

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



**Дизер Олег Анатольевич**

**Гидрометаллургическая переработка медно-мышьяковистого  
сульфидного сырья**

2.6.2. Metallurgy of black, colored and rare metals

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена на кафедре «Металлургия цветных металлов» Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

**Научный руководитель –** доктор технических наук, доцент,  
**Рогожников Денис Александрович**

**Официальные оппоненты:** **Тимофеев Константин Леонидович,**  
доктор технических наук,  
АО «Уралэлектромедь», г. Верхняя  
Пышма Свердловской обл., начальник  
технического отдела инженерно-  
производственного управления;

**Амдур Алексей Миронович,**  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ  
ВО «Уральский государственный горный  
университет», г. Екатеринбург,  
заведующий кафедрой химии;

**Бодуэн Анна Ярославовна,**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный  
университет», г. Санкт-Петербург, доцент  
кафедры металлургии.

Защита диссертации состоится «17» июня 2022 г. в 17:30 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.6.03.08 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=3531>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Шопперт Андрей Андреевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Медная промышленность проявляет большой интерес к разработке и использованию медно-мышьяковых месторождений. Большинство заводов, как правило, используют традиционные технологии переработки, истощение основных запасов медных руд создало конкуренцию в разработке и внедрении новых технологических альтернатив для обработки медно-мышьяковых руд, содержащих такие минералы, как энаргит и теннантит. Тем не менее, последующая переработка медных концентратов с высоким содержанием мышьяка представляет собой серьезную проблему для металлургов как с точки зрения отделения мышьяка, так и его стабилизации в экологически безвредной форме, которая соответствует экологической политике РФ.

Ограничения в переработке подобного сырья пирометаллургическими методами, в первую очередь с точки зрения экологии, а также усложнения технологических и аппаратных схем, приводят к необходимости разработки гидрометаллургических способов. Основной задачей является не только извлечение ценных металлов и выделение мышьяка из сырья, но и стабилизация его в виде безопасного соединения.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 19-38-90190\19 «Комплексная переработка медно-мышьяковистого золотосодержащего сырья».

### **Степень разработанности темы исследования**

Исследования Набойченко С.С., Шнеерсона Я.М., Anderson С.G. и др. ясно показывают, что многие усилия были направлены на разработку технологических процессов для переработки медно-мышьяковистых концентратов, но их использование и промышленная реализация ограничены из-за высокого содержания в них мышьяка и экологических проблем, связанных с его утилизацией.

Пирометаллургические процессы подразумевают использование дорогостоящего оборудования, необходимого для улавливания и обработки отходящих газов, а гидрометаллургические способы не всегда могут обеспечить высокое извлечение ценных компонентов из перерабатываемого сырья.

По вышеупомянутым причинам исследования по проблемам переработки подобного сложного медного сырья с высоким содержанием мышьяка представляют собой серьезную научно-техническую проблему.

### **Цель работы:**

Разработка и научное обоснование гидрометаллургической технологии переработки медно-мышьяковистых сульфидных концентратов с селективным выделением мышьяка в экологически безопасную форму, меди и цинка – в товарный продукт, получением золотосодержащего остатка, пригодного для аффинажа.

### **Задачи исследования:**

- Изучить химический и минералогический составы исходного медно-мышьяковистого сырья.
- Установить основные теоретические закономерности растворения сульфидных медно-мышьяковистых минералов в растворах азотной кислоты и ионов Fe (III).
- Определить условия ведения процесса азотнокислотного выщелачивания с добавлением FeS<sub>2</sub> и ионов Fe (III) с возможностью растворения основных сульфидов изучаемого медно-мышьяковистого сырья более чем на 90 %.
- Изучить кинетические закономерности и выявить особенности механизма азотнокислотного растворения с добавлением FeS<sub>2</sub> и ионов Fe (III) смеси природных сульфидных минералов халькопирита, теннантита, сфалерита.
- Разработать способ полного осаждения мышьяка из растворов азотнокислотного выщелачивания в виде экологически безопасного соединения – арсената железа.

### **Научная новизна:**

1. Установлены новые физико-химические закономерности азотнокислотного выщелачивания сульфидного медно-мышьяковистого концентрата Учалинского месторождения: показано что для полного растворения основных сульфидов изучаемого сырья и получения необходимых конечных продуктов рассматриваемого процесса (CuSO<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> и H<sub>3</sub>AsO<sub>4</sub>) необходимо придерживаться пределов значений pH менее 1 и E<sub>h</sub> > 0,8 В; определена последовательность растворения сульфидов в изучаемом процессе – первыми растворяются галенит и сфалерит, затем пирит и теннантит, халькопирит растворяется в последнюю очередь; показано снижение необходимого количества азотной кислоты для растворения основных сульфидов изучаемого сырья путём введения в процесс ионов Fe (III).

2. Впервые показано совместное влияние добавок FeS<sub>2</sub> и ионов Fe (III) на степень растворения смеси сульфидных минералов теннантита, халькопирита и сфалерита в растворе азотной кислоты.

3. Проведены кинетические исследования растворения теннантита, халькопирита и сфалерита в растворе азотной кислоты с добавлением FeS<sub>2</sub> и ионов Fe (III) при помощи модели сжимающегося ядра, что позволило определить:

- значения кажущейся энергии активации процесса азотнокислотного растворения: для теннантита - 28,8 кДж/моль, халькопирита - 33,7 кДж/моль, сфалерита - 53,7 кДж/моль;

- эмпирические порядки для теннантита, халькопирита и сфалерита: по концентрации азотной кислоты составили 1,2; 1,4; 1,6 соответственно; по концентрации ионов железа (III) 0,34; 0,82; 0,62 соответственно; по пириту 0,47; 0,69; 0,59 соответственно.

Установлено, что в изучаемых условиях ведения процесса растворение медных сульфидных минералов лимитируется внутренней диффузией, что связано с пассивацией поверхности этих минералов плёнкой элементарной серы.

4. Впервые показано, что при совместном азотнокислотном растворении халькопирита, теннантита и пирита, последний выступает в качестве альтернативной каталитической поверхности для медных минералов, пассивированных элементарной серой, облегчая подвод азотной кислоты к зоне реакции.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Разработан новый метод азотнокислотного выщелачивания Учалинского концентрата, позволяющий путем введения в процесс добавок  $\text{FeS}_2$  и ионов  $\text{Fe (III)}$  снизить требуемую начальную концентрацию кислоты с 12 до 6 моль/дм<sup>3</sup>.

2. Разработаны математические модели процесса азотнокислотного выщелачивания, устанавливающие зависимость степени растворения теннантита, халькопирита и сфалерита от концентрации азотной кислоты, продолжительности процесса, температуры, концентрации ионов  $\text{Fe (III)}$  и количества  $\text{FeS}_2$ . Данные модели могут быть использованы для оптимизации и автоматизации разрабатываемых технологий.

3. Оптимизированы основные технологические параметры процесса азотнокислотного выщелачивания медно-мышьяковистого концентрата, позволяющие проводить регенерацию основных реагентов при высокой степени растворения теннантита, халькопирита и сфалерита: концентрация азотной кислоты 6 моль/дм<sup>3</sup>, продолжительность процесса 60 мин, температура 80 °С, концентрация ионов  $\text{Fe (III)}$  16,5 моль/дм<sup>3</sup> и массовое соотношение  $\text{FeS}_2$  к минералам цветных металлов медно-мышьяковистого концентрата 1,2:1.

4. Разработана универсальная технология переработки медно-мышьяковистого сульфидного сырья, включающая вскрытие основных сульфидных минералов азотной кислотой с добавлением  $\text{FeS}_2$  и ионов  $\text{Fe (III)}$ , что обеспечивает степень извлечения меди и цинка в раствор более 95 %; осаждение железа и мышьяка на 99,9 % из продуктивного раствора выщелачивания с минимальными потерями меди и цинка; высвобождение золота и серебра из сульфидной матрицы минералов медно-мышьяковистого сырья для их последующего извлечения традиционными методами. Выполнена технико-экономическая оценка переработки данного сырья по предложенной технологии.

#### **Методология и методы исследования**

Исследования выполнены в лабораторных и укрупненных условиях с применением методов математического планирования эксперимента и компьютерных программ обработки информации и сбора данных (HSC Chemistry 6, Statgraphics 16, Microsoft Office и др.).

Анализ исходного сырья и полупродуктов проводили с использованием аттестованных методов: рентгенофлуоресцентный (Axios MAX фирмы PANalytical), атомно-абсорбционный анализ (AnalytikJena novAA-300 и Perkin-Elmer AAnalyst

400), рентгенофазовый (XRD 7000 Maxima), масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой (Perkin-Elmer ELAN DRC- e), пробирный анализ, электронно-микроскопический (JEOL JSM-6390LA, оснащенный энерго-дисперсионным анализатором JED-2300) и др.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработан новый процесс азотнокислотного выщелачивания медно-мышьяковистого концентрата в присутствии  $\text{FeS}_2$  и ионов Fe (III).
2. Новые сведения о кинетике и механизмах взаимодействия азотной кислоты с  $\text{CuFeS}_2$ ,  $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$  и  $\text{ZnS}$  в присутствии  $\text{FeS}_2$  и ионов Fe (III).
3. Технологическая схема переработки медно-мышьяковистого концентрата Учалинского месторождения, позволяющая выделять в товарные продукты более 95 % меди и цинка, утилизировать мышьяк в экологически безопасную форму и получать золотосодержащий остаток, пригодный для аффинажа.

#### **Достоверность и апробация работы**

Степень достоверности и надежности данных обеспечивается применением и использованием современных средств и методик проведения исследований, аттестованных методик измерений. Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на следующих международных, российских и региональных конференциях: «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований (Техноген)», г. Екатеринбург, 2017, 2019 гг.; «Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения)», Красноярск, 2017 г.; «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», г. Екатеринбург, 2017, 2018, 2019, 2021 гг.; «Интенсификация гидрометаллургических процессов переработки природного и техногенного сырья. Технологии и оборудование», г. С-Петербург, 2018 г.; «Материаловедение и металлургические технологии», г. Челябинск, 2018 г.; «Цветные металлы и минералы», г. Красноярск, 2018, 2019, гг.; «Пром-Инжиниринг», г. Сочи, 2020 г.; «Инновационный потенциал молодежи – вклад в развитие АО «Уралэлектромедь», г. Верхняя Пышма, 2020 г.; «Металлургия цветных, редких и благородных металлов», г. Красноярск, 2021 г.

**Личный вклад** автора заключается в формировании целей и задач исследований, непосредственном участии в проведении лабораторных и укрупненных исследований. Обработка, анализ и обобщение полученных результатов в разработке технологической и аппаратурной схем процесса.

#### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 22 работы, 11 из них в рецензируемых научных журналах и изданиях, определённых ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 10 – в международных базах данных Scopus, WoS.

#### **Структура диссертации**

Диссертационная работа изложена на 127 страницах, состоит из введения, 5 глав, заключения, 43 рисунков, 29 таблиц, списка литературы из 102 наименований, 2 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ современных технологий металлургической переработки медно-мышьяковистого сульфидного сырья. Показана предпочтительность использования гидрометаллургических методов при переработке подобного сырья, характеризующегося высоким содержанием мышьяка.

Представлены краткие сведения о наиболее распространенных гидрометаллургических технологиях с использованием сернокислотного, хлоридного, аммиачного и щелочного выщелачивания, в том числе в режиме бактериального и автоклавного способов, показаны основные достоинства и недостатки этих методов.

Обоснована перспективность использования в качестве выщелачивающего реагента азотной кислоты, обладающей рядом преимуществ, в сравнении с другими окислителями: энергетическая эффективность протекающих химических реакций; высокий окислительный потенциал системы; возможность утилизации отходящих нитрозных газов с регенерацией азотной кислоты.

Во **второй главе** приведены результаты исследования химического, гранулометрического и минералогического составов медно-мышьяковистого концентрата Учалинского месторождения, а также основные результаты физико-химических закономерностей процесса азотнокислотного выщелачивания медно-мышьяковистого сырья.

В качестве объекта исследования выбран медно-мышьяковистый концентрат Учалинского месторождения. Химический состав исходного концентрата представлен в таблице 1, рентгенограмма представлена на рисунке 1.

Таблица 1 – Химический состав медно-мышьяковистого концентрата Учалинского месторождения

Содержание, масс. %									
S	Fe	Cu	Zn	As	Pb	Si	Al	Au, г/т	Ag, г/т
39,40	27,90	18,00	4,83	2,91	2,05	0,80	0,50	4,90	96,40

По результатам рентгенофазового анализа установлены основные фазы изучаемого материала: пирит ( $\text{FeS}_2$ ) – 39,86 %; халькопирит ( $\text{CuFeS}_2$ ) – 30,61 %; теннантит ( $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ ) – 14,36 %; сфалерит ( $\text{ZnS}$ ) – 7,19 %; галенит ( $\text{PbS}$ ) – 2,37 %; кварц ( $\text{SiO}_2$ ) – 1,7 %.

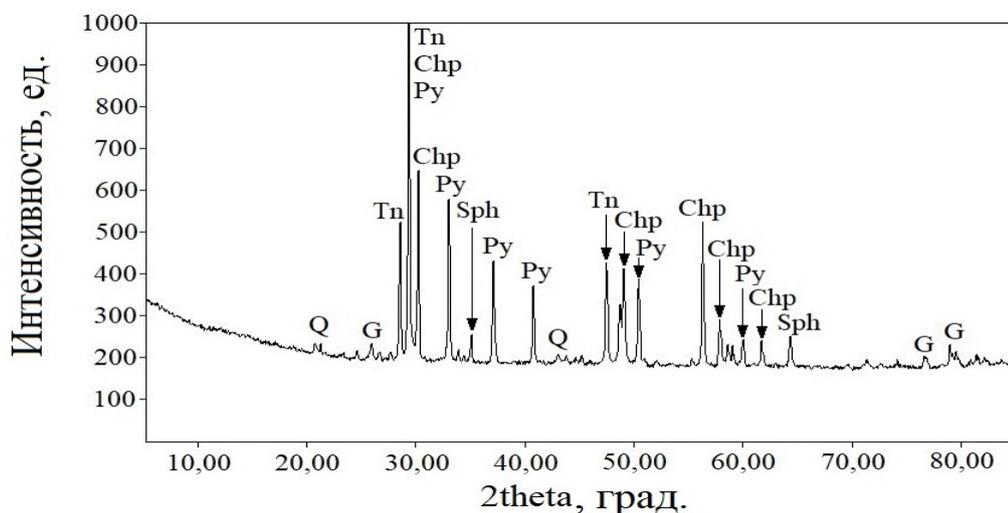


Рисунок 1 – Рентгенограмма Учалинского концентрата; Tn-теннантит, Chp-халькопирит, Py-пирит, Sph -сфалерит, G- галенит, Q – кварц

Посредством построения диаграмм Пурбэ определены параметры ведения процесса азотнокислотного выщелачивания медно-мышьяковистого концентрата. Показано (рис. 2), что для полного растворения основных сульфидов изучаемого сырья (соответственно, вскрытия золота из сульфидной матрицы минералов) и получения необходимых конечных продуктов рассматриваемого процесса ( $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  и  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ) необходимо придерживаться пределов значений pH менее 1 и окислительно-восстановительного потенциала  $> 0,8$  В.

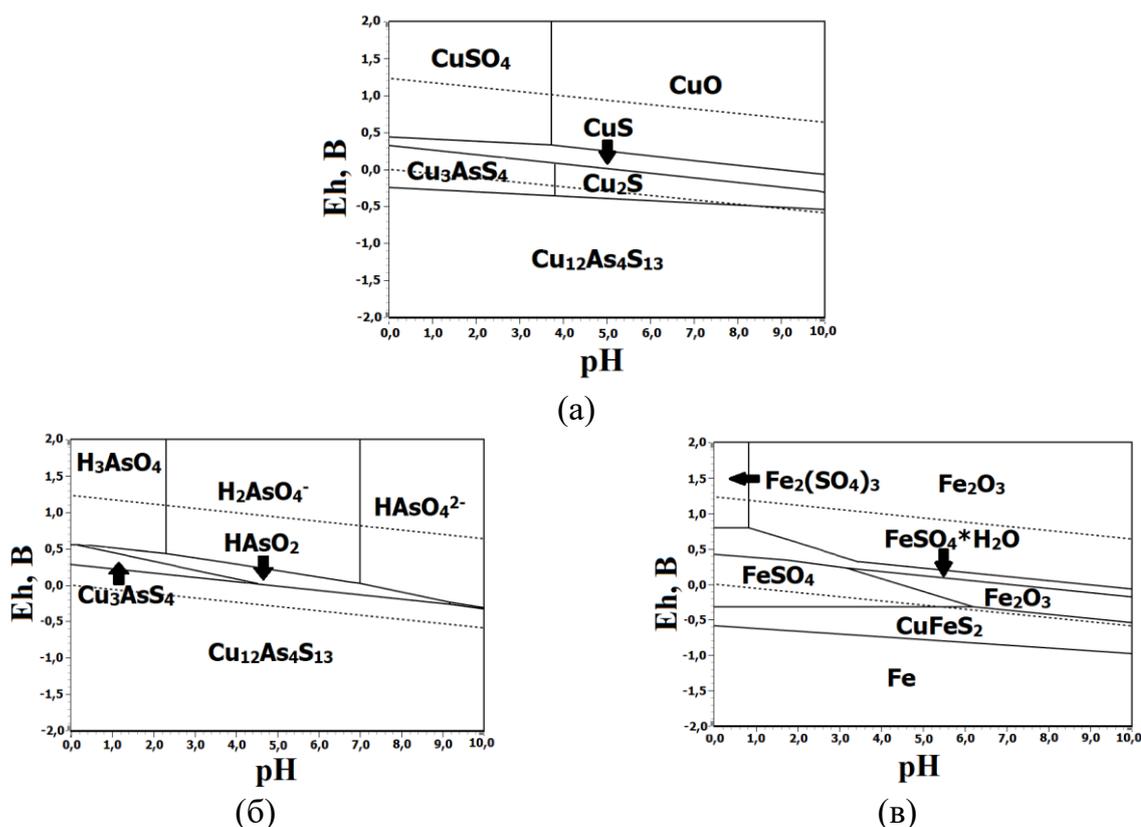


Рисунок 2 – Eh-pH диаграммы для систем S – Cu – As – H<sub>2</sub>O (а); S – As – Cu – H<sub>2</sub>O (б); S – Fe – Cu – H<sub>2</sub>O (в) при 95 °С

С помощью графиков равновесного распределения установлена возможность снижения необходимого количества азотной кислоты для полного растворения основных сульфидов изучаемого сырья при введении в систему ионов Fe (III). Определена последовательность растворения сульфидных минералов в различных окислительных средах – первыми растворяются галенит, пирит и сфалерит, при достижении большего количества кислоты растворяется теннантит, халькопирит растворяется в последнюю очередь, исходя из данных, полученных при термодинамическом моделировании (рис. 3).

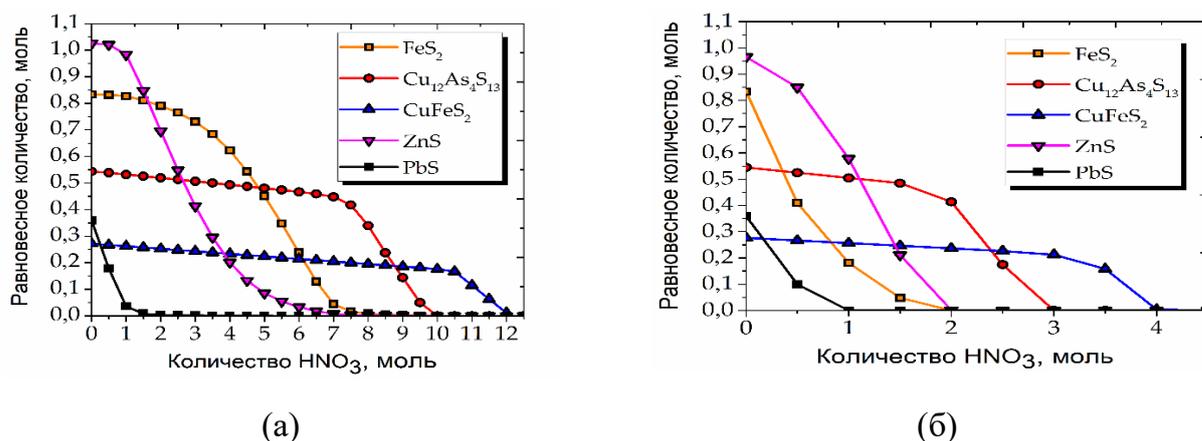


Рисунок 3 – Диаграммы равновесного распределения основных сульфидов медно-мышьяковистого концентрата в азотной кислоте (а); в азотной кислоте с добавлением ионов Fe (III) (б)

**В третьей главе** приведены результаты определения рекомендуемых параметров ведения азотнокислотного выщелачивания медно-мышьяковистого концентрата Учалинского месторождения.

С помощью ПО StatGraphics установлено, что для максимального растворения основных сульфидных минералов изучаемого сырья (более 90 %) в азотнокислых растворах необходимо придерживаться следующих параметров: продолжительность процесса 60 минут, соотношение Ж:Т = 6:1, концентрация азотной кислоты 12 моль/дм<sup>3</sup>.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для вскрытия данного вида сложного упорного сырья необходимо поддержание очень высокой концентрации азотной кислоты – не менее 12 моль/дм<sup>3</sup>, иначе при меньшей кислотности в системе не удастся достичь высоких показателей извлечения основных компонентов медно-мышьяковистого сырья в раствор.

Поскольку технологически крайне сложно и нерентабельно регенерировать азотную кислоту такой концентрации из образующихся нитрозных газов, было решено рассмотреть возможность введения в систему дополнительных добавок для снижения требуемой концентрации азотной кислоты, при этом сохранив высокие показатели степени растворения основных сульфидов (не менее 90 %). В качестве таких добавок использовали FeS<sub>2</sub> и Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.

Для определения эффективности добавления пирита и ионов Fe(III) на показатели азотнокислотного выщелачивания медно-мышьяковитого концентрата была проведена серия опытов со следующими параметрами: концентрация азотной кислоты 6 моль/дм<sup>3</sup>, продолжительность 60 минут, температура 80 °С, концентрация ионов Fe(III) 5 г/дм<sup>3</sup>, пирит добавляли в массовом соотношении 1:1 к общей массе сульфидных минералов цветных металлов изучаемого концентрата (рис. 4).

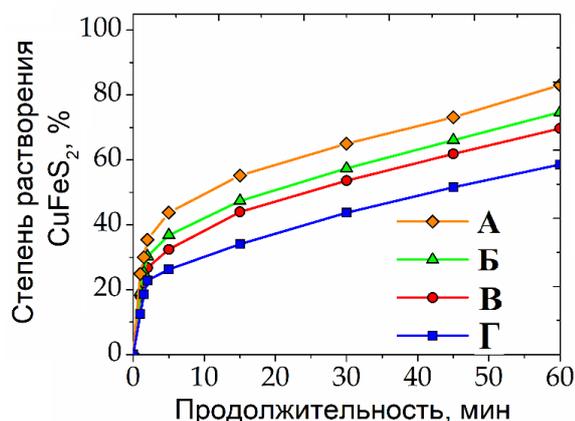


Рисунок 4 – Зависимость степени растворения халькопирита от продолжительности в растворе азотной кислоты с добавлением ионов Fe (III) и FeS<sub>2</sub> (А); с добавлением ионов Fe (III) (Б); с добавлением FeS<sub>2</sub> (В); без добавок (Г)

Как показано на рисунке 4, в эксперименте с одновременным введением пирита и ионов железа (III) степень растворения халькопирита за 60 минут увеличивается на 24,5 %, по сравнению с экспериментом без добавок, что говорит об их положительном влиянии на процесс выщелачивания. Также заметно, что одновременное добавление Fe (III) и FeS<sub>2</sub> оказывает на процесс наибольший положительный эффект.

С помощью ПО StatGraphics была построена ортогональная матрица второго порядка с пятью изменяемыми параметрами: температура 65-95 °С, концентрация азотной кислоты 3-8 моль/дм<sup>3</sup>, концентрация ионов Fe(III) 5-20 г/дм<sup>3</sup>, массовое отношение FeS<sub>2</sub> (0.5-2:1) к массе сульфидных минералов цветных металлов медно-мышьяковитого концентрата, продолжительность 15-60 мин. Опыты по установлению степени влияния данных параметров на растворение минералов теннантита, халькопирита и сфалерита проводили при постоянном значении Ж:Т=6:1, установленном в первой серии экспериментов. Полученные результаты представлены в виде поверхностей отклика (рис. 5). Выведены уравнения регрессии (1-3), получены значения коэффициентов множественной корреляции R<sup>2</sup>.

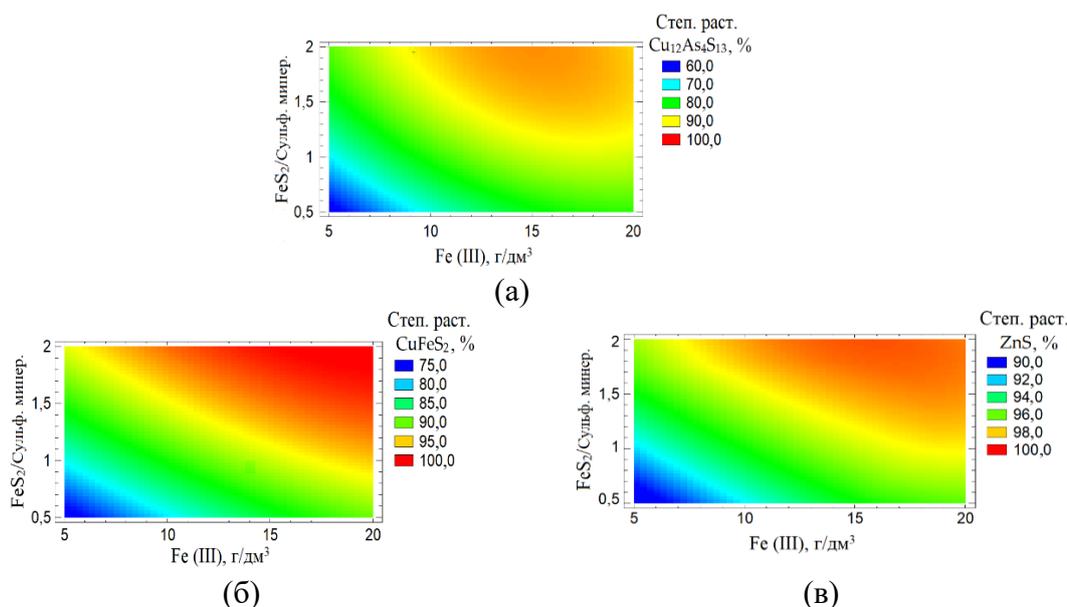


Рисунок 5 – Диаграммы зависимости степени растворения теннантита (а); халькопирита (б) и сфалерита (в) от концентрации ионов Fe (III) и количества пирита

$$\begin{aligned}
 \text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13} = & -76,52 - 1,4 \cdot T + 8,43 \cdot C_{\text{HNO}_3} + 7,57 \cdot C_{\text{Fe(III)}} + 46,72 \cdot N_{\text{FeS}_2} + n_{1,9} \cdot t + \\
 & + 0,02 \cdot T^2 - 0,02 \cdot T \cdot C_{\text{Fe(III)}} - 0,06 \cdot T \cdot N_{\text{FeS}_2} - 0,14 \cdot C_{\text{HNO}_3} \cdot C_{\text{Fe(III)}} - 0,05 \cdot C_{\text{HNO}_3} \cdot N_{\text{FeS}_2} - \\
 & - 0,013 \cdot C_{\text{HNO}_3} \cdot t - 0,1 \cdot C_{\text{Fe(III)}}^2 - 0,7 \cdot C_{\text{Fe(III)}} \cdot N_{\text{FeS}_2} + 6,49 \cdot N_{\text{FeS}_2}^2 - 0,08 \cdot N_{\text{FeS}_2} \cdot t \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CuFeS}_2 = & -161,17 + 0,26 \cdot T + 18,56 \cdot C_{\text{HNO}_3} + 5,1 \cdot C_{\text{Fe(III)}} + 51,81 \cdot N_{\text{FeS}_2} + \\
 & + 2,41 \cdot t + 0,05 \cdot T \cdot C_{\text{HNO}_3} - 0,02 \cdot T \cdot C_{\text{Fe(III)}} - 0,19 \cdot T \cdot N_{\text{FeS}_2} - 0,39 \cdot C_{\text{HNO}_3}^2 - 0,13 \cdot \\
 & \cdot C_{\text{HNO}_3} \cdot C_{\text{Fe(III)}} - 1,84 \cdot C_{\text{HNO}_3} \cdot N_{\text{FeS}_2} - 0,012 \cdot C_{\text{HNO}_3} \cdot t - 0,04 \cdot C_{\text{Fe(III)}}^2 - 0,41 \cdot C_{\text{Fe(III)}} \cdot N_{\text{FeS}_2} - \\
 & - 0,01 \cdot C_{\text{Fe(III)}} \cdot t - 3,18 \cdot N_{\text{FeS}_2}^2 - 0,04 \cdot N_{\text{FeS}_2} \cdot t - 0,01 \cdot t^2 \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ZnS} = & -290,23 + 3,56 \cdot T + 25,76 \cdot C_{\text{HNO}_3} + 2,08 \cdot C_{\text{Fe(III)}} + 29,78 \cdot N_{\text{FeS}_2} + 3,66 \cdot t - \\
 & - 0,01 \cdot T^2 - 0,08 \cdot T \cdot C_{\text{HNO}_3} - 0,18 \cdot T \cdot N_{\text{FeS}_2} - 0,01 \cdot T \cdot t - 0,82 \cdot C_{\text{HNO}_3}^2 - 0,07 \cdot C_{\text{HNO}_3} \cdot C_{\text{Fe(III)}} - \\
 & - 1,09 \cdot C_{\text{HNO}_3} \cdot N_{\text{FeS}_2} - 0,06 \cdot C_{\text{HNO}_3} \cdot t + 0,02 \cdot C_{\text{Fe(III)}}^2 - 0,62 \cdot C_{\text{Fe(III)}} \cdot N_{\text{FeS}_2} - 0,01 \cdot C_{\text{Fe(III)}} \cdot t + \\
 & + 5,19 \cdot N_{\text{FeS}_2}^2 - 0,17 \cdot N_{\text{FeS}_2} \cdot t - 0,01 \cdot t^2 \quad (3)
 \end{aligned}$$

где: T – температура, C<sub>HNO<sub>3</sub></sub> – концентрация кислоты, C<sub>Fe(III)</sub> – концентрация ионов Fe (III), N<sub>FeS<sub>2</sub></sub> – количество пирита, t – продолжительность.

Установлено, что наиболее значимыми параметрами для изучаемого процесса являются концентрация азотной кислоты, концентрация ионов Fe (III) и количество пирита. Рекомендованы параметры ведения процесса: концентрация азотной кислоты 6 моль/дм<sup>3</sup>, продолжительность 60 мин, температура 80 °С, концентрация ионов Fe (III) 16,5 моль/дм<sup>3</sup> и массовое соотношение FeS<sub>2</sub> к сульфидным минералам цветных металлов 1,2:1. При этих значениях достигается степень растворения основных сульфидных минералов более 90 %. При этом удалось снизить требуемую концентрацию азотной кислоты с 12 до 6 моль/дм<sup>3</sup> за счет введения соответствующих добавок.

В четвертой главе приведены результаты исследования кинетики азотнокислотного растворения смеси природных минералов теннантита, халькопирита и сфалерита.

При проведении кинетических исследований оценивали влияние температуры, концентрации азотной кислоты, количества пирита и концентрации ионов железа (III) на эффективность вскрытия минералов (рис. 6). Увеличение параметров в изучаемых интервалах положительно сказывается на степени растворения теннантита, халькопирита и сфалерита, в частности, увеличение температуры процесса до 95 °С позволяет повысить степень растворения халькопирита с 45 % до 75 %.

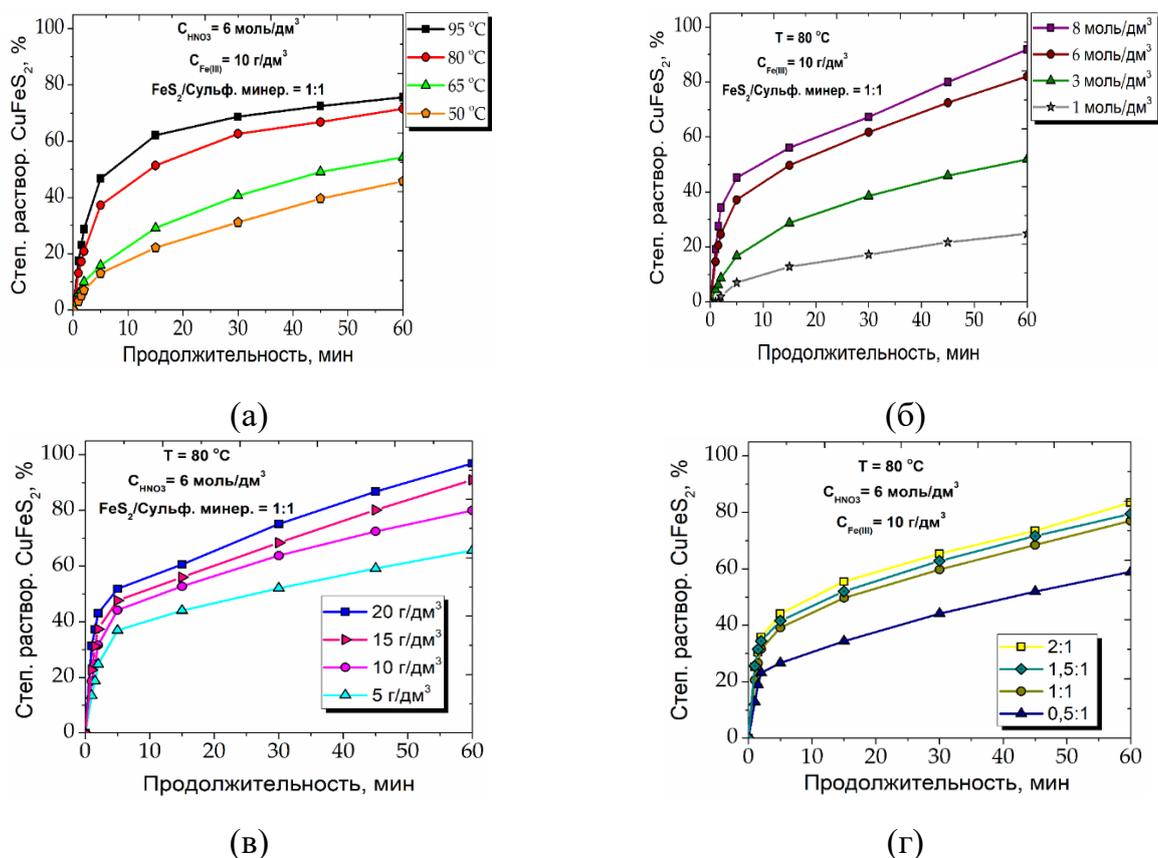


Рисунок 6 – Зависимости степени растворения халькопирита от температуры (а); концентрации азотной кислоты (б); концентрации ионов Fe (III) (в); количества FeS<sub>2</sub> (г)

Для описания кинетики исследуемых гетерогенных реакций использовали модель сжимающегося ядра (МСЯ), предполагающую, что скорость процесса контролируется либо диффузией реагента к поверхности через диффузионный слой (жидкую пленку), либо диффузией через слой продукта, либо поверхностной химической реакцией. По результатам расчетов установлено, что уравнение, описывающее диффузию через слой продукта  $(1-3(1-X)^{2/3} + 2(1-X)=kt)$ , имеет наивысшее значение  $R^2$ . Графическим методом были определены кажущиеся

энергии активации: для теннантита – 28,8 кДж/моль, халькопирита – 33,7 кДж/моль (рис. 7), сфалерита – 53,7 кДж/моль.

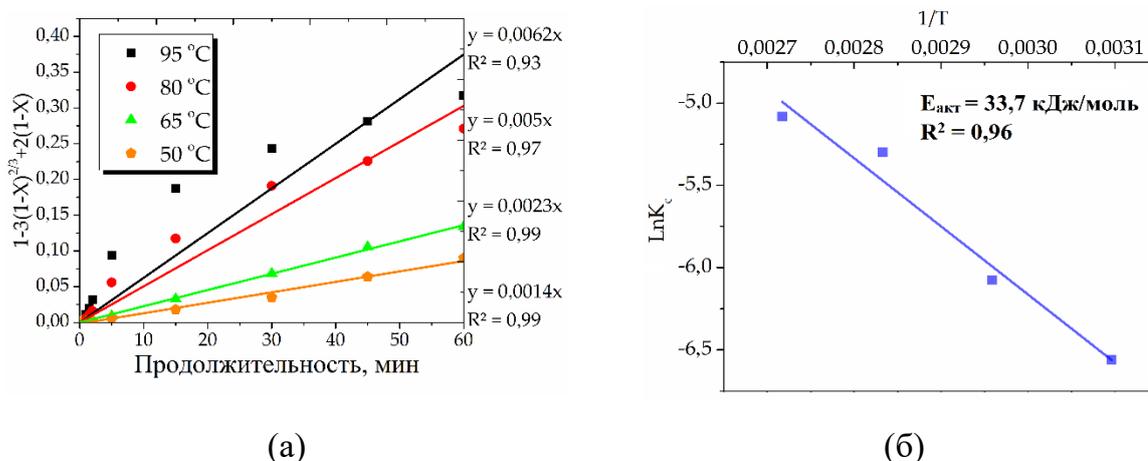


Рисунок 7 – Расчёт углового коэффициента  $k_c$  для халькопирита (а); зависимость  $\ln k_c$  от обратной температуры для халькопирита(б)

Графическим способом рассчитаны эмпирические порядки по концентрации азотной кислоты, концентрации ионов Fe (III) и количеству пирита. В соответствии с приведенными данными видно, что концентрация азотной кислоты оказывает наибольший эффект на степень вскрытия сульфидных минералов (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты расчётов эмпирических порядков по концентрации  $\text{HNO}_3$ , концентрации ионов Fe(III) и количеству  $\text{FeS}_2$  для теннантита, халькопирита и сфалерита

Концентрация $\text{HNO}_3$			
Минерал	$\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$	$\text{CuFeS}_2$	$\text{ZnS}$
Эмпирический порядок	1,2	1,4	1,6
Концентрация ионов Fe (III)			
Эмпирический порядок	0,34	0,82	0,62
Количество $\text{FeS}_2$			
Эмпирический порядок	0,47	0,69	0,59

Согласно полученным результатам, были выведены обобщенные кинетические уравнения для азотнокислотного растворения теннантита, халькопирита и сфалерита:

Для  $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ :

$$1-3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) = 38820 C_{\text{HNO}_3}^{1,2} C_{\text{Fe(III)}}^{0,34} C_{\text{FeS}_2}^{0,47} e^{-28858/RT} \quad (4)$$

Для  $\text{CuFeS}_2$ :

$$1-3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) = 74070 C_{\text{HNO}_3}^{1,42} C_{\text{Fe(III)}}^{0,82} C_{\text{FeS}_2}^{0,7} e^{-33708/RT_t} \quad (5)$$

Для  $\text{ZnS}$ :

$$1-3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) = 4,2 C_{\text{HNO}_3}^{1,52} C_{\text{Fe(III)}}^{0,63} C_{\text{FeS}_2}^{0,59} e^{-53723/RT_t} \quad (6)$$

Исходя из полученных значений энергии активации для теннантита 28,8 кДж/моль, халькопирита 33,7 кДж/моль, сфалерита 53,7 кДж/моль, высоких значений эмпирических порядков по реагенту окислителю  $\text{HNO}_3$  (1,2 – 1,6), можно сделать вывод, что процесс растворения медных сульфидных минералов, в исследуемых условиях, лимитируется внутренней диффузией. Процесс растворения сфалерита протекает в кинетическом режиме.

Для оценки вероятности смены режима использовали метод кинетической функции, который позволяет рассчитать кажущуюся энергию активации для разных стадий процесса выщелачивания (рисунок 8).

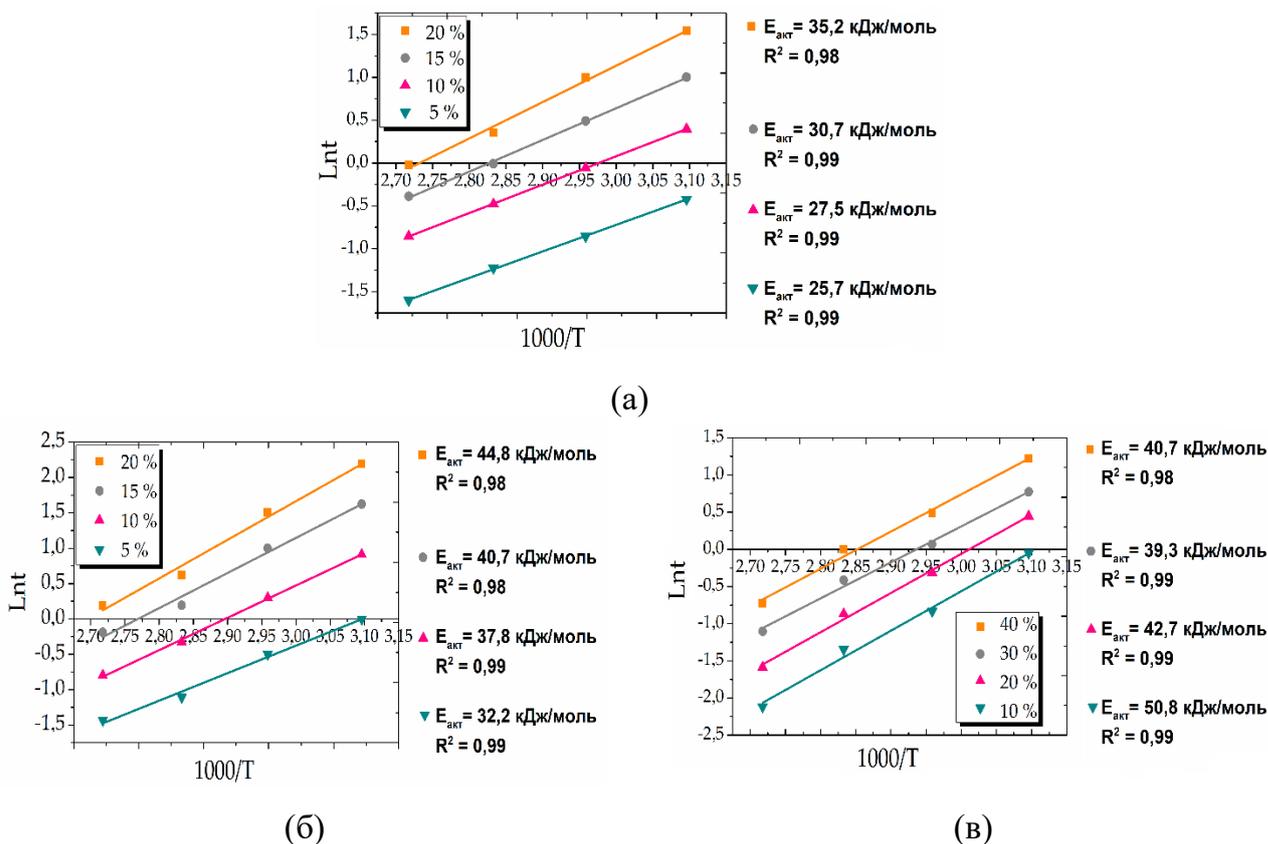


Рисунок 8 – Графики зависимости  $\text{Lnt}$  от  $1000/T$  для разных степеней растворения  $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$  (а),  $\text{CuFeS}_2$  (б);  $\text{ZnS}$  (в)

Рассчитанные графическим методом значения энергии активации для теннантита изменяются – с 25,7 до 35,2 кДж/моль, для халькопирита – с 32,2 до 44,8 кДж/моль, для сфалерита – с 39,3 до 50,8 кДж/моль. Полученные значения схожи со значениями кажущейся энергии активации, полученными по МСЯ, для всех минералов, что подтверждает отсутствие смены режима протекания процесса.

Для объяснения механизма растворения медных минералов проведены микроскопические исследования и энергодисперсионный анализ получаемых остатков выщелачивания.

Показано, что при выщелачивании азотной кислотой концентрацией 6 моль/дм<sup>3</sup>, продолжительности эксперимента 60 мин, температуре 80 °С, концентрации ионов Fe (III) 15 г/дм<sup>3</sup> содержание элементной серы в кеке составило 79 %, окисление сульфидной серы в смеси минералов до элементной достигло 56 %, степень растворения теннантита составила 59 %, халькопирита 60 % и сфалерита 84 %. Кек выщелачивания практически полностью состоит из элементной серы с небольшим количеством непрореагировавших частиц халькопирита (рис. 9). Зеленые зоны соответствуют распределению серы, красная и синяя зона – железу и меди, соответственно.

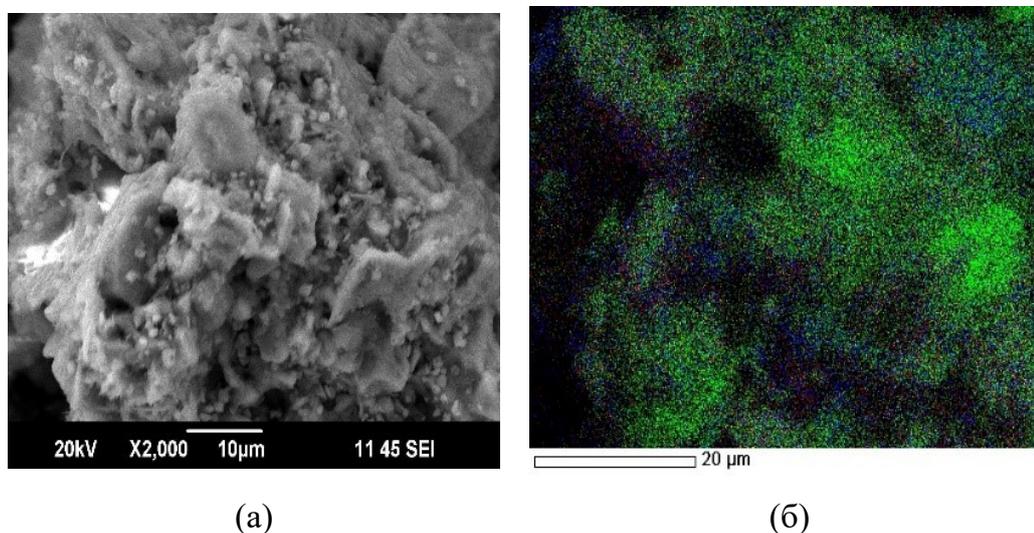


Рисунок 9 – Микрофотография кека азотнокислотного выщелачивания (а) и совместное энергодисперсионное картирование для железа, меди и серы (б) при выщелачивании азотной кислотой концентрацией 6 моль/дм<sup>3</sup>, продолжительности эксперимента 60 мин, температуре 80 °С, концентрации ионов Fe (III) 15 г/дм<sup>3</sup>

Добавление пирита в массовом отношении к смеси сульфидных минералов 1:1 при тех же условиях выщелачивания позволило достичь степени растворения теннантита – 93 %, халькопирита – 94 %, сфалерита –99 %. При данных условиях степень окисления сульфидной серы до элементной достигла 23 %, при этом в кеке ее содержалось 14 %. Кек выщелачивания представлен двумя видами частиц, образующих конгломераты: первые непрореагировавшие частицы халькопирита, покрытые элементной серой, вторые – частицы пирита, имеющие правильную геометрическую форму с гладкой поверхностью (рис. 10), где зеленым цветом показано распределение серы, а красным и синим – распределение железа и меди, соответственно.

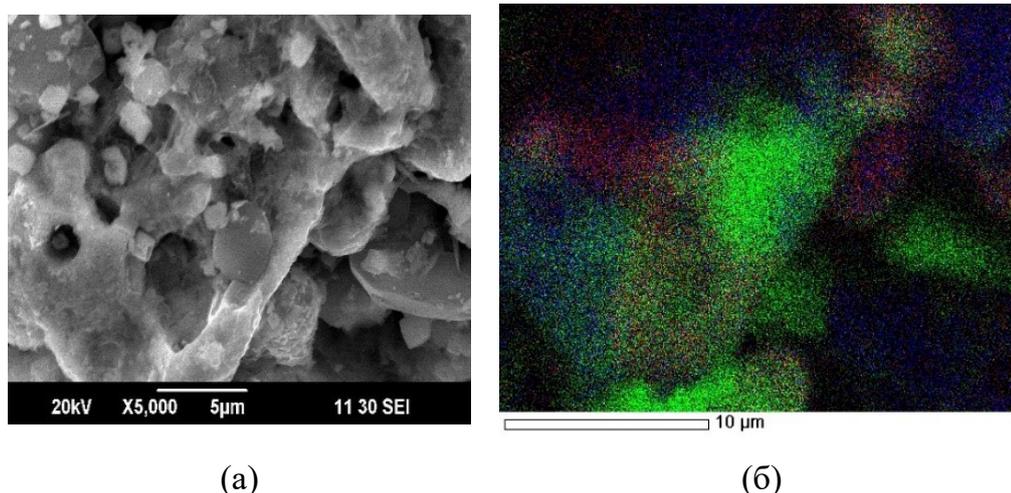


Рисунок 10 – Микрофотография кека азотнокислотного выщелачивания (а) и совместное энергодисперсионное картирование для железа, меди и серы (б) при выщелачивании азотной кислотой концентрацией 6 моль/дм<sup>3</sup>, продолжительности эксперимента 60 мин, температуре 80 °С, концентрации ионов Fe (III) 15 г/дм<sup>3</sup>, количестве FeS<sub>2</sub> в массовом соотношении к смеси сульфидных минералов 1:1

Исходя из полученных результатов микроскопических исследований и энергодисперсионного анализа, а также проведенных кинетических исследований сделан вывод о том, что при азотнокислотном выщелачивании поверхность медных минералов пассивируется плёнкой элементной серы, тем самым ограничивается доступ азотной кислоты к зоне реакции. В свою очередь пирит выступает в качестве альтернативной каталитической поверхности для медных минералов. За счёт образования между минералами электрохимической связи удаётся снизить влияние пассивирующего слоя элементной серы (рис. 11).

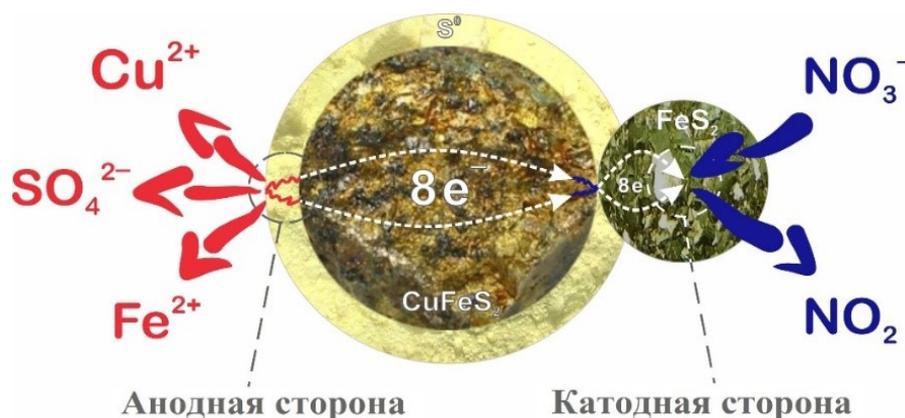
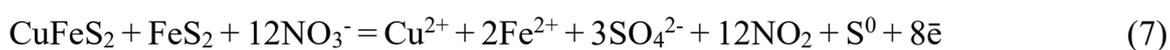


Рисунок 11 – Схема электрохимического азотнокислотного выщелачивания халькопирита и пирита в гальванической связи

Электрохимическое взаимодействие халькопирита и пирита в гальванической связи описывается следующей общей реакцией:



В пятой главе предложена принципиальная технологическая схема совместной переработки медно-мышьяковистого и пиритного концентратов (рис. 12), головной операцией которой является азотнокислотное выщелачивание, позволяющее вскрыть сульфидную матрицу присутствующих минералов и перевести основные компоненты (Fe, Cu, Zn, As) в раствор, при этом высвободив золото и серебро.

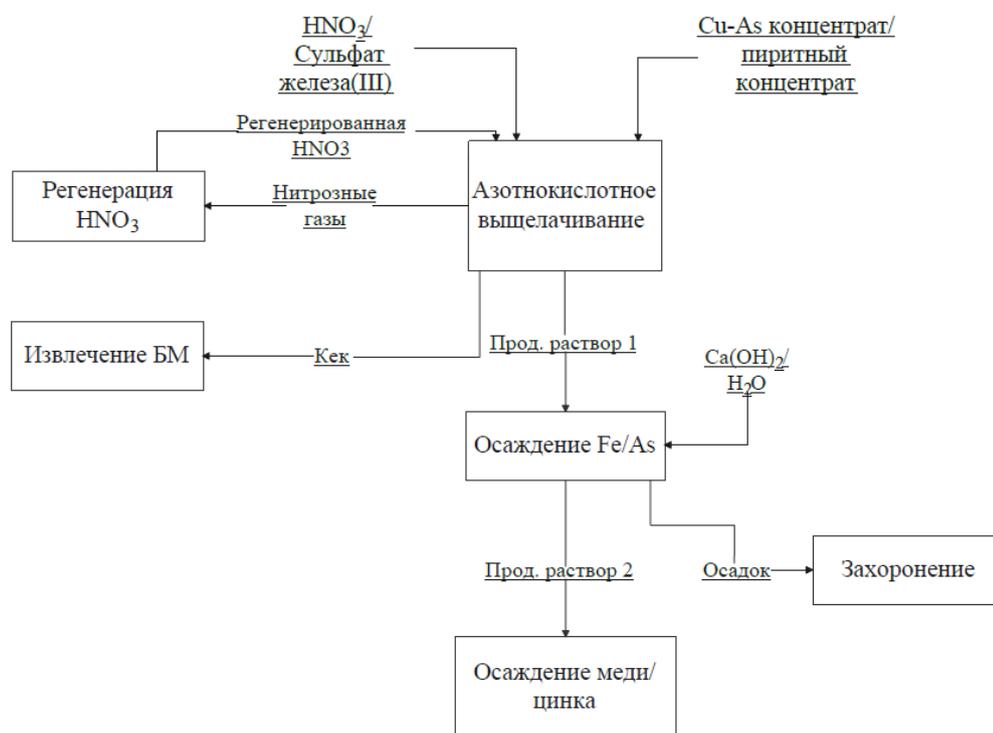


Рисунок 12 – Принципиальная технологическая схема совместной переработки медно-мышьяковистого и пиритного концентратов

Помимо азотнокислотного выщелачивания основными операциями технологии являются:

- улавливание образующихся нитрозных газов с последующей регенерацией азотной кислоты и возвратом ее в голову технологии;
- осаждение железа и мышьяка из продуктивного раствора в виде нерастворимого осадка арсената железа;
- переработка кеков выщелачивания, содержащих благородные металлы цианированием;
- осаждение меди и цинка в виде соответствующих сульфидов.

В главе приведены результаты исследования осаждения мышьяка и железа путем контролируемой нейтрализации известью из продуктивного раствора азотнокислотного выщелачивания. Исследования проводили при температуре 90 °С, варьируя значением рН раствора от 0,8 до 2,7 (рис. 13). При достижении рН 2,7 удалось достичь степени осаждения мышьяка и железа из раствора на 99,9 % в виде

арсената железа и ферригидрита, при этом степень соосаждения меди и цинка в осадок составила 5,23 % и 1,2 % соответственно.

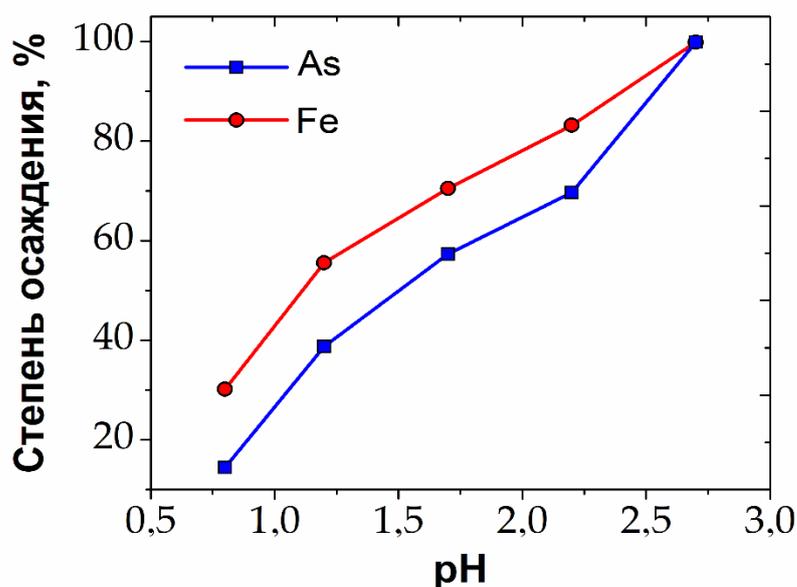


Рисунок 13 – Зависимость степени осаждения As и Fe от pH

Также представлены результаты материального баланса переработки медно-мышьяковистого концентрата Учалинского месторождения и дана оценка экономической эффективности переработки 50 тыс. т исследуемого концентрата в год.

Показано, что себестоимость переработки 50 тыс. тонн медно-мышьяковистого концентрата составляет 8306 млн. руб./год. Дисконтированный срок окупаемости составляет 9 лет.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По мере истощения запасов богатых полезных ископаемых медные руды становятся более сложными за счёт наличия в них большого количества различных примесей. Присутствие мышьяка во многих медных месторождениях Урала ограничивает их переработку по традиционным технологиям; наличие мышьяка в технологических потоках вызывает все большие затруднения на предприятиях медной промышленности. Усилия производителей направлены на разработку новых технологических процессов для переработки медно-мышьяковистых концентратов, но их использование сильно ограничено из-за высокого содержания в них мышьяка и экологических проблем, связанных с выбросами и образующимися стоками.

Весьма перспективным для переработки подобного сырья является способ азотнокислотного выщелачивания. Благодаря высокой интенсивности процесса за счет протекания экзотермических реакций окисления сульфидных минералов, что сопровождается высоким тепловым эффектом, удастся с высокой скоростью перевести основные компоненты в раствор. Дальнейшая переработка получаемых растворов позволяет селективно извлекать цветные металлы в товарную продукцию,

мышьяк переводить в стабильную и экологически безопасную форму, извлекать благородные металлы из кеков выщелачивания по традиционным технологиям.

2. Возможность растворения минералов, присутствующих в медно-мышьяковистом сульфидном концентрате, в растворах азотной кислоты и  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  подтверждается следующими результатами термодинамических исследований:

- расчёты изменения свободной энергии Гиббса и логарифмов констант равновесия показали теоретическую возможность протекания реакций основных соединений исследуемого концентрата с  $\text{HNO}_3$  и  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  в температурном диапазоне 65–95 °С;

- анализ диаграмм Пурбэ для изучаемых гетерогенных систем позволил установить, что для полного растворения основных сульфидов изучаемого сырья (соответственно, вскрытия золота из сульфидной матрицы минералов) и получения необходимых конечных продуктов рассматриваемого процесса ( $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  и  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ) необходимо придерживаться значений pH менее 1 и  $E_h > 0,8$  В;

- построенные диаграммы равновесного распределения основных компонентов в изученных системах позволили установить возможность снижения необходимого количества азотной кислоты для полного растворения основных сульфидов изучаемого сырья при введении в систему ионов Fe (III). Определена последовательность растворения сульфидных минералов – первыми растворяются галенит и сфалерит, затем пирит и теннантит, халькопирит растворяется в последнюю очередь.

3. С помощью центрального композиционного плана с пятью изменяемыми параметрами установлены условия ведения процесса азотнокислотного выщелачивания Cu-As сырья с добавлением ионов Fe (III) и  $\text{FeS}_2$ : концентрация азотной кислоты 6 моль/дм<sup>3</sup>, продолжительность процесса 60 мин, температура 80 °С, концентрация ионов Fe (III) 16,5 моль/дм<sup>3</sup> и массовое соотношение  $\text{FeS}_2$  к сульфидным минералам 1,2:1. При данных условиях достигается степень растворения основных сульфидных минералов более 90 %. При этом введение ионов Fe (III) и  $\text{FeS}_2$  позволяет снизить требуемую начальную концентрацию  $\text{HNO}_3$  с 12 до 6 моль/дм<sup>3</sup>.

4. Наиболее значимыми факторами разработанного процесса выщелачивания Cu-As концентрата являются: концентрация азотной кислоты, концентрация ионов Fe (III) и количество  $\text{FeS}_2$ . Установлено, что совокупность введения в процесс ионов Fe (III) и  $\text{FeS}_2$  оказывает наибольший эффект на эффективность вскрытия сырья. Коэффициенты множественной корреляции  $R^2$  для полученных регрессионных уравнений равны соответственно: 0,93 для теннантита, 0,93 для халькопирита и 0,95 для сфалерита, что говорит об адекватности выбранной модели, что также подтверждено рассчитанными значениями критерия Фишера.

5. Рассчитаны значения кажущейся энергии активации по модели сжимающегося ядра: для теннантита - 28,8 кДж/моль, халькопирита - 33,7 кДж/моль,

сфалерита - 53,7 кДж/моль; эмпирические порядки для теннантита, халькопирита и сфалерита:

- по концентрации азотной кислоты составили 1,2; 1,4; 1,6 соответственно;
- по концентрации ионов железа (III) – 0,34; 0,82; 0,62 соответственно;
- по пириту – 0,47; 0,69; 0,59 соответственно.

Установлено, что в изучаемых условиях ведения процесса растворение медных сульфидных минералов лимитируется внутридиффузионными ограничениями, что связано с возникающими пассивационными явлениями вследствие образования пленок элементарной серы на их поверхности. Выведены полуэмпирические уравнения для описания кинетики выщелачивания теннантита, халькопирита и сфалерита в исследуемых условиях:

$$\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}: 1-3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) = 38820C_{\text{HNO}_3}^{1,2}C_{\text{Fe(III)}}^{0,34}C_{\text{FeS}_2}^{0,47}e^{-28858/RT}t$$

$$\text{CuFeS}_2: 1-3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) = 74070C_{\text{HNO}_3}^{1,42}C_{\text{Fe(III)}}^{0,82}C_{\text{FeS}_2}^{0,7}e^{-33708/RT}t$$

$$\text{ZnS}: 1-3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) = 4,2C_{\text{HNO}_3}^{1,52}C_{\text{Fe(III)}}^{0,63}C_{\text{FeS}_2}^{0,59}e^{-53723/RT}t.$$

6. С использованием метода кинетической функции показано, что в ходе азотнокислотного растворения сульфидных минералов режим процесса не меняется: значения энергии активации для теннантита изменялись с 25,7 до 35,2 кДж/моль, для халькопирита – с 32,2 до 44,8 кДж/моль, для сфалерита – с 39,3 до 50,8 кДж/моль, что сопоставимо со значениями, полученными по МСЯ.

7. Доказано, что при азотнокислотном выщелачивании смеси сульфидных минералов пирит может выступать в качестве альтернативной каталитической поверхности для халькопирита и теннантита. За счёт образования между минералами гальванической связи удаётся снизить влияние пассивирующего слоя элементарной серы.

8. Проведены укрупненные лабораторные испытания и разработана принципиальная технологическая схема совместной переработки сульфидного медно-мышьяковистого концентрата Учалинского месторождения и пиритного концентрата. Проведена оценка технико-экономической эффективности предложенной технологии: срок окупаемости составил 9 лет при переработке 50 тыс. тонн Учалинского концентрата в год.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы исследования**

Усовершенствование технологии с точки зрения ее универсальности на предмет возможности вовлечения в переработку других видов упорного сульфидного сырья цветных металлов. Планируется изучить кинетические закономерностей азотнокислотного растворения других природных сульфидных минералов месторождений Уральского региона, их взаимное влияние друг на друга при совместном растворении.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определённых ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:**

1. Rogozhnikov, D.A. Research of Polymetallic Sulfide Industrial Waste Nitric Acid Treatment / D.A. Rogozhnikov, A.A. Shoppert, **O.A. Dizer** // *KnE Materials Science*. – 2017. – P. 174-181; 0,4 п.л./0,1 п.л. (Web of Science).

2. Рогожников, Д.А. Азотнокислотное вскрытие упорных сульфидных концентратов, содержащих благородные металлы / Д.А. Рогожников, Р.Э. Русалев, **O.A. Дизер**, С.С. Набойченко // *Цветные металлы*. – 2018. – № 12. – С. 38-43; 0,4 п.л./0,1 п.л.

*Rogozhnikov, D.A. Nitric acid loosening of rebellious sulphide concentrates containing precious metals / D.A. Rogozhnikov, R.E. Rusalev, O.A. Dizer, S.S. Naboichenko // Tsvetnye Metally. – 2018. – Vol. 16. – P. 38-44; 0,4 н.л./0,1 н.л. (Scopus).*

3. Rogozhnikov, D.A. Leaching kinetics of sulfides from refractory gold concentrates by nitric acid / D.A. Rogozhnikov, A.A. Shoppert, **O.A. Dizer**, K.A. Karimov, R.E. Rusalev // *Metals*. – 2019. – Vol. 9(4). – P. 465; 1 п.л./0,2 п.л. (Web of Science, Scopus).

4. **Dizer, O.A.** Hydrochemical investigation of dissolving sulfide gold-bearing raw material of uderey deposit / **O.A. Dizer**, D.A. Rogozhnikov, S.S. Naboichenko // *Materials Science Forum*. – 2019. – Vol. 946 MSF. – P. 535-540; 0,3 п.л./0,1 п.л. (Scopus).

5. Рогожников, Д.А. Азотнокислотное выщелачивание акжалского сульфидного мышьяковистого медьсодержащего концентрата / Д.А. Рогожников, С.В. Захарьян, **O.A. Дизер**, К.А. Каримов // *Цветные металлы*. – 2020. – № 8. – С. 11-17; 0,4 п.л./0,1 п.л.

*Rogozhnikov, D.A. Nitric acid leaching of the copper-bearing arsenic sulphide concentrate of Akzhal / D.A. Rogozhnikov, O.A. Dizer, S.V. Zakhar'yan, K.A. Karimov // Tsvetnye Metally. – 2020. – Vol. 8. – P. 11-17; 0,4 н.л./0,1 н.л. (Scopus).*

6. Рогожников, Д.А. Термодинамические закономерности гидрохимического окисления сульфидных минералов цветных металлов в азотнокислых средах / Д.А. Рогожников, **O.A. Дизер**, П.С. Потапов, С.В. Мамяченков // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2020. – Т. 24. – № 2. – С. 460-474; 0,8 п.л./0,2 п.л.

7. Rogozhnikov, D. Kinetics and mechanism of arsenopyrite leaching in nitric acid solutions in the presence of pyrite and Fe(III) ions / D. Rogozhnikov, K. Karimov, A. Shoppert, **O. Dizer**, S. Naboichenko // *Hydrometallurgy*. – 2021. – Vol. 199. – P. 105525; 1 п.л./0,2 п.л. (Scopus/Web of Science).

8. **Dizer, O.A.** Thermodynamics of Copper Arsenious Raw Materials Dissolution in Nitric Acid / **O.A. Dizer**, D.A. Rogozhnikov, S.S. Naboichenko // *Solid State Phenomena*. – 2021. – Vol. 316 SSP. – P. 678-683; 0,3 п.л./0,1 п.л. (Scopus).

9. Karimov, K.A. Deposition of arsenic from nitric acid leaching solutions of gold-arsenic sulphide concentrates / Kirill A. Karimov, Denis A. Rogozhnikov, Evgeniy A.

Kuzas, **Oleg A. Dizer**, Dmitriy I. Golovkin, Maksim A. Tretiak // Metals. - 2021. – Vol. 11(6). – P. 889; 1,2 п.л./0,2 п.л. (Scopus/Web of Science).

10. **Dizer, Oleg A.** Nitric Acid Dissolution of Tennantite, Chalcopyrite and Sphalerite in the Presence of Fe (III) Ions and FeS<sub>2</sub> / **Oleg A. Dizer**, Denis A. Rogozhnikov, Kirill A. Karimov, Evgeniy A. Kuzas, Alexey Yu. Suntsov // Materials. – 2022. – Vol. 15(4). – P. 1545; 1 п.л./0,2 п.л. (Scopus/Web of Science).

11. **Dizer, O.A.** Nitric acid leaching modeling of copper-arsenic sulfide raw material / **O.A. Dizer**, D.A. Rogozhnikov, A.A. Babintsev // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2456. – P. 020007; 0,3 п.л./0,1 п.л. (Scopus).

#### **Монографии:**

12. Рогожников, Д.А. Азотнокислотная переработка сульфидного сырья цветных металлов / Д.А. Рогожников, **О.А. Дизер**, К.А. Каримов, А.А. Шопперт, Е.А. Кузас, С.В. Захарьян; под ред. С.С. Набойченко. – Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2020. – 242 с.; 13,4 п.л./2,6 п.л.

#### **Другие публикации:**

13. Рогожников, Д.А. Исследование комплексной переработки медно-цинкового сульфидного промпродукта / Д.А. Рогожников, С.В. Мамяченков, О.С. Анисимова, **О.А. Дизер** // Материалы XXII Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XV Уральской горнопромышленной декады. – 2017. – С. 306-309; 0,2 п.л./0,05 п.л.

14. Потапов, П.С. Исследование комплексной переработки полиметаллического сульфидного сырья / П.С. Потапов, **О.А. Дизер**, Д.А. Рогожников, С.С. Набойченко // Материалы IV Международной научно - технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения С.И. Кузнецова. – 2018. – С. 155-159; 0,2 п.л./0,05 п.л.

15. Рогожников, Д.А. Исследование комплексной переработки полиметаллического сульфидного сырья / Д.А. Рогожников, Р.Э. Русалев, **О.А. Дизер**, С.С. Набойченко // Сборник тезисов докладов XII конференции «Металлургия цветных, редки и благородных металлов» в рамках X Международного конгресса "Цветные металлы и минералы - 2018". – 2018. – С. 1322-1328; 0,2 п.л./0,05 п.л.

16. Рогожников, Д.А. Исследование азотнокислотного выщелачивания золотосодержащего упорного сырья / Д.А. Рогожников, Р.Э. Русалев, **О. А. Дизер**, С.С. Набойченко // Материалы Международной научно - практической конференции "Интенсификация гидрометаллургических процессов переработки природного и техногенного сырья. Технологии и оборудование". – 2018. – С. 117-120; 0,2 п.л./0,05 п.л.

17. **Дизер, О.А.** Возможность переработки обессурьмянистых кеков Удерецкого месторождения азотнокислотным способом / **О.А. Дизер**, Р.Э. Русалев, Д.А. Рогожников, С.С. Набойченко, Ч.Т. Дзгоев, И.И. Евтушевич // Материалы XXIII Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках

XVI Уральской горнопромышленной декады. – 2018. – С. 345-348; 0,3 п.л./0,1 п.л.

18. Русалев, Р.Э. Гидрометаллургическая технология извлечения сурьмы из золото-сурьмянистых флотационных концентратов / Р.Э. Русалев, Д.А. Рогожников, С.С. Набойченко, **О.А. Дизер**, А.А. Коблик // Сборник тезисов докладов XIII конференции «Металлургия цветных, редких и благородных металлов». – 2019. – С. 900-906; 0,3 п.л./0,05 п.л.

19. Рогожников, Д.А. Исследование азотнокислотного выщелачивания упорного золотосодержащего сырья / Д.А. Рогожников, **О.А. Дизер**, К.А. Каримов, А.А. Шопперт, С.С. Набойченко // Сборник тезисов докладов XIII конференции «Металлургия цветных, редких и благородных металлов» в рамках XI Международного конгресса "Цветные металлы и минералы - 2019". – 2019. – С. 908-913; 0,3 п.л./0,01 п.л.

20. **Дизер, О.А.** Исследование азотнокислотного выщелачивания низкосортного сульфидного промпродукта / **О.А. Дизер**, Д.А. Рогожников, А.А. Шопперт, К.А. Каримов, П.С. Потапов // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований "ТЕХНОГЕН-2019". Труды конгресса с международным участием и конференции молодых ученых. – 2019. – С. 437-440; 0,2 п.л./0,05 п.л.

21. Потапов, П.С. Исследование кинетики гидрохимического вскрытия арсенопирита в растворах азотной кислоты / П.С. Потапов, Д.А. Рогожников, Е.А. Кузас, **О.А. Дизер** // Актуальные проблемы развития технических наук. Сборник статей участников XXIII Областного конкурса научно-исследовательских работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки». – 2020. – С. 27-31; 0,2 п.л./0,05 п.л.

22. Бабинцев, А.А. Азотнокислотное выщелачивание медно-мышьяковистого сырья / А.А. Бабинцев, **О.А. Дизер**, Д.А. Рогожников // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов. Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2021. – С. 15-17; 0,3 п.л./0,1 п.л.