

*На правах рукописи*



**ХОЛОВ ХОЛМАХМАД ИСРОИЛОВИЧ**

**ФИЗИКО - ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ  
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА ИЗ ХВОСТОВ ФЛОТАЦИИ  
РУД НИЖНИХ ГОРИЗОНТОВ ДЖИЖИКРУТСКОГО  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТАДЖИКИСТАНА**

**02.00.04 - Физическая химия**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Душанбе – 2019**

Работа выполнена в лаборатории «Обогащения руд» Института химии им. В.И. Никитина Академии наук Республики Таджикистан.

**Научный руководитель:** кандидат технических наук  
**Самихов Шонавруз Рахимович**

**Официальные оппоненты:** **Рузиев Джура Рахимназарович** – доктор технических наук, главный научный сотрудник Государственного учреждения Научно-исследовательского института металлургии, Государственного унитарного предприятия «Таджикская алюминиевая компания»  
**Баротов Бахтиёр Бурхонович** – кандидат технических наук, заведующий отделом научно-исследовательских и технических услуг Агентства по ядерной и радиационной безопасности АН Республики Таджикистан

**Ведущая организация:** Горно-металлургический институт Таджикистана, кафедра металлургия

Защита состоится « **09** » декабря 2019 года в **12.<sup>00</sup>** часов на заседании диссертационного совета Д 047.003.03 при Институте химии имени В.И. Никитина Академии наук Республики Таджикистан по адресу: 734063, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2. E-mail: [dissovet@ikai.tj](mailto:dissovet@ikai.tj)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Института химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан [www.ikai.tj](http://www.ikai.tj); [www.chemistry.tj](http://www.chemistry.tj)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**Ученый секретарь**  
**диссертационного совета,**  
**кандидат химических наук**



**С.Р. Усманова**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Месторождения сурьмы известны в Китае, России, Таджикистане, Болгарии, ЮАР, Алжире, Азербайджане, Финляндии, Казахстане, Сербии, Киргизии. Согласно опубликованным прогнозам, ежегодный прирост потребления первичной сурьмы до 2020 г. оценивается в 2,5 – 3,1%.

В соответствии с геологическими запасами основными поставщиками сурьмяного сырья являются Китай – 47 %, Россия – 17 %, Таджикистан – 12 %; в этих трех странах добыча составляет около 3/4 от мировой. Основная масса концентратов из этих стран направляется на экспорт, так как потребление концентратов добывающими странами невелико. Главные перерабатывающие центры сосредоточены в Китае, США, Англии и Японии. Обеспеченность сурьмяной промышленности мира имеющимися запасами металла при современном уровне потребления сурьмы – порядка 25-30 лет. Поэтому проблема комплексности использования сурьмосодержащего сырья является **актуальной** задачей.

Многие сурьмяно-ртутные месторождения богаты драгоценными металлами. Одним из таких месторождений является Джижикрутское сурьмяно-ртутно-золотосодержащее месторождение. При этом в переработку в ближайшей перспективе будут вовлекаться золотосодержащие руды нижнего горизонта сурьмяно-ртутного месторождения Джижикрут, в котором содержание попутных элементов значительно возрастает.

В соответствии с литературными данными и минералогического состава золото непосредственно связано с минералами сурьмы, в частности с антимонитом, в виде средних по величине, тонких или субмикроскопических включений металлического золота, а также некоторых золотосодержащих сульфидов: например, пирита. При флотации этих руд основная часть золота не обогащается в концентрат, а переходит в хвосты и можно его извлекать из хвостов флотации. Таким образом, разработка новых технологий для извлечения золота из хвостов флотации является **актуальной задачей**.

Диссертационная работа содержит сведения о современных технологиях и используемых новых методах при выщелачивании золота из хвостов флотации, практике выделения благородных металлов при пирометаллургическом производстве, в т.ч., выделении из растворов благодаря гидрометаллургическим процессам.

В диссертации рассмотрены ресурсы, технологии обогащения руд нижних горизонтов месторождения Джижикрут. Изучаются возможности

переработки руд нижних горизонтов и получение собственно золота из хвостов флотации.

**Целью настоящей работы является:** Разработка технологии переработки сурьмяно-ртутно-золотосодержащих руд нижнего горизонта месторождения Джижикрута, обеспечивающего максимальное извлечение золота из хвостов флотации методом ацетилтиомочевинного и тиомочевинного выщелачивания.

**В связи с поставленной целью в работе решаются следующие задачи:**

⇒ изучение вещественного состава руды нижних горизонтов месторождения Джижикрута;

⇒ исследование условий ацетилтиомочевинного и тиомочевинного выщелачивания золота из продуктов обогащения;

⇒ определение физико-химического состава исходных золото-сурьмяно-ртутных руд и продуктов флотации;

⇒ определение содержания золота из золото-сурьмяно-ртутных руд с адсорбцией активированным углем-йодометрическим методом;

⇒ изучение кинетики процесса ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации руды нижних горизонтов месторождения Джижикрута;

⇒ изучение моделирования процесса ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации руды нижних горизонтов месторождения Джижикрута;

**Научная новизна работы:**

➤ впервые установлены физико-химические закономерности выщелачивания золота ацетилтиомочевинной и тиомочевинной из хвостов флотации месторождения Джижикрут.

➤ исследованы кинетика и механизм выщелачивания золота из хвостов флотации. На основе кинетических данных установлен механизм протекания процесса ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации и разработана принципиальная технологическая схема.

**Практическая значимость работы**

❖ разработана технология переработки золото-сурьмяно-ртутных руд нижних горизонтов месторождения Джижикрута, включающая флотационное обогащение, получение продуктов обогащения, выщелачивания золота из хвостов флотации, с последующим извлечением из него золота;

❖ проведены исследования процесса извлечения золота из хвостов флотации методом ацетилтиомочевинного и тиомочевинного

выщелачивания. На основании проведённых исследований найдены оптимальные условия ацетилтиомочевинного и тиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации.

### **Методология и методы исследования**

Обоснованность результатов и научных выводов работы обеспечена большим объемом выполненных экспериментов с применением современных методов исследования: условий ацетилтиомочевинного и тиомочевинного выщелачивания, физико-химического состава исходной и продуктов флотации, а также адсорбцией активированным углем-йодометрическим методом. Испытаны физико-химические методы обогащения минерального сырья в лабораторных условиях.

Для графической, химической и математической обработки результатов использовались программы «Power Point 2016», «ISIS Draw 2,4», «Math Type Server» и «DataFit 9.1».

Теоретической и методологической основой исследования являлись работы современных отечественных и зарубежных учёных в области гидрометаллургии и технологии переработки золотосодержащего сырья.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- результаты исследований по выявлению основных кинетических закономерностей растворения золота в ацетилтиомочевинном и тиомочевинном растворах;
- результаты химико-технологического изучения объектов исследований;
- результаты изучения физико-химического состава исходного сырья и продуктов флотации, его разложения дифференциально-термическим, рентгенофазовым методами;
- результаты исследования эффективности использования ацетилтиомочевинного и тиомочевинного выщелачивания для извлечения золота из хвостов флотации руды нижних горизонтов Джижикрутского месторождения;
- разработка принципиальной технологической схемы переработки золота из хвостов флотации руды нижних горизонтов с использованием ацетилтиомочевинного выщелачивания.

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались и обсуждались на: международной научно – практической конференции, посвященной 1150-летию персидского-таджикского ученого – энциклопедиста, врача, алхимика и философа Абу Бакра ибн Закария Рази (г.Душанбе, 2015 г.); конференции XIII Нумановские чтения «Достижения химической науки за 25 лет государственной независимости Республики

Таджикистан», посвящённые 70-летию образования Института химии имени В.И. Никитина Академии наук Республики Таджикистан (г.Душанбе, 2016 г.); конференции «Роль молодых ученых в развитии науки, инноваций и технологий» Посвященной 25-летию государственной независимости Республики Таджикистан (ТГНУ, Душанбе 2017 г.); Республиканской научно – практической конференции «Перспективы инновационной технологии в развитии химической промышленности Таджикистана» (ТНУ, г.Душанбе, 2017 г.); VII всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 55-летию кафедры автоматизации производственных процессов (г.Иркутск, 2017 г.); Республиканской научно-практической конференции «Перспективы развития естественных наук» в РТСУ (г.Душанбе, 2018 г.); XLVI Международной научной конференции «Итоги науки в теории и практике, 2018», «Евразийское Научное Объединение» (г.Москва, 2018 г.); Республиканской научно – практической конференции «Техника и технология: основные проблемы, достижения и инновации» (Технический колледж г.Душанбе, 2018 г.); Республиканской научно - практической конференции «Проблемы металлургической отрасли, строительства, маркшейдерского дела и пути их решения на современном этапе» (ГМИТ, г.Бустон, 2019 г.); Международной научно-практической мероприятий Общество Науки и Творчества (Научное знание современности г.Казань, 2019 г.) и т. д.

**Вклад автора** заключается в нахождении способов и решений поставленных задач, планировании и проведении лабораторных испытаний, применении экспериментальных и расчётных методов для достижения намеченной цели, обработке, анализе и обобщении результатов эксперимента и расчётных результатов работы, также их публикации, формулировке и составлении основных положений и выводов диссертации.

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 16 научных работ, из них 4 статей в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК Министерства высшего образования и науки Российской Федерации, 11 тезисов докладов на республиканских и международных конференциях и получен 1 малый патент Республики Таджикистан.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, посвященных обзору литературы, технике эксперимента и экспериментальным исследованиям, а также выводов и списка использованной литературы. Работа изложена на 107 страницах компьютерного набора, включает 19 таблиц, 31 рисунок и 142 библиографических ссылок.

## **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, а также отражены актуальность темы, научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** рассматриваются имеющиеся в литературе данные о физико-химических характеристиках золото-сурьмяно-ртутьсодержащей руды, известные способы переработки и извлечение золотосодержащего сырья, на основании которых намечаются направления собственных исследований. Рассмотрены практические аспекты использования тиомочевинному выщелачивание золота. На основе литературного обзора сделаны соответствующие заключения и обоснование по выбору темы диссертационной работы.

**Во второй главе** приводится краткая характеристика золото-сурьмяно-ртутных руд и сущность флотационной обогащения руды месторождении Джижикрут, используемых в диссертации.

**В третьей главе** изложены результаты обогащения, ацетил-тиомочевинного и тиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации руды нижних горизонтов месторождении Джижикрут. Приведена технологическая схема переработки золото-сурьмяно-ртутных руд нижних горизонтов Джижикрутского месторождения, разработанная в лаборатории обогащения руд Института химии имени В.И. Никита АН Республики Таджикистан.

**В четвертой главе** изложена кинетика и основы моделирование процесса ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации золото-сурьмяно-ртутных руд нижних горизонтов Джижикрутского месторождения.

## **1. ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ЗОЛОТА ИЗ ХВОСТОВ ФЛОТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЖИЖИКРУТ**

### **1.1. Технология обогащения руд нижних горизонтов Джижикрутского месторождения**

Исследования проводили на исходной золото-сурьмяно-ртутных руды нижних горизонтов месторождении Джижикрут. Для подготовки пробы к исследованию руда была подвергнута дроблению, грохочению и измельчению. Измельченная средняя проба была направлена на химический анализ. В таблице 1 приведены результаты химического анализа исходной руды.

По данным химического анализа можно сделать вывод, что руда нижних горизонтов Джижикрутского месторождения является золотосодержащей ртутно-сурьмяной рудой. Кроме того, в руде из сопутствующих элементов

представляют определенный интерес такие металлы, как таллий, селен, теллур.

**Таблица 1** – Результаты химического анализа исходной руды

№	Компоненты руды	Содержание
1.	Sb	3,6 %
2.	Hg	0,37 %
3.	Au	2,2 г/т
4.	Ti	30 г/т
5.	Se	12 г/т
6.	Te	13 г/т

На основании проведенных исследований для воспроизведения процесса флотации в непрерывном (замкнутом) цикле были проведены опыты на 4-х навесках руды. Расход ксантогената был принят 300 г/т, расход азотнокислого свинца 500 г/т. Следует заметить, что количество подаваемого в основную флотацию азотнокислого свинца было повышено до 350 г/т, в 1 контрольную флотацию расход активатора составил 100 г/т, во 2 контрольную 50 г/т. Концентрат подвергался двум перемывкам. В таблицах 2 представлены полученные результаты.

Таким образом, рекомендуемая технологическая схема флотации руды нижних горизонтов Джижикрутского месторождения применительно к Анзобской обогатительной фабрике представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1** – Рекомендуемая схема флотации руды нижних горизонтов Джижикрутского месторождения



**Таблица 2** – Результаты флотация золото-сурьмяно-ртутной руды в замкнутом цикле

Наименование продуктов	Выход		Содержание			Извлечение		
	г	%	Sb, %	Hg, %	Au, г/г	Sb, %	Hg, %	Au, г/г
Концентрат 1	10,0	1,0	57,0	4,6		14,7	14,6	
Концентрат 2	12,7	1,28	47,0	3,7		15,6	15,0	
Концентрат 3	12,9	1,30	43,0	3,3	ср.10	14,5	13,6	
Концентрат 4	13,8	1,39	39,0	4,9		14,0	21,6	20,2
Промеж. продукт 2 контроль. флотации	49,2	4,95	6,4	0,61	5	8,2	9,6	9,6
Промеж. продукт 2 контроль. флотации	15,3	1,54	1,2	0,31	2	0,5	1,5	1,2
Промежуточный продукт 1 перерешетки	82,9	8,33	6,2	0,70	4	13,4	18,4	12,9
Промежуточный продукт 2 перерешетки	27,2	2,73	16,5	0,38	6	11,6	3,3	6,4
Хвосты	170,3	17,12	0,4	0,01	1,6	1,8	0,5	10,6
Хвосты	209,6	21,08	0,3	0,01	1,6	1,6	0,7	13,1
Хвосты	198,2	19,93	0,4	0,01	1,7	2,1	0,6	13,2
Хвосты	192,4	19,35	0,4	0,01	1,7	2,0	0,6	12,8
Исходная руда	994,5	100	3,56	0,31	2,4	100	100	100
Концентрат	49,4	6,02	46,5	4,12	10	89,9	96,3	28,6
Хвосты	770,5	93,98	0,37	0,01	1,6	11,1	3,7	71,4
Руда	819,9	100	3,1	0,26	2,1	100	100	100

По данной схеме (рисунок 1) не удастся удовлетворительно извлечь золото. Необходимо проведение дальнейших исследований по разработке технологии доизвлечения золота из хвостов контрольной флотации.

## **1.2. Рентгеноструктурный анализ исходной руды и продуктов флотации золото-сурьмяно-ртутных руд месторождений**

### **Джизжикрут**

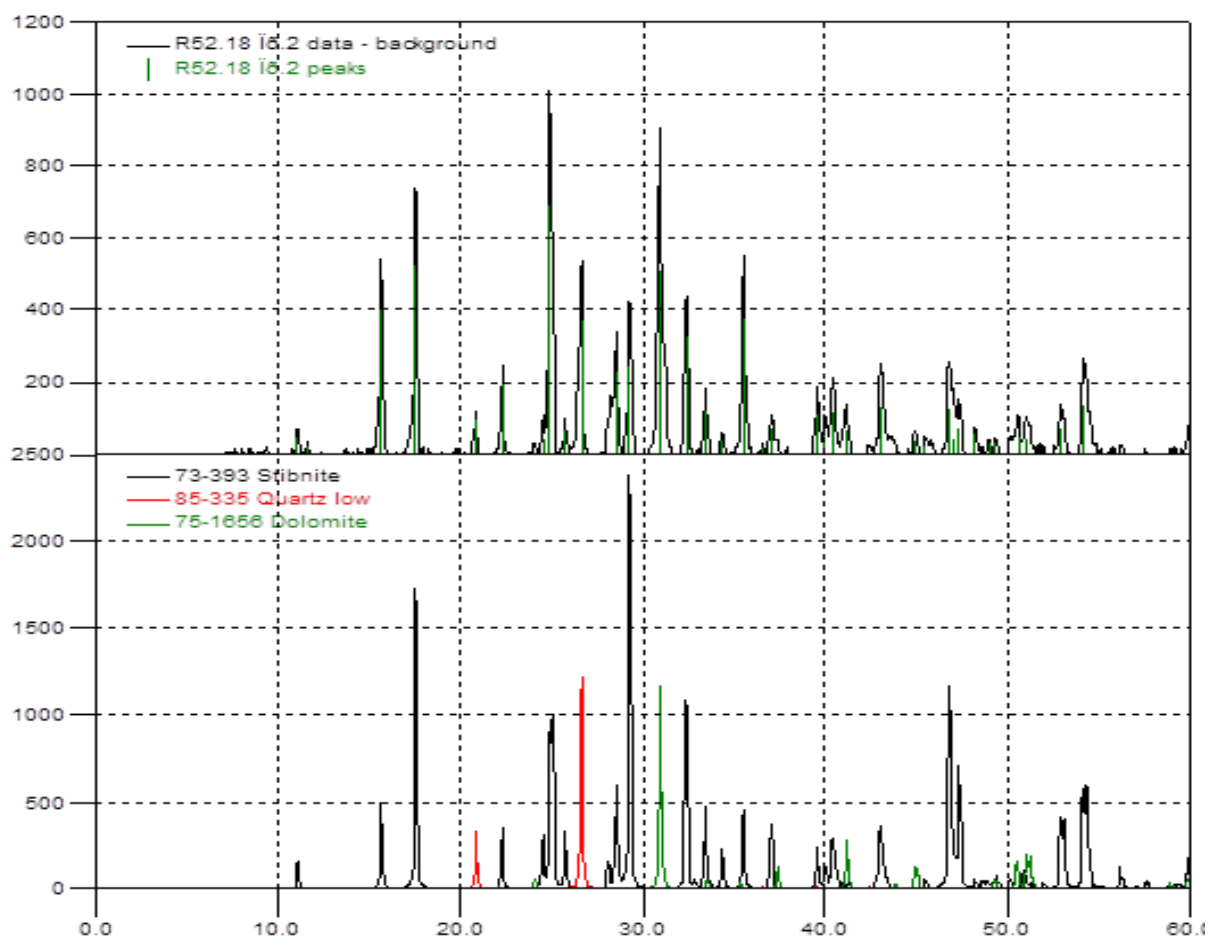
Фазовый состав продуктов различных стадий обработки руд месторождения Джизжикрут нами был изучен с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре «Дрон-3».

В лабораторных условиях проведен обогащение золото-сурьмяно-ртутная руда из месторождения Джижикрута. В результате флотации получен концентрат, промежуточный продукт и хвосты.

Проведен рентгенофазовый анализ на исходной руды, промежуточный продукт и концентрат. Диагностика вещественного состава осуществлялась методами рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре «Дрон-3» (Си-анод, Ni-фильтр). Рентгеновские порошковые дифрактограммы исходных золото-сурьмяно-ртутных руд, продуктов промежуточного обогащения и конечных продуктов обогащения руд приведены на рисунки 2 и 3.

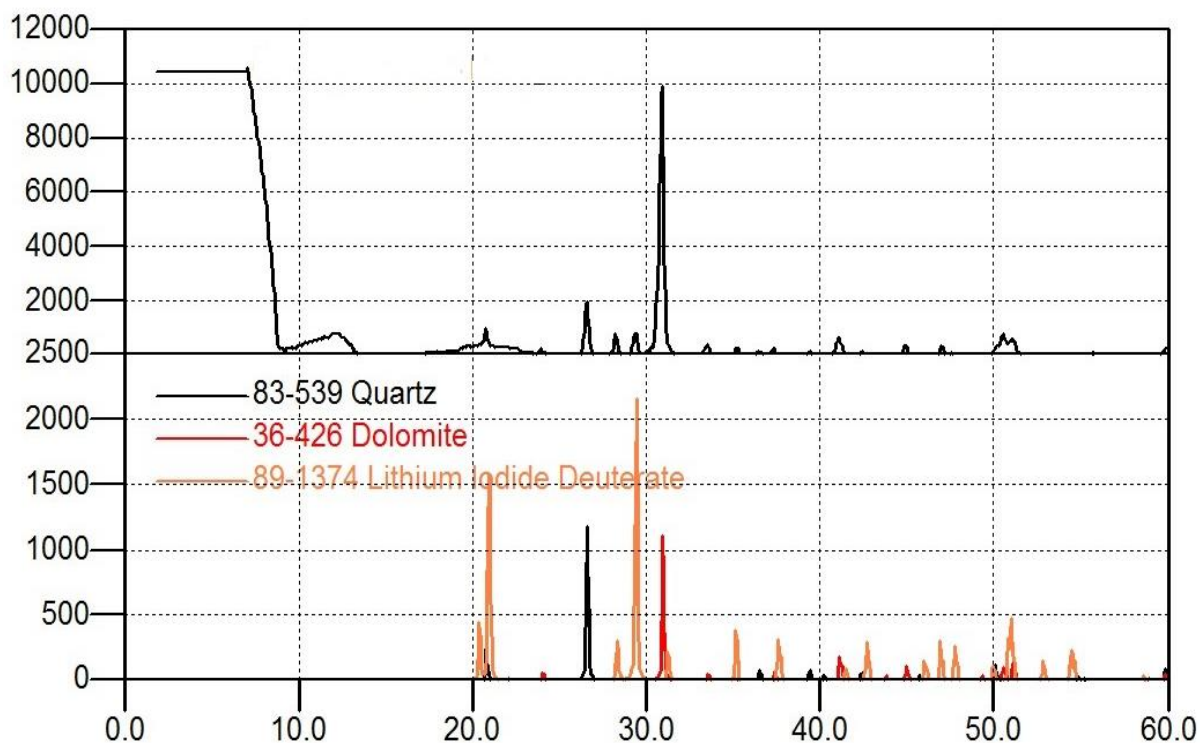
На диаграммах хорошо диагностируется состав руд (рисунки 2 и 3). В процессе технологической обработки руд состав дифференцируется и диагностируются другие минералы.

На рисунок 2 видны пики минералов – стибнит, доломит характерного для нижних горизонтов месторождения Джижикрут которые покрывают диапазоны  $11-56^\circ$ , с характерным пиком в  $31,9^\circ$ .



**Рисунок 2** – Рентгеновская порошковая дифрактограмма концентрата флотации золото-сурьмяно-ртутных руд

На рисунке 3 представлены дифрактограммы хвостов флотации золото-сурьмяно-ртутных руды нижнего горизонта Джижикрутского месторождения. Как видно из рисунка, линии стибнит отсутствуют в хвостах флотации, это объясняется тем, что при флотации стибнит извлекается в концентрат.



**Рисунок 3** – Рентгеновская порошковая дифрактограмма хвостов флотации золото-сурьмяно-ртутных руд

Таким образом, рентгеновская дифрактометрия выявляет особенности поэтапного разложения исходных золото-сурьмяно-ртутных руд на различных этапах технологической обработки и обогащения.

### **1.3. Исследование выщелачивания золота из хвостов флотации ацетилтиомочевинной**

Ацетилтиомочевинное выщелачивание, произведенное тем или иным способом, – перспективный гидрометаллургический процесс извлечения золота. Для проведения этого процесса необходимо применять эффективный окислитель, способный переводить металлическое золото в ионное состояние и поддерживать низкие значения рН с целью предохранения от разложения золотосодержащего комплекса. Это достигается путем введения в процесс серной кислоты и сульфата трёхвалентного железа.

Для снижения расхода ацетилтиомочевины предварительно окисляют сульфиды железа, сурьмы, меди в кислой среде гидроксидом железа. Из

ацетилтиомочевинных растворов золото осаждают цементацией свинцом, цинком, алюминием, сорбцией на активных углях, щелочами, электролизом.

Растворение золота в ацетилтиомочевине в присутствии окислителя–солей трёхвалентного железа идет по реакции:



Предполагают, что трехвалентное железо, в растворах ацетилтиомочевинины играющее роль окислителя металла, связано в комплекс состава  $[\text{Fe}(\text{ThiO})_2]^{3+}$  или  $[\text{Fe}(\text{SO})_4 \times \text{C}_3\text{H}_6\text{N}_2\text{SO}]^+$ . В этом случае процесс растворения золота в ацетилтиомочевине может быть представлен следующей реакцией:



где ThiO – ацетилтиомочевина  $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_2\text{SO}$ .

Нами в лабораторных условиях проведены исследования по ацетилтиомочевинному выщелачиванию золота из хвостов флотации нижнего горизонта месторождения Джижикрут. Исследования в области выщелачивания хвостов флотации проводились в стеклянных стаканах емкостью 500 мл, стеклянной мешалке с двумя лопастями. Навеска хвостов флотации, загружался в склянку, приливались раствор ацетилтиомочевинины и серной кислоты, добавлялся окислитель трёхвалентного сульфата железа и производилось размешивание в течение определённого промежутка времени. После 2,4,6,8 часов после начала исследование мешалку останавливали, и производился отбор аликвоты для определения pH и концентрации золота. В растворах золото определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Испытание проводилось в 1 %-ном растворе ацетилтиомочевинины при 1,38 % серной кислоты и 0,5 % трёхвалентного сульфата железа. Длительность время опытов 8 часов, pH среды - 6,0. Золото в раствор, в данных условиях, переходило в незначительных количествах (таблица 3). Как видно за 8 часов в раствор выщелачивается золота 20,8 %. Условия выщелачивания: руда – 100 гр., вода – 200 мл,  $\text{CH}_3\text{CONHC}_3\text{SNH}_2$ , - 2 гр.,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – 1 мл,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  – 1 гр.

Результаты исследования при разных температурах представлены в табл.3.

Только после обжига при температуре 600 °С при pH = 1,2 в раствор переходило 83,3 % золота с дальнейшей кислотной обработкой спустя 8 часов извлечение золота в раствор из хвостов составило 86,1 %.

Следовательно, использование ацетилтиомочевинины с целью выщелачивания золота из руд и хвостов флотации рентабельно. Помимо того, с применением ацетилтиомочевинины извлечение золота во много раз выше, чем при цианировании.

**Таблица 3** – Извлечение золота при ацетилтиомочевинному выщелачивании хвостов флотации нижнего горизонта Джижикрутского месторождения

Время, ч	Остаточное содержание золота при различный рН, мг/л		Извлечение золота в растворе, %
	нач.	рН	
2	5,8	0,165	19,4
4	6,1	0,174	20,5
6	5,8	0,175	20,6
8	5,8	0,177	20,8
Хвосты флотации после обжига при 200 °С			
2	5,3	0,144	16,9
4	5,3	0,152	17,9
6	5,8	0,168	19,8
8	5,8	0,166	19,5
Хвосты флотации после обжига при 400 °С			
2	5,6	0,162	19,0
4	5,9	0,173	20,3
6	6,2	0,181	21,3
8	6,0	0,184	21,6
Хвосты флотации после обжига при 600 °С			
2	6,2	0,338	39,8
4	6,4	0,379	44,6
6	6,2	0,381	44,8
8	6,8	0,384	45,2
Хвосты флотации после обжига при 600 °С и обработка с H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			
2	2,4	0,648	76,2
4	2,8	0,685	80,6
6	2,6	0,730	85,9
8	2,6	0,732	86,1

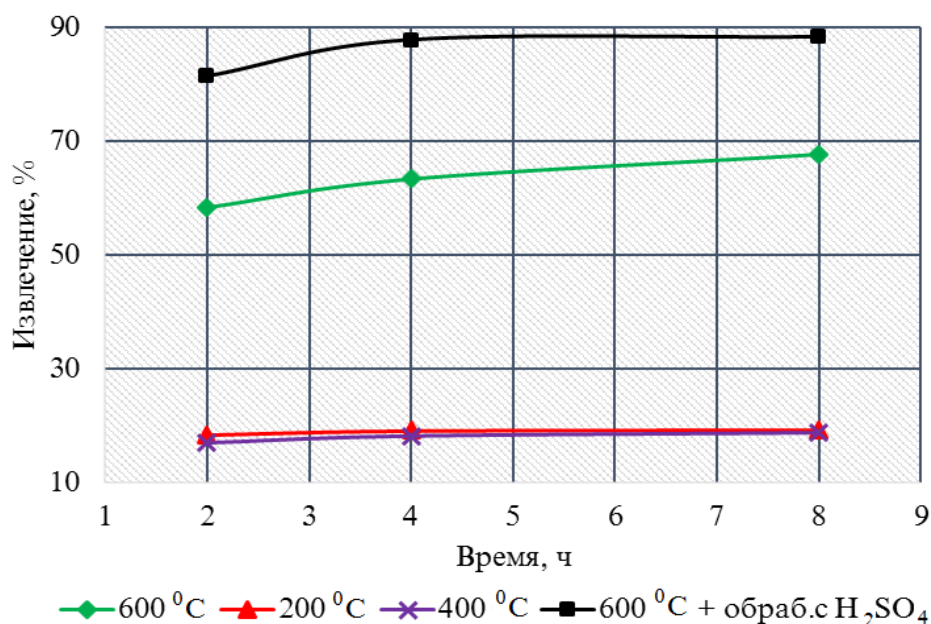
#### **1.4. Тиомочевинное выщелачивание золота из хвостов флотации руды нижних горизонтов Джиджикрутского месторождения**

Растворение золота в тиомочевине в присутствии окислителя-солей трёхвалентного железа идет по реакции:



По последним данным, в кислых растворах реакция между ионом железа (III) и тиомочевинной протекает весьма медленно, но в присутствии пирротина FeS, пирита FeS<sub>2</sub> и ковеллина CuS ускоряется и одновременно происходит окисление тиокарбамида.

Результаты исследования по тиомочевинному выщелачиванию золота из хвостов флотации после обжига при разных температурах приведены на рисунке 4.



**Рисунок 4** – Зависимости извлечения золота от времени при различных температурах

Как видно из рисунка 4 с повышением температуры, уменьшением рН среды и обработкой серной кислотой в тиомочевинных растворах скорость растворения золота возрастает. Степень извлечения возрастает от 67,8 до 88,3 %.

Таким образом, применение тиомочевины для выщелачивания золота из руд и хвостов флотации может быть рентабельно.

## 2. КИНЕТИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АЦЕТИЛТИОМОЧЕВИННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА ИЗ ХВОСТОВ ФЛОТАЦИИ

### 2.1. Кинетика процесса ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации нижнего горизонта Джизжикрутского месторождения

Ацетилтиомочевинное выщелачивание, применяемое при выщелачивании хвостов флотации золото-сурьмяно-ртутных руд, является весьма сложным процессом. Проблемой данного способа является сложность подбора оптимальных условий извлечения золота из продукта, удовлетворяющих требованиям технологического процесса. Поэтому для строгой оптимизации процесса необходимы кинетические исследования. Опыты проводились с хвостами флотации, содержание золота в которых – 1,8 г/т.

Сериями экспериментов изучена кинетика растворения золота в ацетилтиомочевинных растворах для определения зависимости скорости процесса от основных технологических параметров – концентрации  $H_2SO_4$ , температуры и т.д.

Для выяснения механизма химической реакции и расчета константы скорости реакции обязательно надо знать порядок реакции по реагирующим веществам и суммарный порядок данной реакции. Существуют специальные экспериментальные приемы, позволяющие определять, как порядки по отдельным компонентам, так и общий порядок реакции.

Для определения порядка реакции используем графический метод Вант-Гоффа, который позволяет определить порядок реакции по уравнению:

$$n = \lg \frac{g_1}{g_2} / \lg \frac{a_1}{a_2}.$$

Порядок химической реакции, рассчитанной по экспериментальным данным, близки по значениям, следовательно, данная реакция подчиняется уравнению для реакций третьего порядка. В таблице 4 представлена зависимости  $1/(a-x)^2$  от  $\tau$ .

Расчетные данные порядка реакции на основе экспериментально полученных результатов представлены в таблице 5.

**Таблица 4** – Порядка реакции процесса ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации

№	(100-x)	$\frac{1}{(a-x)^2}$	$\tau$	№	(100-x)	$\frac{1}{(a-x)^2}$	$\tau$
1.	80,6	$1,539 \times 10^{-4}$	2	1.	83,1	$1,448 \times 10^{-4}$	2
2.	79,5	$1,581 \times 10^{-4}$	4	2.	82,1	$1,482 \times 10^{-4}$	4
3.	79,4	$1,587 \times 10^{-4}$	6	3.	80,2	$1,554 \times 10^{-4}$	6
4.	79,2	$1,593 \times 10^{-4}$	8	4.	80,5	$1,549 \times 10^{-4}$	8
1.	81,0	$1,524 \times 10^{-4}$	2	1.	60,2	$2,759 \times 10^{-4}$	2
2.	79,7	$1,572 \times 10^{-4}$	4	2.	55,4	$3,258 \times 10^{-4}$	4
3.	78,7	$1,615 \times 10^{-4}$	6	3.	55,2	$3,295 \times 10^{-4}$	6
4.	78,4	$1,626 \times 10^{-4}$	8	4.	54,8	$3,329 \times 10^{-4}$	8
1.	25,8	$1,502 \times 10^{-3}$	2	1.	23,8	$1,765 \times 10^{-3}$	2
2.	22	$2,066 \times 10^{-3}$	4	2.	19,4	$2,066 \times 10^{-3}$	4
3.	17,7	$3,191 \times 10^{-3}$	6	3.	14,1	$3,191 \times 10^{-3}$	6
4.	16,7	$3,585 \times 10^{-3}$	8	4.	13,9	$3,585 \times 10^{-3}$	8

**Таблица 5** – Константы скорости реакции процесса ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации

№	$\frac{1}{(a-x)^2}$	
	$\text{tg } \alpha$	k
1	0,003	0,0015
2	0,01617	0,008085
3	0,002275	0,011375
4	0,02025	0,010125
5	0,3372	0,1686
6	0,3033	0,15165

Одинаковые начальные концентрации наблюдаются только для второй, третьей и четвертой частей таблицы 3, что подходит для наших исследований.

Рассчитанный по методу наименьших квадратов тангенс угла наклона прямой позволим определить энергию активации (таблица 6).

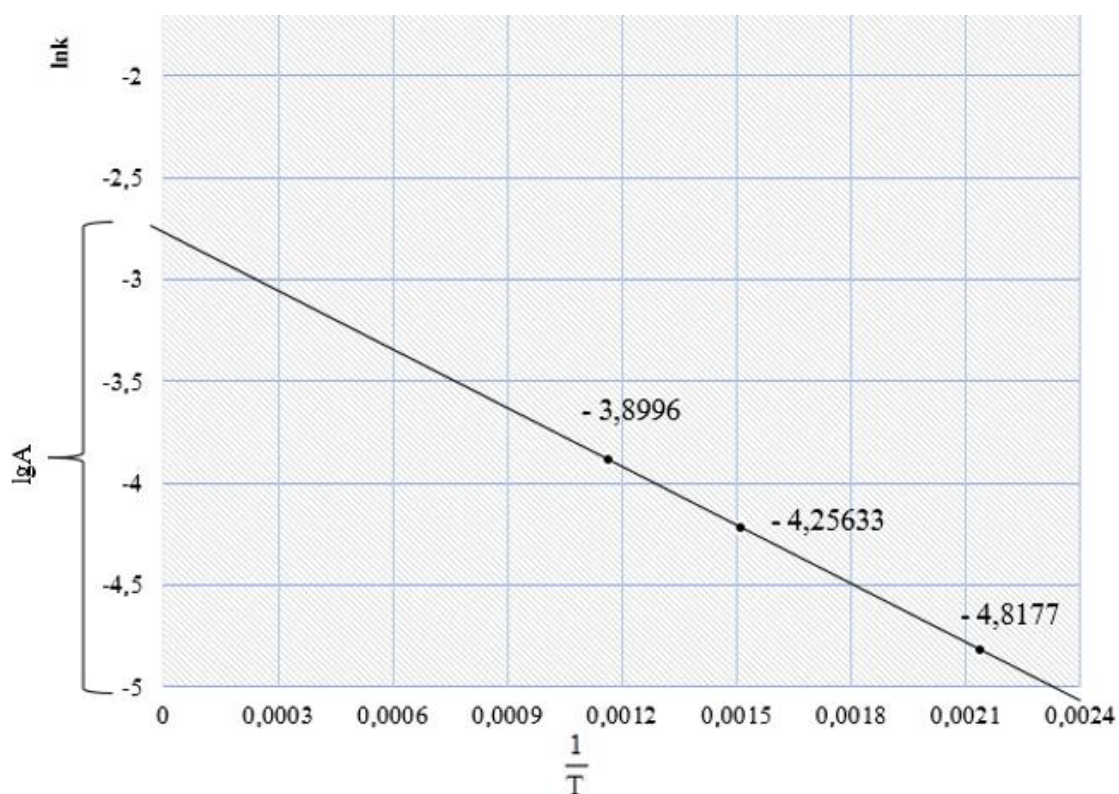
**Таблица 6** – Исходные данные для определения кажущейся энергии активации процесса ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации

№	t, °C	T, K	$\frac{1}{T}$	k	lnk
1.	200	473,15	0,0021135	0,008085	- 4,8177
2.	400	673,15	0,0014855	0,011375	- 4,25633
3.	600	873,15	0,0011453	0,02025	- 3,89960

Далее построим график зависимости константы скорости от температуры в координатах уравнения Аррениуса и рассчитываем энергию активации.

Из графика зависимости  $\ln k$  от  $\frac{1}{T}$  (рисунок 5) следует, что  $\ln A = -2,8$ .





**Рисунок 5** – Линеаризация по уравнению Аррениуса

Таким образом, определено значение энергии активации, которая равна 7,95 кДж/моль, что свидетельствует о быстром протекании реакции в диффузионной области.

## **2.2. Моделирование технологических процессов ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации**

Применение методов математического моделирования позволяет интерпретировать экспериментальные данные, выявлять количественные закономерности механизма процессов. На данном этапе работы рассматриваются моделирование и оптимизация физико-химических параметров процесса ацетил-тиомочевинного выщелачивания золота с применением серной кислоты, сульфата железа при различных температурах.

Для оптимизации изучаемого процесса применены пакеты математических моделей с последующим анализом взаимосвязи между входными и выходными параметрами процесса и определением оптимальных значений технологических параметров. Ацетил-тиомочевинное выщелачивание золота проводили для 5 образцов, при  $T = 200$  до  $600$  °С, при разных значениях рН среды, в течение 2-8 час.

Используя данные таблицы 3 рассчитаем модел технологического процесса ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов

флотации. В соответствии с планом эксперимента для каждой температуры было выбрано 4 точки (таблица 3). С использованием метода полиномы Лагранжа, количество этих точек увеличивалось до семи.

Ниже приводятся экспериментальные и расчетные данные процесса ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации при различных температурах.

Берём частные производные по неизвестным параметрам  $a$ ,  $b$  и  $c$ , приравняем их к нулю. Полученные уравнения, объединяем в систему, и решая её, находим неизвестные параметры. Следуя этому правилу, имеем:

$$\begin{cases} \left( \sum_{i=1}^n x_i^4 \right) a + \left( \sum_{i=1}^n x_i^3 \right) b + \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) c = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i, \\ \left( \sum_{i=1}^n x_i^3 \right) a + \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) b + \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) c = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a + \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) b + nc = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases}$$

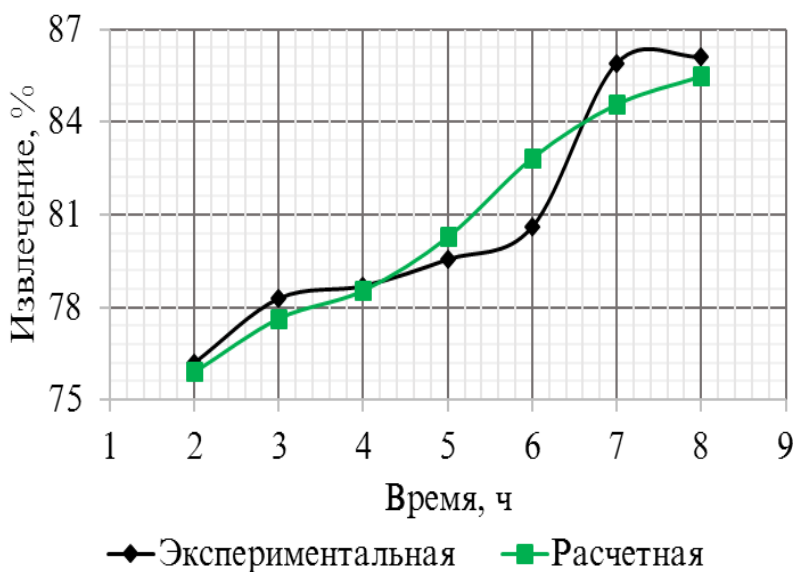
Решая систему вышеуказанным уравнений методом Гаусса, находим:

$$a = 54,26831169; b = 0,906233766; c = 8,263636364.$$

Итак, эмпирическая формула для начальной температуры, выведенная нами, имеет вид

$$Y = 54,26 + 0,90X_1 + 8,2X_2.$$

Подсчитаны проценты отклонения эмпирических и опытных данных по точкам, и по ним найдено среднее процентное отклонение, равное – 6,09.



**Рисунок 6** – Графики зависимости извлечения ацетилтиомочевинного выщелачивания золота от продолжительности процесса

Проведённые регрессионные и дисперсионные анализы позволили получить адекватные математические модели. Для определения

корреляционных зависимостей между входными параметрами и исследуемыми показателями по результатам эксперимента использовалась известная программа DataFit 9.1 (рисунок 7) зависимости извлечения золота от pH среды и времени.

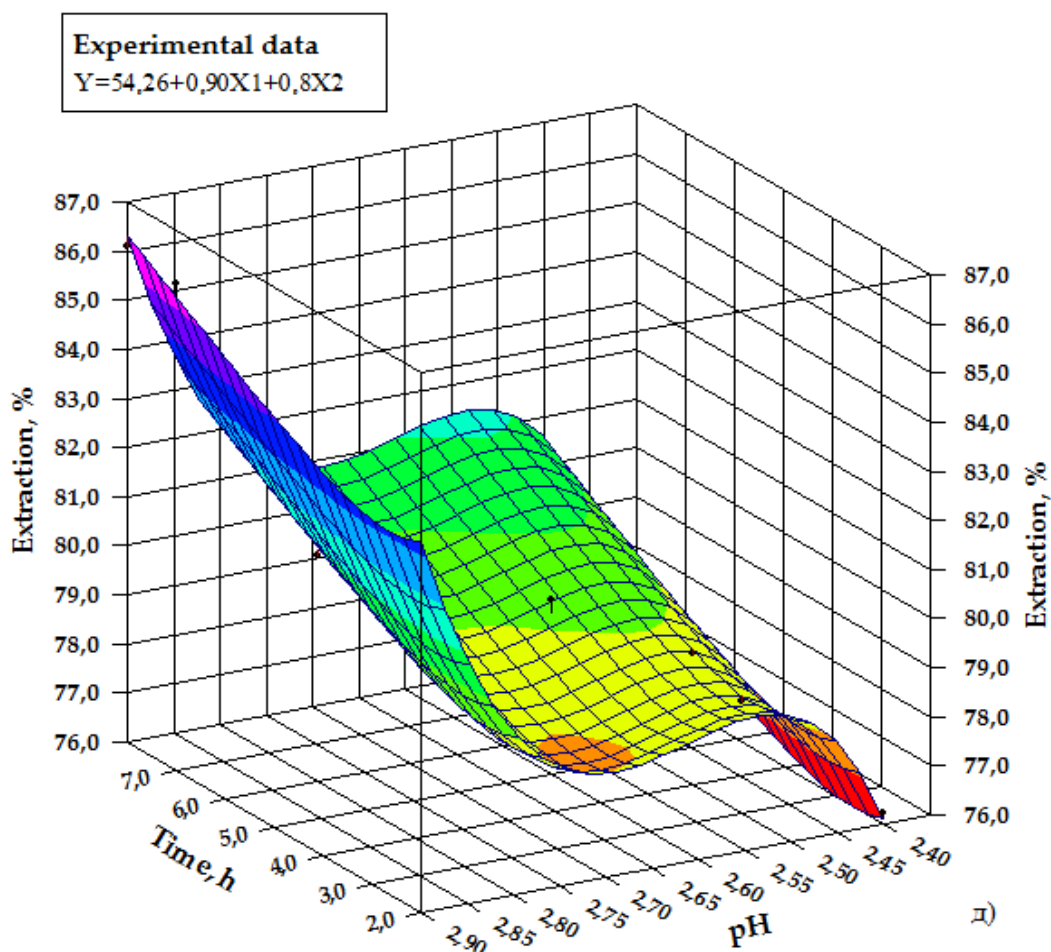


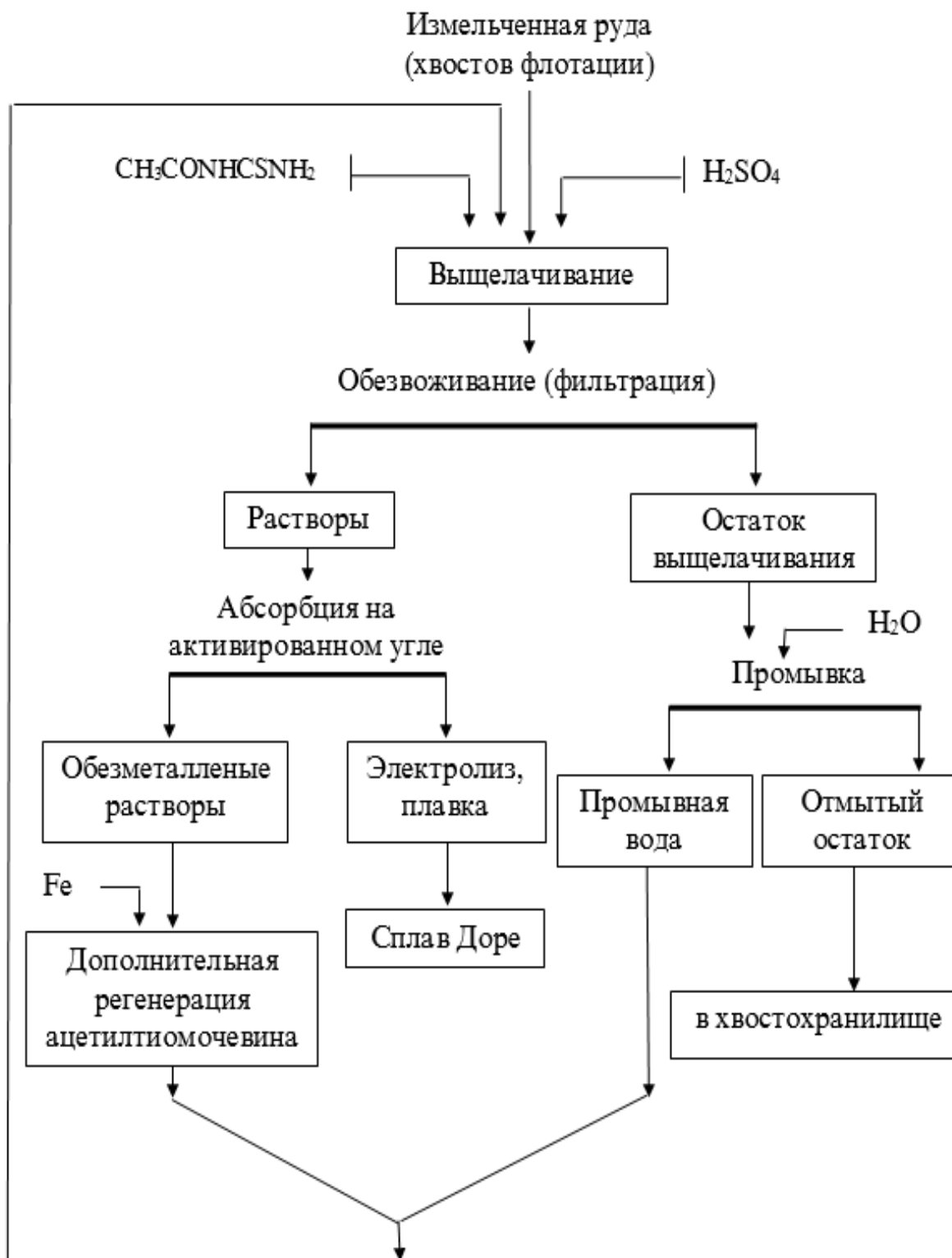
Рисунок 7 – 3D график зависимость извлечения золота от pH среды и времени

В результате сравнения расчетов по программе и экспериментальных данных показано, что математическая модель каждой стадии процесса ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации методом ацетилтиомочевинного выщелачивания в испытании адекватно описывает реальный процесс.

### 2.3. Принципиальная технологическая схема переработки золота из хвостов флотации методом ацетилтиомочевинного выщелачивания

В результате комплекса выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработана принципиальная гидрометаллургическая схема переработки золота из хвостов флотации

ацетилтиомочевинного выщелачивания, состоящая из следующих основных технологических операций (рисунок 8):



**Рисунок 8** – Принципиальная технологическая схема переработки золота из хвостов флотации методом ацетилтиомочевинного выщелачивания

## ВЫВОДЫ

1. Изучен физико-химический состав исходных руд и продуктов флотации, их разложения дифференциально-термическим, рентгенофазовым методами. С помощью рентгеновской дифрактометрии выявляет особенности поэтапного разложения исходной золото-сурьмяно-ртутных руд на различных этапах технологической обработки и обогащения.

2. Изучены физико-химические закономерности выщелачивания золота ацетилтиомочевинной и тиомочевинной из хвостов флотации. Разработанный процесс позволяет достигнуть извлечение золота после обжига при 600 °С и обработки серной кислотой с тиомочевинной 81 – 88 % и ацетилтиомочевинной 76 – 86 %.

3. Исследована кинетика процесса ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации, рассчитаны значения энергии активации процесса, составившие, соответственно, 7.95 кДж/моль, что свидетельствует о быстром протекании реакции в диффузионной области.

4. Определено содержание золота в золото-сурьмяно-ртутных руд и продуктов обогащения с адсорбцией активированным углем-йодометрическим методом. По данным анализа можно сделан вывод, о том, что руда нижних горизонтов Джижикрутского месторождения является золотосодержащей ртутно-сурьмяной рудой. Показано, что золото не обогащается в концентрат, а остается в хвостах и можно его извлекать из хвостов флотации.

5. Разработана математическая модель процесса ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации месторождения Джижикрут. На основании проведённых математических расчетов предложена модель выщелачивания золота из хвостов флотации, которую можно рекомендовать в производство.

6. Разработана и предложена принципиальная технологическая схема обогащения золото-сурьмяно-ртутных руд месторождения Джижикрут. Рекомендуемая технологическая схема флотации руды нижних горизонтов Джижикрутского месторождения включает в себя измельчение руды до 75% класса -0,063 мм, основную, две контрольные флотации и перечистки концентрата две или три в зависимости от качества получаемого концентрата.

**Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:  
Статьи, опубликованные в научных журналах, рекомендованных ВАК  
Министерства высшего образования и науки Российской Федерации**

1. Самихов, Ш.Р. Технология обогащения руд нижних горизонтов Джижикрутского месторождения / Ш.Р. Самихов, **Х.И. Холов**, З.А. Зинченко // – Доклады АН Республики Таджикистан – 2017. Том 60. - №10, - С.533-538.

2. **Холов, Х.И.** Определение содержания золота из золото-сурьмяно-ртутных руд месторождения Джижикрут с адсорбцией активированным углем-йодометрическим методом / **Х.И. Холов**, А.И. Ашуров, Ш.Р. Самихов, С.Ш. Сафаров // -Вестник ТГУ им. М.С. Осими, №1 (45), 2019, С.105-109.

3. **Холов, Х.И.** Извлечение золота тиомочевинной из хвостов флотации руды нижних горизонтов Джижикрутского месторождения / **Х.И. Холов**, Ш.Р. Самихов, М.С. Зарифова, О.М. Бобомуродов // – Доклады АН Республики Таджикистан, 2019 - №1-2, С.88-92.

4. Самихов, Ш.Р. Рентгеноструктурный анализ исходной руды и продуктов флотации золото-сурьмяно-ртутных руд месторождений Джижикрут / Ш.Р. Самихов, **Х.И. Холов**, А.С. Ниёзов // – Вестник ТНУ. – 2019 – № 1/2 – С.246-249.

**Изобретения по теме диссертации**

5. Малый патент Республики Таджикистан № ТЈ 954 / Способ извлечения золота из хвостов флотации сурьмяно-ртутной руды. **Холов Х.И.**, Самихов Ш.Р., Сафаров С.Ш. / № 1801179; заявл. 22.02.18; опубл. 19.11.18.

**Статьи, опубликованные в материалах международных и республиканских конференций:**

6. **Холов, Х.И.** Кинетика процесса ацетилтиомочевинного выщелачивания золота из хвостов флотации нижнего горизонта Джижикрутского месторождения / **Х.И. Холов**, Л.В. Квятковская, Ш.Р. Самихов // – Eurasian Science journal (Евразийский научный журнал). Москва, 2019 г. № 4 (61), - С.59-65.

7. **Холов, Х.И.** Моделирование технологических процессов выщелачивание золота из хвостов флотации руды нижних горизонтов месторождения Джижикрута / **Х.И. Холов**, Ш.Ё. Холов, Ш.Р. Самихов // – Научное знание современности. Казань, 2019, № 5 (29), - С.75-86.

8. **Kholov, Kh.I.** Acetylthiourea leaching gold from tails of flotation deposit Dzhikikrut / **Kh.I. Kholov**, Sh.R. Samikhov // – Norwegian Journal of Development of the International Science. – Global Science Center LP.-2019.- Oslo. Vol.3, - P.70-76.

**9. Холов, Х.И.** Характеристика геологии, минералогический и химический состав руд месторождения Джижикрута / **Х.И. Холов**, Ш.Р. Самихов, А.С. Ниёзов // XLVI Международная научная конференция итоги науки в теории и практике 2018, «Евразийское Научное Объединение». – Москва, 2018, № 12, - С.413-416.

**10. Самихов, Ш.Р.** Обогащение сурьмяных руд / Ш.Р. Самихов, **Х.И. Холов** // Мат. VII всероссийской научно-практической конференции с международным участием посвященная 55-летию кафедры автоматизации производственных процессов. – Иркутск, 2017, - С.95-98.

**11. Холов, Х.И.** Обогащение золотосурьмяных руд месторождения Джижикрут на основе методов флотации / **Х.И. Холов**, Ш.Р. Самихов, М.С. Зарифова // Материалы Республиканской научно – практической конференции «Перспективы развития естественных наук», Российско-Таджикский (Славянский) университет. –Душанбе, 2018, - С.10-15.

**12. Холов, Х.И.** Производство и потребление сурьмы / **Х.И. Холов**, Ш.Р. Самихов, М.С. Зарифова // Материалы Республиканской научно – практической конференции «Техника и технология: основные проблемы, достижения и инновации». – Душанбе, 2018, - С.142-144.

**13. Холов, Х.И.** Минералогические и химические состав руд месторождения Джижикрута / **Х.И. Холов**, Ш.Р. Самихов, А.С. Ниёзов // Республиканская научно - практическая конференция «Проблемы металлургической отрасли, строительства, маркшейдерского дела и пути их решения на современном этапе». – Бустон, 2018, - С.135-140.

**14. Холов Х.И.** Исследование по выщелачиванию золото из хвостов флотации ацетилтиомочевинной / **Х.И. Холов**, Ш.Р. Самихов // XIII Нумановские чтения. Достижения химической науки за 25 лет государственной независимости Республики Таджикистан. Посвящённые 70-летию образования Института химии имени В.И. Никитина Академии наук Республики Таджикистан. – Душанбе, 2016, - С.100-103.

**15. Холов Х.И.** Переработка золотосурьмяных руд / **Х.И. Холов** // Межд.науч.-прак.конференция, посвященная 1150 -летию персидского-таджикского ученого – энциклопедиста, врача, алхимика и философа Абу Бакра ибн Закария Рази. – Душанбе, 2015, -С.128-129.

**16. Холов, Х.И.** Определение содержания благородных металлов из золото-сурьмяно-ртутных руд месторождения Джижикрут с адсорбцией активированным углем-йодометрическим методом / **Х.И. Холов**, Ш.Р. Самихов, М.С. Зарифова // Международная научно – практическая конференция «Проблемы разработка месторождения полезных ископаемых». – Бустон, 2019, - С.38 - 43.