

На правах рукописи



ГАВРИЛОВ Алексей Сергеевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА ИЗ  
ОКИСЛЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ РУД СЕРОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель кандидат технических наук  
Крашенинин Алексей Геннадьевич

Официальные оппоненты: Мамяченков Сергей Владимирович  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», заведующий кафедрой металлургии цветных металлов, г. Екатеринбург

Клюшников Антон Михайлович, кандидат технических наук, акционерное общество «Уралмеханобр», ведущий научный сотрудник лаборатории гидromеталлургии, г. Екатеринбург

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск

Защита состоится «28» сентября 2022 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 004.001.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте металлургии Уральского отделения Российской академии наук по адресу 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке Уральского отделения Российской академии наук и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института металлургии Уральского отделения Российской академии наук <http://www.imet-uran.ru>.

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук

 Салина Валентина Алексеевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Добыча и производство никеля имеет большое значение в мировой промышленности. С применением никеля выплавляют специальные и конструкционные сплавы, производят аккумуляторные батареи и химические реагенты.

Запасы никеля на 2018 год выявлены в 38 странах и составляют около 130 млн. тонн. Из них на долю сульфидных медно-никелевых руд приходится 40% мировых запасов никеля и около 65 % мирового производства никеля.

Рост потребления и производства никеля в последние десятилетия привел к снижению запасов богатых сульфидных медно-никелевых руд. Геологоразведочные работы, проведенные в последнее десятилетие, не выявили крупных месторождений. Вовлечение в переработку новых месторождений окисленных никелевых руд (ОНР), в которых содержится 60% запасов никеля, послужит дополнительным источником для его производства.

Сегодня около 90% ОНР перерабатывается с применением пирометаллургических технологий. Пирометаллургические способы переработки ОНР с получением никеля или ферроникеля реализованы на предприятии Дониамбо (Новая Каледония), Ларимна (Греция), Серро Матосо (Колумбия), Фолкондо (Доминиканская республика) и Побужском ферроникелевом заводе (Украина).

До недавнего времени на Урале ОНР перерабатывали на комбинатах «Уфалейникель», «Южуралникель» и Режевском никелевом заводе по способу сульфидирующей шахтной плавки с получением никеля марки НЗ. Снижение цен на никель привело к закрытию данных предприятий из-за их убыточности. Переработка ОНР в России не ведется. В настоящий момент на Урале существует проблема переработки окисленных никелевых руд (ОНР).

В качестве альтернативы пирометаллургическим способам для переработки ОНР могли выступить автоклавная и аммиачно-карбонатная технологии. Однако их применение для переработки Уральских ОНР нерентабельно ввиду бедности руд по содержанию никеля, высоких содержаний магния и трудностей при их восстановлении.

Для решения проблемы переработки ОНР Урала научными коллективами проводятся исследования по извлечению никеля из ОНР агитационным и подземным выщелачиванием соляной, азотной и серной кислотами. Известны исследования по выщелачиванию ОНР с применением грибковых и культуральных сред. Несмотря на значительное число проведенных исследований и представленных технологических решений, ни одно из них в настоящий момент не было внедрено в производство.

Одним из перспективных способов переработки ОНР Урала является сернокислотное кучное выщелачивание. Преимуществами кучного выщелачивания являются низкие капитальные и эксплуатационные затраты. В связи с вышеизложенным были проведены исследования по извлечению никеля из ОНР Серовского месторождения кучным выщелачиванием.

**Степень разработанности темы исследования.** На момент исследований изучен химический и минералогический состав различных типов окисленных никелевых руд. Установлено, что основными источниками никеля служат минералы серпентиновой группы: антигорит и лизардит. Частично никель содержится в клинохлоре.

Для извлечения никеля опробованы пирометаллургические способы переработки ОНР. В качестве способов извлечения никеля из ОНР исследованы способы автоклавного и агитационного, подземного выщелачивания никеля и кобальта растворами азотной, соляной и серной кислот. Опробованы пирогидрометаллургические способы переработки ОНР, основанные на предварительном обжиге руды с последующим кучным выщелачиванием никеля растворами различных кислот. Изучены способы извлечения никеля с помощью грибковых культур и бактерий. Накоплено значительное количество данных по сорбционным, экстракционным и осадительным способам переработки никельсодержащих растворов.

Ранее проводились исследования по кучному выщелачиванию ОНР. Однако технология извлечения никеля из ОНР серноокислым кучным выщелачиванием так и не была внедрена в производство в связи с трудностями при переработке продукционных растворов, содержащих повышенное количество железа.

**Объектами исследования** являются силикатные окисленные никелевые руды железо-магнезиального типа.

**Предмет исследования** – гидрометаллургические технологии переработки окисленных никелевых руд.

**Целью работы** является разработка гидрометаллургического способа переработки окисленных никелевых руд основанного на кучном выщелачивании никеля водными растворами серной кислоты с последующей переработкой продукционных растворов.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**

1. Определить основные никельсодержащие минералы и кислотопоглощающие компоненты ОНР Серовского месторождения;

2. Исследовать процессы кучного (перколяционного) выщелачивания ОНР и влияние различных параметров (плотности орошения, паузы между орошениями, количества оборачиваний выщелачивающих растворов, концентрации серной кислоты в выщелачивающем растворе) на извлечение никеля из ОНР;

3. Получить безжелезистые никельсодержащие продукционные растворы, пригодные для дальнейшей переработки;

4. Изучить вещественный состав остатков кучного выщелачивания, определить пути их дальнейшей переработки;

5. Опробовать способы переработки продукционных никельсодержащих растворов и выбрать из них наиболее оптимальный, обеспечивающий селективность извлечения никеля и кобальта из продукционных растворов выщелачивания;

6. Разработать принципиальную технологическую схемы извлечения

никеля из ОНР с применением крупнокускового кучного выщелачивания и последующей переработкой продукционных никельсодержащих растворов;

### **Научная новизна работы**

1. Методом перколяционного выщелачивания изучены особенности кучного выщелачивания железо-магнезиальных руд Серовского месторождения. Определено влияние плотности орошения, паузы, количества оборачиваний, исходной концентрации кислоты на процесс извлечения никеля и кобальта. Предложены параметры выщелачивания, способствующие получению безжелезистых растворов, пригодных для дальнейшей переработки.

2. Изучены остатки от выщелачивания при различном извлечении никеля и получены новые данные по вещественному составу остатков кучного выщелачивания ОНР. Даны рекомендации по их утилизации.

3. Экспериментально обоснована возможность селективного извлечения кобальта из продукционных растворов выщелачивания окисленных никелевых руд применено осаждение смесью 2 нафтола и нитрида натрия. Получены положительные результаты.

4. В качестве способа извлечения никеля из продукционных растворов применено осаждение гидросульфидом натрия. В процессе исследования получены новые данные по условиям осаждения никеля, обеспечивающим селективность его извлечения из растворов и составу полученных никельсодержащих концентратов.

5. Опробован экстракционный способ извлечения никеля из растворов отечественным экстрагентом Гидразекс-59 (ГВИК) производства Института технической химии УрО РАН. Получены новые результаты по экстракции и реэкстракции никеля из продукционных растворов без предварительной стадии очистки от примесей и достигнуто 99% извлечение никеля.

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

1. Расширены знания в области кучного выщелачивания из железо-магнезиальных окисленных никелевых руд: установлено влияние паузы между орошениями, удельного расхода выщелачивающего раствора и начальной крупности куска руды на интенсивность извлечения никеля из ОНР и расход серной кислоты.

2. По результатам исследований разработан и запатентован способ выщелачивания окисленных никелевых руд, обеспечивающий получение безжелезистых никельсодержащих растворов пригодных для дальнейшей переработки.

3. Исследованы способы переработки продукционных безжелезистых никельсодержащих растворов. Показана эффективность применения 2- нафтола и нитрида натрия для селективного извлечения кобальта из продукционных растворов выщелачивания с получением концентрата кобальта, пригодного для металлургического передела.

4. На основе результатов исследований разработан и запатентован способ его селективного извлечения никеля из продукционных растворов выщелачивания гидросульфидом натрия.

5. Разработана принципиально новая технологическая схема переработки

ОНР, основанная на крупнокусковом кучном серноокислотном выщелачивании с получением безжелезистых растворов.

**Методология и методы исследования.** Для анализа результатов исследований в ходе выполнения работы использованы современные методы химического, рентгенофлуоресцентного, рентгенофазового и рентгеномикроспектрального анализа. Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования «Урал–М» и методик экспериментов, обеспечивающих воспроизводимость результатов. Химические анализы выполнены на приборах OPTIMA 2100 (атомно – эмиссионная спектроскопия), Hitachi – Z8000 (атомно-абсорбционная спектроскопия) и ELAN 9000 (атомно-эмиссионный метод с индукционной плазмой) с помощью аттестованных методик. Рентгенофазовые исследования проводились на установке D8 ADVANCE (Bruker AXS), дифрактометре Дрон-2 (ИЦ «Буревестник») и электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 40 (Carl Zeiss AG). Лабораторные эксперименты по обжигу никельсодержащих концентратов проведены на муфельной печи ПВК 1,4-8 (НПП «Теплоприбор»).

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

1. Результаты кучного выщелачивания ОНР. Данные о влиянии паузы между орошениями, удельного расхода раствора на выщелачивание и начальной крупности куска руды на процесс извлечения никеля и кобальта из ОНР.

2. Данные по изучению вещественного состава остатков от кучного выщелачивания и возможные пути их утилизации.

3. Результаты переработки производственных растворов выщелачивания с применением гидrolитического и гидросульфидного осаждения с получением концентратов.

4. Разделение никеля и кобальта возможно путем селективного осаждения кобальта из производственных растворов выщелачивания с применением в качестве реагента смеси 2-нафтола и нитрида натрия.

5. Исследования экстракционного извлечения никеля из производственных серноокислотных растворов выщелачивания с применением отечественного экстрагента Гидразекс-59 (ГВИК).

6. Принципиальная технологическая схема переработки ОНР кучным крупнокусковым выщелачиванием с последующим селективным извлечением никеля из растворов гидросульфидным осаждением.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена использованием в процессе исследований современного оборудования и установок, входящих ЦКП «Урал-М», применении при анализе и обработке результатов исследований обновляемых баз данных и общепринятых методик.

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались на VIII Всероссийской молодежной научно-практической конференции по проблемам недропользования (Екатеринбург, 2014), Второй всероссийской молодежной научно-технической конференции с международным участием «Инновации в материаловедении» (Москва, 2015), Научно-практической конференции с международным участием «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных

исследований и НИОКР» (Екатеринбург, 2015), V Международной конференции-школе по химической технологии ХТ'16 (Волгоград, 2016), V научном конгрессе «Техноген-2021»: Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований, (Екатеринбург, 2021), Второй научно-практической конференции Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий: освоение, производство, использование (Москва, 2021).

**Личный вклад автора** состоит в планировании и проведении исследований, анализе полученных данных, подготовке публикации статей и патентов по результатам исследований, разработке технологической схемы переработки ОНР.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 18 статей, в том числе 11 в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 5 статей в сборниках трудов конференций, 2 тезиса докладов. Получено 3 патента на изобретения РФ.

**Связь диссертации с планами НИР:** Работа выполнена в рамках исполнения государственного задания: № АААА-А17-117011810029-5 (2015-2017) программы УрО РАН №АААА-А18-118012590113-6 (2017-2019) и программы государственного задания № 1220013100200-2.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов п. 1 «Рудное, нерудное и энергетическое сырье», п. 2 «Твердое и жидкое состояние металлических, оксидных, сульфидных и хлоридных систем», п. 7 «Тепло и массоперенос в низко- и высокотемпературных процессах», п. 13 «Гидрометаллургические процессы и агрегаты».

**Структура диссертации.** Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, изложена на 116 страницах машинописного текста, содержит 31 рисунок и 48 таблиц. Список литературы включает 90 наименований отечественных и зарубежных авторов.

#### **Благодарности**

Автор выражает благодарность своему первому научному руководителю доктору технических наук Халезову Борису Дмитриевичу, оказавшему большую помощь в выборе темы и написании диссертационной работы.

Благодарит доктора технических наук Радужева Александра Васильевича и кандидата химических наук Чеканову Ларису Геннадьевну, кандидата технических наук Ключникова Александра Михайловича, кандидата физико-математических наук Петрову Софью Александровну и кандидата химических наук Овчинникову Любовь Андреевну за неоценимую помощь в процессе подготовки и написания диссертационной работы.

Также автор благодарит коллективы лаборатории гетерогенных процессов и лаборатории стали и ферросплавов за помощь в проведении экспериментов по теме диссертационной работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы описана степень проработанности темы исследований, научная новизна и практическая значимость работы, поставлены цели и задачи исследования, указаны методы и методология исследований, обеспечивающие воспроизводимость и достоверность исследований.

**В первой главе** проведен литературный анализ сведений об общих запасах никелевых руд (ОНР) и известных способах переработки ОНР.

На основе литературного обзора, в качестве возможного способа извлечения никеля из ОНР выбрано кучное выщелачивание водными растворами  $H_2SO_4$ . Низкие капитальные и эксплуатационные затраты, возможность автоматизации и компьютеризации процесса, отсутствие выбросов отходящих газов в атмосферу являются преимуществами данного процесса.

**Во второй главе** изучен вещественный состав образцов ОНР, установлены основные никельсодержащие минералы: лизардит, антигорит, клинохлор (таблицы 1-2).

Таблица 1 – Химический состав окисленных никелевых руд, мас. %

Ni	Co	Mg	Cu	Al	Si	Fe <sub>общ</sub>	Mn	S	Cr	Ca
1,19	0,039	18,9	0,012	3,05	17,39	14,83	0,57	0,13	0,1	0,66

Таблица 2 – Фазовый состав окисленных никелевых руд

Наименование	Формулы	Содержание, мас. %
Кварц	$\alpha-SiO_2$	12,4
Оксиды железа	$FeO, Fe_2O_3, Fe(OH)_3$	1,5
Лизардит, антигорит	$(Mg, Al)_3[(Si, Fe)_2O_5](OH)_4, Mg_{3-x}[Si_2O_5](OH)_{4-2x}$	52,8
Тальк	$Mg_3[(OH)_2Si_4O_{10}]$	16,9
Актинолит	$Ca_2(Mg, Fe)_5(OH)_2Si_8O_{22}$	6,4
Клинохлор	$(Mg, Fe)_5Si, Al(OH)_8, Mg_{4,88}Fe_{0,22}Al_{1,88}Si_{2,96}O_{10}(OH)_8$	10,0

В лабораторных условиях имитацией кучного выщелачивания является выщелачивание в перколяторах. Перколятор представлял собой прямоугольный сосуд из винипласта с ложным днищем и патрубком для сбора растворов.

Первоначально выщелачивающие растворы в перколяторе №1 подкрепляли серной кислотой и оборачивали. В результате за 440 суток выщелачивания достигнуто извлечение никеля 89 % при расходе кислоты 480 кг на тонну руды (рисунок 1). Это связано с расходом кислоты на выщелачивание железа извлечение которого из ОНР составило 72 %.



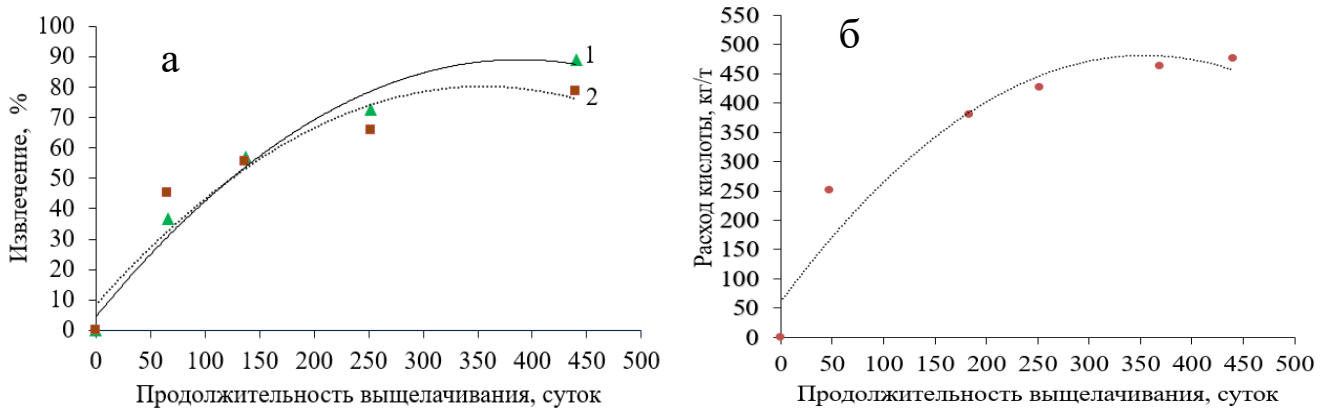


Рисунок 1 – Зависимость: а) извлечения никеля (1) и железа (2), б) расхода кислоты от продолжительности выщелачивания. Перколятор №1

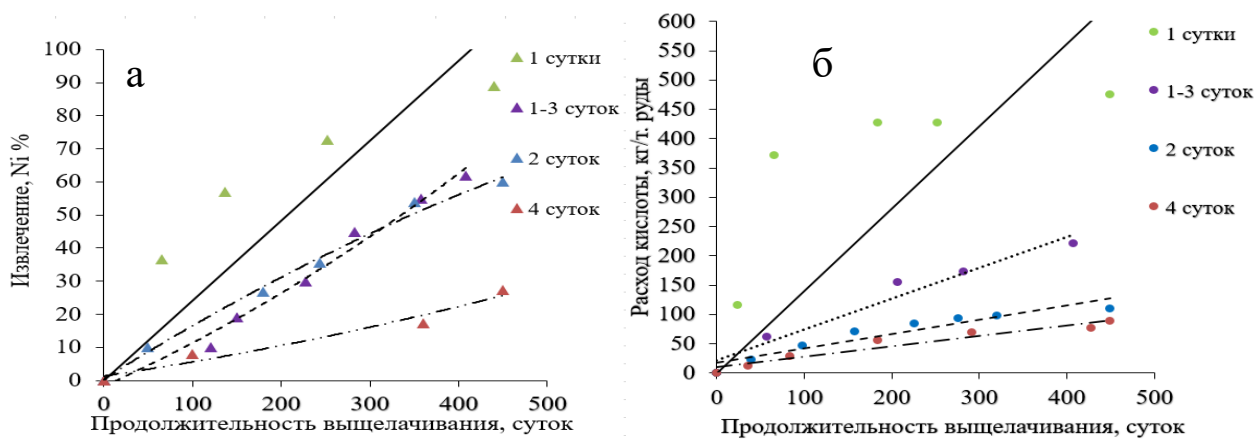
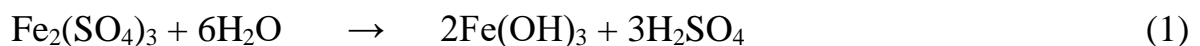


Рисунок 2 – Зависимость извлечения никеля (а) и расхода кислоты (б) от паузы между орошениями: 1) перколятор №1, пауза 1 сутки; 2) перколятор №2, пауза 1-3 суток; 3) перколятор №3, пауза 2 суток; 3) перколятор № 4, пауза 4 суток

В качестве меры по повышению извлечения Ni и снижению расхода кислоты изучено влияние паузы между орошениями, удельного расхода серной кислоты в выщелачивающем растворе и крупности куска руды. Увеличение паузы между орошениями до 4 суток в перколяторе №4 привело к снижению расхода кислоты в 5,5 раз (с 475 до 88,1 кг/т руды) (рисунок 3) и как следствие содержания Fe в продукционном растворе в результате гидролиза  $Fe^{3+}$  при pH выше 1,6 по реакции:



Вместе с тем повышение паузы увеличивает продолжительность и снижает темпы выщелачивания Ni и Co из ОНР, поэтому данный технологический прием предлагается применять на ранних этапах выщелачивания (до 20% извлечения) когда происходит растворение наименее устойчивых к действию кислоты компонентов руды, прежде всего, оксидов и гидроксидов железа.

Установлено, что оптимальные показатели извлечения Ni и Co получены выщелачиванием при удельном расходе выщелачивающего раствора 140  $dm^3$  на

тонну руды. В данных условиях за 135 суток выщелачивания достигнуто извлечение никеля 48% (рисунок 3). Увеличение удельного расхода раствора на выщелачивание до 300 дм<sup>3</sup> на тонну руды не приводило к существенному росту извлечения Ni.

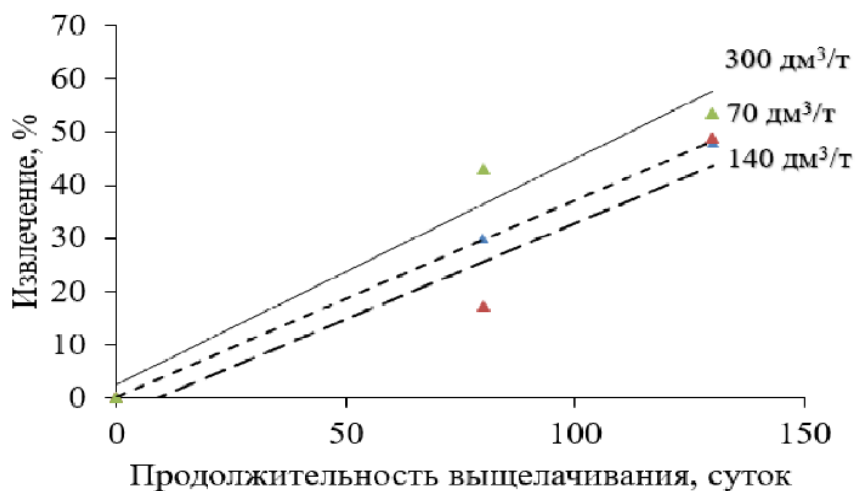


Рисунок 3 - Зависимость извлечения Ni от плотности орошения, дм<sup>3</sup>/т: 1) 70 (перколятор №5); 2) 140 (перколятор №6); 3) 300 (перколятор №7)

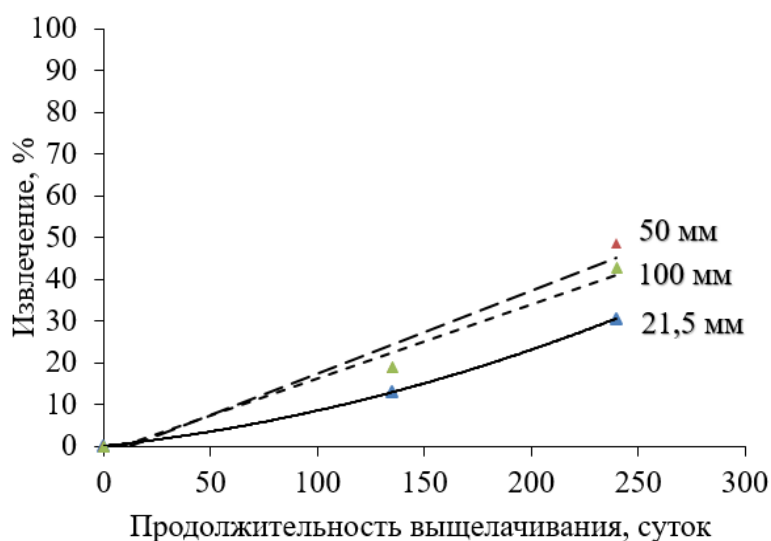


Рисунок 4 - Зависимость извлечения никеля от крупности руды: 1) 21,5 мм (перколятор №8); 2) 50 мм (перколятор №9); 3) 100 мм (перколятор №10)

Размер куска руды на начальном этапе выщелачивания (до 10 % извлечения) не влияет на интенсивность перехода никеля в раствор. По мере обезникеливания ОНР темпы извлечения снижаются при выщелачивании руды крупностью 25 мм, что связано с ухудшением перколяции в следствие самоизмельчения руды. Наилучшие показатели по извлечению никеля получены на руде с максимальной крупностью куска 50 мм (рисунок 4).

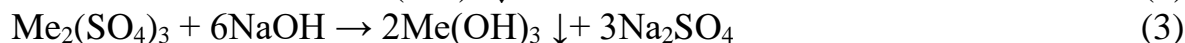
По результатам выщелачивания железомagneзиальной ОНР предложены режимы её выщелачивания на различных этапах извлечения Ni и Co (таблица 3).

Таблица 3 – Режимы выщелачивания, рекомендуемые по результатам исследований

Стадия извлечения, %	$C_{H_2SO_4}$ , г/дм <sup>3</sup>	Пауза, сут	Q, дм <sup>3</sup> /т.	Крупность руды, мм	Количество оборотов, раз
0-10	15-20	2-4	140	50	7
10-30	10	1-2	140	50	5
30-50	5	1-2	140	50	1-2
50-80	5	4-7	70	50	1

В третьей главе для извлечения Ni и Co из продукционных растворов выщелачивания ОНР исследованы гидролитическое осаждение, экстракция и осаждение гидросульфидом натрия.

Гидролитическое осаждение никеля и кобальта из продукционных растворов производили раствором NaOH. Сущность процесса заключалась в переводе Ni, Co, Al, Mg и Mn в нерастворимые гидроксиды согласно реакциям:



Для переработки использовали растворы, содержащие, г/дм<sup>3</sup>: 2,1 Al, 0,15 Fe, 0,064 Co, 1,18 Ni, 0,73 Mn и 13,2 Mg. Гидроксиды металлов осаждали в диапазоне рН от 3,5 до 12,5 приливая по каплям раствор NaOH до достижения необходимого уровня рН.

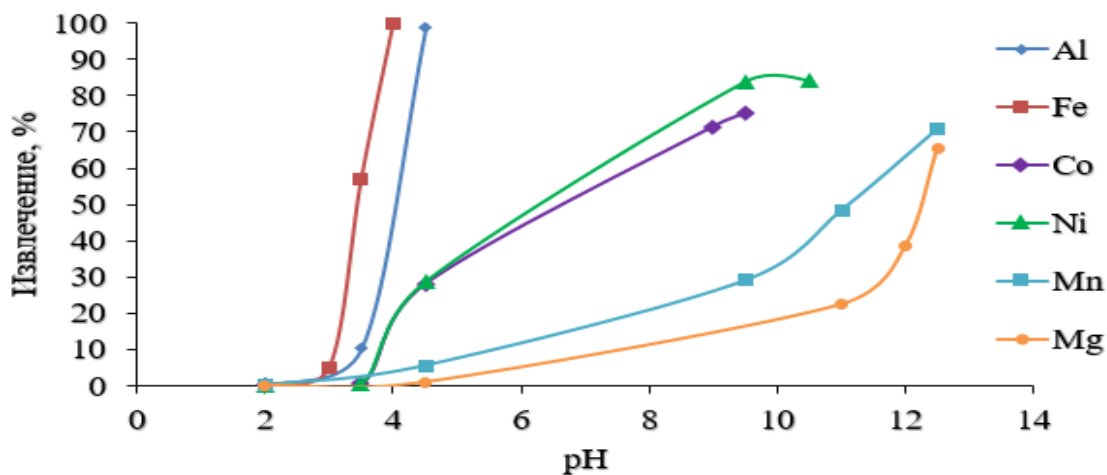


Рисунок 5 – Зависимость извлечения элементов в осадки от значений рН

Результаты осаждения показаны на рисунке 6. Ввиду близости значений рН гидратообразования металлов гидролитическим осаждением не удалось получить селективные гидроксиды металлов. Однако полученные концентраты, содержащие никель, кобальт и марганец, быть использованы для получения комплексных сплавов.

Для селективного извлечения никеля и кобальта из продукционных растворов применен экстрагент Суапех 301 (США). Данный экстрагент,

представляет собой бис(2,2,4-триметилпентил) дитиофосфиновую кислоту (рисунок 7).

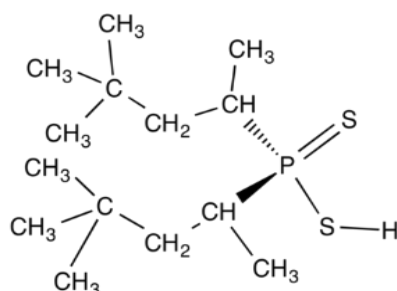


Рисунок 6 – Структурная формула Суанех 301

Органическую фазу для экстракции готовили путем смешивания Суанех 301 и органического растворителя Shellcoll D-60. В качестве модификатора для улучшения процесса экстракции никеля и кобальта в органическую фазу вводили 5 % трибутилфосфата (ТБФ). Состав органической фазы, об. %: 20 Суанех 301, 75 Shellcoll D-60, 5 Трибутилфосфат.

Экстракцию проводили при  $\text{pH} = 1$ ,  $\text{O}:\text{B} = 1:4$  в течение 5 минут. Экстракцию проводили из производственного раствора, содержащего,  $\text{г/дм}^3$ : 1,1 Ni; 0,065 Co; 0,72 Mn; 21,44 Mg; 1,5 Al; 0,2 Fe. Производственный раствор непосредственно перед экстракцией очищали от примесей железа и алюминия. После удаления железа и алюминия, содержание остальных компонентов раствора практически не изменилось.

Извлечение никеля и кобальта в органическую фазу достигает практически 100%. Содержание магния и марганца в выходящих растворах соответствовало их содержанию в исходных растворах (таблица 5).

Таблица 4 – Содержание элементов в растворах после экстракции и реэкстракции

Содержание элементов, $\text{г/дм}^3$	Co	Ni	Mn	Mg
Рафинат 1	0,0001	0,0001	0,681	21,02
Рафинат 2	0,0001	0,00046	0,686	20,13
Рафинат 3	0,0001	0,0029	0,687	21,07
Реэкстракт 1	0,105	2,72	0,028	0,292
Реэкстракт 2	0,027	1,50	0,0056	0,0366

После экстракции органическую фазу дважды реэкстрагировали 3M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  при  $60^\circ\text{C}$  и 500 об/мин в течение 30 минут при  $\text{O}:\text{B} = 1:1$ . Реэкстракция никеля и кобальта из органической фазы затруднена, что вероятно связано с окислением  $\text{Co}^{2+}$  до  $\text{Co}^{3+}$ , который образует прочные комплексные соединения и тем самым препятствует процессу реэкстракции. В результате получены растворы с содержанием,  $\text{г/дм}^3$ : 1,5-2,71 Ni; 0,027 -0,105 Co.

В качестве импортозамещения Суанех 301 для извлечения никеля из растворов может быть использован отечественный экстрагент Гидразекс-59 (ГВИК), который разрабатывают в ИТХ УрО РАН, г. Пермь (рисунок 7).

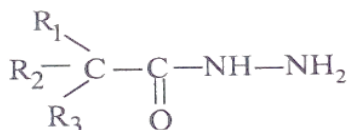


Рисунок 7 – Структурная формула Гидразекс-59 (ГВИК)

Проведены исследование по экстракции никеля и кобальта с применением Гидразекс-59 (ГВИК) на растворе содержащем, г/дм<sup>3</sup>: 1,05 Ni; 0,054 Co; 0,7 Mn; 8,89 Mg; 1,8 Al; 0,65 Fe. Органическую фазу готовили путем растворения 40 % Гидразекс-59 в 60 % керосина. Снижение скорости разделения фаз во второй серии опытов достигали за счет введения в органическую фазу в качестве модификатора 10% 2-этилгексанола. Условия экстракции приведены в таблице 5. Исходные значения рН раствора варьировались от 0,39 до 1,7.

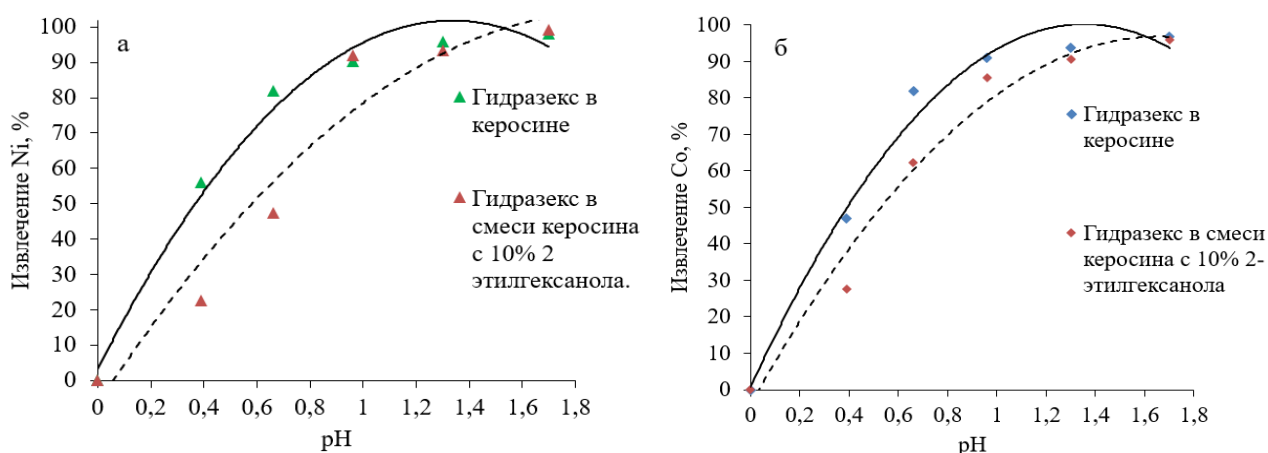


Рисунок 8 – Экстракция никеля (а) и кобальта (б) Гидразекс-59

В процессе экстракции никель и кобальт одинаково удовлетворительно извлекаются из раствора Гидразексом-59 в диапазоне рН = 1,3-1,7 (таблица 6, рисунок 8). При этом в раствор также переходят железо и марганец, которые в дальнейшем могут быть отмыты из органической фазы водными растворами разбавленных кислот ( $\leq 0,5$  М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> или 0,5 М HCl).

Расчет коэффициентов распределения, экстракции и извлечения никеля и кобальта проводили по формулам:

$$D_i = \frac{y_i}{x_i}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_i = D_i \cdot a, \quad (5)$$

$$\eta_i = \varepsilon_i / (1 + \varepsilon_i). \quad (6)$$

где  $y_i$  и  $x_i$  – концентрации элемента в экстракте и рафинате г/дм<sup>3</sup>,  $D_i$  – коэффициент распределения элемента,  $\varepsilon_i$  – коэффициент экстракции,  $\eta_i$  – коэффициент извлечения в органическую фазу. Построена зависимость извлечения никеля и кобальта от рН (рисунок 8).

Проведены опыты по реэкстракции никеля из органической фазы растворами серной и соляной кислоты (таблица 7, опыт 4-5). Реэкстракция без нагревания 5 М серной кислотой идет активнее, чем 5М HCl. Тем не менее, реэкстракт, полученный для 5 М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, содержит большее количество примесей железа, марганца и алюминия, чем при реэкстракции 5 М HCl.

Таблица 5 – Условия экстракции и реэкстракции

№ опыта	Экстракция						Реэкстракция				
	Т, °С	О:В	рН <sub>исх.</sub>	t, мин	Отстаивание, мин	Количество стадий	Т, °С	О:В	Исходная концентрация кислот	t, мин	Количество стадий
1	25	1:1	0,39-1,7	5	15	1	-	-	-	-	-
2	25	1:1	0,39-1,7	5	15	1	-	-	-	-	-
3	25	1:4	1,7	5	5	10	-	-	-	-	-
4	25	1:3	1,7	5	5	2	25	1:1	5 Моль/дм <sup>3</sup> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5	2
5	25	1:3	1,7	5	5	2	25	1:1	5 Моль/дм <sup>3</sup> HCl	5	2
6	25	1:4	1,7	5	5	2	50	1:1	0,5-5 Моль/дм <sup>3</sup> HCl	5	3
7	25	1:3	1,7	5	5	2	25	1:1	0,5-5 Моль/дм <sup>3</sup> HCl	5	3

Таблица 6 – Состав растворов после экстракции Гидразекс -59 (ГВИК)

Опыт	Содержание элементов, г/дм <sup>3</sup>							
	Ni	Co	Fe	Mn	Mg	Al	pH	
	Исходный раствор							
1	1	0,00085	0,00014	0,00593	0,56	6,98	1,73	1,7
	2	0,00035	0,00015	0,00677	0,6	7,01	1,75	1,3
	3	0,0065	0,00056	0,02284	0,63	7,31	1,8	0,96
	4	0,1882	0,00982	0,0877	0,68	7,62	1,85	0,66
	5	0,4597	0,0286	0,1282	0,7	7,15	1,85	0,39
2	6	0,0086	0,00062	0,0069	0,59	7,93	1,71	1,7
	7	0,0077	0,00078	0,01708	0,58	7,16	1,74	1,3
	8	0,0520	0,00299	0,04670	0,65	7,01	1,78	0,96
	9	0,5520	0,02040	0,1250	0,7	7,36	1,81	0,66
	10	0,8420	0,0390	0,193	0,7	7,44	1,84	0,39

Введение стадии промывки 0,5 М раствором HCl перед реэкстракцией позволило удалить кобальт, железо, марганец и алюминий из органической фазы. Наилучшие показатели извлечения никеля получены в результате реэкстракции в две ступени при нагревании (таблица 7, опыт 6).

Таблица 7 – Состав растворов после реэкстракции, г/дм<sup>3</sup>

№ опыта	№ стадии	Ni	Co	Fe	Mn	Al	Остаточное содержание кислоты
4	1 реэкстракция	3,43	0,07	0,61	0,28	0,21	479,4
	2 реэкстракция	0,14	0,003	0,078	-	-	479
5	1 реэкстракция	2,24	0,15	0,11	0,1	-	178,7
	2 реэкстракция	0,19	0,0002	-	0,008	-	178,4
6	Промывка 0,5 моль/дм <sup>3</sup> HCl	0,36	0,08	0,53	0,14	0,24	16,04
	1 реэкстракция	5,49	0,02	0,11	-	-	175,15
	2 реэкстракция	0,65	0,004	0,02	-	-	174,3
7	Промывка 0,5 моль/дм <sup>3</sup> HCl	0,32	0,1	0,37	0,15	0,23	15,84
	1 реэкстракция	3,98	0,003	0,05	-	-	177,1
	2 реэкстракция	0,4	0,004	0,07	-	-	176,5

В качестве сульфидсодержащего реагента для осаждения никеля из растворов был применен гидросульфид натрия, который представляет собой отход химического производства, содержащий до 18 % серы. Для осаждения использовали раствор, содержащий, г/дм<sup>3</sup>: 1,05 Ni, 0,036 Co, 0,1 Fe, 0,64 Mn, 11,8 Mg, 0,9 Al. Расчет необходимого количества реагента для растворов выщелачивания ОНР вели на осаждение никеля по реакции:



Исследована зависимость извлечения никеля от расхода кислоты при различных значениях водородного потенциала. Выполнено две серии опытов при pH = 3 и 4 в следующих условиях: интенсивность перемешивания раствора 400 об/мин, продолжительность 60 мин, T=20–25 °C, расход NaHS от 100% (т.е. от стехиометрического количества по реакции) до 120% (т.е. при 20%-ном избытке).

Максимальные показатели извлечения никеля и кобальта в осадок, равные 97 и 98,6%, отмечены при расходе 20% избытке NaHS и pH = 4 соответственно (рисунок 9). В данных условиях получены осадки, содержащие в среднем, мас. %: 25 Ni, 0,6 Co, 0,25 Fe, 0,3 Mn, 1,8 Mg, 0,9 Al, 30 S, которые могут быть использованы в виде концентрата, пригодного для пирометаллургической переработки с получением никеля. Примеси других металлов, за исключением алюминия, в осадок практически не переходят.

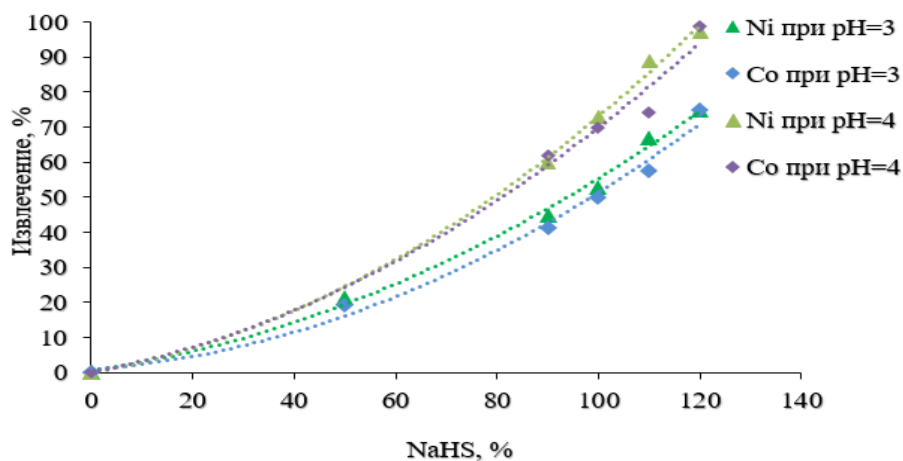


Рисунок 9 – Зависимость осаждения Ni (1, 3) и Co (2, 4) от расхода гидросульфида натрия при pH = 3 и 4

В качестве способа селективного извлечения кобальта из производственных растворов опробовано осаждение в виде нитрозосоединений. Осаждение кобальта вели 2-нафтолом (рисунок 10). Для образования нитрозосоединений в раствор вводили нитрит натрия (NaNO<sub>2</sub>).

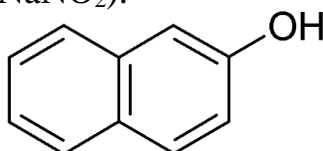


Рисунок 10 – Структурная формула 2-Нафтола

Изучены зависимости извлечения кобальта из раствора от температуры процесса, продолжительности процесса и концентрации 2-нафтола в растворе (рисунки 11-13). Наилучшие показатели по селективности извлечения кобальта достигнуты в результате осаждения при T=60°C, t = 180 минут, соотношении кобальта, нитрита натрия и 2- нафтола 1:6:10. В данных условиях был получен кобальтовый осадок с содержанием кобальта 6% (таблица 8). При этом в осадок переходит некоторое количество примесей железа, алюминия, магния, марганца и никеля.

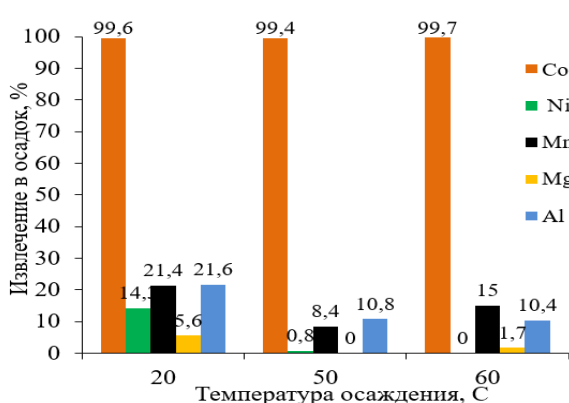


Рисунок 11 – Зависимость осаждения никеля и кобальта от температуры

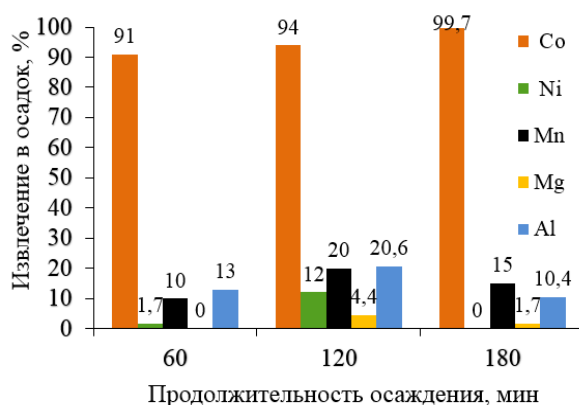


Рисунок 12 – Зависимость осаждения никеля и кобальта от продолжительности



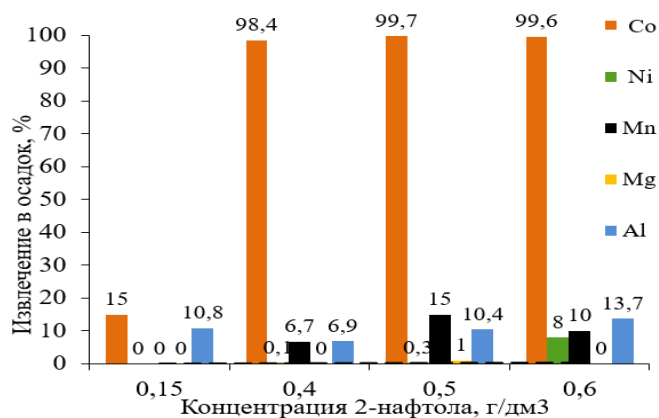


Рисунок 13 – Зависимость осаждения никеля и кобальта от расхода реагента

Из полученного кобальтового осадка путём обработки 15%-м раствором соляной кислоты в течение 180 минут отмыли примеси (таблица 8). В результате из осадка в раствор перешло, мас. %: 71,5 Fe, 85 Al, 90,1 Mg, 85 Mn и около 93 Ni.

Таблица 8 – Кобальтовый осадок, мас. %

Содержание элементов, мас. %	Ni	Co	Mn	Mg	Al	Fe	m, г
Исходный осадок	2,6	6,47	0,044	0,68	0,48	1,28	4,8
Промытый осадок	0,27	7,18	0,01	0,1	0,053	0,054	3,22

Из маточного раствора, полученного после осаждения кобальта, гидросульфидом натрия извлекли никель. Осаждение вели в течение 60 минут при  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и постоянном перемешивании. В результате был получен осадок, содержащий, мас. %: 29,9 Ni, 0,031 Co, 0,33 Fe, 0,24 Mn, 1,27 Mg, 0,22 Al.

Осаждение кобальта с применением в качестве осаждающих реагентов 2-нафтола и нитрита натрия позволяет селективно извлечь кобальт из продукционного раствора выщелачивания. При этом сопутствующие металлы ввиду неустойчивости их комплексных соединений с 2-нафтолом практически не извлекаются из раствора в осадок.

**В четвертой главе** в качестве способа переработки никель и кобальтсодержащих концентратов проведен обжиг концентратов, полученных в третьей главе.

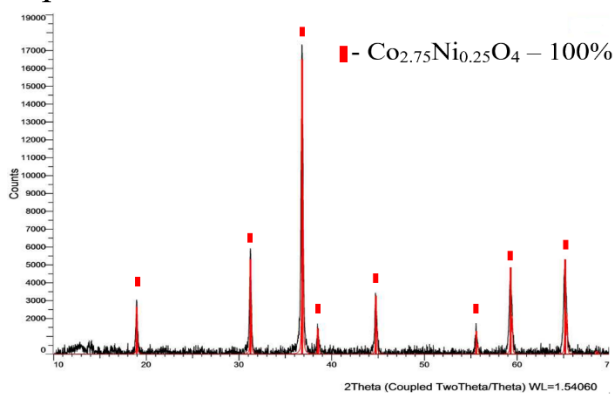


Рисунок 14 – Рентгенограмма кобальтового огарка

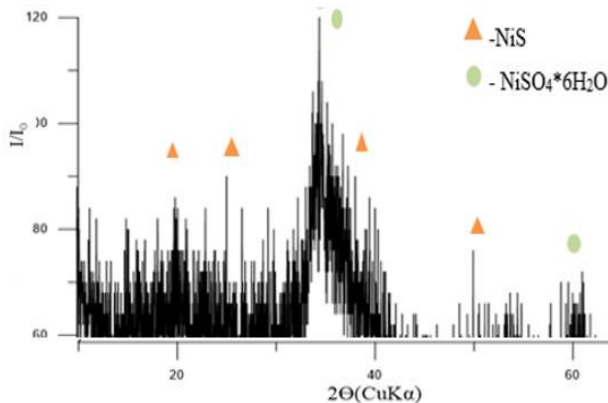


Рисунок 15 – Рентгенограмма никелевого осадка

Кобальтовый осадок, содержащий после промывки и удаления примесей, мас. % (таблица 13): 7,18 Co; 0,27 Ni; 0,054 Fe; 0,01 Mn; 0,1 Mg; 0,053 Al обжигали при  $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 180 минут. В результате полученный огарок содержал 90,9 %  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , 9,1  $\text{Ni}_3\text{O}_4$  (рисунок 14). Такой продукт может быть применен в качестве сырья для пирометаллургического рафинирования кобальта.

Из маточного раствора после осаждения кобальта был получен никелевый осадок, который содержал, мас. %: 29,9 Ni, 0,031 Co, 0,33 Fe, 0,24 Mn, 1,27 Mg, 0,22 Al. Рентгенофазовый анализ осадка показал, что, он состоит преимущественно из сульфатов и сульфидов никеля (рисунок 15). Для разложения сульфатов и удаления серы осадок обожгли при  $T = 1180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В результате был получен огарок (таблица 9, рисунок 16). Наиболее полное удаление серы из огарка достигается и продолжительности процесса 180 минут.

Таблица 9 – Результаты обжига, мас. %

№ оп.	T, °C	t, мин.	Ni	Co	Mn	Mg	Fe	Al	S
Исходный осадок			29,9	0,03	0,24	1,27	0,33	0,22	22,3
1	1180	120	65,3	0,11	0,57	3,6	0,9	0,43	0,072
2	1180	180	65,9	0,1	0,6	3,8	1	0,6	0,043

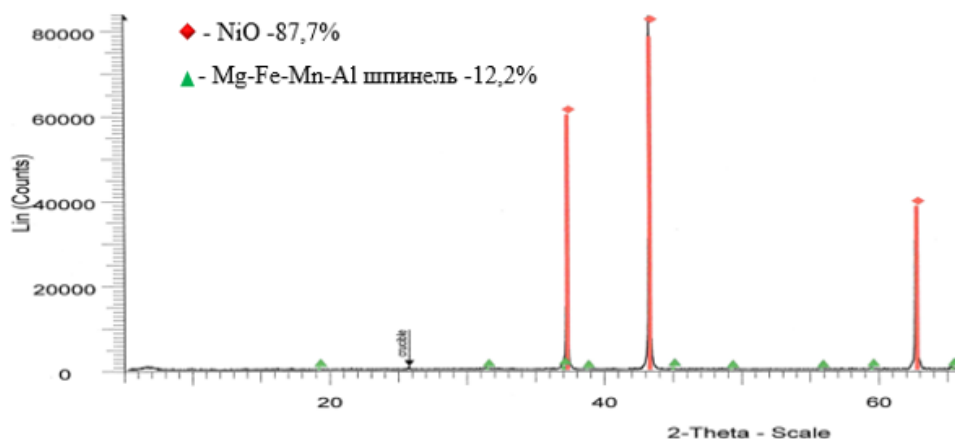


Рисунок 16 – Рентгенограмма огарка, полученного после обжига при  $T=1180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t=180\text{ мин}$

В результате обжига никельсодержащего сульфидного концентрата был получен огарок, содержащий в пересчете на оксиды, мас. %: 87,7 NiO, 0,13 CoO, 0,78 MnO, 6,3 MgO, 1,3 FeO и 1,78  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Данный огарок пригоден для дальнейшей переработки по пирометаллургической схеме.

**В пятой главе** представлена принципиальная технологическая схема переработки железисто-магнезиальной ОНР Серовского месторождения (рисунок 17). В качестве головного процесса её переработки выбрано кучное выщелачивание.

На этапе подготовки к выщелачиванию добытую руду предполагается дробить в две стадии. На первой дробление осуществляется щековыми дробилками до крупности  $-200\text{ мм}$ . После грохочения и классификации руду направляется на вторую стадию, где дробится до крупности  $-50\text{ мм}$ .

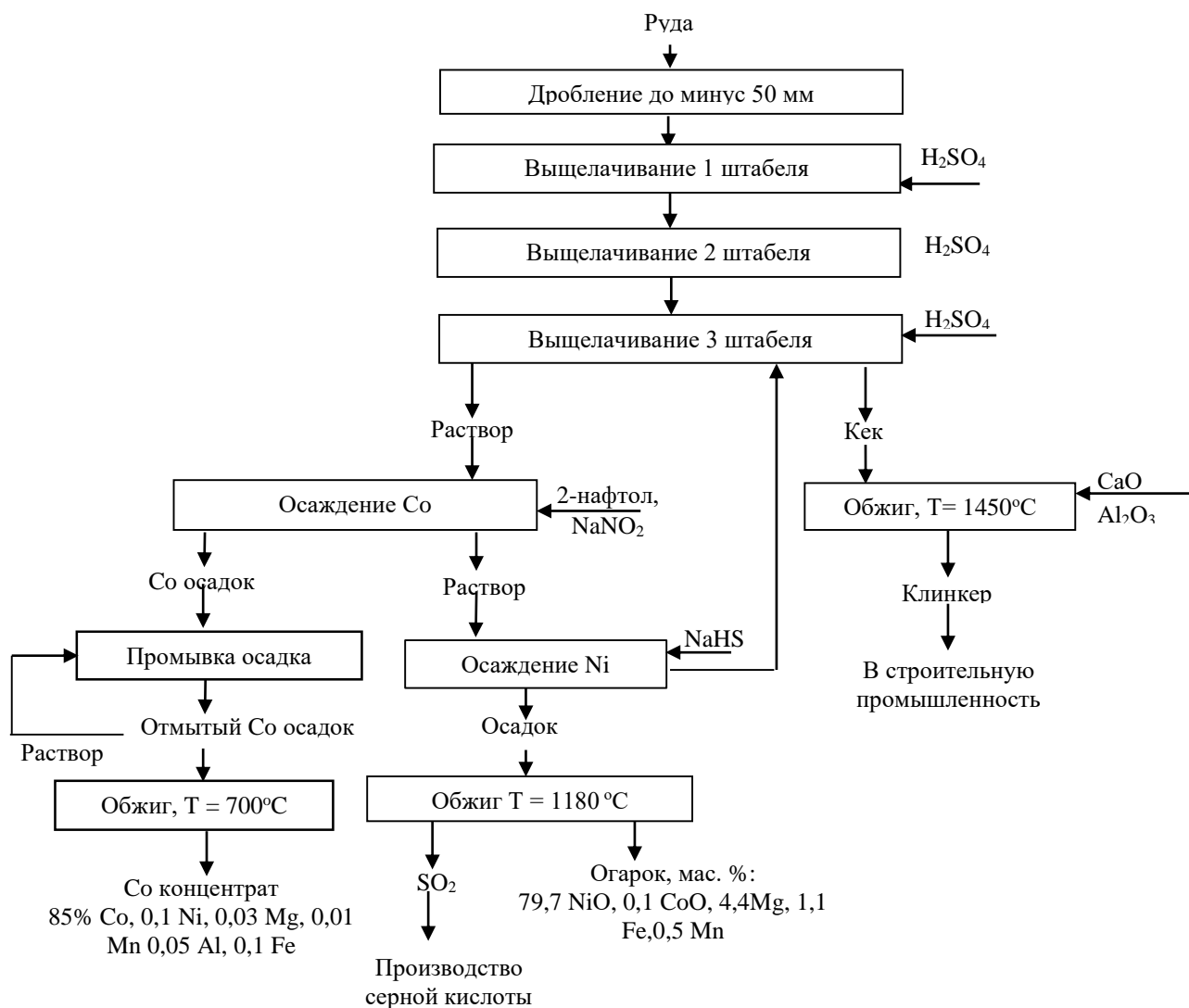


Рисунок 17 – Предполагаемая технологическая схема извлечения никеля и кобальта из окисленных никелевых руд Серовского месторождения

Выщелачивание руды предлагается проводить на естественном глинистом основании. Участок выщелачивания состоит из 3-х штабелей руды по 1 млн. т руды в каждом (рисунок 17). Штабели отсыпаются последовательно, ежегодно по одному штабелю. Продолжительность выщелачивания каждого штабеля составляет 3 года. Из первого штабеля за первый год выщелачивается 40% никеля, за второй – 25%, за третий – 15%. на него растворов с первого штабеля с целью обогащения раствора по содержанию металлов (в зависимости от содержания никеля). На третий год в эксплуатацию вводится третий штабель с подачей растворов со второго штабеля. Таким образом, на третий год общее извлечение никеля составляет 80%, т.е. участок выходит на проектную мощность.

После третьего года эксплуатации первый штабель выводится из цикла выщелачивания. На 4-й год вводится очередной штабель «свежей» руды и т.д. Выщелоченную руду предполагается промывать от остаточных содержаний

серной кислоты путем подачи промывной воды на отработанный штабель и затем использовать в качестве сырья для получения цементного клинкера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучен вещественный состав различных сортов ОНР. Показано, что в железисто-магнезиальной разновидности никель сконцентрирован в лизардите и антигорите (1,6–6,2 мас. % Ni). Общее содержание никеля в руде составляет 1,19 мас. %.

2. Поисковыми лабораторными исследованиями кучного (перколяционного) сернокислого выщелачивания железисто-магнезиальной разновидности ОНР показана возможность перевода в раствор 89% никеля за 440 суток. Повышенный расход кислоты (до 480 кг/т руды) связан с высоким содержанием в сырье железа и магния.

3. Разработан способ получения низкожелезистых никельсодержащих продукционных растворов выщелачивания (0,002-0,02 г/дм<sup>3</sup> Fe и 2-3 г/дм<sup>3</sup> Ni), отличающийся пониженным расходом серной кислоты (до 221 кг/т руды). Снижение расхода кислоты достигается за счет перенаправления высокожелезистых растворов на свежую порцию руды в перколяторе или куче, где железо гидролизуеться в толще руды при pH = 2-3 в виде нерастворимых гидроксидов железа и карбосидеритов.

4. Выполнено теоретическое и экспериментальное обоснование новой технологии кучного выщелачивания ОНР. Усовершенствования связаны со следующими моментами: 1) на стадии извлечения никеля до 10% предложено вести выщелачивание ОНР (размер частиц 50 мм) растворами с концентрацией серной кислоты 15,0-20,0 г/дм<sup>3</sup> с паузой между орошениями 2-4 суток и плотностью орошения 140 дм<sup>3</sup> раствора на тонну руды; растворы с высоким содержанием железа подлежат оборачиванию без доукрепления серной кислотой или направлению на выщелачивание свежей руды с получением растворов при pH=2,5-3; 2) на стадии 10-30%-го извлечения никеля предложено снижать концентрацию серной кислоты в растворе до 10,0 г/дм<sup>3</sup>, а выщелачивание проводить при плотности орошения 140 дм<sup>3</sup>/т и паузе 2-3 суток; 3) на стадии 30-50%-го извлечения необходимо снижать концентрацию кислоты в растворе до 5,0 г/дм<sup>3</sup>, а паузу между орошениями сокращать до 1-2 суток; 4) на этапе 70-80%-го извлечения никеля целесообразно увеличение паузы до между орошениями до 4-7 суток и снижение плотности орошения до 70 дм<sup>3</sup> раствора на тонну руды.

5. Исследованы особенности извлечения никеля и кобальта из растворов выщелачивания методами гидролитического (NaOH), экстракционного (Суанех 301, Гидразекс-59, 2-нафтол) и реагентного (NaHS). Выполнен сравнительный анализ полученных показателей. Установлено, что выделение никеля и кобальта из продукционных растворов кучного выщелачивания целесообразно проводить с экстракцией кобальта 2-нафтолом на первой стадии и осаждением никеля гидросульфидом натрия на второй.

Маточные растворы следует направлять на нейтрализацию с получением оксидов алюминия и марганец-магниевого концентрата.

6. На основании результатов лабораторных исследований предложена технология переработки железисто-магнезиальной ОНР Серовского месторождения. Разработаны принципиальная технологическая и аппаратная схемы производства. Технологическая схема предусматривает двухстадийное дробление руды до крупности -50 мм, кучное сернокислотное выщелачивание, последовательное выделение кобальта и никеля из растворов 2-нафтолом и гидросульфидом натрия и обжиг осадков с получением концентратов, содержащих 85% Со и 65% Ni. Преимуществом технологии является организация замкнутого водооборота.

7. Научные результаты работы рекомендуется использовать в качестве учебно-методических материалов при подготовке специалистов по направлению «Металлургия цветных металлов». Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с исследованием возможности расширения и модификации технологической схемы, обеспечивающей комплексность переработки сырья, замкнутый цикл переработки и отсутствие выбросов продуктов переработки в окружающую среду.

#### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

1. Изучение применимости предложенной технологии для переработки других типов окисленных никелевых руд (ОНР). Экономическая оценка применимости кучного выщелачивания для ОНР.

2. Поиск способов регенерации реагентов и усовершенствования технологии путем введения замкнутого цикла производства.

3. Повышение комплексности переработки за счет извлечения алюминия, марганца и магния в отдельные товарные продукты

4. Испытание технологии в полупромышленном и промышленном масштабе.

#### **Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:**

*Статьи в рецензируемых научных журналах из списка ВАК:*

1. Гаврилов, А.С. Исследование гидролитического способа извлечения металлов из никельсодержащих растворов / А.С. Гаврилов, Б.Д. Халезов, Н.А. Ватолин, Е.А. Зеленин // Проблемы недропользования. – 2014. – № 2 – С. 170-174.

2. Радусhev, А.В. Экстракция никеля и кобальта из сернокислых растворов выщелачивания с использованием реагента на основе гидразидов высших изомерных кислот. / А.В. Радусhev, В.Н. Ваулина, А.В. Харитоновa, Б.Д. Халезов, А.В. Катаев, А.С. Гаврилов // Химическая технология. – 2016. – Т. 17. – № 5. – С. 223-227.

3. Гаврилов, А.С. Перколяционное выщелачивание окисленных никелевых руд./ А.С. Гаврилов, Б. Д. Халезов, А.В. Радусhev, С.А. Петрова, В.Н. Ваулина, А.В. Харитоновa // Бутлеровские сообщения. – 2017. – Т. 49. – № 2. – С. 102-109.

4. Халезов, Б.Д. Гидро-, пирометаллургический способ получения сплавов системы Fe-Ni-Cr-Mn-Si. / Б.Д. Халезов, О.В. Заякин, А.С. Гаврилов, В.И. Жучков // Бутлеровские сообщения. – 2017. – Т. 52. – № 10. – С. 111-117.
  5. Гаврилов, А.С. Оценка возможности извлечения никеля и кобальта из растворов серноокислотного кучного выщелачивания окисленных никелевых руд экстрагентом Гидразекс-59 / А.С. Гаврилов, Б.Д. Халезов // Цветные металлы. – 2017. – № 11. – С. 16-21.
  6. Гаврилов, А.С. Извлечение никеля из растворов кучного выщелачивания руд Серовского месторождения / А.С. Гаврилов, Б.Д. Халезов, А.В. Радусhev, Д.С. Реутов, С.А. Петрова // Бутлеровские сообщения. – 2018. – Т. 56. – № 10. – С. 100-106.
  7. Халезов, Б.Д. Кучное выщелачивание окисленных никелевых руд / Б.Д. Халезов, А.С. Гаврилов, С.А. Петрова, Д.С. Реутов, С.Ю. Мельчаков // Metallurg. – 2019. – № 1. – С. 59-64.
  8. Гаврилов, А.С. Переработка растворов от выщелачивания окисленных никелевых руд / А.С. Гаврилов, Б.Д. Халезов, А.В. Радусhev, Д.С. Реутов, С.А. Петрова // Химическая технология. – 2019. – Т. 20. – № 2. – С. 70-75.
  9. Халезов, Б.Д. Извлечение никеля из растворов гидросульфидом натрия / Б.Д. Халезов, А.С. Гаврилов, С.А. Петрова, Л.А. Овчинникова // Цветные металлы. – 2019. – № 3. – С. 33-38.
  10. Халезов, Б.Д. Исследование твердых остатков, полученных после выщелачивания окисленной никелевой руды. / Б.Д. Халезов, А.С. Гаврилов, С.А. Петрова, С.Ю. Мельчаков // Metallurg. – 2019. – № 8. – С. 77-82.
  11. Гаврилов А.С. Извлечение никеля из окисленных никелевых руд кучным выщелачиванием / А.С. Гаврилов, А.Г. Крашенинин, С.А. Петрова, Д.С. Реутов // Metallurg. – 2022. – № 5 – С. 84-91.
- Публикации в сборниках трудов научных конференций:*
12. Гаврилов, А.С. Необходимость поисковых исследований перколяционного выщелачивания никеля из руды с последующим извлечением никеля и других элементов из растворов / А.С. Гаврилов, Н.А. Ватолин, Б.Д. Халезов, Е.А. Зеленин // IX Междунар. науч.-техн. конф. «Современные проблемы экологии», 29 октября 2013: тезисы докладов. – Тула: Инновационные технологии, 2013. – С. 53-54.
  13. Гаврилов, А.С. Переработка растворов кучного выщелачивания окисленных никелевых руд Серовского месторождения экстракционными, сорбционными и гидролитическими методами / А.С. Гаврилов, Б.Д. Халезов, Н.А. Ватолин и др. // Тр. науч.-практич. конф. с междунар. участ. и эл. шк. мол. уч. «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР», 3-5 июня 2015. – Екатеринбург, 2015. – С. 112-116.
  14. Гаврилов, А.С. Перспективы переработки растворов кучного выщелачивания окисленных никелевых руд Серовского месторождения экстракционными, сорбционными и гидролитическими методами / А.С. Гаврилов, Б.Д. Халезов, Н.А. Ватолин и др. // Сб. материалов II Всеросс.

мол. науч.-технич. конф. с междунар. уч. «Инновации в материаловедении» 1-4 июня 2015, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. – М.: ООО «Ваш полиграфический партнёр», 2015. – С. 412-413.

15. Гаврилов, А.С. Кучное выщелачивание окисленных никелевых руд / А.С. Гаврилов, Б.Д. Халезов, Н.А. Ватолин, Е.А. Зеленин // Тр. науч.-практ. конф. с междунар. участ. «Геотехнологические методы освоения месторождений твердых полезных ископаемых», 17-19 ноября 2015. – М.: ФГУП «ВИМС», 2016. – С. 145-159.

16. Гаврилов, А.С. Оптимальные параметры выщелачивания окисленных никелевых руд Серовского месторождения / А.С. Гаврилов, Б.Д. Халезов, Н.А. Ватолин, Е.А. Зеленин, Д.С. Реутов // III Междунар. мол. науч. конф. «Физика. Технологии. Инновации», 16-20 мая 2016: тезисы докладов; Под ред. А.В. Ищенко и др. – Екатеринбург, 2016. – С. 421-422.

17. Гаврилов, А.С. Осаждение кобальта из продукционных растворов выщелачивания окисленных никелевых руд с применением 2- нафта / А.С. Гаврилов, Д.П. Ординарцев, А.Г. Крашенинин, С.А. Петрова // Сборник трудов V конгресса «Техноген-2021»: Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований, 23-26 ноября 2021. – Екатеринбург: УрО РАН, 2021. – С. 157-160.

18. Гаврилов А.С. Извлечение никеля и кобальта из продукционных растворов кучного выщелачивания окисленных никелевых руд / А.С. Гаврилов, Д.П. Ординарцев, А.Г. Крашенинин, С.А. Петрова // Сборник докладов V Междунар. симпозиума "Уран: геология, ресурсы, производство", 23-24 ноября 2021. – М.: ФГБУ ВИМС им. Н.М. Федоровского – С. 362-371.

#### *Патенты*

1. Пат. № 2618595, Российская Федерация, МПК С22В 23/00 (2006.01), С22В 3/06 (2006.01). Способ переработки окисленных никелевых руд. / Халезов Б.Д., Гаврилов А.С., Крашенинин А.Г., Зеленин Е.А.; заявитель и патентообладатель Институт металлургии УрО РАН; – №2016111038; заявл. 24.03.2016; опубл. 4.05.2017, Бюл. № 13. – 8 с.

2. Пат. № 2621548, Российская Федерация, МПК С22В 23/00 (2006.01), С22В 3/44 (2006.01). Способ переработки никельсодержащих растворов. / Халезов Б.Д., Гаврилов А.С., Зеленин Е.А.; заявитель и патентообладатель Институт металлургии УрО РАН. – №2016107883; заявл. 03.03.2016; опубл. 6.06.2017, Бюл. № 16. – 5 с.

3. Пат. № 2674538, Российская Федерация, СПК С22В 23/00 (2018.08). Способ переработки сульфатных никельсодержащих растворов. / Халезов Б.Д., Гаврилов А.С., заявитель и патентообладатель Институт металлургии УрО РАН. – №2018127442; заявл. 25.07.2018; опубл. 11.12.2018, Бюл. № 35. – 7 с.

Подписано в печать 26.07.2022 Формат 60x84 1/16  
Бумага офсетная Печать офсетная Усл.печ.л. 1.5  
Заказ № 7454Тираж 110 экз.

Отпечатано в типографии  
ООО «Издательство УМЦ УПИ»  
г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф.2  
Тел.: (343) 362-91-16, 362-91-17