

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук

Научный доклад  
по теме научно-квалификационной работы (диссертации):

**Гидрометаллургическое извлечение никеля и кобальта из железистых  
латеритных руд**

Направление подготовки: 22.06.01 Технология материалов

Направленность подготовки Технология черных, цветных и редких металлов

Научная специальность 05.16.02 Металлургия черных цветных и редких металлов

Отрасль науки Металлургия

Аспирант



Хасанов Михаил Шавкатович

Научный руководитель:

Зав. Лаб №1, д.т.н.



Садыхов Гусейнгулу Бахлул оглы

Москва 2020 г.

## Оглавление

Оглавление .....	2
1. Основные положения доклада. ....	3
2. Введение.....	6
3. Термодинамика и эксперименты по восстановительному обжигу. ....	8
4. Кинетика и эксперименты по выщелачиванию.....	12
5. Выводы.....	15
6. Литература.....	16
ПРИЛОЖЕНИЕ А.	

## 1. Основные положения доклада.

**Актуальность работы.** Мировое производство нержавеющей стали на основе никеля ежегодно увеличивается, и в 2019 году составило 52,2 млн. тонн. Так же растет потребность в никеле для производства аккумуляторов электротранспорта (в 1,7 раза в период с 2018 по 2020 год), и по оценке составит 1,8 млн. тонн к 2030 году. Основным источником никелевого сырья являются латеритные и сульфидные руды, в которых по данным USGS содержатся около 130 млн. тонн никеля. Сульфидные руды составляют 30% от общемировых запасов, хорошо изучены и активно разрабатываются. В латеритных рудах сосредоточено около 70% мировых запасов никеля, однако такие руды являются бедными и содержат в среднем не более 1,2% никеля, а в сульфидных – 3,5%. Постепенное истощение сульфидных месторождений делает актуальной разработку новых эффективных способов переработки латеритных никелевых руд. Существующие методы переработки латеритных руд обладают рядом серьезных недостатков – большое количество техногенных отходов – шлаковых гор, содержащих 0,3-0,4% никеля, высокое энергопотребление (аммиачно-карбонатное выщелачивание), высокие конструкционные затраты и необходимость работы в узком диапазоне состава руд (автоклавное выщелачивания).

В окисленных рудах сопутствующим никелю металлом является кобальт, содержание которого в окисленных рудах составляет около 0,05-0,2%, однако из-за его высокой стоимости на рынке металлов, он так же является перспективным к извлечению.

**Научная новизна.** На основании исследований физико-химических особенностей процессов восстановительного обжига и сернокислотного выщелачивания разработан новый технологический процесс селективного извлечения никеля и кобальта из железистых латеритных руд.

На основании модели сжимающегося ядра была получена кинетическая модель процесса выщелачивания системы Fe-Ni-Co серной кислотой, позволяющая описать скорость протекания реакций в растворе выщелачивания.

Выявлено, что при добавлении твердого восстановителя в шихту, возможно проводить восстановительный обжиг при более низких температурах, сохраняя высокую степень металлизации никеля и кобальта.

**Теоретическое и прикладное значение.** На основании проведенных исследований можно судить о применимости нового способа селективного извлечения никеля и кобальта к большинству железистых латеритных руд.

Предложена принципиальная технологическая схема извлечения никеля и кобальта из железистых латеритных руд по схеме «восстановительный обжиг-сернокислотное

выщелачивание».

Определен химизм процессов, протекающих в основных стадиях переработки латеритных никелевых руд по предложенной схеме.

Разработанная схема возможна к применению на Южно-Уральском никелевом комбинате, при соответствующих изменениях в технологической линии предприятия, включающих дополнение имеющейся производственной базы.

**Объект и предмет исследования.** Основные месторождения латеритных руд расположены в основном в тропическом и субтропическом поясах, в таких странах как Индонезия, Филиппины, Австралия, Бразилия и др. В России так же находится месторождение окисленных никелевых руд, Буруктальское, расположенное на южном Урале. В нем сосредоточено примерно 6,2% разведанных российских запасов никеля при среднем содержании 0,63%. Так же эти руды содержат около 0,05% кобальта. Для Южно-Уральского никелевого комбината Буруктальское месторождение окисленных никелевых руд является основной ресурсной базой, однако в сентябре 2012 года предприятие было вынуждено закрыться по причине снижения цены никеля на рынке металлов и выхода за грань рентабельности.

По составу основных компонентов окисленные никелевые руды условно делят на железистые (70% от числа ОНР) и силикатные руды (30%). Содержание никеля в рудах составляет 0,8-1,3% для бедных, железистых руд и 1,9-3,0% для силикатных. Железистые руды залегают у поверхности, а силикатные находятся под ними на глубине 10-50 метров.

Объектом исследования служила железистая латеритная руда Буруктальского никелевого месторождения, в котором сосредоточено ок. 1400 тыс. т никеля.

**Цель исследования.** Разработка физико-химических основ нового эффективного процесса селективного извлечения никеля из железистых латеритных руд по схеме «восстановительный обжиг – сернокислотное выщелачивание».

**Задачи исследования.**

1) Термодинамический анализ восстановления железистых латеритных руд при заданном интервале температур.

2) Изучение условий избирательного восстановления оксида никеля и кобальта до металлического состояния из железистых латеритных руд газообразным восстановителем в заданной области температур.

3) Изучение условий выщелачивания восстановленной железистой латеритной руды с целью селективного извлечения никеля и кобальта в раствор (Т, рН, продолжительность). Определение кинетических параметров процесса выщелачивания.

4) Определение химизма процесса выщелачивания восстановленной руды с селективным извлечением никеля и кобальта в раствор.

5) Выбор и обоснование способа извлечения никеля и кобальта из раствора с учетом возможности возвращения отработанного раствора в процесс выщелачивания.

6) Разработка принципиальной технологической схемы гидрометаллургического извлечения никеля и кобальта из железистых латеритных руд в замкнутом водном цикле.

7) Экономическое обоснование разработанной схемы.

**Методика исследования.** Работа выполнена с использованием современных методов исследования, таких как гранулометрический анализ методом ситового анализа и лазерной дифракции, анализ фазового состава методом фракционного и рентгенофазового анализа, содержание металлов в растворе выщелачивания определяли методом атомной абсорбции. Эксперименты по восстановительному обжигу проводили в трубчатой печи Nabertherm, выщелачивание проводили на лабораторной установке Mettler Toledo T50. Термодинамическое моделирование производилось с использованием баз данных программного пакета FactSage версии 7.1, 2016 г.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов и списка литературы.

**Основные положения, выносимые на защиту.** Результаты исследований минералогического, гранулометрического, химического анализа железистой латеритной никелевой руды Буруктальского месторождения.

Результаты термодинамического моделирования процесса восстановительного обжига железистой латеритной руды.

Результаты расчета кинетических параметров процесса выщелачивания продукта восстановительного обжига.

Разработанная принципиальная технологическая схема переработки железистой латеритной руды по пути «восстановительный обжиг – сернокислотное выщелачивание», применимая к широкому спектру латеритных руд по составу.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертации обсуждались на 8 конференциях, из них 2 – международные. По теме диссертации опубликовано 14 работ, из которых 3 входят в список рекомендуемых к публикации изданий ВАК. По теме диссертационного исследования была получена поддержка от Фонда Содействия Инновациям в рамках конкурса УМНИК-2018.

## 2. Введение.

Никель является одним из важнейших металлов в промышленности, применяемым при производстве нержавеющей стали, сплавов с особыми свойствами, гальванике, в медицине и других отраслях. Одним из основных источников никелевого сырья в мире являются окисленные никелевые руды, запасы которых, в пересчете на никель, составляют 70% от общемировых [1].

Окисленные никелевые руды условно делятся на железистые и силикатные руды. В окисленных никелевых рудах содержится по подсчетам, из которых около 90 млн.т в железистых, а 40 млн.т в силикатных рудах [2]. На рис.1 изображен характер залегания окисленных никелевых руд по высоте пласта. Видно, что железистые руды (1) залегают у поверхности, а силикатные (2) находятся под ними на глубине 10-50 метров.

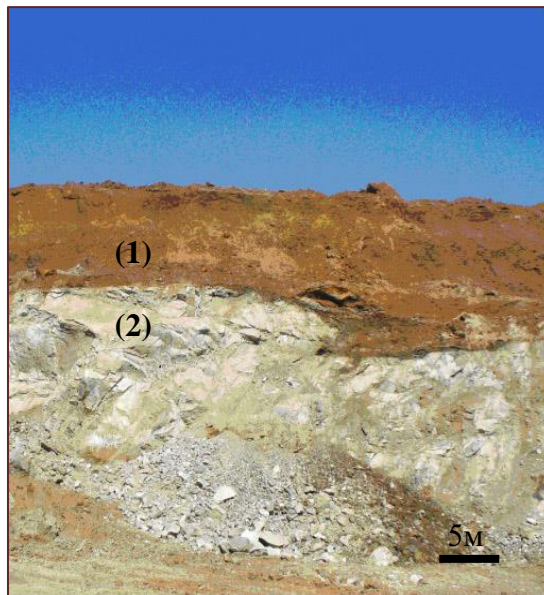


Рис. 1. Характер залегания пласта окисленных никелевых руд

В данной работе была исследована окисленная железистая руда Буруктальского никелевого месторождения, обладающего значительным количеством никеля (ок 1400 тыс. тонн никеля). На данном месторождении выделяют два технологических вида никелевых руд – железистые ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 25\%$ ) и магнезиальные ( $< 25\% \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) [3,4].

В промышленности окисленные никелевые руды перерабатывают пирометаллургическим и гидрометаллургическим способами [5]. Крупными производителями никеля из окисленных никелевых руд являются Китай, Индонезия, Филиппины, Канада, Австралия, Новая Каледония, Бразилия. По традиционному подходу для переработки руд с высоким содержанием железа эффективным является применение сернокислотного автоклавного выщелачивания. К менее окисленным рудам применяют аммиачно-карбонатное выщелачивание, включающее стадию восстановительного обжига руд [1,6,7]. Переработка слоя силикатных окисленных руд с содержанием железа ниже 20% осуществляется выщелачивание при атмосферном давлении, а так же кучное

выщелачивание открытым способом, сульфатизация руд с дальнейшим водным выщелачиванием, а также пирометаллургические способы получения ферроникеля: электроплавка (Elkem процесс) и кричный процесс (Krupp-Renn процесс) [8-10]. Однако при повышенном содержании железа (более 20-25%) получается ферроникель с низким содержанием никеля (4-7%) и с высокой себестоимостью. Кроме этого, низкосортный ферроникель не всегда находит своего потребителя, что делает его невостребованным.

Известные промышленно применяемые гидрометаллургические технологии переработки железистых никелевых руд сегодня считаются низкоэффективными из-за высокой себестоимости получаемого никеля и никелевой продукции. По себестоимости никеля аммиачные технологии находятся на примерно одинаковом уровне с технологиями электроплавки, однако не позволяют извлекать сопутствующие металлы [11].

Технология сернокислотного автоклавного выщелачивания (HPAL) работает в узком диапазоне состава руд, выход за рамки которого может повлечь повышенное содержание примеси в готовом продукте. Высокое содержание железа и алюминия в выщелачиваемой руде и плохое качество используемой воды могут приводить к образованию в реакторе нерастворимых отложений, способных связать большую часть никеля и кобальта, а также сокращают эксплуатационный срок работы автоклавов [12]. Высокое содержание магния приводит к увеличению расхода сернокислого раствора, для получения которого требуется закупать серу, а также строить завод по производству серной кислоты, основанный на сжигании серы. Для HPAL технологии требуются надежные источники серы для кислоты и известняка для нейтрализации отработанных растворов.

Хорошо отработанной является технология аммиачно-карбонатного выщелачивания, применяемая на австралийском заводе Гринвейл. Она, используя современные методы жидкостной экстракции, позволяет получать высококачественные никель и кобальт, хотя извлечение их намного ниже, чем при автоклавном сернокислотном выщелачивании (60 – 70% никеля, 20 – 40% кобальта). Применяемая на заводе технология менее чувствительна к типу перерабатываемой руды, однако она и более дорогая [13]. Вышеперечисленные недостатки негативно сказываются на себестоимости получаемого никеля, что позволяет судить о необходимости поиска новых путей переработки окисленных железистых никелевых руд.

### 3. Термодинамика и эксперименты по восстановительному обжигу.

В ходе работы был проведен расчет термодинамических эффектов возможных реакций при восстановительном обжиге в газовой атмосфере. Основными компонентами руды, которые могут участвовать в процессе восстановления, являются оксиды железа, никеля и кобальта, находящиеся в минералах гетит, маггемит. При этом проведение процесса должно осуществляться в условиях обеспечения селективного восстановления никеля и кобальта, позволяющих восстановить никель и кобальт полностью до металла, и ограничить при этом восстановление железа из оксидов. Это возможно достичь за счет того, что у железа несколько выше сродство к кислороду, чем у никеля и кобальта [14].

Для оценки теоретической возможности протекания данных процессов был проведен термодинамический анализ реакции с восстановителями  $H_2$  и  $CO$ , которые являются могут быть получены при неполном сгорании природного газа с отношением  $\alpha < 1$ . Зависимость  $\Delta G$  от температуры (400-1200°C) для исследуемых реакций представлена в Табл.1., однако следует отметить, что в лабораторных условиях проведение опытов с  $CO$  в качестве восстановителя нарушает технику безопасности, в виду его высокой токсичности для организма. Эксперименты по обжигу проводятся с применением водорода, т.к. оба эти восстановителя обладают схожей активностью в исследуемом температурном интервале.

№	Реакции	Энергия Гиббса ( $\Delta G$ ), Дж/моль				
		400°C	600°C	800°C	1000°C	1200°C
1	$Fe_2O_3 + CO = Fe_3O_4 + CO_2$	-47768	-55375	-62401	-68910	-75593
2	$Fe_2O_3 + CO = FeO + CO_2$	-21331	-29383	-35584	-41624	-47686
3	$Fe_2O_3 + CO = Fe + CO_2$	-28257	-25723	-22941	-20560	-18127
4	$Ni + Fe_2O_3 = NiO + Fe_3O_4$	-24858	-36594	-46991	-57609	-68151
5	$Fe_3O_4 + CO = FeO + CO_2$	3655	-2268	-6328	-10631	-1375
6	$NiO + CO = Ni + CO_2$	-46743	-46617	-46504	-45908	-45487
7	$FeO + CO = Fe + CO_2$	-3263	1581	6220	10631	14678
8	$CoO + CO = Co + CO_2$	-37481	-33958	-30414	-27246	-24023
9	$Co + Fe_2O_3 = CoO + Fe_3O_4$	-34321	-48953	-63181	-76268	-89815
10	$Fe_2O_3 + H_2 = Fe_3O_4 + H_2O$	-19655	-25423	-31295	-36594	-41735
11	$FeO + H_2 = Fe + H_2O$	9570	8130	6428	4662	2912
12	$Fe_2O_3 + H_2 = FeO + H_2O$	-8194	-23042	-35576	-47593	-59353
13	$Fe_3O_4 + H_2 = FeO + H_2O$	16691	4271	-6520	-16598	-26526
14	$Fe_3O_4 + H_2 = Fe + H_2O$	46106	28165	12666	-2919	-16987
15	$CoO + H_2 = Co + H_2O$	-24646	-27617	-30606	-32915	-35890
16	$NiO + H_2 = Ni + H_2O$	-33508	-40476	-46496	-52077	-57354

Табл. 1. Расчетные значения энергии Гиббса реакций восстановления никеля, железа и кобальта (FactSage 7.1)

Согласно полученным с помощью программы термодинамического моделирования расчетным данным получено, что при повышении температуры от 400 до 1200°C, вероятность исследуемых реакций возрастает не зависимо от типа применяемого восстановителя. Известно, что процесс восстановления  $Fe_2O_3$  до  $Fe$  проходит с



последовательным образовыванием промежуточных соединений ( $Fe_3O_4$ ,  $FeO$ ,  $Fe_{мет}$ ). Согласно справочным данным, при температурах ниже  $570^\circ C$  восстановление железа протекает напрямую из магнетита без стадии образования  $FeO$  (рис.2).

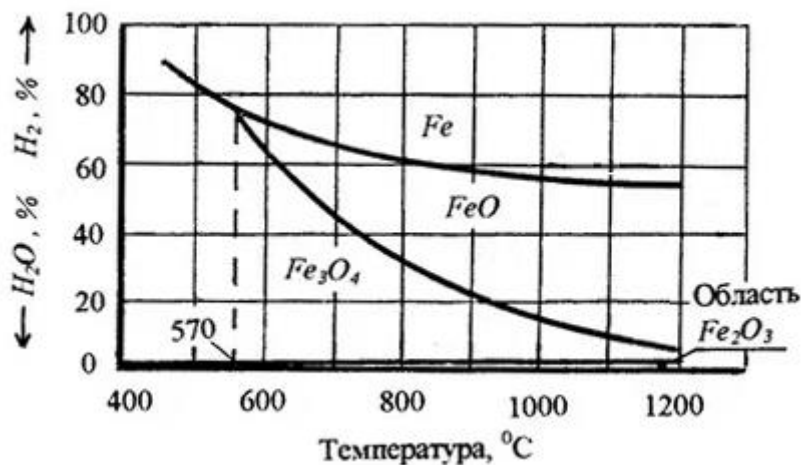


Рис. 2 – Диаграмма восстановления железа водородом.

При восстановлении железистых никелевых руд образование  $FeO$  при восстановительном обжиге оказывает отрицательное влияние на характеристики процесса выщелачивания, т.к. увеличивается расход серной кислоты. Поведение кобальта при отличается от поведения никеля, однако энергия реакции его восстановления так же отрицательна, что позволяет судить о высокой вероятности его восстановления (Рис. 3). На всем интервале температур наблюдается свободное восстановление никеля и кобальта.

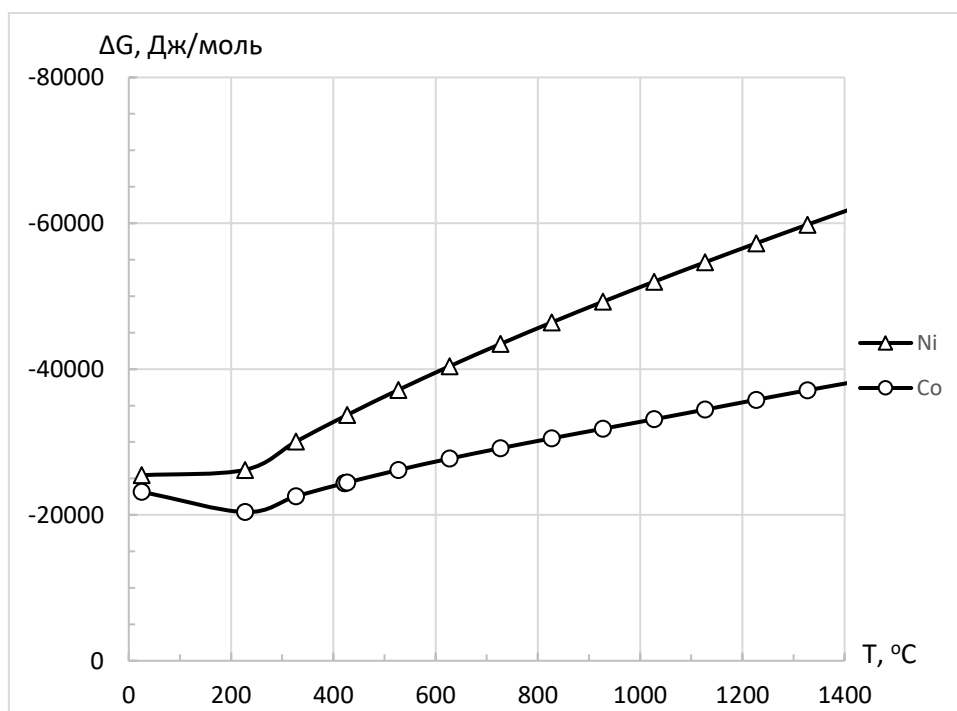


Рис. 3. – Энергия реакций восстановления оксидов никеля и кобальта водородом.

Для определения оптимального температурного режима процесса были проведены дополнительные расчеты энергий реакции полупродуктов между собой в ходе восстановительного обжига. Было получено что термодинамически вероятно протекание

восстановления оксида никеля и кобальта с помощью оксида железа II (рис. 4.). При этом с дальнейшим ростом температуры, энергия реакции восстановления никеля и кобальта по этому механизму снижается. Так же отмечено, получаемый после восстановления магнетит не восстанавливает никель и кобальт на всей области температур.

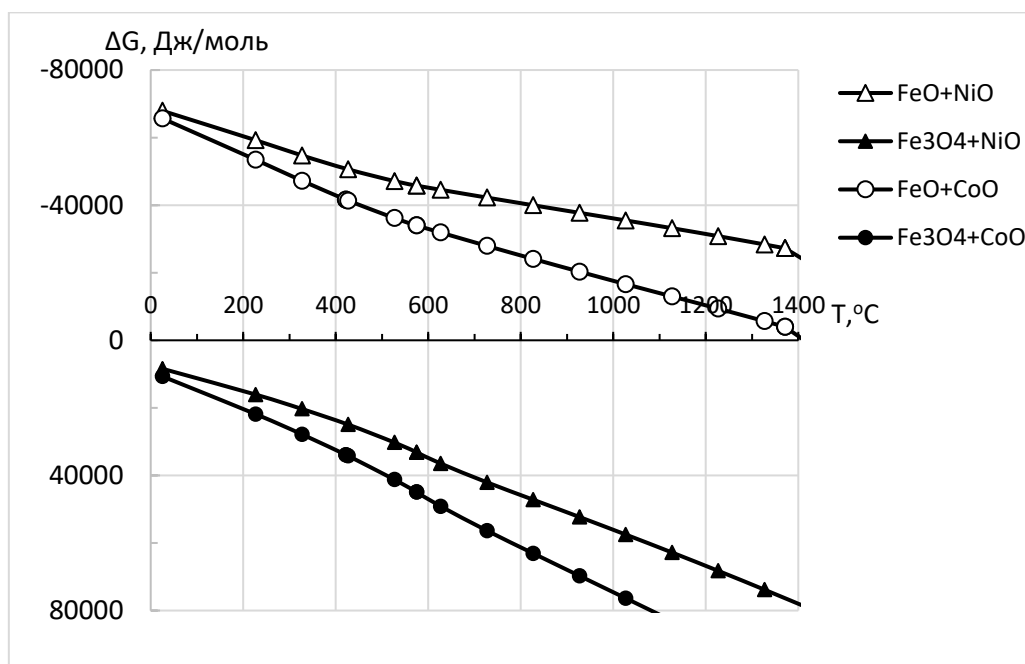


Рис. 4. – Восстановительная способность промежуточных продуктов процесса восстановления железистой латеритной руды к никелю и кобальту

Следует отметить, что теоретические термодинамические эффекты реакций являются отражением процесса восстановления при идеальных условиях, поэтому на практике принимают допущение, что реакции протекают свободно, если энергия Гиббса реакции имеет значение ниже  $-40\text{ кДж/моль}$  [15].

Т.о. оптимальные условия восстановления никеля и кобальта достигаются в интервале температур  $700\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ . При этих условиях на оксиды никеля и кобальта воздействуют сразу два восстановителя – водород и, образующийся в процессе восстановления, оксид железа II, причем количество восстановившегося железа до FeO достаточно мало, и не окажет большого влияния на расход серной кислоты на дальнейшей стадии извлечения никеля и кобальта из латеритных руд.

Исходя из полученных ранее термодинамических характеристик процесса восстановления окисленных железистых руд, была составлена лабораторная установка для проведения процесса восстановительного обжига в атмосфере восстанавливающих газов. Принципиальная схема лабораторной установки приведена на Рис. 5.

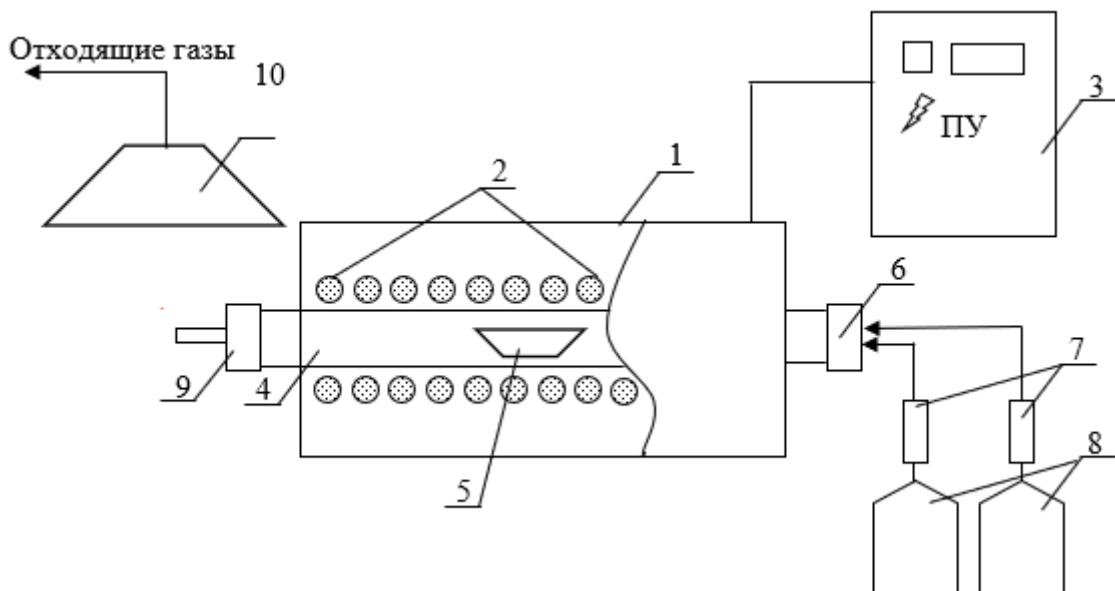


Рис. 5. Схема лабораторной установки для проведения экспериментов по восстановительному обжигу

Трубчатая печь 1 имеет внутри нагревательные элементы 2, напряжение на которых задается на пульте управления 3, для поддержания заданной температуры восстановительного обжига. В трубчатый под печи 4 загружается кварцевая лодочка 5 и печь закрывается. С закрытого газовым смесителем 6 конца пода печи начинается продувка инертным газом, для выдувки воздуха и создания инертной атмосферы. Затем на печь подается напряжение, а на редукторах 7 выставляется заданное соотношение газовых восстановителей в баллонах 8. Процесс в печи идет в газовом потоке, который выходит из нее через фланец 9, на конце которого расположен факел дожига непрореагировавшего объема газов. Отходящие газы улавливаются вытяжкой 10.

Данная установка позволяет создать внутри печи атмосферу восстановительных газов для проведения исследуемого процесса с поддержанием заданного уровня температуры, смешения и расхода газовой фазы, что позволит провести в дальнейшем серию экспериментов по восстановлению окисленной железистой руды Буруктальского месторождения.

#### 4. Кинетика и эксперименты по выщелачиванию.

Анализ современной литературы по вопросу изучения кинетических параметров выщелачивания железистых никелевых руд, который показал, что для определения механизмов процесса перевода никеля в раствор и обработки экспериментальных исследований применяют модель сжимающегося ядра (Shrinking core model, Рис. 6.) — кинетическую модель для систем твердое – жидкость [16,17].

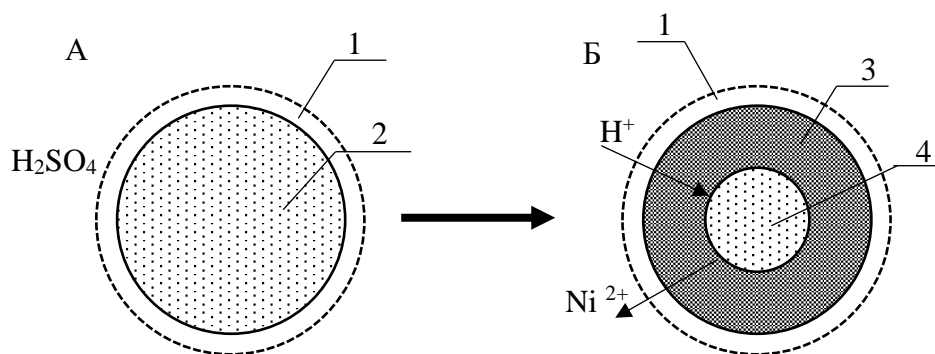


Рис. 6. Модель сжимающегося ядра (SCM).

В соответствии с положениями модели, 1- поверхность контакта частицы с жидким раствором кислоты; 2- частица восстановленного металла (Fe-Ni-Co); 3- твердый слой продуктов реакции выщелачивания; 4- непрореагировавшая часть металлического ядра. Зона протекания реакции с раствором кислоты постепенно продвигается внутрь частицы (Рис. 6.Б.), образуя на поверхности инертную твердую часть. При описании кинетики процесса по SCM рассматривают три варианта механизмов протекания реакции:

- внешнедиффузионный, зависящий от подвода кислоты через жидкий слой;
- внутридиффузионный – через слой твердого продукта или пористую структуру;
- кинетический – обусловленной протеканием реакции непосредственно между жидкостью и твердым материалом.

Были получены уравнения, описывающие глубину превращения целевых металлов по модели SCM (1-3).

$$x = k_f t \quad \text{- внешнедиффузионный режим} \quad (1)$$

$$1 - 3(1 - x)^{2/3} + 2(1 - x) = k_d t \quad \text{- внутридиффузионный режим} \quad (2)$$

$$1 - 3(1 - x)^{1/3} = k_r t \quad \text{- кинетический режим} \quad (3)$$

где  $x$  – извлечение металла,  $t$  – время выщелачивания,  $k_f$ ,  $k_d$ ,  $k_r$  – константы скорости.

Эти зависимости необходимы для составления серии экспериментов по выщелачиванию получаемого огарка на стадии восстановительного обжига окисленных железистых руд.

Была разработана серия экспериментов для определения значений коэффициентов корреляции  $R^2$  для получения лимитирующей стадии процесса выщелачивания никеля и кобальта. Эксперименты по выщелачиванию проводились на установке схема которой

представлена на Рис. 7.

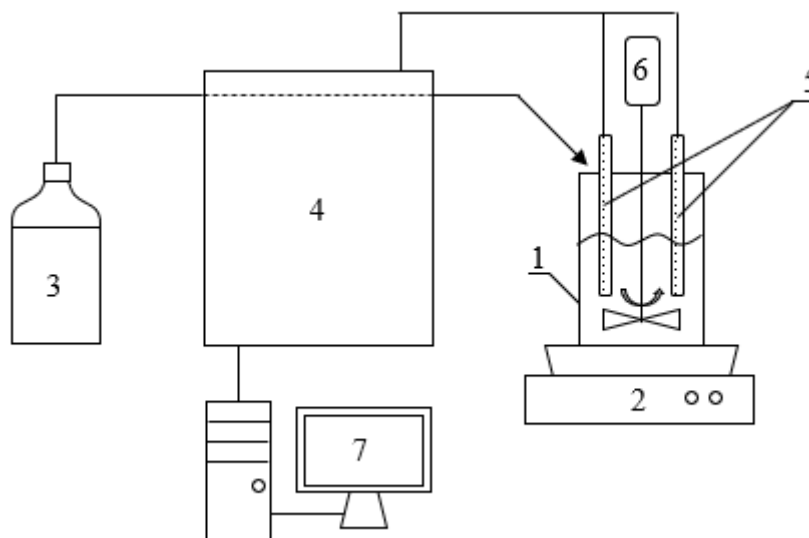


Рис. 7. Принципиальная схема лабораторной установки по выщелачиванию восстановленной железистой латеритной руды.

Разработана методика эксперимента, при которой проба восстановленной латеритной руды загружается в емкость 1, установленную на электроплитку 2. Раствор разбавленной серной кислоты 3 поступает в систему автоматической подачи кислоты 4, к которой подключены датчики 5 уровня рН среды и температуры. Перемешивание ведется механически при помощи лопастной мешалки 6. Данные об изменении параметров проводимого опыта фиксируются и передаются на компьютер 7. Конечный раствор, содержащий целевые металлы никель и кобальт, по завершении опыта фильтруется для отделения от пульпы. Реализация процесса на такой установке позволяет вместе с поддержанием заданной температуры, продолжительности и рН так же фиксировать расход кислоты в зависимости от времени процесса выщелачивания.

Эксперименты по сернокислотному выщелачиванию восстановленной руды осуществляли с поддержанием заданной кислотности раствора рН 1,8 – 2,0. Соотношение твердой к жидкой фазе Т:Ж поддерживалось на уровне 1:4, интервал температур 80 – 95 °С. Расчетные данные приведены в Табл.2.

рН	Т,°С	R <sup>2</sup> вн.д.	R <sup>2</sup> внутр.д.	R <sup>2</sup> кинет.	K <sub>f</sub> 10 <sup>-3</sup> мин <sup>-1</sup>	k <sub>d</sub> 10 <sup>-3</sup> мин <sup>-1</sup>	k <sub>r</sub> 10 <sup>-3</sup> мин <sup>-1</sup>
1,8	80	0,93	0,95	0,94	2,73	0,46	1,40
	90	0,98	0,99	0,99	1,81	0,46	1,09
	95	0,76	0,76	0,76	1,33	0,36	0,90
2,0	80	0,89	0,93	0,91	2,51	0,38	1,27
	90	0,68	0,65	0,66	1,33	0,31	0,84
	95	0,42	0,39	0,41	0,95	0,25	0,67

Табл.2. – Изменение коэффициента корреляции и констант скорости выщелачивания латеритной руды.

Было получено, что коэффициенты корреляции и константы скорости реакции для заданного интервала рН и температур соответствуют внутридиффузионному режиму.

Так же было получено, что при оптимальных условиях выщелачивания, достигается степень извлечения никеля 90 – 95% и кобальта 80 – 85% (Рис.8 А,Б). Так же получено, что минимально необходимый удельный расход кислоты для достижения указанной степени извлечения составляет 1,8 – 2,0 г раствора на 1 г руды, т.е. 180 – 200 кг серной кислоты на 1 тонну руды.

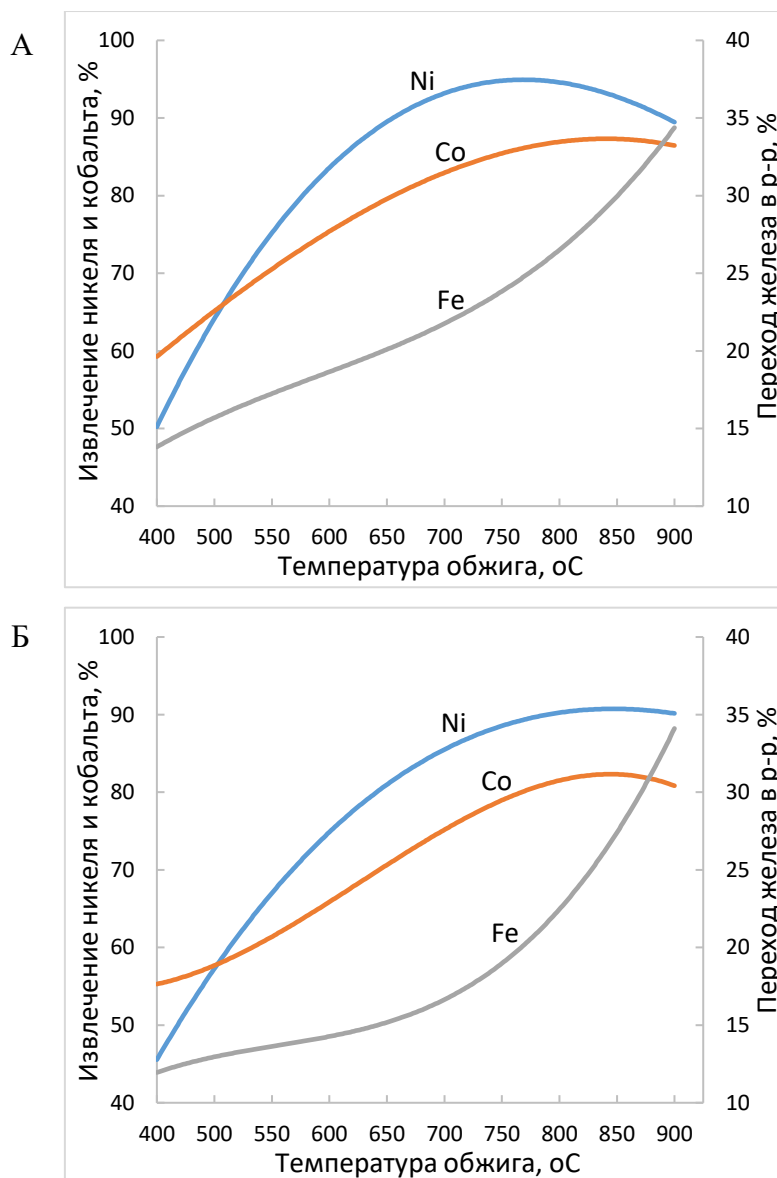


Рис. 8. – Зависимость степени извлечения от температуры восстановительного обжига в процессе выщелачивания при рН = 2,5 (А) и рН = 3,0 (Б)

## 5. Выводы.

Было изучено состояние проблемы переработки латеритных руд в мировой промышленности и подготовлен аналитический обзор применяемых методов на предприятиях металлургии. В соответствии с данными научной литературы, проблема переработки железистых латеритных руд является перспективной к развитию отрасли. Существующие методы обладают существенными недостатками, которые повышают себестоимость получаемого никеля, либо не позволяют извлекать никель и сопутствующие металлы полностью.

Для решения этой проблемы было проведено теоретическое исследование процесса восстановительного обжига железистой латеритной руды в атмосфере восстановительного газа, основным активным компонентом которого является водород. Расчетным путем получено, что при поддержании температуры в области 700 – 800 °С восстановление происходит не только за счет газового восстановителя, но и за счет полупродукта восстановления оксидов железа. Такой режим позволяет наиболее полно восстановить никель и кобальт до металлического состояния при минимальном расходе газового восстановителя и продолжительности обжига.

Основываясь на полученных результатах выполнены экспериментальные исследования по восстановительному обжигу латеритной руды и выщелачиванию продукта восстановления с целью перевода никеля и кобальта в раствор. Было установлено, что растворение никеля и кобальта при выщелачивании продукта восстановительного обжига протекает по внутридиффузионному механизму. Определены оптимальные условия проведения процесса выщелачивания, при которых достигается степень извлечения никеля до 95% и кобальта до 85%.

На основании полученных результатов была разработана принципиально новая технологическая схема процесса извлечения никеля и кобальта из железистых латеритных руд по схеме «восстановительный обжиг-сернокислотное выщелачивание» (Приложение А).

## 6. Литература.

1. Резник И.Д. Никель, Том 2./ И.Д. Резник, Г.П. Ермаков, Я.М. Шнеерсон. – М.: ООО «Наука и технологии», 2000.- 467 с.
2. Кривцов А. И. Минерально-сырьевая база благородных и цветных металлов к 2025 году. Мир и Россия./ А.И. Кривцов, Б.И. Беневольский, С.С. Вартамян; Ред. И.Ф. Мигачев. – М.: ЦНИГРИ, 2003.- 95 с.
3. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Никелевые и кобальтовые руды. – М: ФГУ ГКЗ, 2007.- 37 с.
4. Рыжкова С.О. Типы руд и особенности формирования Буруктаьского никелевого месторождения (Южный урал): автореф. дисс. ... канд. гео-мин. наук: 25.00.11. — СПб., 2010. – 20 с.
5. Уткин Н.И. Металлургия цветных металлов. – М.: Metallurgy, 1985.- 440 с.
6. Пименов Л.И. Переработка окисленных никелевых руд./ Л.И. Пименов, В.И. Михайлов. – М.: Metallurgy. 1972. 336 с.
7. Баженова О.В., Медведев А.С., Медков М.А., Чириков А.Ю. Варианты гидрометаллургической переработки техногенных отходов окисленных никелевых руд// Сб.тр. «IV Международный конгресс «Цветные металлы-2012». Красноярск, 2012. с. 139-143.
8. Гасик М.И., Теория и технология производства ферросплавов/ М.И. Гасик, Н.П. Лякишев, Б.И. Емлин. – М.: Metallurgy. 1988. 784 с.
9. Игревская Л.В. Тенденция развития никелевой промышленности. Мир и Россия: автореф. дисс. ... докт. гео-мин. наук: 25.00.11., 25.00.35 — М., 2009. – 52 с.
10. Серебряный Л.Я. Электроплавка сульфидных медно-никелевых руд и концентратов. – М.: Metallurgy, 1974.– 248 с.
11. Лакерник М.М., Севрюков Н.Н. Metallurgy цветных металлов. М.: Metallurgizdat, 1957. – 535 с.
12. Борбат В.Ф., Лещ И.Ю. Новые процессы в металлургии никеля и кобальта. М.: Metallurgy, 1976, - 360 с.
13. Матвеев Ю.Н., Стрижко В.С. Технология металлургического производства. – М.: Metallurgy, 1986.– 368 с.
14. Басов А.И., Ельцев Ф.П. Справочник механика заводов цветной металлургии. – М.: Metallurgy, 1981. – 496 с.
15. Карапетьянц М.Х. Общая и неорганическая химия / М.Х. Карапетьянц, С.И. Дракин. – М.:Химия, 2000. – 588 с.



16. Oderinde R.A., Olanipekun E.O. Kinetics of hydrochloric acid leaching of laterite // Pakistan journal of scientific and industrial research. 1992. Vol. 35. P. 77-80
17. Ayanda O.S., Adekola A.F. Comparative Study of the Kinetics of Dissolution of Laterite in some Acidic Media // Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering. 2011. Vol. 10, No. 15. P. 1457-1472.

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

