

На правах рукописи



Нормуротов Руслан Идрисович

**РАЗРАБОТКА ХЛОРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА
И СЕРЕБРА ИЗ МАГНИТНОЙ ФРАКЦИИ**

Специальность 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор

Стрижко Леонид Семенович

Официальные оппоненты:
доктор технических наук,
профессор

Брюквин Владимир Александрович

кандидат технических наук

Назаров Юрий Николаевич

Ведущая организация

ОАО «Щелковский завод вторичных драгоценных металлов»

Защита диссертации состоится «14» апреля 2010 г. в 16:00 часов в аудитории К-214 на заседании диссертационного совета Д.212.132.05 при Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119991, г. Москва, Крымский вал, д.3.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке МИСиС.

Автореферат разослан «11» марта 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Лобова Т.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Магнитная фракция (МФ) - продукт, который получается в процессе измельчения золотосодержащей руды за счет истирания металлических шаров. МФ представляет собой мелкодисперсное в значительной степени окисленное железо, извлекаемое в хвосты магнитной перерешетки гравитационного концентрата.

В настоящее время в Узбекистане выявлено более 2,7 тысяч месторождений и перспективных рудопроявлений различных полезных ископаемых, включающих около 100 видов минерального сырья, из которых более 60 уже вовлечены в производство. Разведано более 900 месторождений, в которых подтвержденные запасы оцениваются в 970 млрд. долларов США. При этом следует отметить, что общий минерально-сырьевой потенциал оценивается более чем в 3,3 триллиона долларов США. По ряду важных полезных ископаемых, таких как золото, уран, медь, вольфрам, калийные соли, фосфориты, каолины Узбекистан по подтвержденным запасам и перспективным рудам занимает ведущие места не только в СНГ, но и во всем мире.

Ежегодно в технологическом процессе измельчения золотосодержащей руды на Навоийском горно-металлургическом комбинате (НГМК) (Узбекистан) образуется около 120 тыс. тонн железного скрапа, который удаляется магнитной сепарацией. Содержащееся в нем золото в количестве 9 -20 г/т, вынуждает искать приемлемый способ, как утилизации МФ, так и извлечения золота.

В определенный период МФ отправлялась в Казахстан для производства чугуна. Имелась возможность использования ее в качестве железного штейна при получении меди на Алмалыкском горно-металлургическом комбинате, но при этом железо уходило в шлак. Отправка МФ в г. Бекабад для переплавки железа нецелесообразна из-за безвозвратной потери существенного количества золота.

Ранее на НГМК были проведены исследования по переработке МФ гидро- и пирометаллургическими способами. Пирометаллургический метод состоит в плавке МФ на металл и шлак, в результате чего основное количество золота переходит в чугун, из которого затруднительно и нерентабельно извлекать золото, содержание золота в шлаке незначительно.

Гидрометаллургическая схема утилизации МФ заключается в ее сернокислотной обработке. При этом из 1 т МФ получают 2,4 т сернокислого закисного железа и 80-120 г/т золотосодержащего кека, который направляется на дальнейшую переработку. В результате выщелачивания образуется значительное количество сернокислого закисного железа, которое необходимо утилизировать, что приводит к дополнительным затратам.

Таким образом, пирометаллургическая и гидрометаллургическая схемы переработки МФ относятся к малоэффективным способам извлечения золота. В связи с этим, необходимо искать новые перспективные процессы, способные решить задачу полного и комплексного извлечения ценных компонентов.

Анализ термодинамических и кинетических характеристик извлечения золота различными методами (плавка, цианирование, гидрохлорирование, бромидное и йодидное выщелачивание, хлоридовозгонка, тиосульфатное выщелачивание и т.д.) показал, что из перспективных направлений извлечения золота и серебра из МФ наиболее подходят процессы гидрохлорирования и хлоридовозгонки, которые взяты за основу исследований в данной работе. Физико-химические основы процесса хлорирования такого вида сырья недостаточно изучены, т.к. переработка МФ хлорированием ранее не применялась.

В связи с вышесказанным актуальной является задача разработки эффективной технологии извлечения золота из МФ хлорированием.

Цель работы. Разработка хлоридных методов отделения благородных металлов от цветных металлов и железа и создание на их основе эффективной технологической схемы переработки МФ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. провести термодинамическую оценку возможных реакций гидрохлорирования и хлоридовозгонки МФ;
2. исследовать химический, гранулометрический, фазовый состав золотосодержащей МФ;
3. исследовать процесс гидрохлорирования золота из МФ для выбора оптимальных режимов процесса;
4. исследовать и разработать технологию хлоридовозгонки золотосодержащей МФ;
5. математически обработать экспериментальные данные для получения уравнений, используемых при построении алгоритма автоматического управления процессом хлоридовозгонки золота из МФ;
6. разработать и предложить экономически выгодную технологическую схему и аппаратное оформление процесса хлоридовозгонки золота;
7. провести опытно-промышленную проверку разрабатываемого процесса хлоридовозгонки золотосодержащей МФ.

Методы исследования.

В работе использованы стандартные методы химического, минералогического и ситового анализа, электронная микроскопия (электронный микроскоп Zeiss Observer-Z1m), спектральный эмиссионный метод (масс-спектрометр с индуктивно-связной плазмой (ICP-MS) SPECTRO CI ROS V ISION), а также методы математического моделирования. Для проведения эксперимента использованы промышленное оборудование, печь для обжига и хлоридовозгонки МФ.

Научная новизна работы.

1. Выявлено негативное влияние железа, содержащегося в МФ, на селективность извлечения при гидрохлорировании, выражающееся в снижении концентрации золота в растворе за счет его обратного осаждения в присутствии железа, вследствие чего извлечение золота составляет не более 65 %.
2. Установлен синергетический эффект повышения степени хлорирования золота и серебра при хлоридовозгонке МФ за счет использования в качестве хлоринатора эквимольной смеси NaCl-CaCl_2 , что позволяет повысить извлечение благородных металлов до 97-98 %.
3. Создана математическая модель процесса хлоридовозгонки МФ, позволяющая прогнозировать и контролировать технологические параметры процесса в любой заданный момент времени и для любого состава МФ.

Практическая значимость работы.

1. Установлено повышение извлечения благородных металлов при гидрохлорировании и хлоридовозгонке в результате проведения предварительного окислительного обжига МФ при температуре 700 °С, позволяющего удалить мышьяк, сурьму, серу и перевести железо в нехлорируемую оксидную форму.
2. Разработана технология хлоридовозгонки золота из МФ и определены оптимальные параметры процесса: температура, продолжительность, хлоринатор NaCl-CaCl_2 (1:1), что позволяет достичь степень извлечения золота и серебра 96-97 %.
3. На ОАО «Щелковский завод вторичных драгоценных металлов» проведена опытно-промышленная проверка технологии переработки МФ (1000 кг) хлоридовозгонкой, в результате которой достигнута степень извлечения золота из МФ 97,5 %, а степень концентрирования - 20000 раз. Себестоимость получения 1 гр. золота составила 12,1 доллара США, без учета возможности получения закиси серноокислого железа, которая может быть использована для собственных нужд производства – нейтрализации цианистых стоков ЗИФ.

На защиту выносятся:

- выявленные закономерности окислительного обжига МФ;

- результаты исследований кинетики растворения золота и серебра в растворе гипохлорита и хлорида натрия при различной концентрации и продолжительности;
- результаты исследований физико-химических процессов взаимодействия золотосодержащей МФ различными хлоринаторами при хлоридовозгонке и гидрохлорировании;
- установленные закономерности влияния вида хлорирующего агента на степень извлечения золота и серебра при хлоридовозгонке МФ;
- установленные закономерности влияния цветных металлов, железа и их соединений на поведение золота и серебра при хлоридовозгонке МФ;
- математические уравнения для создания алгоритма автоматического управления процессом хлоридовозгонки;
- установленные технологические параметры разрабатываемого процесса, а также технологическая схема и основной аппарат хлоридовозгонки золотосодержащей МФ.

Апробация работы. Основные положения и результаты доложены на российских и международных конференциях: 61, 62, 63 научная конференция студентов МИСиС, г. Москва (2006-2008 гг.); Международная научно-практическая конференция «Металлургия цветных металлов. Проблемы и перспективы», г. Москва (2009 г.); VIII - Международная конференция «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр», г. Таллинн, Эстонская Республика, (2009 г.); Международная конференция «Ресурсно-экологические проблемы в XXI веке: инновационное недропользование, энергетика, экологическая безопасность и нанотехнологии», г. Алушта, (2009 г.); международная конференция «Стратегия развития минерально-сырьевого комплекса в XXI веке», г. Москва (2004 г.); V конгресс обогатителей стран СНГ, г. Москва (2005 г.).

Публикации. По результатам работы опубликованы четыре статьи из них две в рецензируемом журнале рекомендованном ВАК, девять тезисов докладов в материалах научных конференций и одно ноу-хау

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, выводов и списка литературы. Диссертация изложена на 137 страницах, содержит 26 таблиц, 34 рисунка, список литературы из 101 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы, в котором рассмотрены способы переработки золотосодержащих руд и концентратов.

Анализ литературных данных показал, что в термодинамическом отношении растворение золота возможно не только в цианистых, но и в других растворах, если в них имеются ионы или молекулы, образующие с золотом достаточно прочные комплексы. Все альтернативные растворители (хлоридные, бромидные, тиомочевина, тиоцианаты, тиосульфаты) образуют менее устойчивые золотосодержащие комплексы, чем аурицианид. Поэтому для стабилизации этих комплексов в водной фазе и достижения приемлемых скоростей растворения золота необходима повышенная концентрация растворителей-комплексообразователей, что определяет необходимость оборачиваемости растворов по экономическим и экологическим соображениям.

Технологическим преимуществом цианирования является проведение процесса в щелочной среде, что уменьшает (по сравнению с кислой средой) переход в раствор выщелачивания металлов-примесей, таких как медь, цинк и никель. Кроме того, в щелочной среде можно использовать более дешевые конструкционные материалы.

Поэтому на стороне альтернативных растворителей золота и серебра должны быть веские аргументы, основанные, во-первых, на более высокой скорости выщелачивания и, во-вторых, на меньшей угрозе окружающей среде. Отдельные успехи в этом направлении состоят в использовании в металлургии золота процессов гидрохлорирования, тиомочевинного выщелачивания, хлоридовозгонки и др.

Процесс хлоридовозгонки весьма универсален, его можно использовать для извлечения золота из концентратов практически любого состава. Важное достоинство этого процесса - возможность комплексной переработки концентратов с извлечением из них не только золота и серебра, но и сопутствующих металлов.

Анализ литературных данных по термодинамике и кинетике извлечения золота различными процессами показал, что для переработки МФ с целью извлечения благородных металлов наиболее подходят процессы гидрохлорирования и хлоридовозгонки. Химизм процесса хлорирования МФ недостаточно изучен, что не позволяет рекомендовать его для промышленного применения.

Во второй главе приведены результаты исследований химического, минералогического и фракционного состава золотосодержащей МФ, предложена методика окислительного обжига золотосодержащей МФ, установлено влияние продолжительности и температуры на степень удаления серы и мышьяка при окислительном обжиге.

Минералогический состав МФ состоит из следующих минералов: арсенопирит, пирит и другие сульфиды - 24,3 %; кварц, кальцит, доломит и обломки пород - 2,4 %. Все минералы покрыты оксидными пленками. Химический состав МФ представлен в таблице 1, основная часть МФ представлена классом крупности -0,4+0,16 мм.

Таблица 1 - Химический состав МФ

Номер пробы	Содержание, %				
	S _{общ.}	S* _{сульфид.}	As	Fe	Au, г/т
От партии 100т					
1	1,3	0,21	0,22	84,2	11,6
2	1,1	0,35	0,128	75,5	11,6
От партии 60т 3	0,97	0,65	0,107	79,0	12,0
* Сульфидная форма элемента					

Экспериментальные исследования, процесса окислительного обжига золотосодержащей МФ показали, что максимальная степень перевода сульфидов в оксиды достигается при температуре обжига 650-700 °С.

Обжиг МФ проводился в муфельной печи с подачей воздуха при температуре (670-700 °С). Процесс обжига осуществлялся при интенсивном перемешивании каждые 5 мин в течении 1,5 часов. В результате обжига вес каждой навески увеличился ~ на 6-7 %. Результаты окислительного обжига МФ представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Содержание серы и мышьяка в исходном и обожженном материале и степень окисления железа

Номер пробы	Содержание элемента в исходных материалах, %			Содержание элементов в обожженных материалах, %								
	S _{общ.}	As	Fe _{общ.}	S _{общ.}	S*	As	Fe _{общ.}	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Fe _{мет.}	Fe*	
1	1,3	0,22	84,2	0,08	0,03	-	90,1	89,3	0,3	-	0,5	
2	1,1	0,128	75,5	0,02	0,01	0,03	83,2	82,9	0,2	0,04	-	
3	0,97	0,107	79,0	0,048	0,02	0,02	85,7	85,4	0,3	-	-	

* -сульфидная форма элемента

По полученным результатам обжига степень окисления железа до Fe₂O₃ в процессе обжига в среднем составила ~ 98-99 %, степень десульфурзации ~ 96-98 %.

В результате исследований зависимости степени удаления серы и мышьяка из МФ от температуры и времени процесса обжига установлено (рисунок 1), что степень удаления серы и мышьяка возрастает с увеличением времени и температуры процесса обжига. Степень удаления серы, мышьяка и окисления железа, равная 99,6 %, достигается при обжиге МФ в течение 2 ч. при температуре 700 °С.

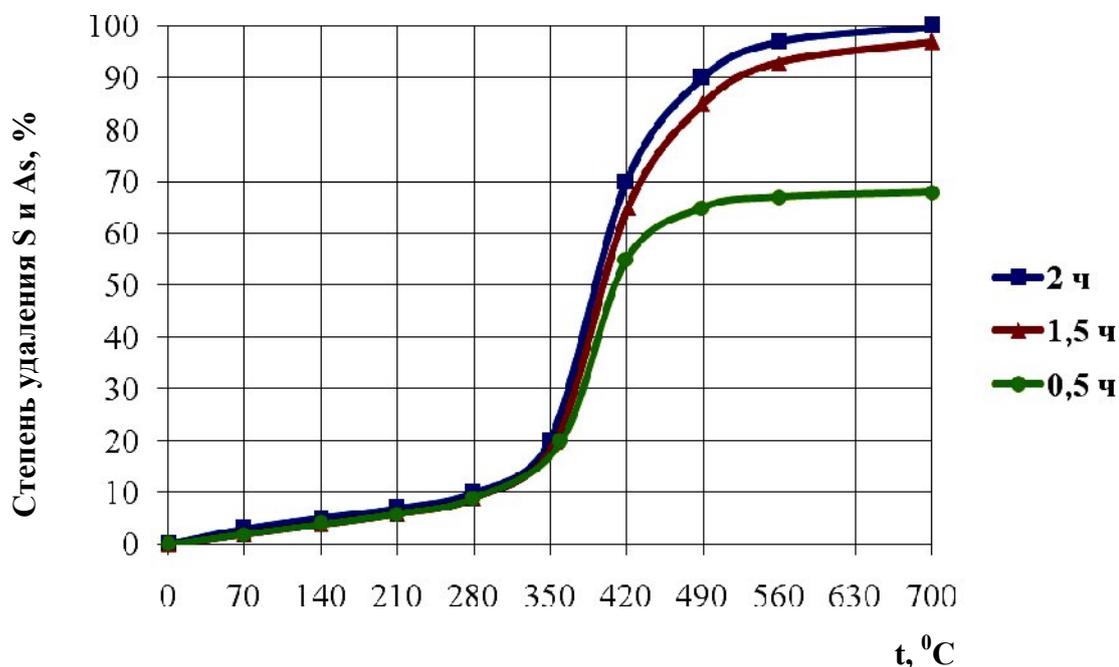


Рисунок 1 - Зависимость степени удаления S и As от температуры и времени окислительного обжига

Основными реакциями процесса обжига МФ являются реакции окисления серы, мышьяка и железа. Окисление пирита начинается при 450-500 °С. Процесс протекает с образованием в качестве промежуточного продукта пирротина, который окисляется до магнетита и далее до гематита. При температурах свыше 600 °С окислению пирита предшествует его диссоциация с образованием пирротина, который, затем окисляется до гематита.

Поведение арсенопирита при окислительном обжиге во многом аналогично поведению пирита. Интенсивное окисление арсенопирита начинается примерно при 450 °С.

В третьей главе представлены результаты исследований по гидрохлорированию золота из МФ. Предварительные результаты показали, что степень растворения золота из необожженной фракции составила – 30 %, из обожженной – 65 %. Поэтому исследована зависимость и установлены оптимальные значения извлечения золота и серебра из МФ.

Для изучения процесса гидрохлорирования золота из МФ использовалась разработанная нами установка.

Гидрохлорированию подвергали МФ следующего состава: 1,1 % S_{общ}, из них 0,35 % S_{сульфид}, 0,13 % As, 75,5 % Fe_{общ} (71 % Fe²⁺, 4,4 % Fe³⁺, 0,1 % Fe_{мет}); 11,6 г/т Au. После ее обжига степень окисления железа до Fe₂O₃ в среднем составила ~ 98÷99 %, степень десульфуризации ~ 96÷98 %. В результате обжига был получен огарок следующего состава: 0,02 % S_{общ}, 0,03 % As, 75,5 % Fe_{общ} (0,2 % Fe²⁺, 75,26 % Fe³⁺, 0,04 % Fe_{мет}); 11,6 г/т Au.

Подготовленный огарок (крупностью < 1 мм) подвергали гидрохлорированию в режиме: исходная жидкая фаза – раствор HCl + NaCl; Ж:Т = 3:1, температура 25-30 °С; продолжительность выщелачивания τ=3 ч; скорость подачи хлора в раствор 25 кг/т. Для сравнения в этих же условиях обрабатывали необожженную МФ. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты гидрохлорирования необоженной и обожженной золотосодержащей МФ

Магнитная фракция	Содержание S, %	Содержание золота, г/т		Степень перехода Me в раствор, %	
		Исходное	В кеке после выщелачивания	Au	Fe
Необоженная	1,1	11,6	8,12	30	80
Обоженная	0,02	11,6	4,06	65	87

Гипохлоритное выщелачивание рассматривается как процесс, альтернативный цианированию. В кислом гипохлоритном растворе хлорида натрия выделяют три области значений pH:

- 1) pH > 7,5 – образуется гипохлорит-ион (ClO⁻);
- 2) pH 3 ÷ 7,5 – хлорноватистая кислота (HClO);
- 3) pH < 3 – газообразный хлор (Cl₂).

Образование хлора идет в несколько стадий. В нормальных условиях переход хлорид-иона в атомарный в водном растворе практически исключается, так как K_p реакции $Cl^- \leftrightarrow Cl + e^-$ при температуре 25 °C составляет весьма незначительную величину ($6,92 \cdot 10^{-64}$ моль/л). Поэтому в этих условиях атомарный хлор не может быть получен и, следовательно, не может выступать в роли окислителя золота. Вследствие чрезвычайной слабости хлорноватистой кислоты можно пренебречь ее ионизацией в нейтральной или кислой среде. Недиссоциированная кислота, являющаяся сильным окислителем, выступает в качестве окислителя золота до Au³⁺. Таким образом, в водном растворе хлора образуются все ионы, участвующие в реакции $Au^{3+} + H^+ + Cl^- \leftrightarrow HAuCl_4$, которая является термодинамически возможной реакцией в сторону образования золотохлористоводородной кислоты.

Кинетическими исследованиями установлена высокая эффективность слабокислой хлорид-гипохлоритной композиции при растворении металлического золота. При концентрациях NaClO ~ 0,133 моль/л (10 г/л), NaCl – 0,35 моль/л (20 г/л) и величине pH среды, близкой к нейтральной (6,0 – 6,5), скорость растворения металла составила порядка $8 \cdot 10^{-9}$ моль/л (5,5 мг/л), что в 3 раза превышает возможности цианистого процесса. Учитывая этот факт, а также меньшую токсичность изучаемой системы, хлорид-гипохлоритные растворы представляются достаточно перспективными в геотехнологических процессах.

На рисунке 2 представлены экспериментальные зависимости величины извлечения золота (φ) из МФ от продолжительности обработки при различной концентрации гипохлорита натрия (C_{NaClO}).

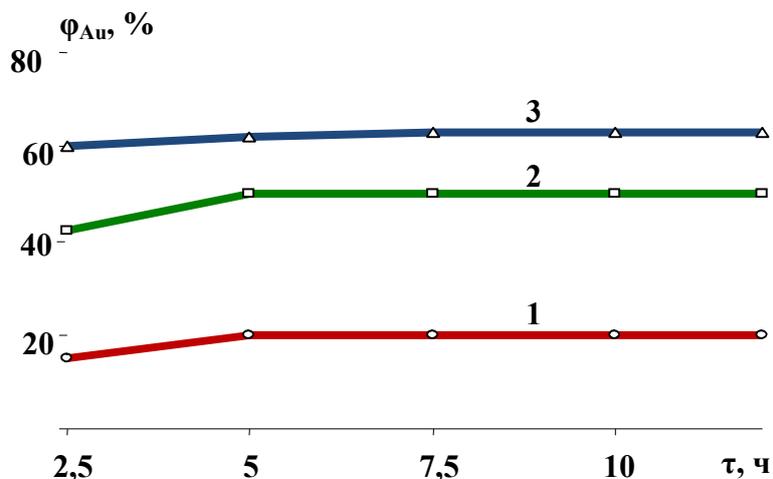


Рисунок 2 - Влияние продолжительности выщелачивания на извлечение золота в раствор при различной концентрации NaClO

C_{NaClO}, г/л: 1 – 0,6, 2 – 2,4, 3 – 5,2;
C_{NaCl} = 25 г/л, pH = 6,5, Ж:Т = 3:1

Установлено, что оптимальными условиями при выщелачивании золота и серебра из МФ являются: $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1\div 1,5\text{ ч}$, Т:Ж = 1:4÷6, концентрация кислоты 3 моль/л, концентрация хлор-иона 3 г/л. Данные по скорости растворения золота и серебра из МФ представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Скорости растворения золота и серебра в хлоридных растворах

Металлы	Реакция растворения	Кинетическое уравнение	Энергия активации, кДж/моль	Примечания
Золото	1) $\text{Au} + 0,5\text{Cl}_2 + \text{Cl}^- \rightarrow \text{AuCl}_2^-$ 2) $\text{AuCl}_2^- + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{AuCl}_4^-$ ($\text{Cl}_2 + \text{HCl}$)	$K_{\text{эксп}} (298\text{ К}) = 4,07 \cdot 10^{-7}$ $\lg K = -1,09 - 1580/T$ $K_{\text{теор}} (\text{реакция 1}) = 1,6 \cdot 10^{-6}$ $K_{\text{теор}} (\text{реакция 2}) = 5,33 \cdot 10^{-7}$	30,3	Реакция имеет первый порядок по начальной концентрации хлора и протекает в диффузионном режиме
Серебро	$2\text{Ag} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{AgCl}$ ($\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}$) $\text{AgCl} + \text{Cl}^- \rightarrow \text{AgCl}_2^-$ ($\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$)	При $[\text{Cl}_2] < 0,02$ моль/л: $K_{\text{эксп}} (298\text{ К}) = 1,23 \cdot 10^{-6}$ При $[\text{Cl}_2] > 0,02$ моль/л: $K_{\text{эксп}} (298\text{ К}) = 1,84 \cdot 10^{-7}$ При $[\text{NaCl}] = 3$ моль/л: $K = 4,15 \cdot 10^{-7}$ $\lg K = -3,16 - 962/T$	9,50 18,4	Процесс определяется диффузией ионов Ag^+ через пленку AgCl Медленной стадией является диффузия AgCl_2^- в объем раствора

При продолжительности выщелачивания 5 часов степень извлечения металла (φ_{Au}) находится в прямой зависимости от концентрации NaClO . Извлечение золота (65-66 %) обеспечивается при наличии в растворах 5,2 г/л NaClO . При этом в среде, близкой к нейтральной, повышение содержания хлорида натрия > 30 г/л не оказывает существенного влияния на переход золота в раствор.

Тонкораспыленный хлор барботировался через весь объем пульпы и тем самым создавались наилучшие условия контакта твердое-газ. Для определения количества непрореагировавшего с пульпой хлора газовый поток из реактора направляли в поглотитель с раствором йодистого калия. Создание внутри реактора небольшого разряжения (19,6-29,4 Па/м²), помимо механического уплотнения, позволило полностью герметизировать его и избежать утечки хлора в атмосферу.

Контроль степени хлорирования золота осуществляли путем анализа на золото остатков хлорирования и растворов.

Железо, а также цветные металлы хорошо подвергаются гидрохлорированию и переходят в раствор (рисунок 3).

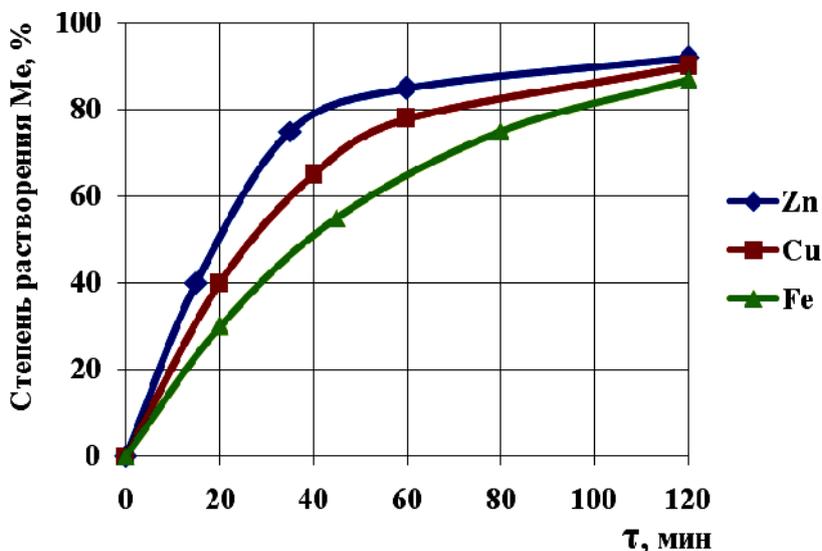


Рисунок 3 - Зависимость степени растворения Zn, Cu и Fe от продолжительности процесса гидрохлорирования МФ
 $C_{\text{NaClO}} = 25$ г/л, pH = 6,5, Ж:Т = 3:1

Но так как в МФ содержание Cu-0,2 %, а Zn – 0,65 %, то концентрация их в растворе небольшая и они не оказывают влияния на дальнейшее извлечение золота. Высокая концентрация железа в растворе в виде FeCl₃, создает негативное влияние на последующее извлечение золота восстанавливая его, а также создается необходимость переработки или утилизации образовавшихся растворов FeCl₃.

Были проведены исследования по изучению поведения серебра в процессе гидрохлорирования. Методом химического анализа установлено, что степень извлечения серебра в раствор составляет не более 2,1 %. Основное количество серебра находится в осадке.

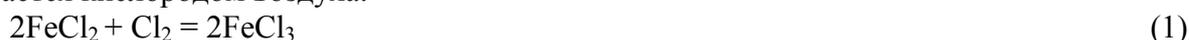
В результате проведенных исследований установлено, что методом гидрохлорирования можно извлечь золото из МФ, однако извлечение золота не высокое и составляет 65 %. Кроме того, при гидрохлорировании в раствор переходит большое количество железа и цветных металлов, которые сложно и дорого перерабатывать. Еще одним недостатком гидрохлорирования является то, что серебро не растворяется и остается в осадке и на его извлечение необходимо дополнительно разрабатывать технологический процесс. Поэтому в дальнейшем нами были изучены закономерности извлечения золота из МФ хлоридовозгонкой.

В четвертой главе рассмотрены исследования по хлоридовозгонке благородных металлов из МФ. В процессе взаимодействия золота с хлором возможно протекание различных реакций. В зависимости от температуры хлорирования участвующие в реакциях вещества находятся в различных агрегатных состояниях: золото – в кристаллическом и жидком, хлор – в газообразном, хлориды золота – в кристаллическом, жидком, газообразном состояниях. Хлор может участвовать в реакциях в молекулярной и атомарной форме.

Хлориды практически всех цветных металлов (рисунок 4) в интервале 600-1050 °С имеют высокое давление пара.

Высокая летучесть MeCl_x позволяет легко и полно переводить их в газовую фазу при хлоридовозгоночном обжиге, не расплавляя всей массы сырья, извлекать малые количества ценных компонентов из большого объема сырья, и проводить их концентрирование.

Обладая высокой химической активностью, хлор взаимодействует с оксидами железа, образуя хлориды FeCl₂ ($t_{пл}=677$ °С, $t_{кип}=1026$ °С) и FeCl₃ ($t_{пл}=319$ °С, $t_{кип}=427$ °С) который разлагается кислородом воздуха:



Процесс основан на разности давлений паров хлоридов металлов. В качестве хлоринаторов применяют хлор, хлорид водорода, хлорид кальция, каменную соль и другие хлориды.

Хлоридовозгонка предусматривает полный перевод металлического золота в летучий хлорид AuCl ($t_{кип}=650$ °С) и последующее улавливание его из газов в виде продукта, концентрированного по металлу.

Как показали исследования, в присутствии порообразующих минералов (SiO₂) образование AuCl протекает по реакции:



Одновременно с золотом хлорируются и переходят в газовую фазу серебро и цветные металлы.

Золото образует летучие хлориды в двух температурных зонах. В присутствии газообразного хлора при нормальном давлении и $t = 200 \div 350$ °С формируется хлорид AuCl₃ ($t_{кип}=265$ °С), а в области $t \geq 650$ °С - AuCl. Несмотря на привлекательность идеи использовать для возгонки золота низкотемпературную зону, технически трудно из-за низкой скорости хлорирования.

В присутствии кислорода хлориды цветных металлов разлагаются с образованием оксидов, причем с повышением его концентрации и температуры скорость процесса увеличивается. Пары воды гидролизуют хлориды тяжелых цветных металлов. Наименее

устойчивы хлориды Fe^{3+} : их разложение в присутствии паров воды начинается с $t = 215^\circ\text{C}$ и завершается при 650°C с образованием Fe_2O_3 .

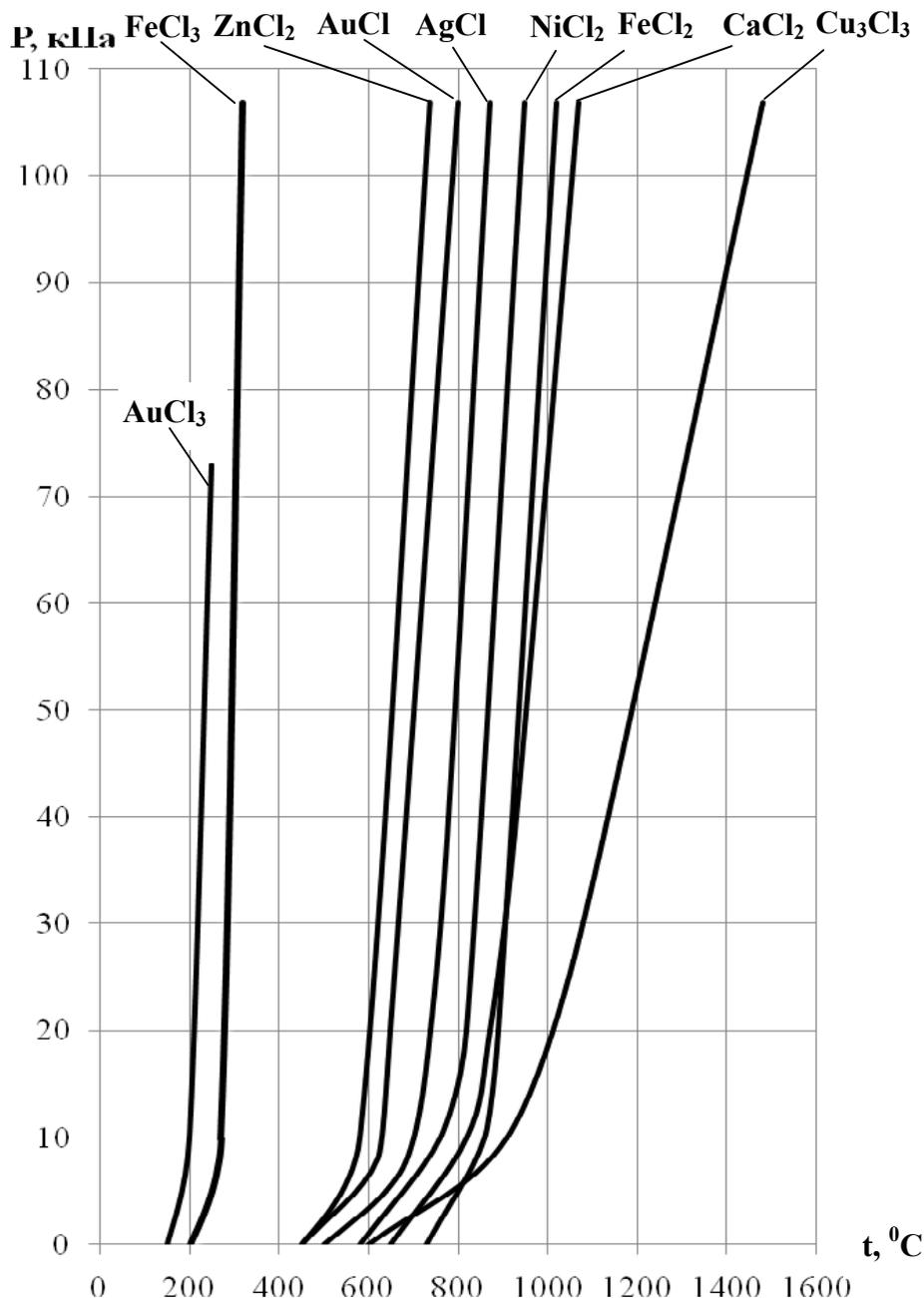


Рисунок 4 - Зависимость давления паров металлов и их соединений от температуры

Была создана установка для изучения кинетики хлоридовозгоночного обжига и его основных закономерностей.

На рисунке 5 приведены данные, характеризующие скорость возгонки золота при различных температурных режимах и подтверждающие возможность полного перехода золота в газовую фазу. В результате опытов были определены оптимальные параметры ведения процесса: температура - 1050°C , время хлорирования 1 ч, скорость пропускания кислородно-аргоновой смеси - 50 л/ч, соотношение CaCl_2 :огарок = 6:100, размер частиц огарка $-0,1+0,074$ мм. При этих условиях извлечение металлов составило, %: 98,0 Ag; 96,5 Pb; 99,4 Zn.

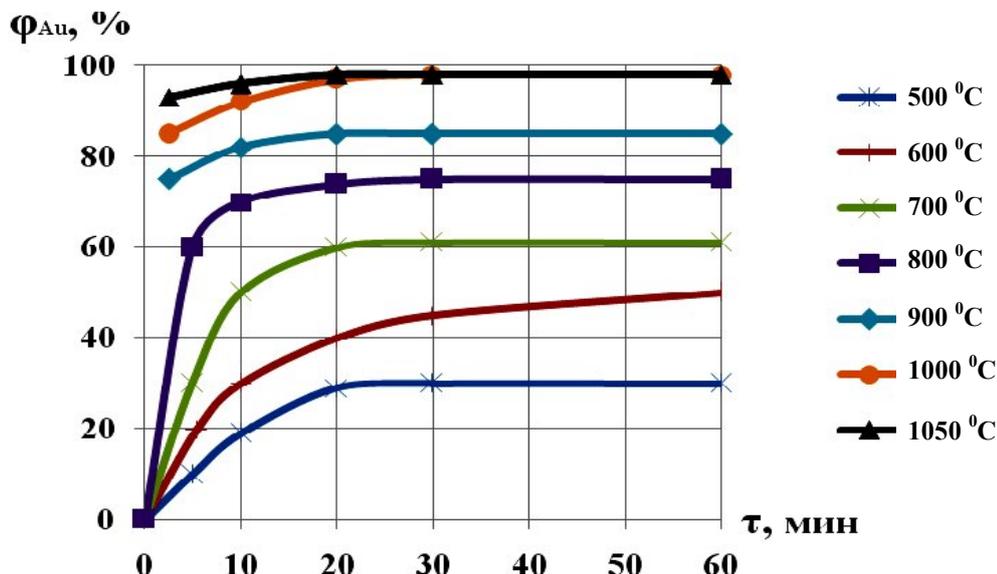


Рисунок 5 - Скорость хлоридовозгонки как функция температуры

При выборе хлорирующего агента для хлоридовозгонки был проведен анализ хлорирования золота газообразным хлором, CaCl_2 и NaCl . В первом случае огарок омывался газами со всех сторон, а в двух последних – его помещали в лодочку вместе с хлоридами. Скорость подачи Cl_2 замеряли ротаметром. Газы предварительно осушали путем пропускания через концентрированную H_2SO_4 и CaCl_2 . Для улавливания хлоридов золота после реакционной трубки газ пропускали через сосуды с водой и щелочью. Температуру процесса поддерживали на уровне $1050\text{ }^\circ\text{C}$ и контролировали термопарой; продолжительность опыта составляла 3 ч.

В ходе опытов выявлено, что степень хлоридовозгонки золота и серебра из огарка зависит от размера частиц (рисунок 6), при размере $0,074 \pm 0,163$ мм степень хлоридовозгонки золота составила 95-96 %, серебра 87-89 %.

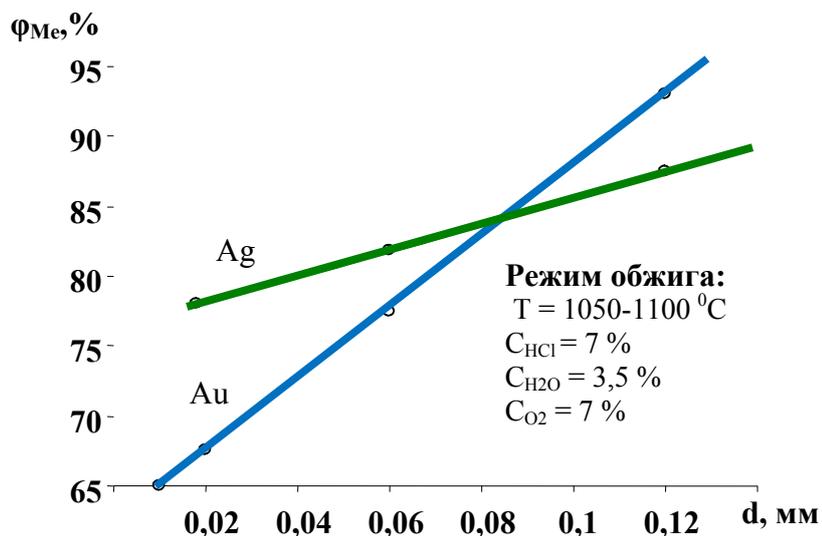


Рисунок 6 - Зависимость степени хлоридовозгонки золота и серебра из огарка от размера частиц

При изучении состава газовой фазы была проанализирована полученная зависимость степени хлоридовозгонки железа от состава газовой фазы и продолжительности процесса, которая представлена на рисунке 7.

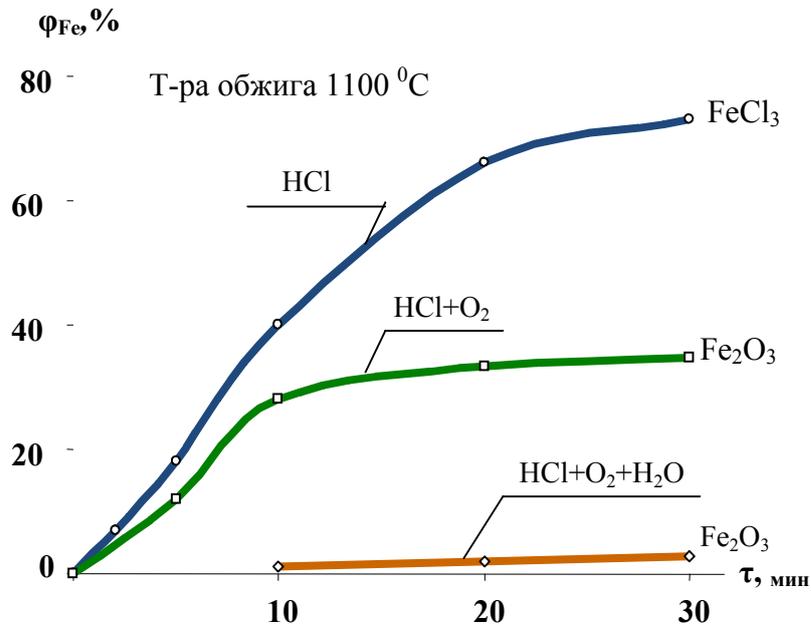


Рисунок 7 - Изменение поведения железа в зависимости от состава газовой смеси и продолжительности обжига

Из рисунка 7 видно, что степень хлоридовозгонки оксида железа мала при составе газовой фазы: (HCl+O₂+H₂O) и составляет ~3-4 %.

В соответствии с фазовым составом огарков обжига проведена термодинамическая оценка изменения свободной энергии Гиббса некоторых возможных реакций хлорирования компонентных и фазовых составляющих МФ поваренной солью при температурах 850 °C и 1050 °C.

Рассматривая AuCl как основной компонент газовой фазы, можно, по-видимому, говорить о его непосредственном влиянии и на механизм сублимационного поведения серебра, результаты экспериментального обоснования и анализа которого изложены выше.

Для решения данной задачи исследовался процесс хлорирования золота, серебра и железа солевым хлоридатором (NaCl).

Изучена возможность хлорирования золота в системе Au – NaCl – SiO₂. Смесь МФ и NaCl в соотношении 1:2 расплавлялась в открытой кварцевой ячейке на воздухе при 900 °C в течении 10 мин., после чего расплав исследовался масс-спектрометрически. Обнаружено, что при указанных параметрах произошло хлорирование значительной части золота. Полученные результаты показывают, что для перевода в газовую фазу золота в виде хлорида достаточно нагревание сырья до температуры, превышающей температуру плавления хлоридатора (800 °C для NaCl).

Скорость испарения золота из МФ с $a_{AuCl}=0,1$ рассчитанная по уравнению Ленгмюра, превышает в 2 раза скорость испарения чистого AuCl. С ростом температуры устойчивость комплексов снижается, но и при температуре 1050 °C скорость испарения золота из сырья составляет согласно расчету 80 % по отношению к чистому AuCl.

Оксид железа FeO термодинамически значительно труднее хлорируется, чем золото. Была изучена зависимость возгонки Fe, FeO и Fe₂O₃ в зависимости от температуры и продолжительности процесса. Смеси Fe, FeO и Fe₂O₃ с NaCl (рисунок 8), сплавлялись в отношении 1:2 в кварцевой ячейке на воздухе при температурах 850 – 1050 °C при исследовании масс-спектрометрически до температуры 1060 °C хлориды железа не обнаружены.

Из рисунка 8 видно, что железо намного лучше хлорируется, чем FeO и Fe₂O₃, что еще раз доказывает необходимость проведения окислительного обжига с целью перевода железа в труднохлорируемые оксиды.

Протекание хлоридовозгонного обжига как синтетических, так и природных соединений благородных и сопутствующих металлов и железа в зависимости от основных факторов (температуры, концентрации и типа хлоринатора, состава газовой фазы, размера частиц и др.) были подробно изучены. Исследования проводились на порошкообразных и гранулированных материалах, основным критерием степени протекания процесса служило остаточное содержание металла в огарках. Содержание золота и серебра в огарке уменьшается по мере повышения температуры и продолжительности процесса, так при $t=900^{\circ}\text{C}$ и $\tau - 80$ мин. содержание золота и серебра в огарке составило от 0,05 до 0,3 %.

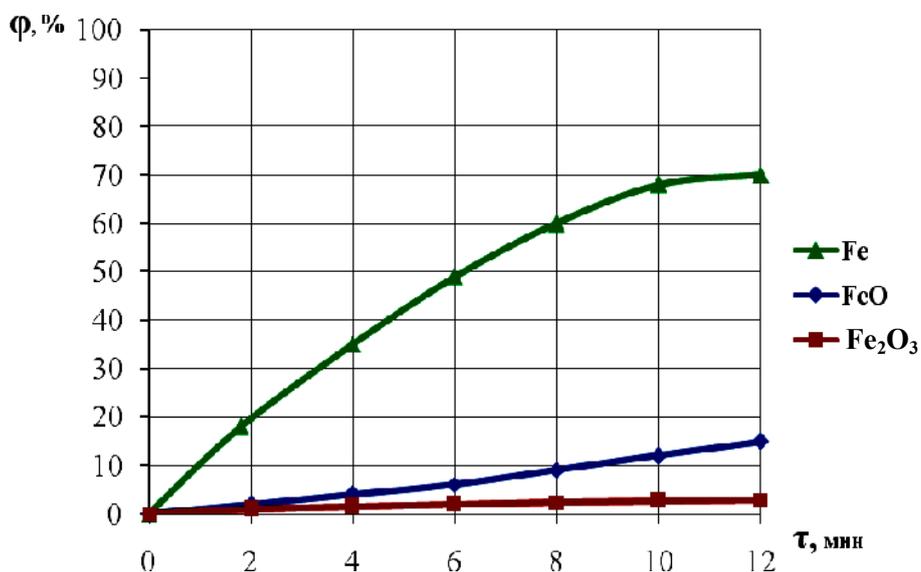


Рисунок 8 - Зависимость хлорирования Fe, FeO и Fe₂O₃ от продолжительности процесса

Исследована кинетика процесса при использовании Cl₂, HCl с воздухом и NaCl. Скорость хлорирования золота различными хлоринаторами показана на рисунке 9.

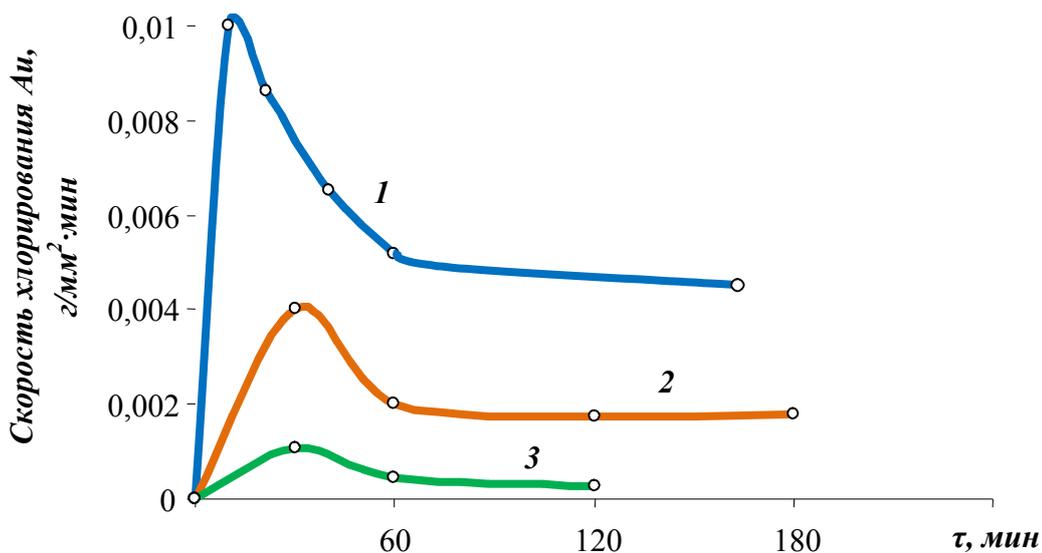


Рисунок 9 - Условная скорость хлорирования золота при 1050 °C газообразным хлором (1), смесью HCl и воздуха (2), NaCl (3).

Показано, что в зависимости от температуры суммарный процесс хлоридовозгонного обжига лимитируется: собственно реакцией хлорирования соединений

извлекаемых металлов (200-600 °С), испарением образовавшихся хлоридов (600-1050 °С), диффузией хлорирующего агента или хлоридов через вмещающую породу или из ядра потока к реакционной поверхности и обратно (выше 700-980 °С).

Выбор хлорирующего агента определяется его химической активностью, физическими и эксплуатационными свойствами, стоимостью, способом осуществления обжига и регенерации хлоринатора и возможностями поставки. Применение Cl_2 обусловлено большой реакционной способностью, широкой распространенностью как реагента в ряде металлургических производств и возможностью изучать реакцию хлорирования металлов и их соединений, не осложненную побочными процессами. Твердые хлоринаторы отличаются доступностью, простотой эксплуатации, низкой ценой, хорошими вяжущими свойствами (что весьма существенно в процессах с грануляцией сырья) и возможностью относительно глубокой регенерации.

Применение Cl_2 и HCl в процессе хлоридовозгонного обжига, возможно, при любом способе его осуществления без ограничения содержания извлекаемых металлов в перерабатываемом сырье. Твердые хлоринаторы (CaCl_2 , NaCl) могут быть использованы в основном для хлоридовозгонного обжига относительно бедного по содержанию благородных металлов сырья (рисунок 10).

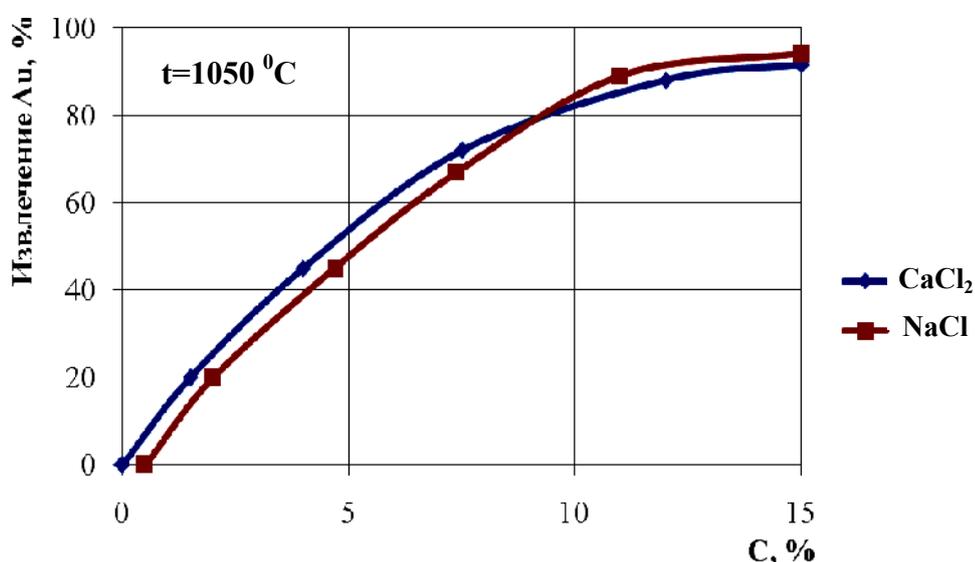


Рисунок 10 - Влияние концентрации хлоринатора на извлечение золота при хлоридовозгонке

Хлориды Na, Ca, K являются высококипящими веществами, давление их паров в условиях реальных процессов хлоридовозгонного обжига мало: при $1050\text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{CaCl}_2} \sim 93,1$ Па, $P_{\text{NaCl}} \sim 1064$ Па. Установлено, что при хлоридовозгонном обжиге происходит разложение твердых хлоринаторов, причем его скорость и состав выделяющихся продуктов определяются температурой, составом газовой фазы, примесями и гидродинамической обстановкой. Повышение концентрации Cl_2 и H_2O в газовой фазе значительно ускоряет разложение твердых хлоринаторов, полнота которого колеблется в пределах 65-99 %. Аналогично влияет повышение температуры процесса. По убывающей скорости разложения твердые хлоринаторы образуют следующий ряд:



Создание оптимальных гидродинамических условий для разложения твердого хлоринатора, например, путем осуществления его в трубчатых печах, повышает скорость процесса в 2-3 раза по сравнению с неподвижным слоем и позволяет снизить его температуру.

В результате исследований установлено действие различных хлоринаторов на извлечение золота в процессе хлоридовозгонки (таблица 5).

Таблица 5 - Хлоридовозгонка золотосодержащей МФ различными хлоринаторами в присутствии воздуха

Хлорирующий агент	Содержание Au в исходном сырье, г/т	Основные режимные параметры				Результаты хлоридовозгонки	
		расход хлорагента, % (Cl ₂ , кг/т)	t, °C	τ, ч	расход воздуха или соотношение хлора и воздуха	содержание Au в остатке, г/т	извлечение Au, %
NaCl	20	5	1020-1050	3	7	0,25	91,5
CaCl ₂	20	5	1020-1050	3	7	0,3	94,1
NaCl + CaCl ₂	20	2,5 + 2,5	1020-1050	3	7	0,2	99,0
Cl ₂	20	50	950-1050	2	1:40	0,25	97,2

Таким образом, извлечение золота зависит от типа применяющегося хлорирующего агента. Наибольшее извлечение золота достигается при применении смеси NaCl+CaCl₂.

Реакционную способность хлоринатора оценивали по остаточному содержанию золота и серебра в огарке и, соответственно, степени отгонки металлов в газовую фазу.

С ростом содержания NaCl в хлорирующем агенте полнота отгонки золота и серебра падает (таблица 6.). Так отгонка золота из частиц размером 0,1-0,16 мм снижается ~ в 1,45 раза, а из частиц ≤ 0,074 мм - в 1,7÷1,8 раза. Это можно объяснить существенно меньшим по сравнению с другими временем пребывания этих частиц.

Таблица 6 - Влияние типа хлоринатора на степень хлоридовозгонки золота и серебра от размера частиц

Тип хлоринатора	Температура хлоридовозгонки, °C	Коэффициент избытка хлоринатора	Размер частиц МФ, мм					
			0,16-0,1		0,1-0,04		-0,04	
			Степень отгонки, %					
			Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
NaCl + CaCl ₂	1050	2	91	90	84	80	81,9	84
NaCl	1050	2	83	84	65	68	65	65
CaCl ₂	1050	2	87,5	86	81,5	82	80,8	82,3
HCl	950	2	90	88	83	81	81,5	83

HCl является эффективным хлоринатором в нейтральной среде чем в окислительной. Процесс устойчиво протекает при температуре 950 °C. Повышение избытка HCl с 1,1 до 1,5 существенно в окислительной среде для всех исследованных металлов и менее значимо в нейтральной. Сопоставление данных по влиянию типа хлоринатора на извлечение благородных металлов при хлоридовозгоночном обжиге показывает, что в аналогичных условиях NaCl является наименее активным хлоринатором. Степень разложения, рассчитанная по остаточному содержанию хлоридов Ca и Na в огарках после обжига (рисунок 11), составила: для CaCl₂ - 80-90% вместо 65-67%, полученных при более жестких условиях (температура 1200 °C продолжительность обжига - 2 часа); для NaCl- 60-70% вместо 55-59% (при содержании в газовой фазе до 10% сернистого газа).

Результаты исследований показали целесообразность проведения дальнейших лабораторных и опытно-промышленных исследований хлоридовозгоночного обжига с применением в качестве хлоринатора NaCl и CaCl₂ и необходимость специального изучения поведения последнего при осуществлении процесса в трубчатой печи.

Анализ проведенных исследований показал, что скорость протекания процесса, степень, а также селективность хлоридовозгоночного обжига МФ определяются в основном температурой, продолжительностью процесса, типом хлоринатора, составом газовой фазы,

размером обжигаемых частиц, формой нахождения извлекаемых металлов в сырье и рядом других параметров (состав вмещающей породы, состояние поверхности частиц и др.). В связи, с чем была создана математическая модель необходимая для прогнозирования технологических параметров процесса.

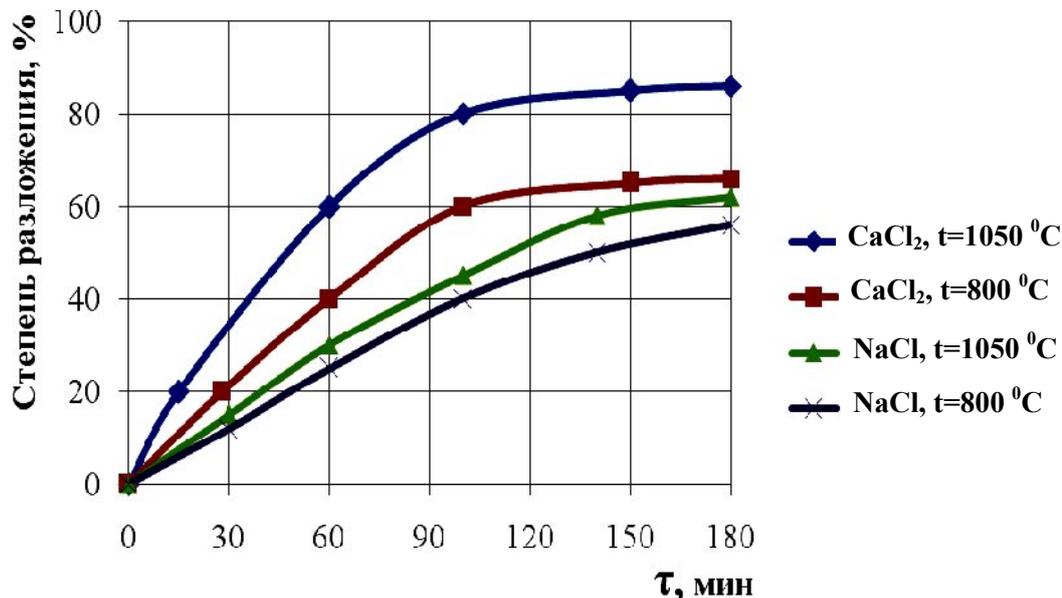


Рисунок 11 - Зависимость степени разложения хлоринатора от времени хлоридовозгоночного обжига

Математическая модель создана сплайнами с применением известных квадратичных кривых Безье. Эти уравнения описывают процессы, протекающие по всей поверхности частиц, скорость которых может лимитироваться как кинетической, так и диффузионной стадиями.

Созданная математическая модель позволит контролировать и прогнозировать технологические параметры, регулируемые в процессе хлоридовозгонки МФ в любой заданный момент времени и для любого состава МФ.

В пятой главе предложена технологическая схема по переработке золотосодержащей МФ и приведены результаты опытно-промышленного опробования хлоридовозгонки золота из МФ. Проведенные лабораторные исследования показали, что методом хлоридовозгоночного обжига можно выделить благородные металлы из МФ. Извлечение золота в возгоны при хлорирующем обжиге достигает 97,6 %, при этом основная часть железа и других компонентов остается в огарке.

На основании результатов исследований по переработке МФ хлоридовозгонкой разработана технологическая схема, приведенная на рисунке 15.

Для проведения опытно-промышленных исследований нами была взята МФ золотоизвлекательной фабрики, по составу близкая к МФ ГМЗ-1 (НГМК).

Сравнительный анализ составов МФ представлен в таблице 7. Материал представляет собой магнитный порошок крупностью $\leq 0,4$ мм.

Таблица 7 - Минералогический состав МФ

Наименование материала	Содержание, %						Немагнитная фракция
	SiO ₂	FeS ₂	FeAsS	CaO	Fe	Au, г/т	
Магнитная фракция ГМЗ-1	1,5	8,3	5,6	0,6	75,5	11,6	1
Магнитная фракция ЗИФ	12,3	3,2	2,0	1,4	77,2	11,1	1,8
	10,7	4,1	2,3	1,2	79,0	21,0	1,6

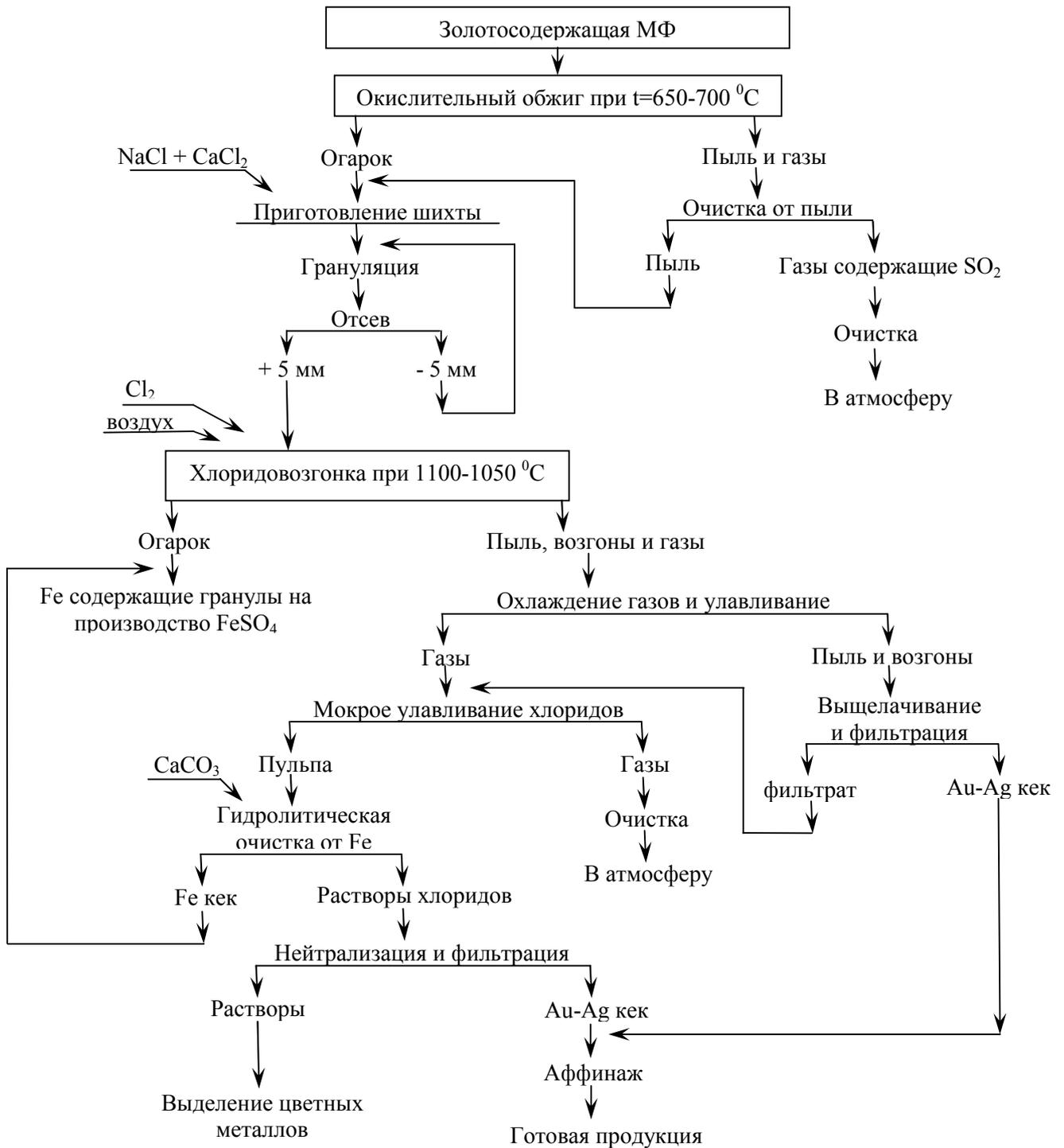


Рисунок 15 - Предлагаемая технологическая схема переработки золотосодержащей МФ хлоридовозгонкой

Окислительный и хлорирующий обжиг проводили в ОАО «Щёлковский завод вторичных драгоценных металлов» на обжиговой печи.

Промышленная двухзонная обжиговая печь производительностью 80 кг/ч применяется на заводе для обжига электронного лома. Небольшая конструктивная модернизация печи, выполненная нами, позволила провести опытно-промышленные испытания по окислительному и хлорирующему обжигу МФ. Процесс окислительного обжига более простой и хорошо отработан, поэтому нами была обожжена сразу вся партия сырья около 1000 кг при условиях, описанных в главе 2. Огарок после обжига был еще раз проанализирован и использован для исследования и уточнения технологических показателей возгонки хлоридов благородных и цветных металлов, а также железа из МФ.

При температуре 1020-1050 °С достигнута степень возгонки золота 97,7 и 96,4 % при остаточном его содержании 0,4-0,5 г/т.

В трубчатой печи наряду с высоким результатом по степени хлорирования и возгонки золота достигнута и высокая степень концентрирования золота. За одну операцию хлорирования получают продукты, обогащенные золотом в сотни - тысячи раз по сравнению с исходным материалом. Такая высокая степень достигается за счет незначительного пылевыноса (3,6-5,2 %) и небольшого выхода осадков улавливания, а также полноты, селективности восстановления хлоридов золота в растворах улавливания. Незначительный выход пылей обусловлен проведением процесса на гранулированном материале, а осадков мокрого улавливания - растворимостью хлоридов цветных металлов и железа в воде, а также низкой степенью хлорирования железа. Результаты хлоридовозгонки представлены в таблице 8.

Степень хлоридовозгонки золота из огарка находится на уровне 97,6 %, однако извлечение золота после мокрого улавливания составляет 92 %, как показали наши исследования это связано с тем, длина трубопровода от печи до скруббера более 6 метров, поэтому хлориды золота частично осаждаются в газоходе, не доходя до скруббера. Поэтому при дальнейшем конструировании промышленной печи необходимо это учесть и расположить скруббер как можно ближе к печи.

Таблица 8 - Результаты хлоридовозгонки золотосодержащей МФ в трубчатой печи

Материал	Au в исходном материале, г/т	Au в остатке хлорирования, г/т	Распределение золота по продуктам хлорирования, %			
			остаток хлорирования	пылевозгоны	осадки мокрого улавливания	растворы улавливания
1	11,1	0,3	2,7	3,3	92	2
2	11,6	0,4	3,5	3,9	91	1,6
3	15,0	0,45	3,8	4,1	89,8	2
3*	15,0	0,7	4,2	4,3	87	2,4

*-Хлорирование газообразным хлором при температуре 1020-1050 °С.

Изучена зависимость извлечения золота из МФ от производительности печи и температуры процесса, установлено, что увеличение производительности выше 20 кг/час не целесообразно.

Была изучена зависимость извлечения золота и железа от расхода хлоринатора. Из предварительных данных главы 4, следует, что с повышением концентрации хлоринатора скорость хлорирования золота увеличивается. Было исследовано поведение железа при увеличении концентрации хлоринатора (рисунок 13).

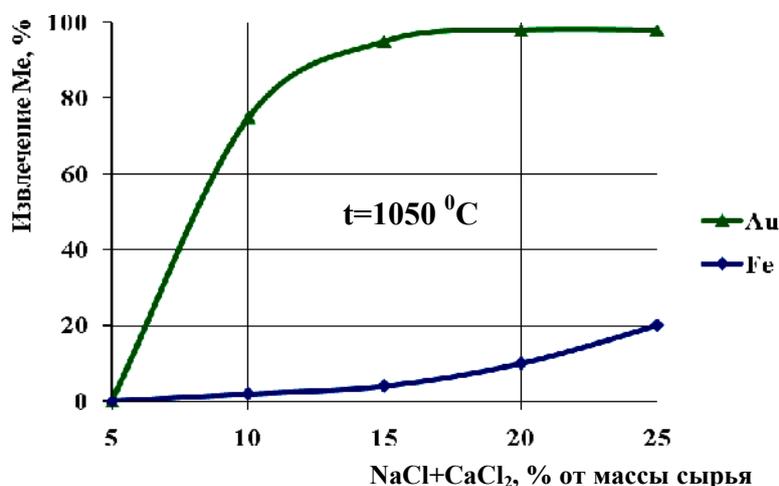
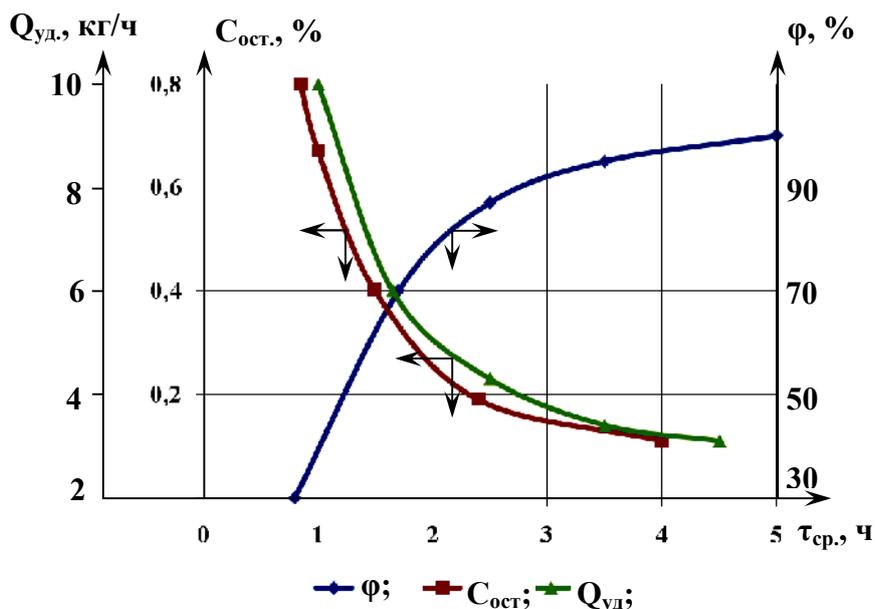


Рисунок 13 - Зависимость извлечения золота и железа из МФ от расхода хлоринатора

В предварительных исследованиях концентрация хлоринатора для полного удаления золота из МФ составляет 15-20 % от массы сырья, установлено, что повышение концентрации хлоринатора не целесообразно, т.к. увеличивается степень хлорирования железа. Очевидно, железо может частично восстанавливаться и переходить в хлориды из-за присутствия некоторых восстановителей, которые остаются в сырье.

Предложенный процесс хлоридовозгоночного обжига МФ, по данным опытно-промышленных испытаний, протекает стабильно и легко управляется. Колебания температуры в зоне не превышали ± 3 %. При обжиге МФ отклонения часовой производительности печи по сырью не превышали ± 10 % от среднего значения остаточного содержания в огарках золота - ± 12 %, серебра - ± 15 % от средних значений 0,28 и 0,42 %, соответственно (рисунок 14).



Режим обжига: $t=1020-1050$ °С; **концентрация в газовой фазе** - $\text{HCl}=5-6,5$ %; $\text{O}_2=5-7$ %; $\text{H}_2\text{O}=4-6$ %; **сырье** – Au-содержащая МФ.

Рисунок 14 - Зависимость остаточного содержания золота в огарках ($C_{ост}$), степени отгонки золота (φ) и удельной производительности печи ($Q_{уд}$) от среднего времени пребывания ($\tau_{ср}$) МФ в печи при хлоридовозгонке

Полученные результаты хлоридовозгоночного обжига МФ с учетом основных режимов и показателей исследований внесены в таблицу 9.

Таблица 9 - Основные режимы и показатели исследований хлоридовозгоночного обжига МФ

Параметры	Ед. измерения	Au-содержащая МФ
1	2	3
Температура обжига	°С	1020-1050
Газовая фаза:		Окислительная
HCl	%	6,9-7,1
H ₂ O	%	3-4
O ₂	%	6-9
Производительность по сырью	кг/ч	5-20
Расход воздуха	м ³ /ч	6,4-6,6
Расход хлоринатора (NaCl + CaCl ₂)	% от исходной массы сырья	10-15
Среднее время пребывания в зоне обжига	час	2-3
Размер частиц	мм	≤ 0,4

1	2	3
Начальное содержание Au в исходном сырье	г/т	11,6-12,0
Конечное содержание Au в огарке	г/т	0,28-0,3
Степень извлечения Au в газовую фазу	%	97,6-97,5
Начальное содержание Fe в исходном сырье	%	75,5-76
Конечное содержание Fe в огарке	%	70-72
Степень извлечения Fe в газовую фазу	%	7,2-5,2

Методом хлоридовозгонки было переработано около 1000 кг МФ. Это позволило отработать основные параметры технологии, определить расходные коэффициенты и с помощью специалистов завода рассчитать себестоимость получения 1 гр. золота методом хлоридовозгоночного обжига.

Пробы прохлорированных окатышей составлялись из проб, отобранных из каждой выгрузки в течение испытания, и подвергались пробирному анализу.

Полное улавливание хлоридовозгонов извлекаемых металлов из газовой фазы, как и очистка обжиговых газов от механического уноса является одним из основных условий успешной промышленной реализации хлоридовозгоночного обжига МФ.

Хлоридные возгоны, проходя систему мокрого улавливания при контакте с водой очищаются от хлоридов цветных металлов, т.е. хлориды цветных металлов переходят в раствор, золото восстанавливают, там же и остается все серебро, которое находится в виде AgCl.

Себестоимость получения 1 гр. золота составила 12,1 доллара США. При этом не учитывалось, что из МФ можно дополнительно получать закись серноокислого железа, которая будет использована для собственных нужд – нейтрализации цианистых стоков ЗИФ и очистки питьевой воды.

Экономический эффект от переработки 1 т МФ при содержании в ней 11,6 г/т золота составит 232 доллара США, что полностью окупает все затраты на переработку при внедрении данной технологии.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основании литературных данных, анализа МФ и предварительных опытов по извлечению благородных металлов из МФ предложены процессы гидрохлорирования и хлоридовозгонки. Извлечение золота при гидрохлорировании составляет 65 %, а при хлоридовозгонке 97,7 %.

2. Экспериментально установлено повышение эффективности извлечения благородных металлов при гидрохлорировании и хлоридовозгонки, за счет проведения предварительного окислительного обжига МФ при температуре 700 °С, позволяющая удалить мышьяк, сурьму, серу и перевести железо в нехлорируемую оксидную форму.

3. Изучено влияние концентраций NaCl и NaClO и продолжительности процесса на степень извлечения золота при гидрохлорировании золота из МФ. Выявлено негативное влияние железа на селективность выделения золота из МФ в процессе гидрохлорирования, выраженное обратным восстановлением золота из раствора железом, перешедшим в раствор, что приводит к снижению извлечения золота. Степень перехода золота в раствор составила 65 % при этом серебро не растворяется и остается в кеке.

4. Исследовано поведение различных хлоринаторов в процессе хлоридовозгоночного обжига. Установлен синергетический эффект повышения степени хлорирования золота и серебра при хлоридовозгонке МФ за счет использования в качестве хлоринатора смеси NaCl-CaCl₂, что позволяет повысить извлечение благородных металлов до 97-98 %.

5. Изучены кинетические и термодинамические закономерности поведения цветных, благородных металлов и железа при хлоридовозгонке, определены кажущиеся энергии активации скорости протекания реакций, влияние температуры и продолжительности процесса на степень извлечения благородных металлов из МФ, на основании которых

определены оптимальные параметры проведения процесса: температура - 1050-1100 °С, время – 3 часа, хлоринатор - смесь NaCl-CaCl₂ (1:1) в количестве 15 % от массы исходного сырья.

6. Разработана и предложена технологическая схема переработки золотосодержащей МФ методом хлоридовозгонки с получением обогащенного золотого концентрата, которая прошла опытно-промышленную проверку на Щелковском заводе вторичных драгоценных металлов на промышленном оборудовании. Переработано около 1000 кг МФ, получен золотосодержащий концентрат с содержанием золота до 40 кг/т и рассчитана себестоимость получения 1 гр. золота, которая составила 12,1 доллара США.

Расчетный экономический эффект от внедрения разработанной технологии при переработке 120 тыс. т. МФ в год составит более 24 млн. долларов США, что полностью окупает все затраты на переработку.

Основное содержание работы отражено в публикациях:

1. Нормуротов Р.И., Стрижко Л.С., Холикулов Д.Б. Исследования по извлечению золота из золотосодержащей магнитной фракции хлорированием //Изв. вузов. Цветная металлургия. 2009 г., № 4, С. 35-38.
2. Нормуротов Р.И., Стрижко Л.С. Холикулов Д.Б. Изучение процесса гидрохлорирования золота при переработке золотосодержащей магнитной фракции //Изв. вузов. Цветная металлургия. 2009 г., № 5, С. 17-19.
3. Нормуротов Р.И., Холикулов Д.Б. Современное состояние и развитие производства золота в Узбекистане //Сборник тезисов докладов международной конференции «Стратегия развития минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» г. Москва. РУДН, 2004 г., С. 70-71.
4. Нормуротов Р.И., Стрижко Л.С. Исследования процессов извлечения золота из магнитной фракции //Сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции «Металлургия цветных металлов. Проблемы и перспективы» г. Москва. МИСиС, 2009 г., С. 182-183.
5. Нормуротов Р.И., Холикулов Д.Б., Шерхонов Х.М., Музаффаров У.У., Шодиева Н.Ж. Организация технологии извлечения золота из малых месторождений Узбекистана //Сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции «Металлургия цветных металлов. Проблемы и перспективы» г. Москва. МИСиС, 2009 г., С. 191-119.
6. Нормуротов Р.И., Холикулов Д.Б., Махатов И.М., Бекназарова О.А., Шержанова Н.Ю. Возможности применения хлорного рафинирования при аффинаже золота //Сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции «Металлургия цветных металлов. Проблемы и перспективы» г. Москва. МИСиС, 2009 г., С. 99-100.
7. Нормуротов Р.И., Лолейт С.И., Стрижко Л.С. Разработка технологии извлечения золота из сырья с повышенным содержанием железа //Сборник тезисов докладов VIII - Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» г. Таллинн, Эстонская Республика, 2009 г., С. 233-235.
8. Нормуротов Р.И., Стрижко Л.С., Холикулов Д.Б. О возможности переработки золотосодержащей магнитной фракции хлоридовозгонкой //Сборник тезисов докладов международной конференции «Ресурсно-экологические проблемы в XXI веке: инновационное недропользование, энергетика, экологическая безопасность и нанотехнологии» г. Алушта, 2009 г., С. 157-159.
9. Нормуротов Р.И., Умарова И.К., Абдурахмонов С.А., Аскарлов М.А., Холикулов Д.Б. Изменение фазового состава сульфида меди при окислении в присутствии воздуха и водяного пара //Вестник ТашГТУ. Ташкент. 2002 г., № 3, С. 99-103.

10. Нормуротов Р.И., Абдурахманов С.А., Холикулов Д.Б., Пиримов А.П., Назаров В.Ф. Статистическая обработка показателей ионной флотации металлов из сернокислотных растворов //Горный вестник Узбекистана. 2005 г., №4, С. 67-69.
11. Нормуротов Р.И., Абдурахманов С.А., Холикулов Д.Б., Эгамов Р.И. Механизм термопарообработки молибденового концентрата //Материалы IV международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» г. Москва-Навои, 2005 г., С. 219-221.
12. Нормуротов Р.И., Абдурахманов С.А., Холикулов Д.Б., Эгамов Р.И., Назаров В.Ф. Изучение возможности переработки забалансовых медных руд месторождения Калмакир //Материалы конгресса. V конгресс обогатителей стран СНГ. III-том. г. Москва. МИСиС. 2005 г., С. 317-319.
13. Ноу-хау № 21-344-2009 ОИС от «15» сентября 2009 г. «Разработка эффективной технологии извлечения золота из магнитной фракции золотосодержащих руд Кызылкумского региона». Зарегистрировано в Депозитарии ноу-хау Отдела защиты интеллектуальной собственности НИТУ «МИСиС».