

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

Кафедра металлургических процессов, теплотехники и технологии
специальных материалов

Логунов Максим Анатольевич

Экстракционное разделение золота и серебра

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Специальность 5В070900 – «Металлургия»

Алматы 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

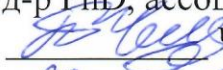
Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

Кафедра металлургических процессов, теплотехники и технологии
специальных материалов

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой МПТиТСМ

д-р PhD, ассоц. профессор

 Чепуштанова Т.А.

« 29 » 05 2019 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Экстракционное разделение золота и серебра»

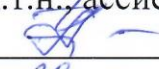
по специальности 5В070900 – «Металлургия»

Выполнил:

Логунов М.А.

Научный руководитель:

к.т.н., ассистент-профессор

 Усольцева Г.А.

« 29 » 05 2019 г.



Алматы 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

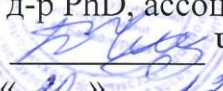
Кафедра металлургических процессов, теплотехники и технологии
специальных материалов

5В070900 – Металлургия

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой МПТиТСМ

д-р PhD, ассоц. профессор

 Чепуштанова Т.А.

« 20 » 12 2018 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Логунову Максиму Анатольевичу

Тема «Экстракционное разделение золота и серебра».

Утверждена приказом ректора университета № 497-п от «20» декабря 2018 г.

Срок сдачи законченной работы (проекта) «30» апреля 2019 г.

Исходные данные к дипломной работе (проекту): золотосодержащий раствор, трибутилфосфат, экстрактор, делительная воронка.

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов или краткое содержание дипломной работы

а) введение: отразить актуальность тематики, дать краткое описание современного состояния проблемы разделения золота и серебра;

б) основная часть, в которой отразить критический анализ литературных данных, дать характеристику производственных процессов в металлургии золота, представить экспериментальные данные по разделению золота и серебра методом экстракции;

в) расчет затрат на выполнение исследований по экстракционному разделению золота и серебра;

г) вредные и опасные факторы, а также приемы безопасной работы при экстракционном разделении золота и серебра.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей) демонстрационный материал на 10-15 слайдах

Рекомендуемая основная литература из 27 наименований

ГРАФИК
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю или консультанту	Примечание
Введение	7.02.2019 г.	
Критический анализ литературных данных по современному состоянию методов получения золота	16.03.2019 г.	
Экспериментальная часть	15.04.2019 г.	
Расчет затрат на выполнение исследований	20.04.2019 г.	
Анализ вредных и опасных факторов при выполнении работ по экстракции золота	25.04.2019 г.	
Заключение	30.04.2019 г.	
Нормоконтроль	30.04.2019 г.	

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу
с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Научный руководитель, консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Расчет затрат на выполнение исследований	Г.А. Усольцева, канд. техн. наук, ассистент- профессор	14.05.2019г.	
Анализ вредных и опасных факторов при выполнении работ по экстракции золота	Г.А. Усольцева, канд. техн. наук, ассистент- профессор	20.05.2019г.	
Нормоконтроль	С.С. Коныратбекова, канд. техн. наук, сениор- лектор	29.05.2019г.	

Научный руководитель  / Усольцева Г.А./

Задание принял к исполнению обучающийся  / Логунов М.А./

Дата « 20 » 12 2018 г.

АНДАТПА

Дипломның нақты көлемі 40 бет. Диплом жұмысы төрт бөлімнен тұрады: 10 сурет, 18 кесте, 27 әдебиет көздері.

Зерттеу объектілері: алтыны бар ерітінді, алтын мен күмісті экстракциялау және қайта резэкстракциялау процестері.

Жұмыстың мақсаты – экстрагент ретінде трибутилфосфатты пайдалана отырып, алтын мен күмісті шығарып алу мүмкіндігін анықтау.

Жұмыс барысында алтынның құрамында ерітінділердің өндірісі бойынша әдеби сын деректердің анализі, алтынды ион алмасу және экстракция арқылы өндіру, және алтынның концентрацияланған ерітінділерден электролиз арқылы сақтауға болатындығы көрсетілген.

Алтынды және күмісті сулы ерітінділерден алу бойынша алынған тәжірибелік деректер осы металдарды бөліп алу үшін экстракция әдісін және экстрагент ретінде кен таралған реагенттерді қолдануға болатындығын, трибутилфосфат класына жататын реагентті пайдаланылуға мүмкін екендігін көрсетеді. Экстрагенттердің экстракциялық қасиеттерін жақсарту үшін краунэфир-6 қосылды. Нәтижесінде элементтердің бөліну коэффициенті 22,37 болды.

Жұмыста судың құрамында алтыны бар ерітінділермен жұмыс істегенде және олардан алтын мен күмісті шығару кезінде мүмкін болатын қауіптер мен қауіптердің талдауы келтірілген. Зерттеулерге жұмсалған шығындарды, яғни экономикалық есептеулерде бағалаудың өтелу мерзімі – 1,5 жыл.

АННОТАЦИЯ

Объем настоящей дипломной работы – 40 страниц. В составе дипломной работы 4 раздела, 10 рисунков, 18 таблиц, 27 источников литературы.

Объекты исследований: золотосодержащие растворы, процессы экстракции и реэкстракции золота и серебра.

Цель работы – выявление возможности экстракционного разделения золота и серебра с использованием в качестве экстрагента на основе трибутилфосфата.

В работе приведен критический анализ литературных данных по получению продуктивных золотосодержащих растворов, извлечению из них золота методами ионного обмена и экстракции, показано, что из концентрированных растворов возможно осаждение золота методом электролиза.

Полученные экспериментальные данные по экстракции золота и серебра из водных растворов позволяют утверждать, что для разделения этих металлов возможно применение экстракционного метода, а в качестве экстрагента можно использовать широко распространенный реагент, относящийся к классу нейтральных экстрагентов – трибутилфосфат. Для улучшения экстракционных свойств экстрагента добавляли краунэфир-6. В результате коэффициент разделения элементов составил 22,37.

В работе приведен анализ вредностей и опасностей, возможных при работе с водными золотосодержащими растворами и экстракции из них золота и серебра. Экономические расчеты затрат на выполнение исследований показали, что предполагаемый срок окупаемости составляет 1,5 года.

SUMMARY

The scope of the present thesis is 40 pages. The thesis consists of 4 sections, 10 pictures, 18 tables, and 27 references.

Subjects of the research are the following: gold-containing solutions, processes of gold and silver extraction and re-extraction.

The purpose of the study is to identify the possibility of gold and silver extraction separation using tributylphosphate as an extraction agent.

The thesis presents the critical analysis of literature data on the production of pregnant gold-containing solutions, as well as the gold recovery from them by ion exchange and extraction. It is shown that the electrolytic gold precipitation from concentrated solutions is possible.

The obtained experimental data on the gold and silver recovery from aqueous solutions suggest that the extractive method can be applied to separate these metals, and tributylphosphate, the widely used reagent belonging to the class of neutral extraction agents, can be used as an extraction agent. Crownether-6 was added to improve the extraction properties of the extraction agents. As a result, the partition coefficient of the elements was 22,37.

The work presents the analysis of hazards and threats that are possible when working with aqueous gold-containing solutions and extracting gold and silver from them. The cost analysis of the research fulfillment showed that the estimated payback period is 1,5 years.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	9
1	Критический анализ литературных данных по современному состоянию методов получения золота	11
1.1	Выщелачивание золота из рудного сырья	11
1.2	Ионообменное извлечение золота из продуктивных растворов	12
1.3	Экстракционное извлечение и концентрирование золота	13
2	Экспериментальная часть	15
2.1	Методика выполнения исследований	15
2.1.1	Исходные материалы и реагенты	15
2.1.2	Методы исследований и анализа	15
2.2	Анализ золотосодержащей руды	16
2.3	Получение продуктивных золотосодержащих растворов	18
2.4	Сорбция и десорбция золота с использованием активированного угля марки JX-102	20
2.5	Экстракционное разделение золота и серебра	22
2.5.1	Экстракция золота и серебра трибутилфосфатом	22
2.5.2	Экстракция золота и серебра смешанным экстрагентом на основе трибутилфосфата и краунэфира-6	28
3	Анализ вредных и опасных факторов при выполнении работ по экстракции золота	31
3.1	Организация работ в золотодобывающей промышленности	31
3.2	Вредные и опасные факторы при работе в золотодобывающей промышленности	31
3.3	Анализ сочетаний вредных воздействий на персонал промплощадки и меры защиты	32
4	Расчет затрат на выполнение исследований	34
	Заключение	37
	Список использованной литературы	39

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние научно-технической проблемы. Получение золота и серебра опирается, прежде всего, на гидрометаллургические методы, так как в рудном сырье этих металлов содержится чаще всего не более двух десятков граммов на тонну [1]. Выщелачивание благородных металлов производят с помощью реагентов, которые образуют с ионами золота и серебра устойчивые комплексы. К числу растворителей относятся щелочные растворы цианида натрия (или калия), тиоционатные растворы и растворы тиомочевины. Для интенсификации процессов применяют окислители или редуцирующие кислород бактерии. Получаемые растворы имеют невысокие содержания по золоту и серебру, в составе растворов присутствуют примеси цветных металлов. Поэтому для переработки таких растворов применяют обычно ионообменные методы, в качестве сорбентов используют при этом либо активированные угли, либо ионообменные смолы. Таким образом достигают хорошего концентрирования золота и серебра в водных растворах, однако разделение этих металлов методами ионного обмена и сорбции на углях не производят. Конечным результатом до стадии аффинажа поэтому является сплав Доре, который представляет собой сплав, содержащий не менее 70 % золота и серебра в своем составе. Если в сплаве Доре содержатся вредные примеси, такие как железо, свинец, теллур, никель, то на аффинаж принимают его неохотно, так как процессы перечистки являются довольно дорогостоящими [2].

Известно, что провести очистку растворов от примесей можно до получения сплава Доре, применяя метод экстракции. Кроме того, с помощью экстракционного метода можно разделять металлы, в том числе серебро и золото. Для этой цели используют нейтральные и анионообменные экстрагенты. Наряду с перечисленным, при экстракционной переработке продуктивных растворов и элюатов можно получать богатые резэкстракты, из которых можно осаждать золото непосредственно электролитически. Метод экстракции является доступным, дешевым, легко поддающимся автоматизации и механизации методом, кроме того, возможность регенерации экстрагентов делает этот метод перспективным для его применения в металлургии благородных металлов [3].

Актуальность работы состоит в том, что при реализации экстракционного разделения серебра и золота до стадии получения сплава Доре, возможно получение богатых индивидуальных резэкстрактов – золота и серебра, которые отличаются, кроме того, малым содержанием примесных компонентов. Такая переработка может позволить организовать получение сплава Доре более высокого качества, что благоприятно отразится на стоимости процессов аффинажа. Поэтому выявление возможности разделения золота и серебра на стадии экстракционной переработки является актуальной и

практически значимой задачей для дальнейшего развития металлургии благородных металлов в Казахстане.

Цель работы – выявление возможности разделения золота и серебра на стадии экстракционной переработки продуктивных растворов.

Задачи работы:

- 1) критический анализ современного состояния проблемы переработки продуктивных золотосодержащих растворов;
- 2) анализ рудного золотосодержащего сырья и его гидрометаллургическая переработка;
- 3) изучение экстракционного разделения золота и серебра с использованием трибутилфосфата и смеси трибутилфосфата с дициклогексил-18-краун-6;
- 4) оценка вредностей и опасностей при проведении выщелачивания и переработки полученных золотосодержащих растворов методом экстракции;
- 5) расчет затраты на выполнение исследований.

Научная новизна работы состоит в том, что установлена возможность экстракционного разделения золота и серебра с помощью смеси нейтральных экстрагентов – трибутилфосфата и дициклогексила-18-краун-6.

Теоретическая и методологическая основы работы. Выполнение дипломной работы основано на теоретических знаниях о процессах выщелачивания, ионного обмена и экстракции золота и серебра. В работе для контроля составов исходного и получаемых золотосодержащих растворов применяли атомно-адсорбционный метод с индуктивно-связанной плазмой и фотоколориметрический метод. При выполнении работы соблюдены правила и техника выполнения экспериментов по экстракции, расчеты производились с использованием теоретических показателей экстракции.

Практическая база выполнения дипломной работы. Работа выполнялась в лаборатории спецкурсов кафедры "Металлургические процессы, теплотехника и технология специальных материалов" Горно-металлургического института имени О.А. Байконурова КазНИТУ имени К.И. Сатпаева. Лаборатория оснащена необходимым оборудованием и реагентами для реализации процессов экстракции. Экстракция золота из хлоридных растворов трибутилфосфатом проводилась в КазНИТУ имени К.И. Сатпаева. Разделы дипломной работы, посвященные получению продуктивных растворов и извлечению из них золота с помощью активированного угля производства КНР марки JX-102, а также экстракция золота и серебра из цианидных растворов смесью ТБФ и краунэфира-6 выполнялись на реальных объектах по месту работы – в Исламской Республике Иран на месторождении Сари-Гунай.

Обоснование необходимости выполнения работы. Выполнение работы является необходимым, так как разделение золота и серебра до стадии получения сплава Доре, позволит получить более качественный сплав, что будет способствовать снижению стоимости процессов аффинажа.

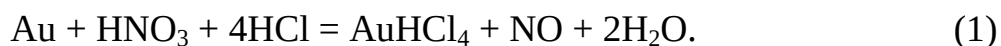
1 Критический анализ литературных данных по современному состоянию методов получения золота

1.1 Выщелачивание золота из рудного сырья

Выщелачивание – это процесс перевода одного или нескольких компонентов твердого вещества в жидкую фазу, с помощью водного или органического растворителя. Выщелачивание включает в себя по меньшей мере два процесса: химический – перевод одного из веществ в растворимое состояние, и физико-химический – растворение в воде.

Наиболее известными методами выщелачивания, применяемыми в современной промышленной практике золотодобычи, являются: кучное; подземное; чановое; бактериальное; флотация. В последнее время в сфере золотодобывающей промышленности наиболее динамично развивающейся технологией стало кучное выщелачивание. Это один из самых дешевых способов выщелачивания металлов из руды.

Среди реактивов, которыми можно растворить золото, самым известным и применяемым является «царская водка». Это смесь азотной и соляной кислот в соотношении 1:3 по объему и 1:2 по массе. Уравнение реакции выглядит так:



Для растворения драгоценного металла, так же можно использовать цианид натрия. Реакция золота с цианидами протекает в присутствии кислорода воздуха: после определенного процесса рудоподготовки сырье обрабатывают растворами цианида натрия, тем самым получая продуктивный раствор цианоурата натрия $\text{Na}[\text{Au}(\text{CN})_2]$. Золото растворяется по реакции:

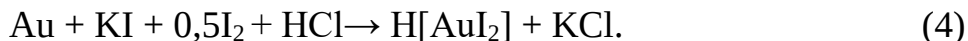


Еще одним из веществ, с помощью которого можно растворить золото, является тиомочевина. Тиокарбамидное выщелачивание известно уже давно [4]. Оно осуществляется в кислой среде при pH 2-4, при которых тиокарбамид (тиомочевина) не окисляется. В качестве окислителя обычно используется серноокислый раствор соли трехвалентного железа $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ или перекись водорода. Растворение золота в тиомочевине идет по реакции:



Галоидные растворы могут быть альтернативными реагентами при выщелачивании золота из золотосодержащего сырья. Среди галоидных систем представляют интерес растворы, содержащие наряду с иодид-ионом элементный иод [5]. Йод является нетоксичным, выщелачивание проводится

при низких концентрациях растворов йода. Реакция растворения золота в иод-иодидной системе в присутствии кислот (например, в присутствии соляной кислоты) описывается уравнением:



В полииодидном растворе возможно образование также комплекса AuI^{4-} . Авторы отмечают [5], что путем подбора концентраций иодид-иона и молекулярного йода можно получить окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), достаточный для растворения золота.

1.2 Ионообменное извлечение золота из продуктивных растворов

В настоящее время технология цианирования с угольной адсорбцией золота является преобладающей в золотодобывающей промышленности. По мнению большинства зарубежных экспертов, данная технология является универсальной и может быть применена при переработке различных по составу золотосодержащих руд и концентратов, исключая серебряные и золотосеребряные руды, для которых более рациональным остается процесс цементации цинковой пылью [6].

Вместе с тем информация, поступающая в последние годы из «дальнего зарубежья» и основанная на результатах научных исследований и опыте работы ряда предприятий, которые осуществляют гидрометаллургическую переработку золоторудного сырья, заставляет несколько усомниться в правомочности тезиса об универсальности угольно-сорбционного процесса и о неоспоримых преимуществах угольных сорбентов для извлечения золота из цианистых сред. В основном это связано с последними достижениями зарубежной отраслевой науки в области изучения, создания и использования ионообменных смол в качестве альтернативы активированным углям.

Многие технические решения, реализованные в ходе внедрения ионного обмена в золотодобывающую промышленность России, носят инновационный характер и нигде до этого в мире не применялись. К таковым могут быть отнесены, в частности, следующие:

- процесс раздельного цианирования песковой и иловой фракций руды (после предварительного ее измельчения в цианистых растворах) с переработкой по ионообменной технологии (RIP) только шламистой части пульпы;
- последовательная ионообменная сорбция серебра и золота из цианистых пульп при переработке комплексных $\text{Au} - \text{Ag}$ руд с раздельной регенерацией получаемых на каждой стадии насыщенных смол;
- ионообменный способ извлечения золота при цианировании углистых флотационных концентратов, характеризующихся высокой естественной

сорбционной активностью (ЗИФ им. Матросова). Особенностью принятой на фабрике технологии является то, что эффект от использования процесса RIP усиливается за счет введения в цианистую пульпу пассивирующих добавок (данном случае – керосина), которые образуют экранирующие пленки на поверхности частиц органического углерода, предотвращая их контакт с растворенным золотом, тем самым снижая потери металла с хвостами;

– применение ионообменной технологии цианирования к продуктам биохимического вскрытия упорных золотосодержащих концентратов на Олимпиадинской ЗИФ с извлечением золота из концентратов на уровне 94 %. Аналогов такой технологии в мире пока не существует [7].

1.3 Экстракционное извлечение и концентрирование золота

Экстракция – извлечение вещества из смеси с помощью растворителя. Применяется для концентрирования и очистки извлекаемого вещества или для разделения и очистки всех компонентов данной смеси.

Экстракция в аналитической химии золота используется достаточно широко как для его концентрирования, так и для отделения сложной матрицы. В некоторых случаях концентрирование расширило пределы применимости инструментальных методов [8]. Высокая полнота и избирательность извлечения золота объясняют широкое использование экстракции его из хлоридных растворов. В частности, экстракция из хлоридных растворов применяется для определения золота в рудах и породах, продуктах обогащения, полупродуктах производств цветных металлов, металлах, полупроводниковых материалов, солях, природных водах и других объектах, а также при определении примесей в металлическом золоте [9-12].

При переработке полиметаллических бедных руд и техногенных отходов селективное извлечение компонентов из них представляется сложной задачей. В таких объектах, наряду с золотом и серебром, содержатся железо, цветные металлы и другие ценные компоненты. При комплексной переработке руд и техногенных отходов технологии их переработки ориентированы не только на извлечение золота и серебра, но и на извлечение других компонентов. Например, для извлечения железа и цинка из раствора сложного состава применяют экстракцию с использованием трибутилфосфата (ТБФ). В этих условиях, если в таких растворах присутствуют золото и серебро, для их извлечения лучше использовать также экстракцию с ТБФ [13, 14].

Среди экстрагентов золота при извлечении из цианидных растворов наиболее часто отмечают амины, амиды, ТБФ, краун-эфиры и синергетические смеси ТБФ с органическими кислотами [15,16]. В то же время информации о разделении золота и серебра методом экстракции немного, отмечено лишь, что имеется зависимость извлечения этих металлов от концентрации цианид-иона в

водном растворе, причем рекомендуют при экстракции золота и серебра содержания цианида – до 0,2 г/л [9, 11, 14-16].

Практически во всех источниках отмечается, что чаще всего экстракция протекает по анионообменному или сольватному механизму, что вызвано как состоянием ионов золота в водных растворах, так и строением органических реагентов. Кроме того, отмечается возможность хелатообразования за счет наличия в структуре экстрагентов донорных атомов кислорода (в случае краун-эфиров) или азота (в случае аминов и амидов) [9, 11, 14-16].

Проблема разделения смесей и выделения в чистом виде индивидуальных химических соединений имеет огромное практическое значение. В последние десятилетия интерес к этой проблеме усилился в связи с развитием металлургии цветных, благородных и редких металлов, полупроводниковой техники. Основными преимуществами экстракционного метода являются высокая избирательность и чистота разделения, возможность работы как с большими, так и с самыми малыми концентрациями, отсутствие загрязнений продуктов, легкость технологического и аппаратного оформления, возможность осуществления непрерывного процесса, автоматизации и, наконец, высокая производительность.

Развитие экстракционных методов достигло такой ступени, что в настоящее время можно экстрагировать любой элемент или разделить любую пару элементов путем применения тех или иных экстракционных систем или выбора соответствующих условий экстракции [15-17].

Выводы по разделу I:

- ввиду малого содержания золота в рудах, его извлечение возможно только гидрометаллургическими способами, в числе которых кучное выщелачивание с получением продуктивных растворов, сорбционное концентрирование, цементация золота цинковой пылью и т.д.;

- основными реагентами для растворения золота являются цианидные и тиосульфатные растворы, имеются сведения о растворении галогенидами и, в частности иод-иодидными растворами;

- в металлургии золота применяют также экстракционные способы, отличающиеся высокой селективностью, удобством реализации, скоростью протекания. В число экстрагентов золота входят в основном анионообменные и нейтральные экстрагенты, а механизм сводится в основном к анионообменному и сольватному;

- гидрометаллургия золота практически полностью основана на способности золота к комплексообразованию, что прослеживается практически во всех технологических процессах – выщелачивания, ионного обмена, экстракции и даже электролиза;

- выбор реагента для извлечения золота из водных растворов должен учитывать способность золота к комплексообразованию, следовательно, для экстракции могут быть отобраны хелатообразующие реагенты и смеси с другими органическими веществами.

2 Экспериментальная часть

2.1 Методика выполнения исследований

2.1.1 Исходные материалы и реагенты

В ходе исследований были использованы следующие материалы и реагенты:

- цианид натрия;
- гидроксид натрия;
- активированный уголь марки JX-102 (производство КНР);
- трибутилфосфат;
- дициклогексил-18-краун-6 (далее – краун-эфир-6);
- золотосодержащая руда месторождения Сари-Гунай (Исламская Республика Иран);
- дистиллированная вода;
- диметилкетон.

2.1.2 Методы исследований и анализа

Химический состав золотосодержащей руды определяли методами полуколичественного оптического эмиссионного спектрального анализа и количественного рентгенофлуоресцентного анализа.

Содержание благородных металлов – золота и серебра – в руде определяли пробирным и пробирно-атомно-абсорбционным методом.

Химический анализ на золото, серебро, железо, серу и тяжелые цветные металлы в руде и растворах выполнялся атомно-абсорбционным и атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой (ICP).

Для анализа золотосодержащая руда измельчалась до однородного состояния с размерами зерен 0,074 мм (98 % зерен). Навеска руды, взятая для выполнения рационального анализа, составляла 1 кг. Рациональный анализ руды производился по методике Иргиредмета.

Обработка данных по выщелачиванию, ионному обмену и экстракции производилась в соответствии с классическими инженерными методами обработки экспериментальных данных.

Выщелачивание золотосодержащей руды проводили агитационным методом при соотношении Ж:Т = 2:1, перемешивая пульпу с помощью механической мешалки. Растворителем служили щелочные растворы цианистого натрия.

Сорбцию золота и серебра из технологических растворов осуществляли в статических и динамических условиях путем пропускания растворов с определенной скоростью через слой активированного угля марки JX-102 в

сорбционной колонке. Насыщение угля и построение изотермы сорбции производили методом переменных концентраций.

Экстракцию золота и серебра из водных растворов производили трибутилфосфатом и его смесью с краун-эфиром-6.

2.2 Анализ золотосодержащей руды

Рентгенофазовый анализ пробы руды показал, что она состоит из литофильных элементов, среди которых преобладают кремний и алюминий, содержание кремния в пересчете на оксид составляло 61,4 %, содержание алюминия в пересчете на его оксид было равно 19,7 %. В небольшом количестве в руде зафиксированы оксиды калия и магния (1,11 %), оксид кальция (0,31 %) и оксид натрия (1,34 %). Особенностью руды является малая ожелезненность – общее содержание железа составляет всего 2,67 %, которое в основном представлено пиритом.

Массовая доля общей серы 0,48 %, сульфидной – 0,22 %. Массовая доля общего мышьяка 0,203 %, окисленных форм мышьяка – 0,122 %, сульфидных формы мышьяка – 0,064 %. Проба отличается малым содержанием цветных металлов (меди, свинца и цинка), которые присутствуют в тысячных и десятых долях процента. Содержание золота в пробе $1,79 \pm 0,35 \div 1,82 \pm 0,36$ г/т, серебра – значительно меньше (менее 1 г/т). Химический состав руды представлен таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав пробы золотосодержащей руды месторождения Сари-Гунай (Исламская Республика Иран)

Компоненты	Содержание	Компоненты	Содержание
г/т			
Au	$1,82 \pm 0,36$	Ag	<1,0
масс. %			
SiO ₂	61,4	Al ₂ O ₃	19,7
MgO	0,80	K ₂ O	7,30
TiO ₂	0,49	Na ₂ O	1,34
CaO	0,31	P ₂ O ₅	0,21
As _{общ.}	0,203	As _{ок.}	0,122
As _{сульф.}	0,064	Fe _{общ.}	2,67
Fe _{ок.}	0,44	Fe _{сульф.}	2,23
S _{общ.}	1,48	S _{сульф.}	1,12
Pb _{общ.}	0,108	Cu _{общ.}	0,009
Cu _{ок.}	0,0023	Cu _{сульф.}	0,0042
Sb	0,046	Zn _{общ.}	0,0082

Результаты рационального анализа золотосодержащей руды (таблица 2) показали, что в доступной форме для цианирования находится почти 80 % золота. В упорной форме – около 20 %. Большая часть золота в упорной форме (11,7 %) связана с карбонатами и гидроксидами железа, а остальное однородно распределено между сульфидными и породообразующими минералами.

Таблица 2 – Формы нахождения золота в золотосодержащей руде месторождения Сари-Гунай (Исламская Республика Иран)

Формы нахождения золота и его связь с рудными компонентами	Распределение золота	
	г/т	%
Упорное: тонковкрапленное в породообразующие минералы	0,09	4,40
Упорное: тонковкрапленное в сульфиды (пирит, арсенопирит и другие)	0,10	4,88
Всего в упорной форме:	0,43	20,98
Свободные зерна с чистой поверхностью (золото, извлекаемое амальгамацией)	0,12	5,85
В виде сростков (золото, извлекаемое цианированием)	1,50	73,17
Всего в цианируемой форме	1,62	79,02
В пленках и минералах, растворимых в соляной кислоте – карбонатах, гидроксидах железа (золото, извлекаемое цианированием после обработки HCl)	0,24	11,70
Итого в исходной руде:	2,05	100,00

Таким образом, в руде найдены следующие формы золота: свободное (извлекаемое амальгамацией), в сростках (цианируемое), извлекаемое цианированием после обработки в соляной кислоте, упорное, тонковкрапленное в сульфидные и породообразующие минералы.

Известно, что золото при дроблении и измельчении руды может быть распределено по крупности неравномерно, поэтому выполнили исследования для следующих классов крупности в миллиметрах: -40+0; -20+0; -10+0; -5+0; -2+0. Результаты исследований приведены в таблице 3, из которой видно, что максимальное содержание золота находится в классе крупности (-5+0) и достигает 2,57 г/т.

Таблица 3 – Распределение золота по классам крупности дробленной золотосодержащей руды месторождения Сари-Гунай

Класс крупности, мм	Содержание Au, г/т	Класс крупности, мм	Содержание Au, г/т
-40+0	1,40	-5+0	2,57
-20+0	2,1	-2+0	2,07
-10+0	2,15		

2.3 Получение продуктивных золотосодержащих растворов

Получение продуктивных золотосодержащих растворов и их переработку проводили в соответствии с действующей на руднике месторождения Сари-Гунай (Исламская Республика Иран) схеме [18], которая представлена на рисунке 1.

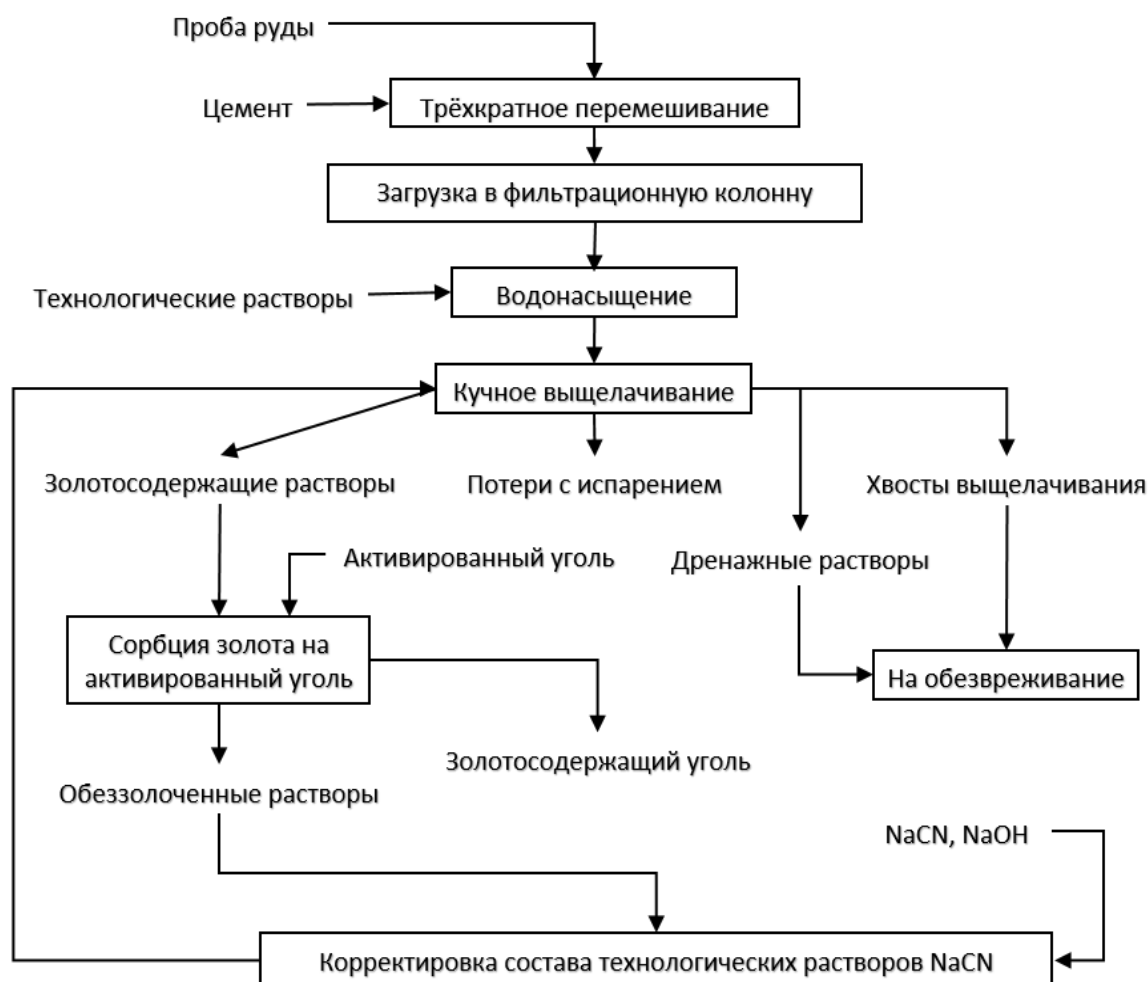


Рисунок 1 – Схема извлечения золота с применением сорбции золота на активированной угле

Выщелачивание проводили при комнатной температуре агитационным методом при соотношении жидкой и твердой фаз Ж:Т = 2:1 раствором цианида натрия концентрацией по цианиду 1 г/л, содержание гидроксида натрия составляло 10 масс. %. Выщелачивание проводили в зависимости от гранулометрического состава руды в течение 72 часов. Промежуточные отборы проб раствора на анализ делали через 24 и 48 часов. Эксперименты по выщелачиванию проводили в двух параллельных опытах. Усредненные результаты опытов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты агитационного выщелачивания золота щелочным раствором цианистого натрия из руды месторождения Сари-Гунай

Класс крупности, мм	Концентрация золота в растворе, мг/л			Содержание золота в кеке, г/т*	Извлечение золота, %*
	24 ч	48 ч	72 ч		
-40+0	0,24	0,38	0,54	0,32	77,1
-20+0	0,69	0,85	0,86	0,38	81,9
-10+0	0,76	0,87	0,88	0,39	81,8
-5+0	0,95	1,02	1,04	0,49	80,9
-2+0	0,94	0,80	0,82	0,43	79,2
Примечание: содержание золота в кеке и извлечение золота в процессе выщелачивания приведено для продолжительности 72 часа.					

Таким образом, несмотря на содержание золота во фракции (-5+0) большее, чем во всех остальных, максимум извлечения золота приходится на фракцию (-20+0) и составляет 81,9 %. Анализ на содержание в растворе серебра при выщелачивании из фракции (-20+0) показал, что его содержание в растворе составляет 0,74 мг/л, а извлечение из руды – 87,1 %.

Наработку раствора для сорбционного извлечения золота в дальнейшем проводили при выщелачивании руды крупностью менее 5 мм (для получения растворов с большим содержанием золота) в течение 48 часов.

Из наработанного раствора (общий объем раствора – 25 л), отбирали на анализ 2 параллельных пробы. Результаты химического анализа продуктивного раствора представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Состав продуктивного золотосодержащего раствора, полученного цианированием руды месторождения Сари-Гунай

Элемент	Au	Ag	Zn	Cu	Hg	As	Fe	Sb	Co
Содержание, мг/л	1,02	0,74	11,3	10,2	9,1	8,9	0,98	0,78	0,13

Кроме указанных элементов в растворе были обнаружены в небольшом количестве никель (около 0,05 мг/л) и свинец (менее 0,01 мг/л).

2.4 Сорбция и десорбция золота с использованием активированного угля марки JX-102

В мировой практике золотодобычи для извлечения золота из продуктивных растворов обычно применяют 2 метода: метод цементации и сорбционный метод. При реализации сорбционного метода чаще других применяют активированные угли (способ наиболее широко распространен на

зарубежных золотоизвлекательных фабриках) и ионообменную смолу АМ-2Б, являющуюся амфолитом (смола применяется в России и в Казахстане). Более предпочтительным считается сорбция на активированном угле, так как процесс является более экономичным, с меньшими капиталовложениями и эксплуатационными расходами.

Кроме того, уголь менее чувствителен к присутствующим примесям цветных металлов, а также из него легче удалить извлеченную ртуть. На руднике месторождения Сари-Гунай с успехом применяют активированный уголь марки JX-102 [18]. В настоящей работе поэтому сорбцию золота проводили именно на угле этой марки.

Для определения параметров процесса сорбции методом переменных концентраций (достигали путем разбавления продуктивного раствора) была построена изотерма сорбции с приведением емкости угля в пересчете массы сорбированного золота в килограммах на 1 тонну угля. Полученные данные представлены на рисунке 2.

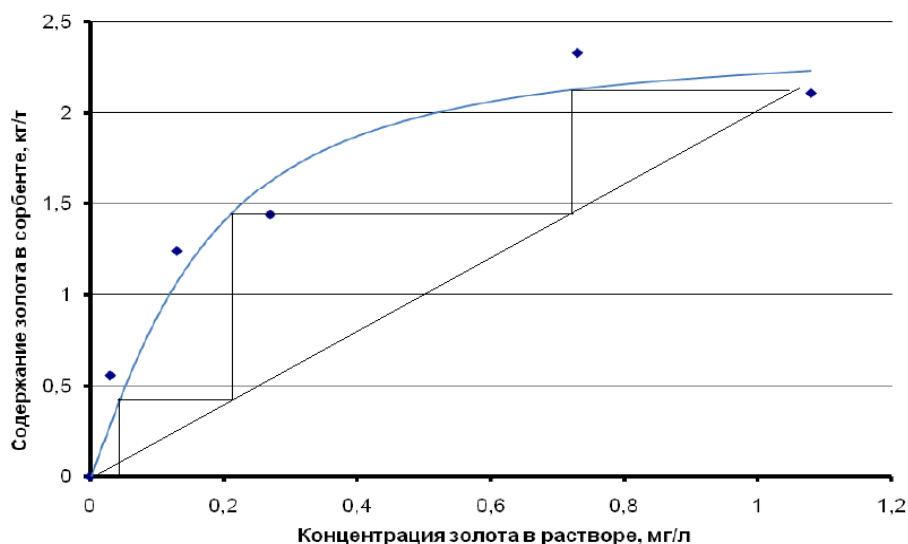


Рисунок 2 – Изотерма сорбции золота на активированном угле марки JX-102

Графическое построение ступеней сорбции показало, что для достижения глубины сорбции до остаточного содержания золота в растворе 0,03 мг/л необходимо минимум 3 ступени сорбции. Практика сорбции показывает, что таких ступеней должно быть не менее 4. Это связано с наличием примесей в продуктивном растворе. Кроме того, из полученных данных следует, что емкость угля по золоту не превышает 2,3 кг/т.

Для оценки показателей сорбции был проведен химический анализ насыщенного угля, результаты которого представлены в таблице 6.

Таким образом, насыщение угля в динамическом режиме показало, что достигается несколько меньшая емкость по золоту, чем установленная при построении изотермы сорбции. Наряду с золотом в фазе угля обнаружены в

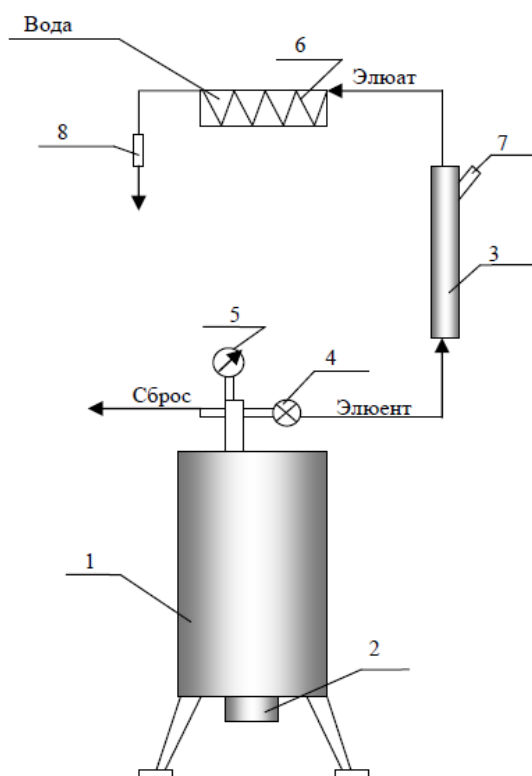
значительном количестве серебро, цветные металлы, марганец и железо. Особое внимание следует уделить тому, что сорбируется ртуть, которая при электролизе будет переходить в состав получаемого сплава Доре.

Таблица 6 – Химический состав насыщенного угля марки JX-102 после сорбции золота из продуктивного золотосодержащего раствора

Опыт	Массовая доля элемента, %								
	Au	Ag	Cu	Zn	Fe	Al	Ni	Mn	Hg
1	1,98	0,165	1,29	0,63	0,091	0,089	0,050	0,067	0,337
2	1,97	0,168	1,26	0,62	0,091	0,094	0,050	0,068	0,349

Примечание: массовая доля элементов Pb, Co, Cd, Cr, As и Sb – менее 0,0050 %.

Десорбцию золота с угля марки JX-102 осуществляли высокотемпературным методом с применением автоклава [18] (рисунок 3) в лаборатории рудника месторождения Сари-Гунай раствором NaOH с концентрацией 10 г/л (результаты десорбции приведены в таблице 7).



1 – автоклав; 2 – нагреватель; 3 – колонка десорбции; 4 – вентиль;
5 – манометр; 6 – холодильник; 7 – термопара; 8 – прободборник

Рисунок 3 – Схема установки десорбции [18]

Для этого в десорбер загрузили насыщенный уголь массой 60 г с содержанием золота 1,98 г/кг. Температура в автоклаве поддерживалась около 180 °С, продолжительность процесса – 1 час. Количество элюента – 10 объемов на 1 объем насыщенного угля, скорость его пропускания через слой угля составляла 6,7-7,0 мл/мин. Содержание Au в элюате составило 256 мг/л, содержание Ag – 184 мг/л. Остальные элементы определять не стали, поскольку основной задачей дипломной работы является установление возможности экстракционного разделения золота и серебра.

Таблица 7 – Химический состав угля после десорбции раствором гидроксида натрия высокотемпературным методом

Опыт	Массовая доля элемента, %								
	Au	Ag	Cu	Zn	Fe	Al	Ni	Mn	Hg
1	0,045	0,023	0,039	0,044	0,083	0,009	0,006	0,021	0,002
2	0,042	0,020	0,043	0,042	0,081	0,008	0,005	0,022	н/о
Примечание: массовая доля элементов Pb, Co, Cd, Cr, As и Sb составляла менее 0,0020 %									

2.5 Экстракционное разделение золота и серебра

2.5.1 Экстракция золота и серебра трибутилфосфатом

Известен метод разделения золота и серебра с применением трибутилфосфата из солянокислых растворов. В таких растворах эти металлы содержатся в основном в виде анионных хлоридных комплексов $[\text{AuCl}_2]^-$, $[\text{AuCl}_4]^-$, $[\text{AgCl}_2]^-$, $[\text{AgCl}_3]^{2-}$, $[\text{AgCl}_4]^{3-}$ и др. [19]. В цианистых щелочных растворах также отмечается наличие анионных комплексов, следовательно, возможно, что трибутилфосфат будет экстрагировать золото и серебро из полученных элюатов.

Трибутилфосфат – трибутиловый эфир фосфорной кислоты со структурной формулой, изображенной на рисунке 4. Экстракция анионных комплексов по мнению авторов [19] протекает по сольватному механизму.

Экстракцию проводили в делительных воронках объемом 200 мл, которые устанавливались на вибрационный встряхиватель. Сначала установили время, необходимое для достижения равновесия в процессе экстракции. Экстракцию проводили при соотношении водной и органической фаз 1:1 и использовании неразбавленного трибутилфосфата. Содержание золота в исходном растворе составляло 0,256 г/л, содержание серебра – 0,184 г/л. Контроль в данных экспериментах проводили только по содержанию золота. Полученные результаты представлены в таблице 8 и на рисунке 5.

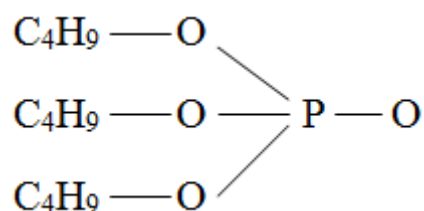


Рисунок 4 – Структурная формула трибутилфосфата

Таблица 8 – Результаты экстракционного извлечения золота трибутилфосфатом в зависимости от продолжительности процесса

τ., мин	C _{раф} , г/л	C _{о.ф.} , г/л	D	lgD	E, %
5	0,166	0,090	0,542	-0,266	35,3
10	0,116	0,140	1,207	0,082	54,6
20	0,087	0,169	1,943	0,288	66,2
30	0,083	0,173	2,084	0,319	67,4
60	0,082	0,174	2,122	0,327	67,9

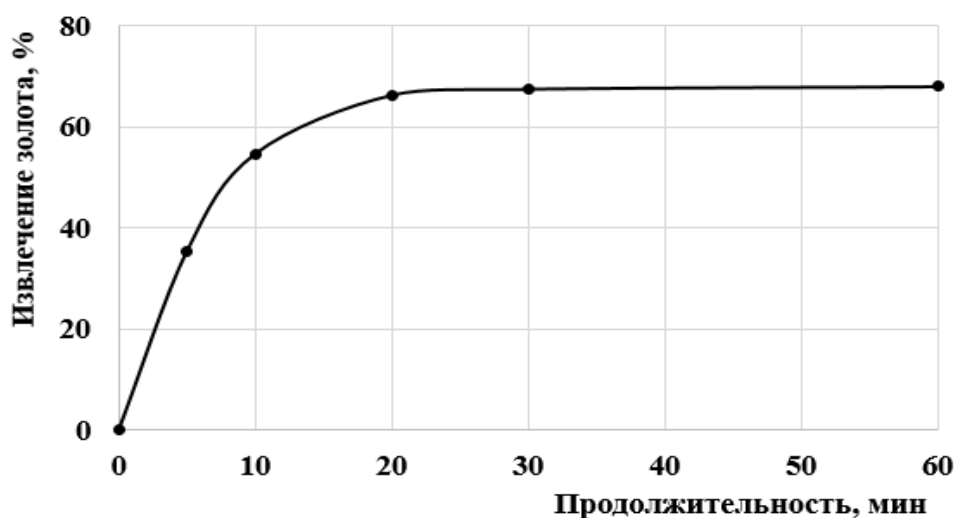


Рисунок 5 – Влияние продолжительности экстракции трибутилфосфатом на извлечение золота из цианистого щелочного элюата

Как следует из полученных данных, равновесие устанавливается на 30 минуте экстракции. Извлечение золота в этих условиях составляет 67,4 %, поэтому было решено сначала установить влияние концентрации золота на экстракционные характеристики трибутилфосфата, потому как золото – основной извлекаемый компонент.

Изучение влияния этого фактора проводили на специально приготовленных модельных растворах, полученных упариванием

золотосодержащего раствора в 4 раза и затем разбавлением части раствора до требуемой концентрации. Продолжительность экстракции во всех опытах составляла 30 минут. В ходе экспериментов контролировали содержание в водной фазе только золота.

В результате экспериментов методом переменных концентраций была построена изотерма экстракции и графическим методом определено минимальное количество ступеней экстракции. Полученные результаты представлены в таблице 9 и на рисунке 6.

Таблица 9 – Влияние концентрации золота в водном растворе на его извлечение трибутилфосфатом

$C_{исх}, \text{ г/л}$	$C_{раф}, \text{ г/л}$	$C_{о.ф.}, \text{ г/л}$	D	lgD	E, %
0,098	0,014	0,084	6,000	0,778	85,3
0,256	0,083	0,173	2,084	0,319	67,4
0,408	0,168	0,239	1,423	0,153	58,7
0,835	0,486	0,349	0,718	-0,144	41,8
1,057	0,706	0,351	0,497	-0,303	33,2

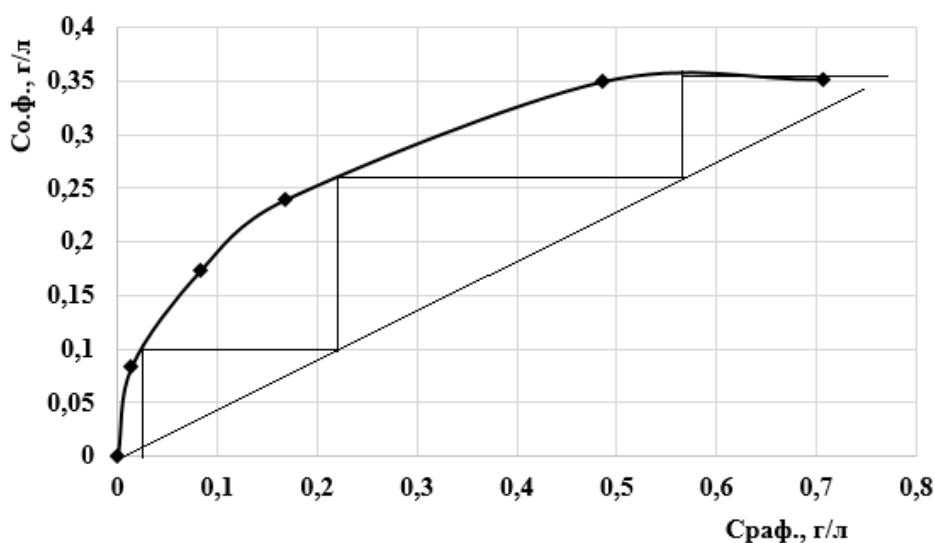


Рисунок 6 – Изотерма экстракции золота из цианистых растворов трибутилфосфатом

Как видим, даже при содержании золота около 100 мг/л его извлечение трибутилфосфатом достигает всего лишь 85,3 %, изотерма экстракции имеет выпуклый вид, минимальное количество ступеней экстракции – три.

Следующей задачей является изучение влияния соотношения органической и водной фаз на процесс экстракции благородных металлов. Соотношение фаз варьировали в пределах: $V_{О}:V_{В} = 0,5:1 \div 5:1$. Исходное

содержание золота и серебра в водном растворе составляло 0,256 и 0,184 г/л соответственно. Продолжительность экстракции – 30 минут. В ходе экспериментов контролировали содержание в водной фазе как золота, так и серебра. Полученные данные представлены в таблице 10 и на рисунке 7.

Таблица 10 – Влияние соотношения фаз на извлечение золота и серебра из продуктивного раствора трибутилфосфатом

$V_O:V_B$	$C_{\text{раф}}, \text{ г/л}$	$C_{\text{о.ф.}}, \text{ г/л}$	D_{Me}	$\lg D_{\text{Me}}$	$E, \%$	$\beta_{\text{Ag/Au}}$
Экстракция золота						
0,5:1	0,103	0,306	2,971	0,473	59,7	1,29
1:1	0,083	0,173	2,084	0,319	67,4	1,73
2:1	0,054	0,101	1,870	0,272	78,8	1,71
3,5:1	0,039	0,062	1,587	0,200	84,6	1,77
5:1	0,033	0,045	1,351	0,131	87,3	1,79
Экстракция серебра						
0,5:1	0,063	0,242	3,841	0,584	65,7	1,29
1:1	0,040	0,144	3,600	0,556	78,4	1,73
2:1	0,025	0,080	3,200	0,505	86,3	1,71
3,5:1	0,017	0,048	2,807	0,448	90,6	1,77
5:1	0,014	0,034	2,429	0,385	92,2	1,79

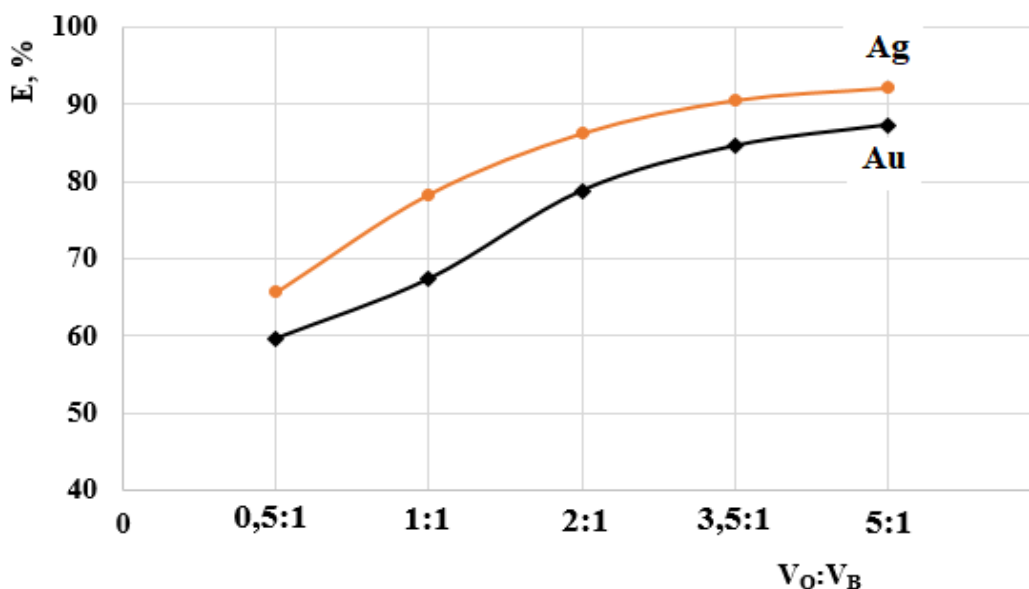


Рисунок 7 – Влияние соотношения фаз на степень извлечения золота и серебра из продуктивных растворов

Полученные данные показали, что серебро извлекается из водного раствора трибутилфосфатом несколько лучше, чем золото, причем с ростом объема органической фазы растет не только степень извлечения серебра, но и

коэффициент разделения и достигает величины $\beta_{\text{Ag}/\text{Au}} = 1,79$. Исходя из этих данных, экстракция благородных металлов из цианистых щелочных растворов не позволяет качественно разделить эти металлы. Возможно, что разделить их удастся на стадии реэкстракции. Увеличивать количество органической фазы вряд ли будет экономически выгодным, несмотря на то, что при соотношении $V_{\text{O}}:V_{\text{B}} = 5:1$ достигали извлечения 87,3 % золота и 91,5 % серебра.

Известно, что на процесс экстракции золота и серебра может оказывать влияние концентрация цианид-иона [20]. Поэтому были проведены эксперименты по экстракции этих благородных металлов из растворов с разным содержанием цианида натрия, что достигалось добавлением концентрированного раствора цианида натрия в золотосодержащий раствор, а минимальное количество определялось наличием цианида натрия в исходной водной фазе.

Условия экстракции: продолжительность – 30 минут, соотношение фаз – 1:1, содержание золота и серебра в водном растворе – 0,256 и 0,184 г/л соответственно. В ходе экспериментов контролировали содержание в водной фазе как золота, так и серебра. Результаты экспериментов представлены в таблице 11 и на рисунке 8.

Таблица 11 – Влияние концентрации цианида натрия на извлечение золота и серебра из продуктивного раствора трибутилфосфатом

C_{NaCN} , г/л	$C_{\text{раф}}$, г/л	$C_{\text{о.ф.}}$, г/л	D_{Me}	$\lg D_{\text{Me}}$	E, %	$\beta_{\text{Ag}/\text{Au}}$
Экстракция золота						
0,65	0,083	0,173	2,084	0,319	67,4	1,73
0,85	0,089	0,167	1,876	0,273	65,2	6,01
1,20	0,099	0,157	1,586	0,200	61,5	4,64
2,05	0,102	0,154	1,510	0,179	60,3	3,14
2,60	0,104	0,152	1,462	0,165	59,6	2,81
Экстракция серебра						
0,65	0,040	0,144	3,600	0,556	78,4	1,73
0,85	0,015	0,169	11,267	1,052	91,8	6,01
1,20	0,022	0,162	7,364	0,867	88,3	4,64
2,05	0,032	0,152	4,750	0,767	82,6	3,14
2,60	0,034	0,150	4,112	0,614	81,4	2,81

Из полученных данных видно, что коэффициенты распределения золота и серебра зависят от концентрации цианида натрия в водном растворе, причем изменение коэффициента распределения серебра имеет максимум в области 0,85-1,0 г/л по цианиду натрия, в то время как коэффициент распределения золота постепенно уменьшается с ростом содержания цианида натрия в водном растворе.

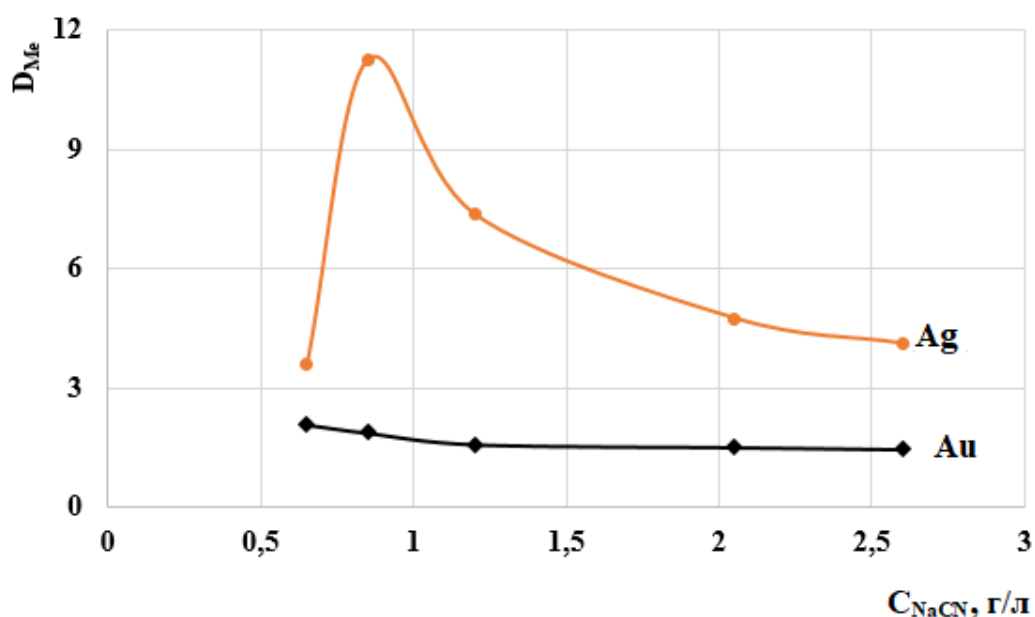


Рисунок 8 – Влияние концентрации цианида натрия в золотосодержащем растворе на величину коэффициентов распределения золота и серебра при экстракции трибутилфосфатом

Такое поведение металлов авторы [21] объясняют тем, что с ростом концентрации цианида растет устойчивость сольватов серебра с эфирами ввиду их меньшего радиуса по сравнению с сольватами золота. Этими же авторами было установлено, что золото и серебро количественно извлекаются из цианистых растворов 0,05 М раствором дициклогексил-18-краун-6 в пентахлорэтаноле. Примерная структура получаемого сольвата согласно представлениям авторов статьи [20], приведена на рисунке 9.

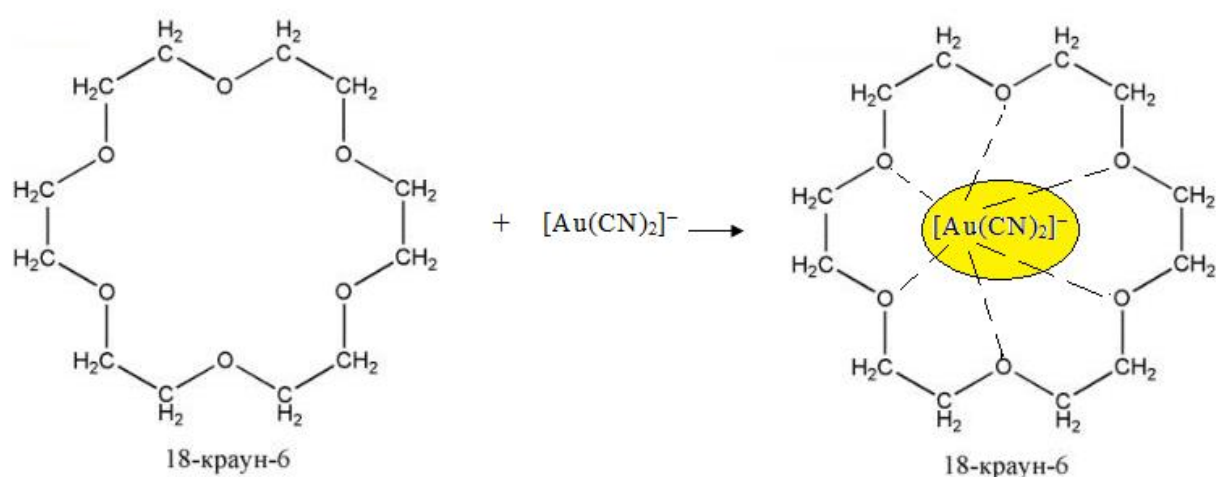


Рисунок 9 – Примерная схема образования сольвата краунэфира дициклогексил-18-краун-6 с цианидным комплексом золота

Поэтому было решено опробовать добавку этого эфира в состав трибутилфосфата. Возможно это усилит эффект разделения металлов на стадии экстракции.

2.5.2 Экстракция золота и серебра смешанным экстрагентом на основе трибутилфосфата и краунэфира-6

Ввиду ограниченного количества дициклогексила-18-краун-6 в состав трибутилфосфата ввели 5 % (по объему) указанного циклического эфира. Условия экстракции: продолжительность – 30 минут, соотношение фаз – 1:1, содержание золота и серебра в водном растворе – 0,256 и 0,184 г/л соответственно. В ходе экспериментов меняли содержание цианида натрия и контролировали содержание в водной фазе золота и серебра. Результаты экспериментов представлены в таблице 12 и на рисунке 10.

Таблица 12 – Экстракция золота и серебра смешанным экстрагентом на основе трибутилфосфата и циклического эфира дициклогексил-18-краун-6

C_{NaCN} , г/л	$C_{\text{раф}}$, г/л	$C_{\text{о.ф.}}$, г/л	D_{Me}	$\lg D_{\text{Me}}$	E, %	$\beta_{\text{Ag/Au}}$
Экстракция золота						
0,65	0,080	0,176	2,200	0,342	68,8	3,18
0,85	0,085	0,171	2,012	0,304	66,9	22,37
1,20	0,093	0,163	1,753	0,243	63,7	9,93
2,05	0,096	0,160	1,667	0,222	62,4	5,89
2,60	0,098	0,158	1,612	0,207	61,8	3,61
Экстракция серебра						
0,65	0,023	0,161	7,000	0,845	87,4	3,18
0,85	0,004	0,180	45,000	1,653	97,8	22,37
1,20	0,010	0,174	17,400	1,241	94,5	9,93
2,05	0,017	0,167	9,824	0,992	90,8	5,89
2,60	0,027	0,157	5,815	0,764	85,3	3,61

Из таблицы 12 видно, что на экстракцию золота добавка краунэфира-6 в изучаемых условиях повлияла мало – степень извлечения металла повысилась в среднем примерно на 2 % при всех концентрациях цианида натрия, тенденция к снижению извлечения золота сохранилась. В то же время извлечение серебра при экстракции из исходного раствора повысилось почти на 10 %, а коэффициент разделения металлов при добавке к трибутилфосфату краун-эфира-6 увеличился до значения $\beta_{\text{Ag/Au}} = 22,37$, что говорит о положительном влиянии добавки краун-эфира-6 на процесс разделения золота и серебра на стадии экстракции.

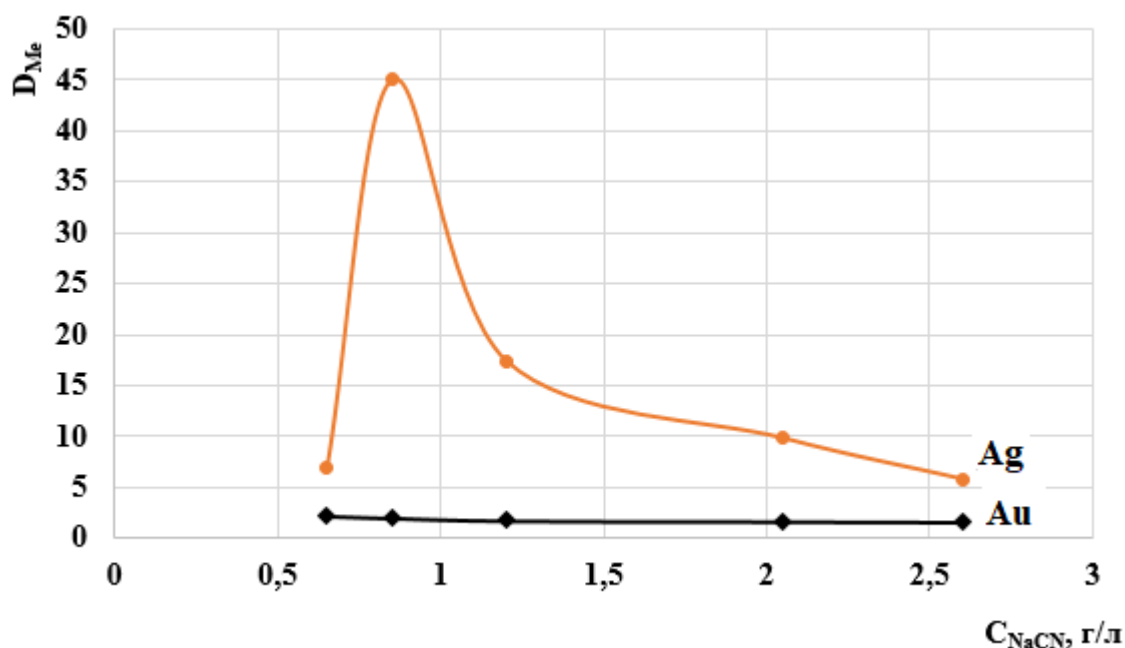


Рисунок 10 – Влияние концентрации цианида натрия в золотосодержащем растворе на величину коэффициентов распределения золота и серебра при экстракции смесью трибутилфосфата и дициклогексила-18-краун-6

Выводы:

- в исходной золотоносной в руде найдены следующие формы золота:
 - 1) свободное (извлекаемые амальгамацией),
 - 2) в сростках (цианируемое), извлекаемое цианированием после обработки в соляной кислоте;
 - 3) упорное, тонковкрапленное в сульфидные и породообразующие минералы;
- максимальное содержание золота в руде находится в классе крупности (-5+0) и достигает 2,57 г/т;
- несмотря на содержание золота во фракции (-5+0) большее, чем во всех остальных, максимум извлечения золота при агитационном выщелачивании руды раствором цианида натрия приходится на фракцию (-20+0) и составляет 81,9 %. Анализ на содержание в растворе серебра при выщелачивании из фракции (-20+0) показал, что его содержание в растворе составляет 0,74 мг/л, а извлечение из руды – 87,1 %. В раствор переходили не только благородные металлы, но и цветные, в том числе – ртуть;
- насыщение угля в динамическом режиме показало, что достигается несколько меньшая емкость по золоту, чем установленная при построении изотермы сорбции. Наряду с золотом в фазе угля обнаружены в значительном количестве серебро, цветные металлы, марганец и железо. Особое внимание следует уделить тому, что сорбируется ртуть, которая при электролизе будет переходить в состав получаемого сплава Доре;

– десорбцию золота с угля марки JX-102 осуществляли высокотемпературным методом, результатом десорбции стали растворы с содержанием золота и серебра – 0,256 и 0,184 г/л соответственно. Высокотемпературный способ десорбции позволяет почти полностью удалить сорбированные элементы из фазы угля;

– при экстракции благородных металлов из полученных элюатов трибутилфосфатом равновесие устанавливается на 30 минуте. Извлечение золота в этих условиях составляет 67,4 %;

– серебро извлекается из водного раствора трибутилфосфатом несколько лучше, чем золото, причем с ростом объема органической фазы растет не только степень извлечения серебра, но и коэффициент разделения и достигает величины $\beta_{\text{Ag/Au}} = 1,79$;

– коэффициенты распределения золота и серебра зависят от концентрации цианида натрия в водном растворе, причем изменение коэффициента распределения серебра имеет максимум в области 0,85-1,0 г/л по цианиду натрия, в то время как коэффициент распределения золота постепенно уменьшается с ростом содержания цианида натрия в водном растворе;

– добавка краунэфира-6 (дициклогексил-18-краун-6) на экстракцию золота в изучаемых условиях повлияла мало – степень извлечения металла повысилась в среднем примерно на 2 % во всем изучаемом интервале концентраций цианида натрия, тенденция к снижению извлечения золота сохранилась. В то же время извлечение серебра при экстракции из исходного раствора повысилось почти на 10 %, а коэффициент разделения металлов при добавке к трибутилфосфату краун-эфира-6 увеличился до $\beta_{\text{Ag/Au}} = 22,37$, что говорит о положительном влиянии добавки краун-эфира-6 на процесс разделения золота и серебра на стадии экстракции.

3 Анализ вредных и опасных факторов при выполнении работ по экстракции золота

3.1 Организация работ в золотодобывающей промышленности

При проектировании промышленной установки кучного выщелачивания необходимо предусмотреть проведение нижеследующих мероприятий. Основание для площадки выщелачивания должно быть расположено на возвышенном участке, не подверженном внезапным затоплениям поверхностными водами. Площадка выщелачивания должна быть ограждена защитным валом высотой не менее 0,5 м, вдоль внешнего периметра которого проходит водоотводная канава, включающая в контур защиты не только основание под рудный штабель, но и весь аппаратный комплекс технологического оборудования [18].

Для контроля производства режимных наблюдений по замеру уровня грунтовых вод и их химическому составу необходимо предусмотреть проходку необходимого количества наблюдательных скважин по направлению стока грунтовых вод.

В отделениях гидрометаллургии и переработки осадков следует предусмотреть местные вытяжные системы в соответствии с действующими СНИПами.

При выполнении дипломной работы соблюдались требования Трудового Кодекса Республики Казахстан и нормативной базы по технике безопасности и охране труда. Дипломная работа выполнялась в лаборатории спецкурсов кафедры «Металлургические процессы, теплотехника и технология специальных материалов» (ГМК, ауд. 302) и в лаборатории по месту работы – в Исламской Республике Иран на месторождении Сары-Гунай. Лаборатории по своему строению, наличию оборудования, организации освещения, водопровода и канализации соответствуют функциональному назначению и требованиям безопасности и охраны труда. Рабочее оборудование, используемое в дипломной работе, было в исправном состоянии и соответствовало своему назначению [22-24].

3.2 Вредные и опасные факторы при работе в золотодобывающей промышленности

В золотодобывающей промышленности имеют место физические, психофизиологические и химические факторы воздействия на человека:

- механическое травмирование;
- движущиеся части машин и механизмов;
- повышенный шум и вибрация;
- цианистый водород;

- пары хлора;
- едкая щелочь;
- пары ртути.

3.3 Анализ сочетаний вредных воздействий на персонал промплощадки и меры защиты

На промплощадке расположены различные технологические переделы, на персонал которых воздействуют различные комбинации вредных воздействий. По характеру вредных воздействий персонал можно разделить на следующие группы:

- аппаратчики передела рудоподготовки;
- персонал гидрометаллургических отделений цеха металлургии;
- смотрители насосного парка и трубопроводных систем.

На переделе рудоподготовки преобладают следующие вредные факторы: повышенный уровень шума, запыленность. Шум, вызываемый работой двигателей бульдозера и самосвалов. Пыль может возникать при неудовлетворительной работе аспирационного оборудования и при движении автотехники [18].

Принятая технология с целью исключения вредных факторов и снижения их уровня и времени контакта с ними обеспечивается непрерывностью и поточностью производства, и дистанционным контролем за ходом технологического процесса и оборудования, изоляцией и герметизацией производств и оборудования, связанных с образованием и выделением в воздушную среду пыли. Запыленность также может быть исключена своевременным увлажнением дорог, площадок поливочными машинами. При необходимости персонал должен использовать респираторы «лепесток».

Персонал гидрометаллургического отделения цеха металлургии подвергается воздействию комплекса вредных факторов: загазованность парами и аэрозолями щелочей и цианида, воздействие шума аппаратов и вентиляционных устройств.

Борьба с загазованностью сводится к поддержанию в исправном состоянии вентиляционных устройств и соблюдению технологических инструкций, что обеспечивает содержание вредных веществ в воздухе на уровне ПДК. Для борьбы с шумом и доведением его до нормируемых величин в проекте предусмотреть использование приточно-вытяжной вентиляции, выполненной с соблюдением вышеперечисленных требований [18].

Смотрители насосного парка и технологических трубопроводов могут подвергаться воздействию паров и аэрозолей, а также воздействию атмосферных осадков.

Для исключения вредного воздействия технологических растворов персонал должен строго соблюдать технологические инструкции. Производить

работы с трубопроводами после их опорожнения и промывки водой. Дополнительно смотрители (обходчики трасс, слесаря) должны быть обеспечены теплой непромокаемой одеждой [18, 25].

Узлы приготовления цианосодержащих и кислых растворов рекомендуется запроектировать в соответствии с временными правилами хранения сильнодействующих ядовитых веществ на предприятиях цветной металлургии:

1) помещения для приготовления растворов реагентов оборудовать приточно-вытяжной вентиляцией. В помещениях установить газоанализаторы. Газоанализаторы в помещении склада цианидов и приготовления раствора цианидов заблокировать с аварийной вентиляцией;

2) помещения для приготовления реагентов оборудовать питьевыми фонтанчиками, умывальниками, поливочными кранами, устройствами для включения вентиляционных установок и искусственного освещения;

3) вскрытие емкостей с реагентами, приготовление растворов и подачу их в чаны механизировать. Вскрытие емкостей с цианистыми солями предусматривается в специализированных аппаратах, перегрузка предусматривается с помощью грузоподъемного оборудования. Подавать готовые реагенты рекомендуется насосами. Обеззараживание тары, освобожденной от цианистых солей, предусмотреть в специальной емкости раствором гипохлорита;

4) работу насосного оборудования принять в пределах рабочей зоны паспортных характеристик заводов-изготовителей, что исключает снижение энергетических показателей и показателей надежности оборудования. Вибрационные технические характеристики гарантируются заводами-изготовителями и согласованы со всеми заинтересованными службами в установленном порядке;

5) в связи с наличием ртути в исходном сырье и как следствие в продуктах технологии необходимо применение анализаторов паров ртути во всех производственных помещениях. Кроме того, необходимо провести обучение персонала для работы со ртуть содержащими продуктами [18, 25].

При выполнении работ по экстракции следует соблюдать правила техники безопасности с горючими и огнеопасными веществами:

- исключение работ вблизи с открытыми источниками огня и высокотемпературным оборудованием;
- запрещение курения в цехах экстракции;
- наличие средств тушения и пожарной сигнализации.

Выводы:

- в золотодобывающей промышленности к вредным факторам следует отнести возможности травмирования, отравления, ожогов, влияния пыли, вибрации и шума;
- для исключения аварийных ситуаций и травмирования персонала следует соблюдать правила техники безопасности, описываемые в Регламенте производства.

4 Расчет затрат на выполнение исследований

Расчет затрат на проведение исследований [26, 27] производится по формуле:

$$З_{\text{и}} = З_1 + З_2 + З_3 + З_4. \quad (5)$$

Затраты $З_1$ приведены в таблице 13.

Таблица 13 - Затраты на основные и вспомогательные материалы ($З_1$)

Наименование материалов	Расход материалов	Стоимость единицы, тг	Общая стоимость, тг
Золотоносная руда, кг	10	4000,00	40000,00
Активированный уголь, кг	1	3500,00	3500,00
Цианид натрия, кг	0,1	45000,00	4500,00
Гидроксид натрия, кг	1	1500,00	1500,00
Трибутилфосфат, л	1	3700,00	3700,00
Дициклогексил-18-краун-6, л	0,05	10000,00	500,00
Вода, м ³	3	60,00	180,00
Итого $З_1$:			53880,00

В данной работе электричество потребляют встряхиватель, автоклав и насос. Затраты электроэнергии на аналитическое оборудование учитывать не стали, поскольку они выполнялись вместе с остальными пробами лаборатории рудника. Затраты на электроэнергию приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Затраты на электроэнергию ($З_2$)

Наименование оборудования	Мощность, кВт/ч	Время работы, ч	Количество затраченной электроэнергии, кВт	Тариф на электроэнергию, тг	Затраты на электроэнергию, тг
Встряхиватель	0,5	60	30	16,83	504,90
Автоклав	3	10	30		504,90
Насос	0,2	60	12		201,96
Экстрактор	0,5	60	30		504,90
Итого $З_2$:					1716,66

Расчет заработной платы и социальных отчислений произведен для руководителя дипломной работы и представлен в таблице 15.

Расчет амортизационных отчислений. Норму (H_a) определяют по сроку службы оборудования согласно формуле [26, 27]:

$$H_a = \frac{100}{B}, \quad (6)$$

где В – срок службы оборудования.

Таблица 15 – Расходы на заработную плату и начисления (З₃)

Количество работающих	Заработная плата на 1 дипломную работу, тг	Социальные отчисления (21 %), тг	Начисления в фонд занятости (2 %), тг	Всего, тг
1	3000,0	630,0	60,0	3690,0

Расчет стоимости оборудования и амортизационных отчислений приведен в таблице 16. Из таблицы 16 следует, что общая стоимость оборудования составляет 3050000 тг. За год сумма амортизационных отчислений за оборудование составит 305000 тг.

Таблица 16 – Амортизационные отчисления на оборудование

Наименование оборудования	Срок службы, лет	Количество	Цена, тыс. тг	Годовая стоимость, тг	Н _а , %	Годовая сумма амортизации (А), тг
Встряхиватель	10	1	350,00	350000	10	35000
Автоклав	10	1	1000,00	1000000	10	100000
Насос	10	1	250,00	250000	10	25000
Экстрактор	10	1	850,00	850000	10	85000
Сорбционная колонна	10	1	600,00	600000	10	60000
Итого:						305000

Расчет общей суммы затрат произведем по формуле (5) и сведем все затраты в таблицу 17.

Таблица 17 – Общие затраты на научно-исследовательскую работу

Наименование затрат	Сумма затрат, тг
Основные и вспомогательные материалы (З ₁)	53880,00
Электричество (З ₂)	1716,66
Заработная плата (З ₃)	3690,00
Амортизационные отчисления за год работы (З ₄)	305000,00
Итого (З):	364286,66

Метод экстракционного разделения золота и серебра приводит к росту среднего содержания целевого металла в растворе, подаваемом на электролиз, поэтому снижение себестоимости может быть определено по формуле:

$$U = 3 \times \frac{(E_1 - E_2)}{E_1}, \quad (7)$$

где Z – затраты на исследования;
 E_1 – среднее содержание золота в растворе, направляемом на электролиз до разрабатываемых мероприятий, г/л; $E_1 = 0,25$ г/л [18];
 E_2 – среднее содержание золота в растворе, направляемом на электролиз после разрабатываемых мероприятий, г/л; $E_2 = 1,65$ г/л.

$$U = 364286,66 \times (1,65 - 0,25) / 0,25 = 2040005,30 \text{ тг.} \quad (8)$$

Срок окупаемости проекта на единицу продукции рассчитываем по формуле:

$$T = \frac{K}{U} \quad (9)$$

где K – единовременные затраты;
 U – изменение себестоимости.

$$T = 3050000 / 2040005,30 = 1,5 \text{ лет.} \quad (10)$$

На основании рассчитанных данных составим таблицу основных технико-экономических показателей (таблица 18), характеризующих данную научно-исследовательскую работу.

Таблица 18 – Техничко-экономические показатели исследований

Показатели	Значения
Продолжительность экстракции, мин	30
Концентрация золота в исходном растворе, г/л	0,256
Концентрация серебра в исходном растворе, г/л	0,184
Концентрация золота в рафинате, г/л	0,085
Концентрация серебра в рафинате, г/л	0,004
Извлечение золота при экстракции, %	66,9
Извлечение серебра при экстракции, %	97,8
Коэффициент разделения металлов	22,37
Затраты на исследования, тг	364286,66
Срок окупаемости, лет	1,5

Выводы:

- при реализации экстракции смешанным экстрагентом (трибутилфосфат + дициклогексил-18-краун-6), удастся разделить золото и серебро, что будет отражаться на себестоимости продукции – будет происходить ее снижение на 2040005,30 тг;
- срок окупаемости исследований составит 1,5 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в настоящей дипломной работе результаты полностью соответствуют заданию, поставленным цели и задачам.

Цель, поставленная в дипломной работе, достигнута, так как полученные экспериментальные данные по экстракции золота и серебра из водных растворов позволяют утверждать, что для разделения этих металлов возможно применение экстракционного метода, а в качестве экстрагента можно использовать широко распространенный реагент, относящийся к классу нейтральных экстрагентов – трибутилфосфат, усиление свойств которого возможно введением в состав экстрагента краун-эфира.

Задачи выполнены в полном объеме:

1) выполнен критический анализ современного состояния методов получения золота. Показано, что в процессе переработки продуктивных золотосодержащих растворов наиболее эффективными для извлечения и концентрирования золота и серебра являются ионообменные методы, а в качестве сорбентов следует использовать либо активированные угли, либо ионообменные смолы;

2) проведен анализ рудного золотосодержащего сырья и его гидрометаллургическая переработка, он показал, что преимущественно подходящим методом переработки, является метод кучного выщелачивания с применением цианида натрия, так как он представляет собой один из самых дешевых способов выщелачивания металлов из руды.

3) изучен метод экстракционного разделения золота и серебра с использованием трибутилфосфата и его смеси с краунэфиром-6, выявлены закономерности экстракции благородных металлов, исследовано распределение золота и серебра в цикле экстракции при переработке золотосодержащих элюатов и установлено, что условия экстракции хорошо сочетаются с условиями выщелачивания и сорбции на активированном угле, и продемонстрирована возможность экстракционного извлечения благородных металлов из золотосодержащего сырья;

4) проведена оценка вредностей и опасностей при проведении выщелачивания и переработки полученных золотосодержащих растворов методом экстракции, кратко описаны меры безопасной работы при использовании этих методов на производстве;

5) произведен расчет затрат на выполнение исследований, в рамках настоящей дипломной работы, показано, что срок окупаемости может составить 1,5 года. В то же время, учитывая, что экстрагент будет находиться в обороте, срок окупаемости может быть меньшим, чем получен при расчете.

Поскольку переработка продуктивных растворов с использованием экстракционного разделения золота и серебра позволяет получить высококачественные богатые реэкстракты, то извлечение золота и серебра будет экономически выгодным, так как это позволит организовать получение

сплава Доре более высокого качества, что благоприятно отразится на стоимости процессов аффинажа, а конечная продукция в своем составе будет иметь меньшее количество примесных компонентов.

Научная и познавательная ценность работы заключается в том, что разделение золота и серебра на стадии экстракционной переработки является хорошей альтернативой перед методами, применяемыми на данный момент в сфере золотодобывающей промышленности. Такой метод способен оказать существенное влияние на повышение эффективности технологических процессов переработки сырья, содержащих благородные металлы.

Социальная ценность исследований связана с возможностью разработки простых и экспрессных методов определения золота и серебра в цианидных растворах, а также с возможностью очистки промышленных и бытовых стоков, и тем самым со снижением нагрузки на окружающую среду.

В работе получены новые сведения об использовании жидкостной экстракции золота и серебра на стадии извлечения благородных металлов из продуктивных растворов выщелачивания при гидрометаллургической переработке концентратов золота.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Меретуков М.А., Орлов А.М. Металлургия благородных металлов (зарубежный опыт). – М.: Металлургия. – 1990. – 416 с.
- 2 Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Абрютин Д.В. Технология переработки золотосодержащего сырья. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 328 с.
- 3 Анастасов В.В., Зайцев Р.В., Покидин У.В. – Горный журнал, 1993, №3, с. 30-36.
- 4 Каковский И.А., Поташникова Ю.М. Кинетика процессов растворения. – М.: Металлургия, 1975. – 224 с.
- 5 Tran, T., Lee, K., Fernando, K. Halide as an alternative lixiviant for gold processing an update. In: Young, C.A., Twidwell, L.G., Anderson, C.G. (Eds.), Cyanide: Social, Industrial and Economic Aspects. The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, PA, USA, 2001. – P. 501-508.
- 6 Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: в 2-х томах. – Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1999. – 775 с.
- 7 Царьков В.А. Опыт работы золотоизвлекательных предприятий мира. – М.: Изд. Дом «Руда и металлы», 2004. – 112 с.
- 8 Золотов Ю.А. Разделение и концентрирование веществ: место в химическом анализе // Зав. Лаб. Диагностика материалов. – 2012. – Т.78. – №1. – ч.1. – С.5-6.
- 9 Торгов В.Г., Корда Т.М., Демидова М.Г., Гуськова Е.А., Бухбинер Л.Г. Экстракционно-реэкстракционное концентрирование в системе на основе п-алкиланилина и сульфидов нефти для определения платиновых металлов и золота методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой // Журн. аналит. Химии, 2009. – Т.64, №9. – С.901-902
- 10 Elsi L., Sahan D., Basaran A., Soylak M. Solid phase extraction of gold (III) on Amberlite XAD-2000 prior to its flame atomic absorption spectrometric determination // Environ. Monit. And Assess. – 2007. – Vol.132, № 1-3. – P.331-338.
- 11 Крюков С.В., Гарифзянов А.Р. Экстракционно-РФСА определение микроколичеств золота, палладия и платины в геологических образцах после вскрытия проб методом пробирной плавки с сульфидно-никелевым коллектором // XVII Международное Чернявское совещание по химии, анализу и технологии платиновых металлов, Москва, 17-19 апр., 2001: Тезисы докладов. – М., 2001. – С.56
- 12 Meeravali Noorbasha N., Jiang Shiuh-Jen Microwave assisted mixed-micelle cloud point extraction of Au and Tl from environmental samples without using a chelating agent prior to ICP-MS determination // JAAS: J. Anal. Spectrom. – 2008. – 23. – №10. – P.1365-1371.
- 13 Патент 2520902 РФ. МКИ: С 22 В 19/00, 11/00, 3/10. Способ извлечения тяжелых металлов, железа, золота и серебра из сульфатного спека / Л.А. Воропанова, Н.Б. Кокоева. Опубл. 27.06.2014. Бюл. № 18.

- 14 Резник И.Д. Кобальт / И.Д. Резник, С.И. Соболев, В.М. Худяков. М.: Машиностроение, 1995. Ч. 2. С. 91-93.
- 15 Золотов Ю.А. Экстракция в неорганическом анализе. М.: Изд-во МГУ, 1988. – 82 с.
- 16 Золотов Ю.А. Экстракция внутрикомплексных соединений. М.: Наука, 1968. – 313 с.
- 17 Zadra J.B. A process for the recovery of gold from activated carbon by leaching and electrolysis//U. S. Bureau of Mines Reports of Investigations, 4672. – 1950, April. – P. 4672 – 4677.
- 18 Технологический регламент на переработку окисленной руды месторождения «Сари-Гунай» методом кучного выщелачивания. Иргиредмет. Рук. А.Ф. Ращенко. Иркутск, 2011 г. – 186 с.
- 19 Воропанова Л.А. Способ селективной экстракции ионов золота и серебра из солянокислых растворов трибутилфосфатом / Л.А. Воропанова, Н.Б. Кокоева // Записки Горного института. – 2016. – Т. 222. – С. 823-827.
- 20 Буслаева Т.М., Крылова Е.А., Волчкова Е.В. и др. Экстракция благородных металлов макроциклическими соединениями. // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. – 2009. – №5. – С. 28-36.
- 21 А.С. SU № 1028005А. МКИ: C01G5/00; C01G7/00. Способ извлечения золота и серебра из водных растворов / Б.Н. Ласкорин, В.В. Якшин, В.В. Доброскокин, В.М. Абашкин, Т.И. Коненкова. – Заявлено 04.09.1981; Опубл. 30.10.1984; № заявки 3337579/23-26. - Бюл. № 40.
- 22 Трудовой кодекс Республики Казахстан.–Алматы: Юрист, 2008.–112 с.
- 23 Закон РК «О труде в Республике Казахстан» от 10 декабря 1999 г. // Электронная версия на сайте <http://www.government.kz>
- 24 Закон «О промышленной безопасности на опасных производственных объектах» от 03 апреля 2002 г. // Электронная версия на сайте <http://www.government.kz>
- 25 Горшкова С.И. Производственная эргономика. – М.: Медицина, 1979. – 312 с.
- 26 Немцев В.Н. Экономический анализ эффективности промышленного предприятия. – Магнитогорск: Наука, 2004.
- 27 Прусакова М. Ю. Оценка финансового состояния предприятия. Методики и приемы. – М.: Вершина, 2008. – 80 с.