭСК 2 обладает более высокой собирательной способностью по отношению всем сульфидам (рисунок 11, в). В таблице 2 представлены данные по оценки эффективности флотационного обогащения по критерию Ханкок-Луйкен.

Таблица 2 – Оценка эффективности флотационного обогащения по критерию Ханкок-Луйкен (the Hancock – Luiken criterion)

Собиратель	Общий расход собирателя, г/т	$S_{H-L}$ , %			
		Au	As	Sb	Hg
ДИФ (Aerophine3418A)	33	47,9	41,8	44,0	72,9
ЭСК 1 (ДТФ+ИТК)	33	41,6	39,4	44,8	75,2
ЭСК 2 (ДТФ+ИТК)	33	55,6	46,4	56,8	70,1
ЭСК 3 (М-ТФ 421)	33	44,3	41,2	70,6	74,3
ЭСК 2 (ДТФ+ИТК)	110	66,1	57,9	56,3	63,8
БутКх	350	67,0	59,8	37,3	70,1

Наибольшая эффективность флотационного обогащения по критерию Ханкок-Луйкена соответствует собирателю ЭСК 2 при расходе 33 г/т, где Au – 55,6 %, As – 46,4 %, Sb – 56,8 %, Hg – 70,1 %. Увеличение расхода ЭСК 2 до 110 г/т повышает эффективность флотации целевых компонентов.

Результаты опытов на руде согласуются с результатами исследований на мономинеральных фракциях, что коллективная флотация сульфидов наиболее эффективна сульфгидрильным собирателем при установленном соотношении ДТФ:ТК=50:50.

Разработан реагентный режим флотации, позволяющий снизить массовую долю сурьмы в золотосульфидном концентрате, на основе использования тиосульфата натрия в селективной флотации коллективного концентрата.

Технологическая схема включает межстадиальные флотации для последовательного вывода фракции углеродистого материала, раскрытых частиц золота, коллективную флотацию сульфидов, пром.продуктовый цикл с выводом отвальных хвостов 2 и цикл обессурьмянивания золотосульфидного концентрата (рисунок 12).

Таблица 3 – Результаты лабораторных исследований обессурьмянивания черного золотосульфидного концентрата

Продукт	Выход, %	Au, г/т	Массовая доля, %			Извлечение, %			
			Sb	As	C <sub>орг</sub>	Au	Sb	As	C <sub>орг</sub>
Σ УМ	0,90	7,75	0,24	0,68	17,60	0,58	1,16	0,23	8,96
Sb продукт (пенный)	1,40	8,07	3,13	0,50	5,50	2,10	53,20	0,59	4,18
ΣAu-As-S к-т + п/п	9,80	41,12	0,27	9,29	2,85	77,60	33,40	78,30	15,50
ΣОтвальные хвосты	87,90	1,16	0,01	0,28	1,46	19,60	12,20	20,90	71,30
Исходная руда	100,00	5,18	0,080	1,16	1,80	100,00	100,00	100,00	100,00

Разработанная схема и реагентный режим (рисунок 12, таблица 3) позволили селективно извлечь сурьму в пенный продукт с незначительными потерями золота в нем (1,16 %) и получить золотосульфидный концентрат камерным продуктом с извлечением 77,6 % с содержанием золота более 41,12 г/т и массовой доле сурьме 0,27 % за счет использования в реагентном режиме коллективной флотации сульфгидрильного собирателя ЭСК 2 и модификатора тиосульфата натрия в цикле селекции.

γ, %	$\delta^{Au}_{\text{пл}}$ , г/т	$\delta^{Au}_{\text{к}}$ , %	$\delta^{Au}_{\text{п}}$ , %	$\delta^{Au}_{\text{с}}$ , %	$\delta^{Au}_{\text{с}}$ , %	$\delta^{Au}_{\text{с}}$ , %
------	---------------------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------

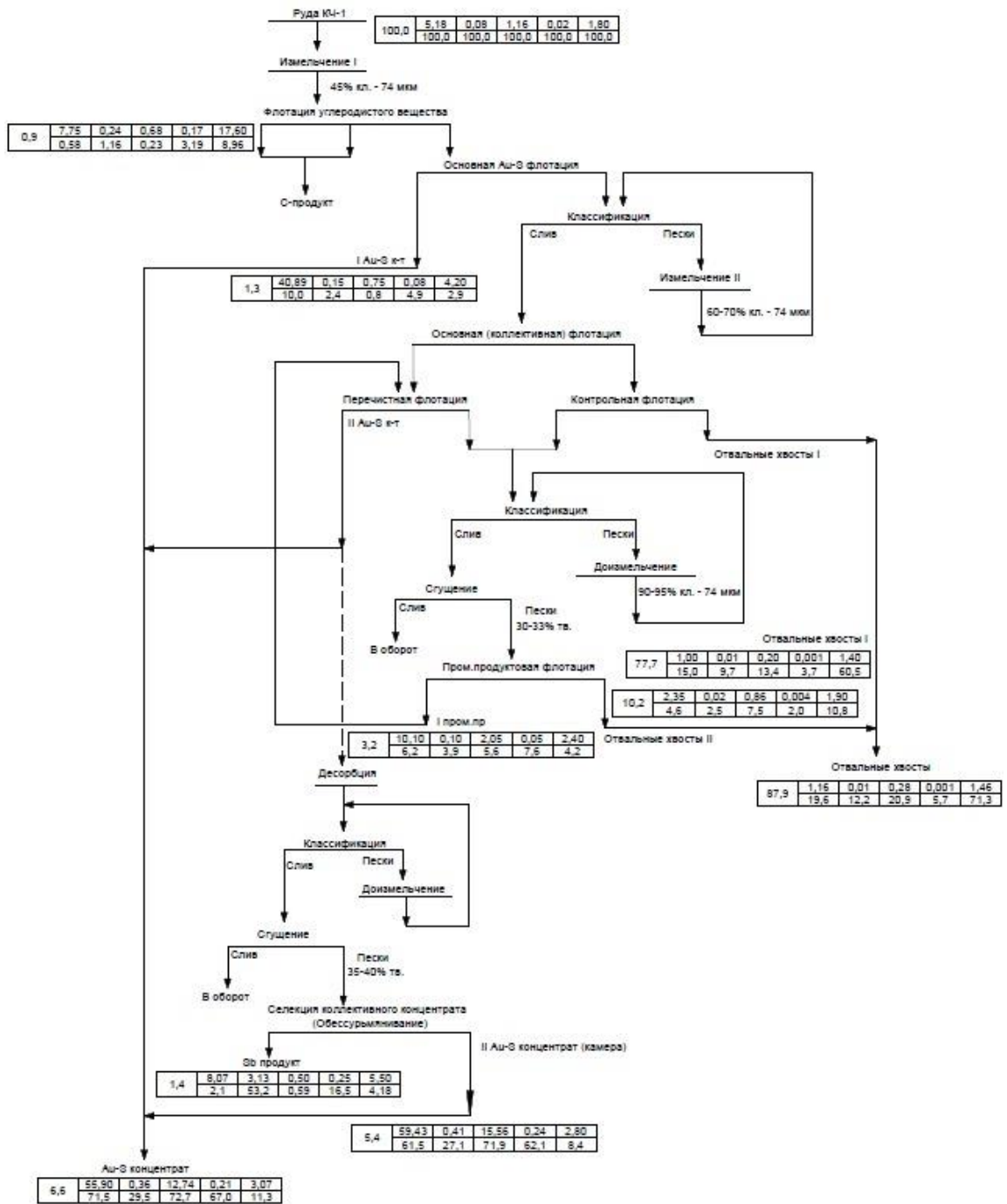


Рисунок 12 – Технологическая схема циклом обесурьмяивания с применением тиосульфата натрия

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании комплекса выполненных исследований и полученных новых научных результатов предложены технологические решения по вовлечению в переработку труднообогатимых золото-арсенопиритовых сурьмянистых руд, что имеет существенное значение для золотодобывающей отрасли.

Получены следующие основные результаты:

1) Методом молярных отношений Йоу и Джонса определено, что состав комплексов железа (II), железа (III) и меди (II) с бутКх и ДТФ соответствует их стехиометрическому соотношению. Методом изомолярных серий Жоба подтверждено, что устойчивый комплекс бутКх образует с Cu (I), при этом устойчивые комплексы ДТФ образуются с Cu (II). ДТФ образует с медью несколько сложных комплексных соединений при соотношении  $[Me]:[L]=0,3:0,7$  (1:2) и  $0,6:0,4$  (1,5:1).

2) Методами беспенной, пенной флотации мономинеральных фракции, краевого угла смачивания, ИКС МНПВО доказано, что ДТФ более селективный собиратель по отношению к антимониту и арсенопириту, чем бутКх. Сульфгидрильный собиратель ЭСК2 (смесь ТК и ДТФ в соотношении 50:50) является лучшим сульфгидрильным собирателем для коллективной флотации сульфидов.

3) Впервые определена общая критическая концентрация  $4,4 \cdot 10^{-3}$  моль/л для модификаторов  $Na_2S_2O_3$  и  $H_2O_2$  при которой увеличивается контрастность флотируемости между арсенопиритом, пиритом и антимонитом.

4) Результаты кинетики флотации на смесях « $Sb_2S_3-FeAsS$ » и « $Sb_2S_3-FeS_2$ » показали, что бутКх активнее флотирует сульфиды из смеси с пиритом, а ДТФ из смеси с арсенопиритом. Тиосульфат обеспечивает разницу в 1.4 раза в константах скорости флотации реагентного режима «ДТФ+ $Na_2S_2O_3$ » антимонита ( $k=2,116 \text{ мин}^{-1}$ ) против арсенопирита ( $k=1,500 \text{ мин}^{-1}$ ). Для смеси « $Sb_2S_3-FeS_2$ » константа скорости флотации выше в 1.5 для реагентного режима «бутКх+ $Na_2S_2O_3$ »  $k_{Sb_2S_3} = 3,998 \text{ мин}^{-1}$  и  $k_{FeS_2} = (2,599 \text{ мин}^{-1})$ .

5) Предложен механизм действия с поверхностью антимонита, арсенопирита и пирита сульфгидрильного собирателя в присутствии тиосульфата натрия. На поверхности антимонита сульфгидрильные собиратели и тиосульфат закрепляются на независимых активных центрах, конкуренция между собирателем и модификатором за активные центры поверхности минимальна, поэтому гидрофобность поверхности снижается незначительно для реагентного режима флотации «ДТФ+ $Na_2S_2O_3$ ».

При взаимодействии арсенопирита и пирита сульфгидрильного собирателя в присутствии тиосульфата натрия закрепление собирателя на поверхности затруднено вследствие конкуренции с гидроксидами, гидроксокомплексами и полисульфидами железа. Изменение состава поверхностных соединений на арсенопирите и пирите в присутствии тиосульфата приводит к снижению закрепления собирателя и гидрофилизации поверхности.

6) Изучен вещественный состав пробы золотосодержащей руды, который относит ее к труднообогатимой за счет тонкой дисперсности, присутствия природногидрофобного минерала антимонита, углеродистого материала и соотношения пирита:арсенопирита 1,2:1. Согласно технологическим лабораторным исследованиям максимальное извлечение золотоносных сульфидов коллективный концентрат достигается сочетанием сульфгидрильных компонентов в собирателе ТК и ДТФ в соотношении 50:50 (ЭСК 2).

7) На основе установленных закономерностей разработана частично-коллективно-селективная схема флотации и реагентный режим труднообогатимой золотосульфидной руды, которая позволяет извлечь золото на уровне 80 % в золотосульфидный концентрат с содержанием золота более 40 г/т и массовой доле сурьмы 0,27 % (ТУ 48-16-6-75). В реагентном режиме коллективной флотации использован сульфгидрильный собиратель ЭСК 2, в цикле селекции (обессурьмянивания) – модификатор тиосульфата натрия.

### **Основные положения диссертационной работы опубликованы**

#### **Научные статьи в издание, рекомендованном перечнем ВАК РФ, WoS, Scopus**

1. Игнаткина В.А., Аксенова Д.Д., Каюмов А.А., **Ергешева Н.Д.** Пероксид водорода в реагентных режимах флотации колчеданных медных руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – 1. – С. 139-152. DOI: 10.15372/FTPRPI20220115;

Ignatkina V.A., Aksenova D.D., Kayumov A.A., **Ergesheva N.D.** Hydrogen Peroxide in Reagents Regimes in Copper Sulphide Ore Flotation. Journal of Mining Science. – 2022. – Т. 58. – р. 123-134. doi.org/10.1134/S106273912201015X.

2. Игнаткина В.А., Каюмов А.А., **Ергешева Н.Д.** Флотоактивность и реакционная способность сульфидных минералов и золота // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2022. – №4. – С. 4-14. DOI: 10.17073/0021-3438-2022-4-4-14;

Ignatkina V.A., Kayumov A.A., **Yergesheva N.D.** Flotoability and Calculated Reactivity of Gold and Sulphide Minerals // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2022. – Т 63. – №5. – p. 473-481. DOI: 10.3103/S1067821222050054.

3. Игнаткина В.А., Каюмов А.А., **Ергешева Н.Д.**, Чернова П.А. Флотуемость трудноокисляемых сульфидов молибдена и сурьмы в контролируемых окислительно-восстановительных условиях // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – №1. – С. 145-160. DOI: 10.15372/FTPRPI20230114;

Ignatkina V.A., Kayumov A.A., **Ergesheva N.D.**, Chernova P.A. Floatability of low-oxidizable molybdenum and antimony sulfides in controlled oxidation-reduction conditions // Journal of Mining Science. – 2023. – Т. 59. – №1. – p. 127-141. DOI: 10.1134/S1062739123010143.

4. Игнаткина В.А., Каюмов А.А., **Ергешева Н.Д.**, Чернова П.А. Кинетические исследования реагентных режимов для повышения контрастности флотации сульфидных минералов // Цветные металлы. – 2023. – №10. – С. 15-22. DOI: 10.17580/tsm.2023.10.02;

Ignatkina V.A., Kayumov A.A., **Ergesheva N.D.**, Chernova P.A. Kinetic studies of reagent modes to increase the contrast of flotation of sulfide minerals // Tsvetnye Metally. – 2023. – Т. 10. – p. 15-22, DOI: 10.17580/tsm.2023.10.02

5. Каюмов А.А., Игнаткина В.А., **Ергешева Н.Д.** Исследование кинетики электродных потенциалов сульфидных минеральных электродов в присутствии модификаторов флотации // ГИАБ. – 2023. – №10. – С. 89-103. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_10\_0\_89.

Kayumov A.A., Ignatkina V.A., **Ergesheva N.D.** Kinetics of electrode potentials of sulfide mineral electrodes in the presence of flotation modifiers // Mining informational and analytical bulletin. – 2023. – Т. 10. – p. 89-103. DOI:10.25018/0236\_1493\_2023\_10\_0\_89.

6. Жаролла Н.Д. (**Ергешева Н.Д.**), Ергешев А.Р., Игнаткина В.А. Оценка селективности действия сульфгидрильных собирателей на основе дитиофосфатов // ГИАБ. – 2020. – №11. – С. 14-26. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-14-26.

### Другие научные публикации

1. К механизму взаимодействия бутилового ксантогената с ионами меди и железа методом молярных отношений / Н.Д. Ергешева, В.А. Игнаткина, А.Р. Ергешев // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXVII Международной научно-технической конференции, 07-08 апреля 2022 г., проводимой в



рамках XX Уральской горнопромышленной декады 04-13 апреля 2022 г., Екатеринбург: Издательство ИП Русских А.В., 2022. – С. 100-106.

2. К механизму действия собирателей разной ионогенности при флотационном разделении сульфидов в контролируемых окислительно-восстановительных условиях / В.А. Игнаткина, А.А. Каюмов, Н.Д. Ергешева // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения (Плаксинские чтения – 2022), 04-07 октября 2022 г., Владивосток: Издательство ДВФУ, 2022. – С. 210-212.

3. Потенциометрические исследования с применением сульфидных минеральных электродов в контролируемых окислительно-восстановительных условиях / А.А. Каюмов, В.А. Игнаткина, Н.Д. Ергешева // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXVIII Международной научно-технической конференции, 06-07 апреля 2022 г., проводимой в рамках XXI Уральской горнопромышленной декады 03-12 апреля 2023 г., Екатеринбург: Издательство ИП Русских А.В., 2023. – С. 157-162.

4. Basic selective reagents regimes for complex sulfide ore flotation / V. Ignatkina, A. Kayumov, N. Yergesheva, P. Chernova // XV International Mineral Processing & Recycling Conference, 17-19 May 2023, Belgrade, Serbia: Publisher University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, 2023. – P. 179-185

5. Влияние качественно-количественного состава сульфгидрильных собирателей на контрастность флотуемости сульфидов в контролируемые окислительно-восстановительные условия / В.А. Игнаткина, А.А. Каюмов, Н.Д. Ергешева, П.А. Чернова // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения (Плаксинские чтения – 2023), 02-05 октября 2023 г., Москва: Издательство Спутник+, 2023. – С. 284-286

Выражаю благодарность исследователям Центра ресурсосберегающих технологий переработки минерального сырья, «НУИЛ ФХУ» за содействие в выполнении элементов диссертационного исследования.