

Общество с ограниченной ответственностью «Институт Гипроникель»

На правах рукописи

Рябушкин Максим Игоревич



РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НИКЕЛЕВОГО ПОРОШКА
ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЕГО ПЕРЕРАБОТКИ ПУТЕМ
ХЛОРНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ И ЭЛЕКТРОЭКСТРАКЦИИ НИКЕЛЯ

Специальность 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Цымбулов Л.Б.

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАКИСИ НИКЕЛЯ	11
1.1 Промышленные способы восстановления закиси никеля	11
1.1.1 Получение никелевого порошка в печах кипящего слоя или многоподовых печах	11
1.1.2 Восстановление закиси никеля в трубчатых печах	13
1.1.3 Переработка окисленного никелевого огарка в трубчатой печи в КГМК.....	14
1.2 Термодинамика восстановления закиси никеля различными восстановителями	20
1.3 Механизм и кинетика восстановления	23
1.3.1 Общие закономерности	23
1.3.2 Кинетика восстановления закиси никеля.....	24
1.3.3 Влияние вида восстановителя на кинетику процесса.....	26
1.4 Факторы, влияющие на степень восстановления закиси никеля	29
1.4.1 Температура процессов получения закиси никеля и восстановления.....	29
1.4.2 Состояние поверхности и кристаллической решетки восстановленной закиси никеля	30
1.5 Методы разделения восстановленной закиси никеля от немагнитной фракции	32
1.6 Выводы по главе 1	33
ГЛАВА 2 ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИБОРЫ И УСТАНОВКИ	36
2.1 Приборное и программное обеспечение при проведении исследований.....	36
2.1.1 Аналитическая химия	36
2.1.2 Электронная микроскопия и микроанализ.....	37
2.1.3 Рентгенофазовый анализ.....	38
2.1.4 Термодинамическое моделирование	38

2.2 Лабораторные и укрупнённые установки.....	39
2.2.1 Дробильное оборудование	39
2.2.2 Трубчатые горизонтальные и вертикальные печи	40
2.2.3 Магнитные сепараторы и аэросепараторы.....	41
2.3 Выводы по главе 2	43
ГЛАВА 3 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ КОНЦЕНТРАТОВ ОТ РАЗДЕЛЕНИЯ ФАЙНШТЕЙНА.....	44
3.1 Окислительного обжига никелевого концентрата.....	44
3.2 Термодинамическое моделирование окислительного обжига.....	45
3.3 Термодинамическое моделирование восстановительного обжига огарка	53
3.4 Выводы по главе 3	58
ГЛАВА 4 ПРОЦЕССЫ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО И ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ОБЖИГОВ ПРИ ПЕРЕРАБОТКИ НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА ОТ РАЗДЕЛЕНИЯ ФАЙНШТЕЙНА	60
4.1 Лабораторные исследования.....	60
4.2 Промышленные испытания	62
4.2.1 Работа промышленных агрегатов	62
4.2.2 Методика проведения промышленных испытаний.....	66
4.2.3 Поведение силикатной составляющей	67
4.2.3 Обжиг концентрата в печах КС	80
4.2.4 Результаты промышленных испытаний ТВП.....	83
4.2.5 Спёкообразование	88
4.3 Выводы по главе 4	96
ГЛАВА 5 МАГНИТНАЯ СЕПАРАЦИЯ НИКЕЛЕВОГО ПОРОШКА.....	99
5.1 Результаты промышленных испытаний.....	99

5.2 Исследования по разработке двухстадийной схемы Анализ текущей схемы при различной крупности.....	103
5.2.1 Работа основной сепарации и пневмокласификации.....	110
5.2.2 Работа контрольной сепарации.....	116
5.3 Экономическая эффективность предлагаемых мероприятий	126
5.3.1 Техничко-экономические показатели сравнительной экономической эффективности.....	128
5.3.2 Капитальные вложения	129
5.3.3 Товарная продукция.....	130
5.3.4 Эксплуатационные расходы.....	130
5.3.5 Финансовые результаты и выводы	135
5.4 Выводы по главе 5	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	141
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	143
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акты о внедрении результатов диссертационного исследования.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Содержание основных компонентов в пробах кека поступающего в печи КС.....	167
ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты анализов аналитической химии различных продуктов.....	168

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

На АО «Кольская ГМК» в течение многих десятилетий эксплуатировалась технология получения катодного никеля, включающая: окислительный обжиг никелевого концентрата от разделения фэйнштейна в печах кипящего слоя, восстановительный обжиг огарка в трубчатых вращающихся печах, плавку восстановленного никелевого порошка в электропечах с получением анодного никеля, электролиз никеля с растворимыми анодами [190].

В 2019 году технология получения катодного никеля на АО «Кольская ГМК» была существенным образом изменена и на смену процесса с плавкой восстановленного никелевого порошка на никелевые аноды и последующим их электрорафинированием пришла более современная технология хлорного выщелачивания никелевого порошка с последующей электроэкстракцией с нерастворимыми анодами [88,89,143,145,146]. Новая технология характеризуется меньшими операционными издержками, более высоким извлечением ценных компонентов, улучшением качества катодного металла и меньшей экологической нагрузкой на окружающую среду.

Первоначально предполагалось, что пирометаллургическая ветка технологии, включающая окислительный обжиг никелевого концентрата от разделения фэйнштейна в печах кипящего слоя (КС), восстановительный обжиг огарка в трубчатых вращающихся печах (ТВП) и простейшую схему магнитной сепарации (МС) восстановленного никелевого порошка обеспечит его требуемое качество для последующего хлорного выщелачивания.

Однако сразу после пуска новой гидрометаллургической ветки технологии были выявлены проблемы нестабильного качества никелевого порошка.

В процессе пускового периода технологии хлорного выщелачивания было установлено, что несмотря на высокую степень металлизации никелевого порошка, направляемого на выщелачивание, достаточно критичными являются и другие критерии его качества. К этим критериям относятся: гранулометрический состав, содержание в порошке SiO_2 и С.

Таким образом, в связи с возросшими требованиями к качеству никелевого порошка, необходимо было произвести верификацию технологии окислительного обжига в печах КС, восстановительного обжига в ТВП, МС восстановленного никелевого порошка, выявить причины получения порошка ненадлежащего качества и подобрать рациональные технологические параметры.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в разработку технологии получения никелевого порошка из никелевого концентрата от разделения фэйнштейна путем окислительного обжига в печах КС и последующего твердофазного восстановления в ТВП внесли такие советские, российские и

зарубежные ученые как: А.А. Байков, Б.И. Бондаренко, О.А. Есин, П.В. Гельд, Г.И. Чуфаров, А.Ф. Астафьев, Н.И. Гельперин, С.Е. Люмкис., Л.Л. Чермак, Л.Ш. Цемехман, В.В. Клементьев, П.С. Серегин, S. Eketorp, E. Turkdogan, E.A. Utigard.

Однако обзор литературных данных показал, что имеющейся информации недостаточно для понимания того, как получить никелевый порошок необходимого для хлорного выщелачивания качества по гранулометрическому составу и содержанию в нем SiO_2 и С.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.6.2 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» (технические науки) по пунктам: 4 - Термодинамика и кинетика металлургических процессов; 10 - Твердофазные процессы в получении черных, цветных и редких металлов; 11 - Пирометаллургические процессы и агрегаты.

Объект исследования. В настоящей работе объектами исследований являются сульфидный никелевый концентрат от разделения фэйнштейна, а также продукты его пирометаллургической переработки и магнитной сепарации.

Предмет исследования. В настоящей работе предметами исследования являются процессы переработки никелевого концентрата: окислительный обжиг, восстановительный обжиг, магнитная сепарация.

Цель работы – развитие технологии переработки никелевого концентрата от разделения фэйнштейна с получением никелевого порошка, полностью пригодного для технологии хлорного выщелачивания с последующей электроэкстракцией никеля.

Идея работы – на основе термодинамического моделирования, анализа работы технологических переделов, а также детального исследования фазового состава продуктов технологической схемы выявить и устранить причины:

- нестабильности гранулометрического состава никелевого порошка в зависимости от режимов окислительного и восстановительного обжига;
- накопления SiO_2 в технологической схеме;
- повышенных концентраций SiO_2 и С в никелевом порошке на стадии магнитной сепарации.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Выполнить термодинамический анализ окислительного и восстановительного обжига применительно к условиям взаимодействия в промышленных печах.
2. Установить механизм накопления диоксида кремния в технологической цепочке.
3. Уточнить рациональные параметры восстановительного обжига в лабораторных условиях.

4. Определить рациональные параметры процесса окислительного обжига в печах КС и восстановительного обжига в ТВП по результатам промышленных испытаний.

5. Выявить и устранить причины получения никелевого порошка с некондиционным содержанием диоксида кремния и углерода при анализе работы участка МС.

6. Произвести технико-экономическую оценку мероприятий по совершенствованию технологии.

Научная новизна

1. На основе термодинамического моделирования окислительного обжига никелевого концентрата от разделения фэйнштейна и восстановительного обжига образующегося никелевого огарка установлена зависимость тепловых эффектов процессов от исходных технологических параметров (химического состава шихты, параметров дутья и пр.).

2. В результате исследований продуктов технологии пирометаллургической переработки никелевого концентрата от разделения фэйнштейна методами растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа установлен механизм накопления в никелевом порошке наиболее проблемной примеси – диоксида кремния.

3. Выявлен механизм образования спеченных конгломератов при восстановительном обжиге огарка в трубчатых вращающихся печах, определена взаимосвязь гранулометрического состава конгломератов и их прочности от параметров процесса.

4. Определена зависимость эффективности магнитной сепарации никелевого порошка и содержания в нем SiO_2 и С от крупности исходного питания, величины магнитной индукции и частоты вращения барабана сепаратора.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.6.2. Metallurgy черных, цветных и редких металлов по следующим пунктам:

- п. 16. Твердофазные процессы в получении черных, цветных и редких металлов;
- п. 4. Термодинамика и кинетика металлургических процессов;
- п. 17. Пирометаллургические процессы и агрегаты.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Теоретическая значимость работы заключается в установлении зависимости тепловых эффектов процессов окислительного обжига никелевого концентрата и восстановительного обжига никелевого огарка от исходных технологических параметров на основе термодинамического моделирования, в выявлении механизма образования спеченных конгломератов при восстановительном обжиге огарка в трубчатых вращающихся печах, а также в определении зависимости эффективности магнитной сепарации никелевого порошка и

содержания в нем диоксида кремния и углерода от крупности исходного питания, величины магнитной индукции и частоты вращения барабана-сепаратора.

2. На основании установленного механизма накопления в технологической схеме диоксида кремния, приводящего к многократному увеличению его концентрации в никелевом порошке и росту выхода остатка хлорного раствора, разработаны мероприятия и определен канал вывода ряда оборотных материалов из технологической схемы производства никеля.

3. В результате выполненных исследований процесса восстановления огарка в трубчатых вращающихся печах в промышленных условиях экспериментально подтверждено избыточное потребление твердого восстановителя. Показано, что его расход может быть снижен на 10% с экономическим эффектом 18,484 млн. руб./год.

4. На основании исследований разработана новая технологическая схема участка магнитной сепарации, позволяющая увеличить извлечение никеля в никелевый порошок с 98,3 до 99,9% и снизить его потери на 359 т/год. При инвестиционных затратах на модернизацию участка в 0,567 млрд. руб. дополнительная стоимость товарной продукции составит 6,455 млрд. руб./год, дисконтированный срок окупаемости – 3,2 года.

5. Получены акты о внедрении результатов проведенного диссертационного исследования от 01.12.2023, подтверждающие реализацию результатов работы. (приложение А)

Методология и методы исследования

Термодинамическое моделирование производилось при использовании программного пакета FactSage. Лабораторные исследования процесса восстановительного обжига проводились в трубчатой печи. Промышленные испытания процессов окислительного обжига в печах КС и восстановительного обжига в ТВП выполнялись на действующем производстве рафинировочного цеха АО «Кольская ГМК». Опытно-промышленные испытания процесса магнитной сепарации проводили на установках НПО «Эрга». Для исследований состава и строения технологических продуктов применялись методы химического анализа, растровая электронная микроскопия (Tescan 5130MM) с системой микроанализа INCA (Oxford Instruments, UK).

Положения, выносимые на защиту

1. Термодинамическое моделирование окислительного обжига никелевого концентрата и восстановительного обжига огарка позволяет эффективно прогнозировать процессы, происходящие в обжиговых печах и может быть использовано в алгоритмах систем управления этими процессами.

2. Исследование поведения SiO_2 в технологической схеме производства никеля в совокупности с изучением форм его нахождения в продуктах технологических переделов,

позволило установить причины, степень накопления и определить каналы вывода нежелательной примеси.

3. Промышленные испытания обжига никелевого концентрата в печах КС и восстановления никелевого огарка в ТВП в широком диапазоне составов и параметров, позволили выявить причины и механизм образования конгломератов и подобрать рациональные технологические параметры ведения процесса на этих переделах.

4. Результаты опытно-промышленных испытаний МС никелевого порошка позволили оптимизировать гранулометрический состав питания, характеристики магнитной сепарации и усовершенствовать технологическую схему введением операции контрольной перечистки, обеспечив существенный рост извлечения никеля.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается их соответствием современным представлениям о механизме физико-химических процессов, протекающих при окислении, последующем восстановлении и разделении на магнитную (МФ) и немагнитную фракцию (НМФ) продуктов при переработке никелевого концентрата от разделения фэйнштейна, применением современных методов исследований, оборудования и программного обеспечения, а также соответствием результатов моделирования и лабораторных исследований результатам, полученным в ходе опытно-промышленных и промышленных испытаний.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на международной научной конференции "MELTS" Екатеринбург 2021 год, на международной научно-практической конференции «Российская наука в современном мире» Москва 2024 г, на международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс: информация, технологии, механизм» Стерлитамак 2024 г, заседаниях НТС ПАО «ГМК «Норильский Никель» и АО «Кольская ГМК», 2020-2023 гг., а также научных семинарах ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург 2023 г.

Личный вклад автора состоит в анализе существующей ситуации на производстве, постановке исследовательских задач, необходимых для исправления ситуации, обработке, анализе и обобщении полученных результатов исследований, а также подготовке публикаций.

Публикации. Основные результаты диссертации приведены в 9 научных работах (106-114), в том числе в 5 статьях, опубликованных в журналах, входящих в международную базу данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Диссертация изложена на 182 страницах машинописного текста, содержит 82 рисунка, 50 таблиц, список литературы из 203 наименований.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю член.-корр. РАН, д.т.н., проф. Цымбулову Л.Б., за творческую помощь при выполнении работы к.т.н., Пахомову Р.А., а также коллективу сотрудников ООО «Институт Гипроникель» за содействие при проведении диссертационного исследования.

ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАКИСИ НИКЕЛЯ

1.1 Промышленные способы восстановления закиси никеля

Наибольшее распространение среди способов получения никелевых порошков получило химическое восстановление оксидов. Для этих целей применяют твердые углеродистые восстановители, жидкие углеводороды и газовые восстановители.

В современной промышленной практике известны два основных вида восстановления закиси никеля. Это газовое восстановление в печах кипящего слоя или в многоподовых печах с получением никелевого порошка и восстановление с использованием твердых восстановителей.

1.1.1 Получение никелевого порошка в печах кипящего слоя или многоподовых печах

Процессам газового восстановления в кипящем слое посвящено достаточное количество работ [2,3,5,6,36,58,68,77,87,93,99,126,134,136,141]. Основное различие между процессами, протекающими в спокойном и кипящем слоях, заключается в явлениях, происходящих во внешнедиффузионной области. Условно эти различия можно разделить на две части: различие в механизме восстановления отдельной частицы и различие в восстановлении слоя в целом. Восстановительная способность смесей "водород - монооксид углерода" в сильной мере зависит от содержания водорода, что можно объяснить более высокой химической активностью последнего. Смесей "водород – метан" являются достаточно активными восстановителями.

В работе [136] исследовались степени восстановления для конвертированного воздухом газа при различных температурах и различных коэффициентах избытка воздуха α . Максимальной скорости процесс достигает в интервале 600-650°C. Полученные данные показывают также, что влияние α сильнее, чем это следует из анализа констант равновесия восстановления закиси никеля водородом и монооксидом углерода. С повышением скорости подачи восстановителя (увеличение числа псевдооживления) скорость процесса возрастает, что свидетельствует о внешнедиффузионном характере протекания процесса.

В работе [133] установлено, что степень использования газа при восстановлении падает по ходу процесса. С ростом температуры от 500 до 600°C степень использования газа несколько возрастает, однако дальнейшее увеличение температуры не приводит к росту степени использования газа, что объясняется сокращением реакционной поверхности. Степень использования газа линейно растет с увеличением высоты слоя материала.

В 1954 году на Норильском горно-металлургическом комбинате (НГМК) была внедрена технология непрерывного производства никелевого порошка в многоподовой печи [57]. В качестве восстановителя применяли коксовый, а затем генераторный газ. Температура восстановления 500–600°C. Активность порошка не ниже 79%. Однако этот способ имеет ряд существенных недостатков, основным из которых следует считать невысокую

производительность, необходимость подогрева газов, чувствительность процесса к составу сырья и его крупности, ограниченные возможности по регулировке и автоматизации процесса.

С 1960 года на НГМК были проведены исследования по восстановлению технической закиси никеля генераторным газом в реконструированной промышленной печи кипящего слоя (КС) и опытно-промышленной печи фильтрующе-кипящего слоя (ФКС) [67]. Эксплуатация установок показала, что ФКС имеет ряд преимуществ перед КС. Температура восстановления закиси никеля 550–600°C.

На комбинате «Североникель» в 1980-е гг. внедрен способ восстановления закиси никеля жидкими углеводородами, подаваемыми непосредственно в кипящий слой. Удельная производительность по закиси никеля составляет 36 т/м²сут; активность никелевого порошка 60–70%; степень восстановления закиси никеля 98%; температура процесса 820°C [5]. Применение различных видов жидкого топлива показало принципиальную возможность ведения процесса с устойчивыми показателями, однако данный способ не позволяет получить активность никелевого порошка выше 70%.

Изучение применения конверсированного газа от паровой конверсии пропана на катализаторе для восстановления закиси никеля [96] проводили в трубчатой печи при температурах 500–650°C. Конверсия пропана протекала недостаточно полно, избежать образования сажи не удавалось, в результате активность никелевого порошка не превышала 74%.

Применение смеси метана и водяных паров в отношении 1:2 в условиях виброкипящего слоя изучено Ю.С. Егоровым [47]. Полное восстановление закиси никеля происходит при температуре 700°C за 10 минут, однако никелевый порошок с максимальной активностью получен при 600°C.

С 1986 года на НГМК велись работы по созданию технологии получения активного никелевого порошка в КС [130]. В качестве восстановительного агента применялся продукт конверсии природного газа. Температура слоя КСВ 700–850°C; активность порошка 79–87%. Однако промышленный комплекс характеризовался низким коэффициентом использования из-за недостаточной надежности отдельных узлов.

В работах А.Ф. Астафьева [3] описываются полупромышленные испытания восстановления закиси никеля при подаче в кипящий слой различных видов жидкого топлива (высокосернистый мазут, дизельное топливо, керосин). Коэффициент сжигания топлива составлял 0,2–0,4. Сажеобразование при этом практически не происходило. Температура поддерживалась в пределах 800–850°C, восстановительная среда содержала монооксид углерода, водород и углеводороды.

К недостаткам данного способа получения активного порошка следует отнести высокий пылевынос твердого материала, что приводило к дополнительным затратам на переработку

пылей. Также недостатками данной технологии является достаточно сложная конструкция газораспределительных узлов совместной подачи топлива, водяного пара и воздуха и использование дорогостоящего жидкого углеводородного топлива, из-за отсутствия природного газа на Кольском полуострове. Штокмановское месторождение природного газа осваивается на шельфе Баренцева моря в 300 км от берега, и было выявлено лишь в 1988г. [44]. Успехи в получении высококачественного продукта на альтернативных пирометаллургических агрегатах, привели к отказу от технологии получения порошка в восстановительных печах кипящего слоя на комбинате «Североникель», с 2000-х гг. активный никелевый порошок получается в восстановительных трубчатых печах, речь о которых пойдет в следующем разделе.

1.1.2 Восстановление закиси никеля в трубчатых печах

Одним из наиболее широко применяемых в промышленной практике агрегатов для твердофазного восстановления закиси никеля является трубчатая печь. На комбинате «Североникель» ее принято называть трубчатой печью-реактором (ТПР), на Никелевом заводе НГМК, закрытие которого произошло в 2016 году, [194] или трубчатой вращающейся печью (ТВП). Огарок из печи КС через разгрузочную течку с температурой 1100-1150 °С поступает в восстановительную зону трубчатой печи, в которую также подается угольная крошка по специальному тракту. Для получения кондиционного никелевого порошка (содержание никеля не менее 76%) в трубчатую печь необходимо подать 16-18% угольной крошки от массы огарка.

Условно трубчатую печь можно разделить по длине на четыре зоны.

В первой зоне (~10% от общей длины) происходит механическое смешение угольной крошки с горячим огарком, разогрев угля за счет физического тепла огарка и пламени горелки. В этой же зоне начинается газификация угля и восстановление оксидов металлов в основном летучими составляющими. Данные процессы идут с поглощением тепла.

Во второй зоне (следующие 10% печи) происходит интенсивное горение угольной крошки за счет избытка кислорода воздуха, поступающего в реакционную зону с подсосом через торец. Сжигание природного газа ведут при $\alpha=1,03-1,05$ для того, чтобы получить максимально возможную температуру пламени горелки.

Непосредственное восстановление огарка до никелевого порошка происходит, в основном, за счет оксида углерода и водорода, а также твердым углеродом на поверхности контакта уголь–огарок.

В третьей зоне печи (60-65% от общей длины) происходит окончательное восстановление огарка до никелевого порошка. Качество никелевого порошка зависит от температуры в реакционной зоне.

В четвертой зоне (грохот) происходит охлаждение полученного порошка до 90-120°C. При недостаточном охлаждении никелевый порошок в местах пересыпания окисляется кислородом воздуха (вторичное окисление), что снижает степень металлизации.

Рассмотрим становление процесса восстановления никелевых огарков на примере «Кольской ГМК»

1.1.3 Переработка окисленного никелевого огарка в трубчатой печи в КГМК

АО «Кольская ГМК» образованная в 1998 году из двух комбинатов «Североникель» и «Печенганикель» эксплуатируется уже 90 лет. За прошедший период работы предприятия, в технологическом производстве производились изменения и модернизации, которые были направлены на повышение эффективности технологии в совокупности с сокращением затрат. В последние годы работы предприятия особое внимание уделяется к качеству промежуточного продукта – никелевого порошка по содержанию количества диоксида кремния, оксидов алюминия, магния и кальция, концентрации углерода, а также степени металлизации порошка и его цементационной активности.

Первые работы по восстановлению оксидов никеля до металлизированных продуктов производились уже в начале XX века. Широкое распространение в 50х годах двадцатого века получил способ восстановления оксидов металлов, в частности никеля, древесным углем в чугунных вертикальных печах, обогрев которых производился снаружи. Температура процесса составляла 750-820°C. [32].

В 60х годах XX века вводится в эксплуатацию технология окислительного обжига сульфидного никелевого концентрата от разделения фэйнштейна в печах кипящего слоя. Печи кипящего слоя (КС) используются и в настоящее время для переработки различных, чаще всего, сульфидных материалов, большое количество работ посвящено данному процессу [161,203]. Основу продуктов печей КС составляет оксид никеля, который растворяет в себе и оксиды других металлов, таких как Си, Со, Fe и др., остаточное содержание серы обычно не превышает 0,05-0,10 % масс. Образующий продукт - никелевый огарок восстанавливают в трубчатых вращающихся печах при использовании твердого и/или жидкого углеродсодержащего восстановителя. Образующийся частично восстановленный металлический порошок – частично восстановленная закись никеля, направляется на электроплавку, где окончательно восстанавливается до металлического состояния, после чего разливается на аноды. На следующем переделе производится электролитическое рафинирование никелевых анодов с получением уже катодного никеля [57,133]. На рисунке 1.1 представлена схема развития переработки оксидов никеля и сульфидного никелевого концентрата на АО «Кольская ГМК» с 50х годов XX века.

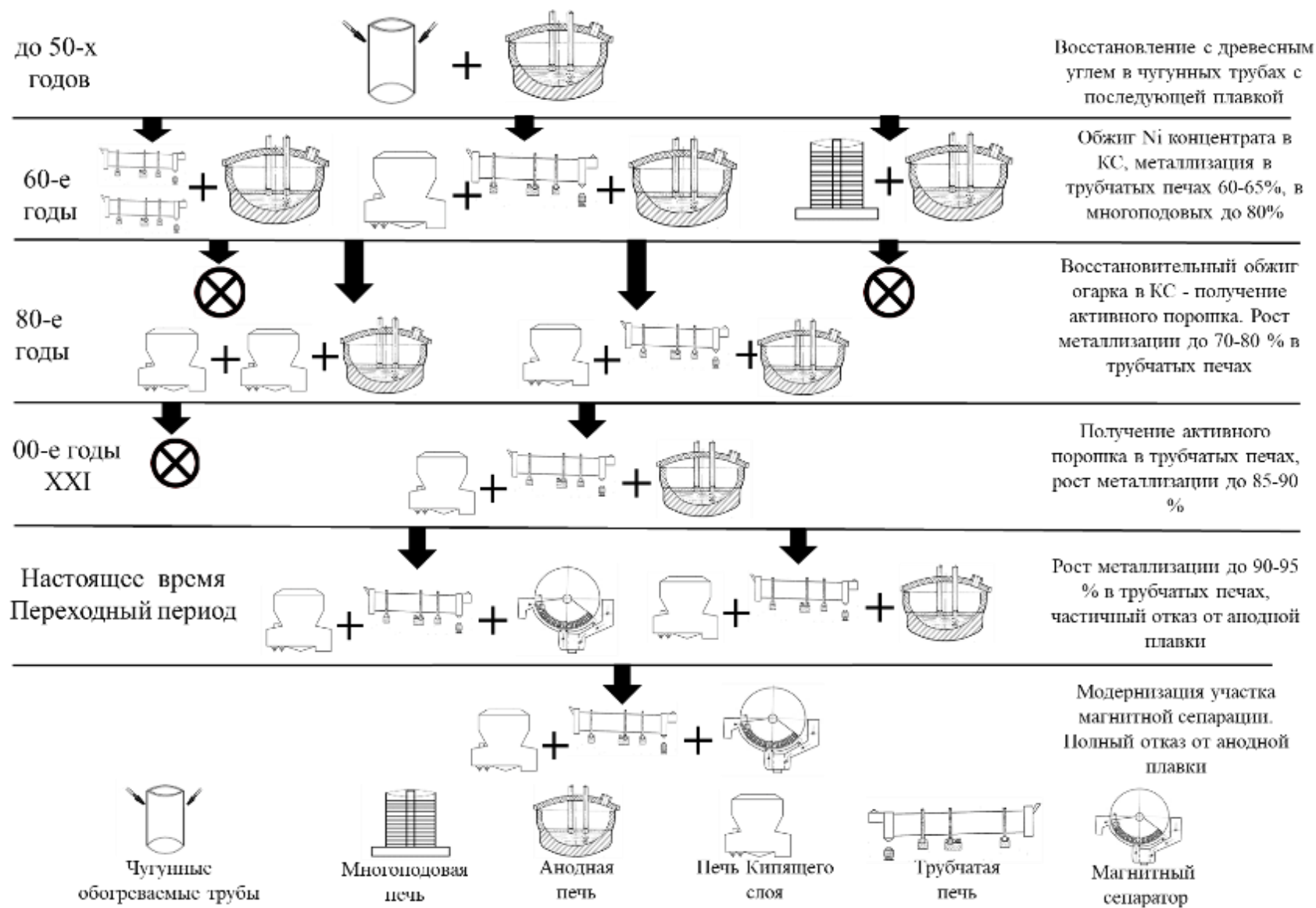


Рисунок 1.1 - Схема развития методов получения никелевого порошка

Следующим периодом существенных модернизаций никелевого производства пришлось на 2000-ые годы. В период с 60х по 00ые года переработка никелевого концентрата от разделения флуксината не менялась и состояла из следующих переделов: окислительный обжиг никелевого концентрата, восстановление никелевого огарка, электроплавка полувосстановленного никелевого огарка с получением никелевых анодов, электрорафинирование с получением продуктов высокой чистоты. Проведем анализ модернизации АО «Кольская ГМК» в последние 25-30 лет

В 1997 году на НГМК были проведены полупромышленные испытания восстановления закиси никеля в ТВП [129]. Процесс ведется при температуре слоя в печи КС 1050°C; коэффициенте избытка воздуха 0,8; расходе твердого восстановителя 1380–1420 кг/час; расходе природного газа в трубчатую печь - 180 нм³/ч. Однако стабильно получить степень восстановления никелевого порошка выше 80% при данных испытаниях не удалось.

Помимо частично восстановленного металлизированного никелевого порошка, отправляемого на плавку, гидрометаллургическому производству требовался продукт – активный никелевый порошок, который использовался на операциях медочистки, для удаления из растворов меди при помощи цементации [2,134,136,159]. До 2000 года получение активного никелевого порошка выполнялась в печах КС (рисунок 1.1). Применение печей КС было обусловлено невысокими показателями степени металлизации порошка в трубчатых вращающихся печах, которое достигало 75-80 % отн. К основным типам восстановителя в тот период можно отнести мазут, который также использовался и для подогрева трубчатой печи и коксовую мелочь. Необходимость снижения операционных затрат производства на предприятии в двухтысячные годы, привело к модернизации технологического производства и в конечном итоге позволило отказаться от восстановительных печей кипящего слоя.

Проведенные фундаментальные исследования ученых металлургов прошлого века, таких как О.А. Есин, П.В. Гельд А.А. Байков, Б.И. Бондаренко, Г.И. Чуфаров, А.Ф. Астафьев, Н.И. Гельперин, С.Е. Люмкис., Л.Л. Чермак, S. Eketorp, E. Turkdogan, E.A. Utigard [8,20,35,50,151-156], в совокупности с проведенным системным анализом работы трубчатых печей, который ранее не был представлен в литературе (за исключением работы сотрудников ВАМИ [21,24,25,60] в 70-80х годах прошлого века), позволили повысить эффективность работы трубчатых печей, а также привело к повышению степени металлизации и активности никелевого порошка вращающихся печей. Совершенствование пирометаллургических переделов было реализовано ввиду выполненных в 2000х годах работ под научным руководством П.С. Серегина [119-122].

В настоящее время активный порошок получается при выделении определенного класса крупности из продуктов трубчатой печи. Восстановительный обжиг проводят при температуре 1000-1150 °С, «альфа» дутья составляет 0,7-0,9 для создания восстановительной атмосферы.

Неполное сгорание углеродсодержащего восстановителя предохраняет восстановленные металлы от вторичного окисления, подачей твердого восстановителя составляет 15-21% от массы загружаемого огарка печей КС. Готовый порошок охлаждается водой до температуры $220\pm 40^\circ\text{C}$ и выделяется активная фракция порошка, которая пригодна для проведения цементации от меди. Активная фракция выделяется методом отсева на грохоте по классу $-1,25 +0,4$ мм, цементационная активность данной фракции превышает 80%. Так же на грохоте происходит отделение остаточного углерода и золы перпендикулярной продувкой воздухом просеиваемого порошка. Высокая степень металлизации никелевого порошка 90-95% отн. и цементационная активность определенного класса продуктов трубчатой печи привела к отказу от реализации восстановления никелевого огарка в печах кипящего слоя.

Процесс восстановления оксидов металлов при взаимодействии углеродсодержащего восстановителя в слое обусловлен сложным механизмом взаимодействия при контакте твердого углерода, оксидом металлов и образующегося в процессе монооксида углерода. В тоже время конверсия летучих углеводородов в составе жидкого, газообразного и летучей части твердого восстановителя приводит к увеличению доли водорода и насыщению им слоя оксидов металлов, что также способствует росту восстановления оксидов. В результате полученный активный никелевый порошок обладает достаточно развитой поверхностью частиц, что благоприятно сказывается на полноте очистки никелевого электролита от меди на гидрометаллургическом участке.

В конце 2010х годов производство АО «Кольской ГМК» по переработке никелевого сульфидного концентрата от разделения фэйнштейна подверглось существенным изменениям. В этот период был реализован переход гидрометаллургического передела на технологию хлорного выщелачивания и использования нерастворимых анодов при электролизе никеля. Изменение гидрометаллургического производства было обусловлено ростом энергетических затрат электролитического рафинирования никелевых анодов ввиду использования электроплавки металлического порошка, а также привела к росту человеческого труда во вредных и агрессивных условиях. Изменение гидрометаллургического способа переработки привело и к необходимости произвести изменения и на пирометаллургическом участке в технологическом производстве по переработке сульфидного никелевого концентрата.

Схемы рисунка 1.2 показывают результаты изменения работы технологических участков по переработке сульфидного никелевого концентрата, которое было выполнено в период 2016-2018 гг. Рисунок 1.2а ранее используемый способ переработки, рисунок 1.2б текущая схема переработки никелевого концентрата.



а



б

Рисунок 1.2 – Технологические схемы переработки никелевого концентрата на КГМК.

а - ранее использованная схема по получению анодов; б – существующая схема электроэкстракционной переработки.

Изменение способа переработки получения никеля при использовании электроэкстракции и отказа от восстановительной плавки металлизированного никелевого порошка способствует улучшению экологической обстановки, снижению углеродного следа, сокращению операционных и эксплуатационных затрат, повышению показателей извлечения и качества продукции в целом. Новая технология переработки металлизированного никелевого порошка без участия плавильных мощностей с выплавкой анодов использует применение газообразного хлора при реализации хлорного выщелачивания металлических гранул на основе никеля, очистке полученного раствора от примесей металлов, таких как Cu, Fe, Zn и Co и передаче очищенного электролита для получения никелевых катодов высокой чистоты [88,89,143,145,146].

Переход на новый способ получения катодного никеля высокой чистоты обусловлено и ростом требований к промпродукту пирометаллургического передела, что в результате в значительной степени повышает требование к продукту трубчатых печей по его составу, степени металлизации, крупности и наличию включений на основе углерода и шлакообразующих соединений. Новый процесс приводит к необходимости достигать практически 100%-ного выхода качественного Ni порошка, пригодного для хлорного выщелачивания.

Ключевое требование, которое предъявляется к металлизированному порошку, следом за требованиями по поддержанию высокой степени металлизации является сохранение на низком уровне концентрации компонентов, входящих в состав пустой породы и твердых восстановителей, таких как SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O и проч. Наиболее значимым соединением в отмеченном списке является диоксид кремния (SiO_2), концентрация которого наиболее высока. Высокая концентрация диоксида кремния в металлизированном порошке отправляемого на хлорное растворение приводит к снижению скорости фильтрации пульпы остатков хлорного выщелачивания, а, следовательно, и понижению производительности производства, росту оборотных продуктов, ухудшению эффективности флотации остатков хлорного растворения. Остатки хлорного растворения являются побочным продуктом гидрометаллургического передела, которые концентрируют в себе драгоценные металлы. [68]

Исследование зарубежной и отечественной литературы в области твердофазного восстановления оксидов металлов показало, что в основном исследовательские работы направлены на восстановление оксидов никеля различными типами углеродсодержащих восстановителей. Часть работ рассматривает поведение оксидов никеля при взаимодействии с газообразным водородом [174,175], в других рассматривается стадийность восстановления оксида никеля. Другие работы исследователей рассматривают кинетику восстановления оксидов никеля [168]. В работах [179,196] используется метан или смесь $\text{CO}+\text{CO}_2$ при температурах 400-1050°C как восстановительный агент и исследование поведения продуктов при таком взаимодействии. Отдельные группы исследователей анализируют более сложные системы на

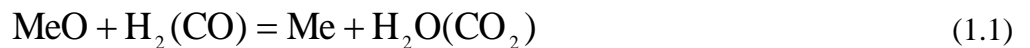
основе $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-NiO}$, где восстановление производится графитом при температурах 1300-1350 °С. [199] Следует отметить, что исследования, направленные на более сложные системы, который из себя представляет никелевый огарок печей КС и поведению его примесей обнаружить не удалось.

В металлическом никелевом порошке трубчатых печей, как упоминалось выше присутствуют, как оксидные невосстановленные частицы оксидов черных и цветных металлов, так и остатки углей, к которым относится и непрореагировавший углерод, зольная составляющая углей. Рассмотрим подходы и методы удаления примесных компонентов, которые негативно сказываются на работе последующих переделов металлургической переработки никелевого концентрата до товарных металлов.

1.2 Термодинамика восстановления закиси никеля различными восстановителями

Термодинамика восстановительных процессов изучена достаточно полно [37,52,53,59,64,65,78,142], и главным выводом, который можно сделать на основании приведенного ниже материала, является утверждение, что закись никеля - легковосстановимый оксид, и его восстановление термодинамически возможно всеми известными восстановителями при сравнительно невысоких температурах.

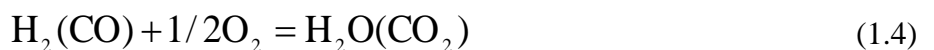
Процесс восстановления оксидов MeO и их твердых растворов является обратимым процессом, характеризующимся константой равновесия. Для оксидов постоянного состава константа равновесия реакции восстановления (формулы 1.1-1.6)



$$K_{\text{восст}} = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}(\text{CO}_2)}}{P_{\text{H}_2(\text{CO})}} \quad (1.2)$$

$$\frac{P_{\text{H}_2\text{O}(\text{CO}_2)}}{P_{\text{H}_2(\text{CO})}} = K' P_{\text{O}_2}^{1/2} \quad (1.3)$$

Где K' – константа равновесия реакции



$$P_{\text{O}_2}^{1/2} = K_{\text{восст}} / K' = K_{\text{дис}} \quad (1.5)$$

Где - $K_{\text{дис}}$ – константа равновесия реакции



На рисунке 1.3 приведена зависимость $\lg P_{O_2}$ от температуры для некоторых оксидов [153]. Равновесное давление кислорода является характеристикой устойчивости оксидов. Оксид тем устойчивее, чем ниже величина P_{O_2} . Видно, что оксиды Cu_2O , CoO , NiO и FeO имеют значительно более высокое значение равновесного давления кислорода, чем, скажем, MnO или MgO , которые являются трудновосстановимыми. Обращает на себя внимание более выраженная температурная зависимость равновесного давления кислорода для NiO , чем у других приведенных на графике оксидов.

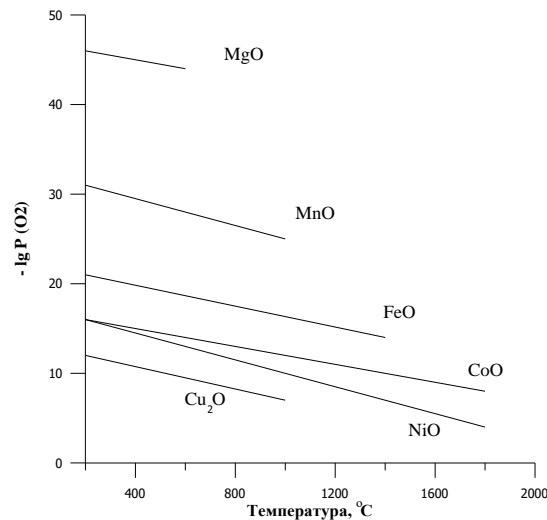


Рисунок 1.3 - Зависимость равновесного давления кислорода от температуры при восстановлении оксидов

Изменение объема газовой фазы при восстановлении водородом и монооксидом углерода не происходит, что свидетельствует об отсутствии зависимости константы равновесия от давления системы в области умеренных температур. Таким образом парциальное давление газов возможно заменить на концентрацию газов этой системы. На рисунке 1.4 сплошными линиями показаны рассчитанные Б.И. Бондаренко [20] значения равновесных составов газовой фазы для реакции восстановления NiO водородом и монооксидом углерода. Пунктиром показаны опытные данные Д.П. Богацкого [14] по равновесию реакции восстановления закиси никеля монооксидом углерода. Как видно, опытные и расчетные данные авторов практически совпадают.

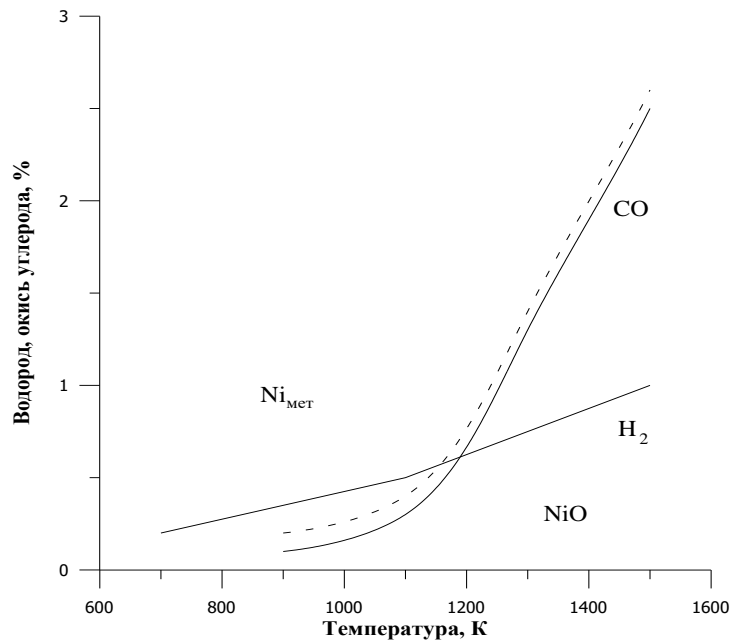


Рисунок 1.4 - Равновесные составы газовой фазы реакций восстановления закиси никеля водородом и монооксидом углерода

В таблице 1.1 представлены некоторые значения термодинамических функций и констант равновесия реакций газового восстановления закиси никеля.

Таблица 1.1 - Значения ΔG^0 ; ΔH^0 ; K_p реакций газового восстановления

Реакция	T, К	ΔG^0 , ккал/моль	ΔH^0 , ккал/моль	K_p
$NiO+CO=Ni+CO_2$	800	-10,89	-11,40	943,8
	1000	-10,76	-11,48	224,7
	1200	-10,62	-11,45	85,92
	1500	-10,53	-11,14	34,21
$NiO+H_2=Ni+H_2O$	800	-8,67	-2,57	233,6
	1000	-10,12	-3,14	162,8
	1200	-11,47	-3,60	122,7
	1500	-13,45	-3,96	91,11

Константа равновесия представлена в формуле 1.7 для систем с одной газовой фазой, т.е. константа равновесия для системы является величиной равновесного давления системы:

$$K_p = \frac{\bar{P}_{CO(CO_2)}}{a_C a_{Me} a_{MeO}} = \bar{P}_{CO(CO_2)} = \bar{P}_0 \quad (1.7)$$

В работе [158] произведен расчет термодинамических функций ΔG^0 , ΔH^0 и логарифмов равновесных давлений газа для этих реакций, результаты представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Значения ΔG^0 ; ΔH^0 ; $\lg P_{CO(CO_2)}$ реакций восстановления NiO углеродом

Реакция	T, K	ΔG^0 , ккал/моль	ΔH^0 , ккал/моль	$\lg P_{CO(CO_2)}$
NiO+C=Ni+CO	900	-7,88	29,54	1,91
	1200	-20,26	28,84	3,69
	1500	-32,56	28,34	4,74
2NiO+C=2Ni+CO ₂	900	-18,70	18,09	4,54
	1200	-30,88	17,39	5,62
	1500	-43,09	17,20	6,27

Сравнительный анализ данных для оксидов различной термодинамической прочности обнаруживает следующую закономерность: чем слабее оксид, тем более вероятно его восстановление по реакции $MeO+C=Me+CO_2$. Закись никеля, как слабый оксид, восстанавливается углеродом с образованием в газовой фазе CO_2 . Термодинамическое равновесие рассматриваемых систем с однокомпонентной газовой фазой достаточно сильно зависят от давления системы.

1.3 Механизм и кинетика восстановления

1.3.1 Общие закономерности

Процесс восстановления оксидов металлов довольно сложный многофазный физико-химический процесс, который обуславливает перестройку кристаллической решетки при удалении кислорода и формирование новой фазы. Скорость протекания процессов восстановления оксидов металлов исследовалась в многочисленных работах ряда авторов [17-19,66,92,100,101,103,135,176,182,192].

Первые теории и представления о процессах восстановления оксидов металлов подразумевали две последовательные операции или стадии [8]. Процесс происходит поэтапно и состоит из:

- термической диссоциации и разрушение оксидов металла на элементы;
- взаимодействие кислорода с восстановителем;
- снижение парциального давления кислорода в системе ниже точки диссоциации оксида.

По данной теории скорость реакции зависит от величины упругости диссоциации оксида, что в ряде работ [35, 102, 154], выполненных в 50х годах не нашло подтверждения. Место первых теорий о восстановлении оксидов заняла адсорбционно-каталитическая теория.

Данная теория рассматривает реализацию гетерогенного процесса восстановления оксидов [70,151,152], где в основе теории лежит химическая адсорбция, так как влияние физической адсорбции снижается с ростом температуры [48]. На поверхности оксидов присутствует множество дефектов, трещин и пустот, которые происходили с исследуемым образцом, совместно с тепловой разупорядоченностью, что еще более усложняет структуру

поверхности. Одним из предположений является тот факт, что микродефекты являются активными центрами хемосорбции и служат центром локализации свободных электронов и дырок, что вызывает первичную деформацию решетки. Подробный анализ влияния геометрии образцов и влияния на процессы адсорбции показан в работе [9].

Многие положения адсорбционно-автокаталитической теории развиты на основе экспериментального материала, полученного при низкотемпературной адсорбции газов на оксидах. Надежные данные по хемосорбции при высоких температурах в настоящее время отсутствуют. Критикуя этот недостаток, Манчинский и Шкодин [74] указывали на то, что основные моменты адсорбционно-автокаталитической теории могут быть объяснены с точки зрения диффузионных процессов в газовой фазе. Некоторые исследователи подвергают сомнению эффект каталитического влияния твердых продуктов реакции на скорость процесса [97].

В настоящее время набирает популярность и электрохимическая теории восстановления, которая использует смешанную электронно-ионную проводимость адсорбции газ-восстановителя, которая служит донором электронов, на поверхности оксида и приводит к образованию электрического поля. Данная теория рассмотрена в следующих работах [33, 45].

Следует отметить, что различные мнения авторов о механизме и кинетике процессов восстановления не являются взаимоисключающими. Каждый из авторов углубленно изучал ту или иную сторону процесса, и, в соответствии с выбором направления работы, делались выводы о значении того или другого фактора.

Для различных выводов следует только более тщательно учитывать границы их применимости. Сложность процесса восстановления и многообразие условий его протекания подтверждают тот факт, что до настоящего времени не предложен метод теоретического расчета скорости восстановления, применимый для различных условий процесса.

1.3.2 Кинетика восстановления закиси никеля

Из всех оксидов никеля только закись можно считать стабильным оксидом. Остальные оксиды метастабильны и при повышении температуры претерпевают диссоциативное превращение в закись. Максимальная температура, при которой исчезает двуокись, 300°C [15,40,61].

Закись никеля является термодинамически легковосстановимым оксидом, поэтому на скорость восстановления сильно влияет характер образующейся новой фазы. Возможны два предельных случая: блокирование исходной твердой фазы конденсированным продуктом и полное деблокирование, например, вследствие растрескивания, разрыхления или даже полного удаления продукта. В первом случае должно наблюдаться замедление реакции — импеданс, во втором — ускорение ее (истинный или кажущийся автокатализ).

В.А. Пушкарев [98] считает, что вследствие блокирования оксида продуктом реакции кинетический режим восстановления оксидов с решеткой типа NiO вообще невозможен. В начальный период восстановления, когда поверхность каждой частицы представлена осколками элементарных ячеек закиси, возможно появление плоских сеток никеля и закиси различной ориентации; в дальнейшем, как следует из правила Бравэ, наибольшую вероятность сопряжения приобретают плоские сетки, параллельные граням октаэдра $\{111\}$.

Дальнейшее восстановление возможно благодаря диффузии газов по межкристаллитным границам в слое никеля, диффузии ионов в твердой фазе, а также вследствие проникновения протона. При восстановлении монооксидом углерода подвод восстановителя еще более затруднен.

На основании численных оценок степени восстановления, отвечающей восстановлению первого слоя элементарных ячеек закиси никеля, Пушкарев приходит к выводу, что в реальных условиях гетерогенный процесс в кинетическом режиме реализовать невозможно (до сколь угодно значимой степени восстановления).

Из термодинамического расчета следует, что при восстановлении закиси никеля водородом при температуре 300°C давление водяных паров под слоем никеля достигает 350 атм. Повышение давления газообразных продуктов реакции под слоем металла должно приводить к нарушению сплошности слоя никеля, и, следовательно, к изменению предела, до которого диффузионный газообмен не тормозится слоем твердых продуктов реакции.

Е.С. Воронцов с сотрудниками [34] приводит примеры более глубокого торможения процесса вследствие блокирующего действия продукта, что противоречит правилу Пиллинга-Бедстворта. Обсуждая это противоречие, Воронцов приходит к следующему выводу: «Анализ экспериментального материала дает основание считать, что главным критерием импеданса (торможения) в процессах восстановления металлов является не соотношение истинных объемов твердых фаз, а способ осуществления процесса, а также физическое состояние продукта».

Состояние продукта зависит от температуры, степени дисперсности фаз, величин внутренних напряжений в приконтактных участках твердых продуктов и реагентов, степени химического пресыщения. Последняя, по его мнению, определяется не только составом газовой фазы, но и интенсивностью продувки реакционного пространства газом-восстановителем, так как накопление газа-продукта ухудшает термодинамические условия ведения процесса.

Таким образом, явления автокатализа и импеданса — две стороны одного процесса, которые находятся в определенном соотношении друг с другом. Достижение высоких скоростей процесса при значительной степени превращения возможно лишь при подавлении блокирующего действия продукта.

1.3.3 Влияние вида восстановителя на кинетику процесса

Водород и монооксид углерода

Влияние вида восстановителя в первую очередь определяется термодинамическими соотношениями. При температуре 1093 К константа реакции водяного газа равна единице, и термодинамика процесса такова, что для любого оксида при этой температуре активность водорода будет равна активности СО. При восстановлении оксидов железа выше 820°C водород становится более активным восстановителем. С точки зрения термодинамики, при восстановлении закиси никеля при температурах выше 820°C активность водорода также превышает активность для оксида углерода [16,169,177,178]. На отличии в кинетике восстановления монооксидом углерода и водородом могут влиять полярность оксида углерода и способность водорода растворяться (ооклюдировать) в твердой фазе [81, 139].

Еще одним отличительным фактором являются размеры каждой молекулы водорода и оксида углерода или продуктов их диссоциации. Согласно исследованиям размер молекул водорода, составляет 0,742 Å, что существенно меньше молекулы СО размер, которой 1,6 Å, в связи с этим высказывается предположение о более глубокой проницаемости водорода и его лучшей восстановительной способности. Помимо уже отмеченного размера атома водорода, возможно также и испускание электрона атомом водорода, что приводит к образованию протона водорода размер которого на 4-5 порядков меньше атома водорода (10^{-12} – 10^{-13} см). Такая частица может проникать через плотно упакованную металлическую решетку [98].

Восстановление монооксидом углерода в реальных процессах часто осложняется развитием реакции ее диспропорционирования на углерод и угольную кислоту, а также реакциями карбидообразования и науглероживания [103-105,108]. Растворенный углерод в металле ввиду высокой активности может приводить к деблокированию границы "блокирующий слой металла – оксид" за счет разрушения покровного слоя металла [169].

Углерод

Механизм и кинетика углетермического восстановления оксидов подробно изучены Г.И. Чуфаровым [153,155], П.В. Гельдом и О.А. Есиным [35].

Восстановление углерод содержащими агентами, механизмы и кинетика процесса изучена многочисленными авторами [35,153,155], а также изложена в специальной монографии [48]. П.Н. Острик [86] в своей докторской диссертации в 1976 году изложил особенности комбинированных восстановительных процессов при участии углерода. Процесс восстановления углеродом универсален и зависит преимущественно от температуры процесса. Однако наиболее популярные теории восстановления твердым углеродом, также используют газовую фазу для взаимодействия твердого углерода с твердым оксидом металла с последующей регенерацией

диоксида углерода до монооксида. [72, 102]. Описанный в работах механизм справедлив для оксидов малой и средней прочности.

Необходимо отметить, что в литературе недостаточно учитывается тот факт, что многие явления углетермического восстановления, объясняемые при помощи того или иного сложного механизма, могут быть освещены с учетом термодинамических соображений. Так вполне объяснимо ускорение низкотемпературных процессов углетермического восстановления оксидов, наблюдавшееся рядом авторов [41,48,82] при повышении скорости продувки инертным газом. При этом понижается парциальное давление оксидов углерода, что должно ускорять его газификацию. Кроме того, подавляется реакция распада оксида углерода.

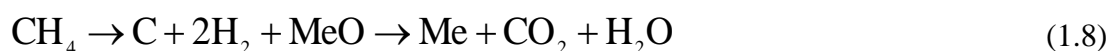
На углетермическое восстановление оксидов существенно влияет атмосфера, в которой реализуется восстановление. При восстановлении оксидов малой и средней прочности применение восстановительной атмосферы снижает степень участия углерода в процессе. В связи с этим увеличение до определенного предела содержания окислителей в газовой атмосфере значительно ускоряет процессы комбинированного восстановления за счет усиления процесса газификации углерода.

Динамика углетермического восстановления во многом определяется природой углеродистого восстановителя. На активность твердых восстановителей влияют такие факторы, как несовершенство структуры, дисперсность, наличие органических и минеральных примесей и т.п. Повышенная активность восстановителей объяснялась наличием примесей щелочных металлов и высокой разупорядоченностью кристаллической решетки, а пониженная - упорядоченностью решетки и отсутствием примесей.

Метан

При высоких температурах в термодинамическом смысле метан является чрезвычайно сильным восстановителем [26-29,124,131]. Однако при низких температурах он может вести себя как химически инертное соединение, поскольку не обладает полярностью или способностью растворяться в твердой фазе [30,31,62,80,170].

Упрощенно можно полагать, что в основе процесса восстановления оксидов металлов метаном лежат следующие реакции (формула 1.8):



В работах [27,28] отмечается, что восстановление оксидов природным газом до металла происходит без заметного отложения на образце углерода. Формирование отложений на исследуемом объекте возможно, только после полного восстановления и удаления кислорода. Такие работы проводились О.А. Степановым [132] и Г.В. Губиным [42,43]. Было установлено, что при пониженных температурах увеличение расхода CH_4 заметно интенсифицирует процесс вплоть до критических значений скоростей газового потока. З.И. Некрасов с сотрудниками [83]

сообщал, что до температуры 1073 К в газообразных продуктах восстановления оксидов метаном наряду с двуоксидом углерода и водяным паром появлялись продукты неполного окисления углеводородов: метилен (CH_2O) и формальдегид (CH_3OH).

В.П. Дорохович [46] установил, что закись никеля при 673 К чистым метаном не восстанавливается, а при 723 К восстанавливается до металлического никеля. Скорость процесса возрастает при подъеме температуры до 973 К и затем стабилизируется. Завершающая стадия восстановления закиси никеля сопровождается значительным науглероживанием, скорость которого также максимальна при температуре 973 К. Дальнейшее повышение температуры уменьшает скорость науглероживания, вероятно, вследствие быстрого спекания развитой металлической поверхности, катализирующей этот процесс. Л.М. Волгина [32], исследуя восстановление закиси никеля в интервале температур 748—973 К, обнаружила, что преобладающим оксидом углерода в продуктах реакции является его двуокись.

Сложные газовые смеси (СГС)

Отдельное направление по восстановлению оксидов металлов использует сложные газовые смеси. К сложным восстановительным атмосферам могут быть отнесены те, которые имеют в своем составе С, Н, О и их продукты взаимодействия [83,118,134,135].

На основании обобщения обширного литературного и собственного экспериментального материала по восстановлению оксидов железа в СГС $\text{CO—CO}_2\text{—H}_2\text{—H}_2\text{O}$ Н.Л. Гольдштейн сделал следующие выводы [38]:

1. Пары воды и двуокись углерода при любых условиях замедляют восстановление оксидов железа. Торможение процесса примерно пропорционально концентрации окислителей.
2. При температурах ниже 873—973 К пары воды, как правило, замедляют восстановление любых материалов сильнее, чем двуокись углерода.
3. При повышении температуры различие в тормозящем влиянии водяных паров и двуоксида углерода уменьшается.
4. Чем ниже восстановимость материалов, тем эффективнее добавки водорода. Замена части оксида углерода водородом заметно ускоряет восстановление только трудновосстановимых, труднопроницаемых (сильноплавленных) агломератов.
5. Добавки паров воды и углекислого газа существенно уменьшают реакцию распада оксида углерода, причем водяные пары действуют сильнее, чем углекислота.
6. Добавки водорода ускоряют распад оксида углерода. Чем интенсивнее распад оксида углерода, тем сильнее торможение процесса.

1.4 Факторы, влияющие на степень восстановления закиси никеля

1.4.1 Температура процессов получения закиси никеля и восстановления

В 60-е годы были высказаны две концепции влияния температуры на степень восстановления никелевого порошка. Первая ставила степень восстановления в зависимость от температуры обжига при получении закиси никеля (С.Е. Люмкис и др. [73]). Другую концепцию высказывал Ю.В. Алексеев [2], и заключалась она в том, что неважно, при каких условиях получена закись никеля, так как всегда можно создать такие условия восстановления, чтобы получить высокую степень восстановления.

Известно, что прокалка сопровождается резким уменьшением реакционной способности ряда металлических оксидов. О.А. Есин и П.В. Гельд [50] приводят данные о снижении гидратируемости оксида кальция в результате высокотемпературной обработки. Закись никеля после прокалки также становится нерастворимой в кислотах.

Как следует из данных, описанных в работе С.Е. Люмкиса [73], степень восстановления никелевого порошка зависит главным образом от температуры, при которой прокаливалась исходная закись.

Для выяснения причин, обуславливающих влияние температуры на степень восстановления никелевого порошка, были проведены рентгеноструктурные исследования, которые показали, что размеры зерна в исследованных образцах закиси никеля различны. Замеры показывали, что величина кристаллитов закиси никеля, полученной при 700°C, составляет 3-5 мкм, а прошедшей высокотемпературную обработку (1300°C) - 20 мкм. Размер кристаллитов закиси никеля, спеченной при температуре 1600-1700°C, возрастает до 25 мкм. Для сравнения отметим, что размер кристаллитов свежесажженного гидрата закиси никеля - около 0,01 мкм.

Таким образом, зависимость между размером кристаллитов (т.е. структурой закиси никеля) и температурой обработки закиси (определяющей впоследствии степень восстановления порошка) выражена вполне отчетливо.

До 60-х годов продукт низкотемпературного обжига (800—900°C) подвергался газовому восстановлению в многоподовых печах с механическим перегибанием. Получаемые порошки имели активность до 70%, несмотря на крайне низкое качество генераторного газа, применяемого для восстановления закиси (последний содержал около 20% оксида углерода и 7—10% водорода).

В работе Ю.В. Алексеева [2] восстановлению водородом подвергалась закись никеля, получаемая в промышленных условиях на комбинате «Североникель» и имевшая состав 73% Ni; 2,9% Cu; 1,6% Co; 0,05% S.

Установлено, что влияние температуры на структуру закиси никеля значительно слабее, чем это констатируют С.Е. Люмкис [73]. Действительно, при температуре прокалки 1250° и выше

получается трудновосстановимая закись никеля с более плотной кристаллической решеткой. Это подтвердил и рентгеноструктурный анализ: закись никеля, из которой получался порошок с активностью 70—75%, имела параметр элементарной ячейки $4,172 \pm 0,004$ кХ, что соответствует минералу бунзениту [8], а закись, из которой был получен порошок с активностью 50-55% — $4,151 \pm 0,003$ кХ. Но из этого не следует, что из прокаленной закиси нельзя получить активный порошок.

С точки зрения Ю.В. Алексеева [2] неблагоприятная для производства никелевого порошка закись никеля может быть получена при высокой температуре прокалики (выше 1400°C для сравнительно чистой закиси и при более низкой температуре для закиси никеля с примесями) или при отклонениях от режима обжига.

Таким образом, на условия получения активного никелевого порошка оказывает влияние не «мягкость» закиси никеля, а макроструктура ее зерен. Некоторое размягчение материала при прокалке приводит к резкому снижению реакционной поверхности каждого зерна закиси.

Удельный вес металлического никеля в несколько раз больше, чем самой закиси никеля, поэтому такая закись получается более тяжелая и грубозернистая. При нормальном протекании процесса прокалки укрупнение закиси никеля незначительное, и из-за отсутствия тяжелой металлической составляющей она имеет меньший насыпной вес и значительно более пористую структуру зерен, благоприятную для последующего восстановления.

Для проверки утверждения о резком влиянии температуры прокалки закиси никеля на ее качество в работе [2] была специально приготовлена закись при температуре прокалки $1350-1370^\circ\text{C}$. Зерна закиси не были оплавлены, имели пористую структуру. Обычная и прокаленная закиси были подвергнуты восстановлению в шамотных тиглях в одинаковых условиях. Активность полученного порошка из обычной закиси достигла максимума в течение 3,5 час, а прокаленной — на 30 мин позже. Активность порошков была выше 70%.

Таким образом, активность никелевого порошка, получаемого восстановлением технической закиси никеля, определяется в первую очередь структурой ее зерен. Температура получения закиси никеля оказывает косвенное влияние на качество порошка. При отклонении температуры обжига от оптимальной происходит спекание, окатывание и уплотнение зерен закиси никеля, что неизбежно влечет за собой ухудшение полноты восстановления материала, образование менее пористых частиц и, как следствие, снижение активности никелевого порошка.

1.4.2 Состояние поверхности и кристаллической решетки восстановленной закиси никеля

Природа дефектов «биографического происхождения» в металлических порошках неоднократно обсуждалась в литературе, однако она до сих пор остается неясной. В работе [127] было показано, что некоторые особенности поведения металлических порошков и металлов

гальванического происхождения при отжиге и деформации при малых напряжениях можно объяснить, предположив наличие в них дефектов упаковки со сравнительно высокой поверхностной энергией – более 100 эрг/см^2 .

В работе [128] предпринято рентгенографическое изучение порошков никеля – карбонильного и восстановленного водородом из карбоната – для определения наличия в них дефектов упаковки. Для сравнения исследовался также деформированный литой никель; деформацию осуществляли напильником или сверлением. По различным данным [22,84], энергия дефектов упаковки в никеле составляет от 150 до 300 эрг/см^2 . Поэтому именно в никеле можно ожидать наибольшего влияния дефектов упаковки на молекулярные процессы при низких (ниже интервала рекристаллизации) температурах.

Присутствие дефектов упаковки, по Вагнеру [195], вызывает смещение рентгеновских интерференций и их размытость. Чтобы установить вероятность появления дефектов упаковки по смещению рефлексов, требуется точное определение положения пика. К тому же этот метод имеет низкую чувствительность: при относительном смещении пиков $\{111\}$ и $\{200\}$ для никеля вероятность появления дефектов упаковки составляет всего $3 \cdot 10^{-4}$. Кроме того, на смещение пиков не влияет присутствие двойниковых дефектов упаковки. Поэтому использовался метод, учитывающий влияние дефектов упаковки на размытие рентгеновских рефлексов по Вагнеру [195].

Спрессованные брикеты из порошков или опилок подвергались съемке на УРС-50И. Снимались линии $\{111\}$, $\{222\}$ и $\{200\}$. Линию $\{400\}$ удалось получить только для никелевых опилок. Для порошков она оказалась очень слабой. Профиль рефлексов строился по точкам с угловым интервалом 2° . Каждая точка получалась в результате отсчета импульсов за 5 мин. Воспроизведение опытов было удовлетворительным.

Эталоном служил электролитический никель, переплавленный в вакууме, отшлифованный и отожженный при 1400° К . Полученные таким образом кривые профиля рефлексов исправлялись на монохроматичность излучения по методу, описанному в монографии [79]. После этого профиль линий оказывался симметричным. Плотность дислокации рассчитывалась методом Вильямсона и Смоллмена.

Карбонильный никель имеет наименьшую плотность дислокации и наибольшую вероятность появления дефектов упаковки. По-видимому, дефекты упаковки в нем возникают в процессе роста кристаллитов и не связаны с расщепленными дислокациями Гейденриха—Шокли.

Дефекты упаковки в деформированном никеле, по-видимому, почти полностью обусловлены расщеплением полных дислокаций. Определенное таким путем количество их согласуется с другими литературными данными [138]. Восстановленный никель представляет

собой промежуточный случай. Обнаруженная концентрация дефектов упаковки в карбонильном никеле дает заметное смещение линий $\{111\}$ и $\{200\}$.

1.5 Методы разделения восстановленной закиси никеля от немагнитной фракции

Для удаления невосстановленных частиц оксидов металлов и непрореагировавших частиц угля или зольной составляющей углей на АО «Кольская ГМК» используется сухая магнитная сепарация металлического никелевого порошка, который получают в трубчатых вращающихся печах.

Применение методов разделения материалов, обладающих различной магнитной восприимчивостью широко распространено в отечественной промышленности и в зарубежных странах. В основном, применение методов магнитной сепарации используется при обогащении уже полученных отходов производства [1,54,55,144,149,150,157]. Также магнитная сепарация применяется, как один из способов обогащения бедных продуктов. Например, магнитная сепарация может применяться при обогащении бедных окисленных железных руд или иного типа окисленного сырья, обладающего магнитными свойствами [71,91,163,172,180]. Литературный обзор и обзор патентов разных стран показал заинтересованность различных исследований и производств в данном направлении. В рассмотренных материалах представлены способы и устройства для разделения порошкообразных материалов при использовании магнитной сепарации [185-187,197]. Основной задаче отмеченных работ в различной литературе является извлечение ценного компонента из исходного материала, концентрация которого невелика. В задаче же, которая ставится перед исследователем в настоящей работе, совершенно противоположная. Продукт трубчатых печей является высокометаллизированным продуктом, доля которого в общем потоке составляет 90-95% отн., т.е. основную массу порошка трубчатых печей необходимо очистить от присутствующих в нем примесей. В тоже время содержание балластных примесей невелико и обычно не превышает 2-4 % отн., а иногда и 1% масс. Анализ литературы не позволил найти значительное количество материалов по данному направлению, что приводит к необходимости дополнительных самостоятельных исследований.

В настоящее время на АО «Кольская ГМК» применяется сухая магнитная сепарация для очистки металлического порошка от углеродной составляющей, оксидов металлов и оксидов таких элементов как Al, Si, Mg, Ca и проч. Полученный восстановленный металлический порошок во вращающихся трубчатых печах в будате примыкающей к вращающейся печи разделяется на два продукта по классу крупности: более 50 мм и менее 50 мм. Фракция – 50мм по системе ленточных транспортеров и виброконвейеров передается на участок магнитной сепарации. Схема работы магнитной сепарации АО «Кольская ГМК» представлена на рисунке 1.5.

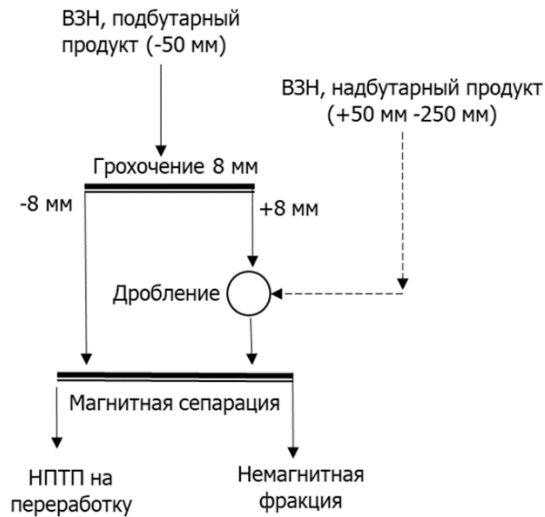


Рисунок 1.5 – Технологическая схема участка магнитной сепарации¹

Как видно из представленной схемы подбударный продукт крупность – 50 мм

Восстановленная закись никеля крупностью менее 50 мм по серии транспортеров подается на одну из двух линий очистки металлизированного порошка. На первом этапе реализуется грохочение по классу 8 мм. Более крупный продукт, оставшийся на решетке грохота, а также класс +50 мм, выгружаемый из трубчатой печи, направляется на дробление в роторной дробилке. Регулировка крупности дробления в роторной дробилке производится при изменении зазора между ударными элементами ротора дробилки и отражательными плитами. Отгрохоченный по классу -8 мм и продробленный продукт объединяются и самотеком направляются на барабанный магнитный сепаратор для разделения на два класса: магнитный продукт и немагнитная фракция.

Однако, в настоящее время эффективность реализованной схемы магнитной сепарации невысока, так как содержание углерода и диоксида кремния в магнитной фракции превышают регламентные значения, а также в процессе перехода на технологию электроэкстракции существенно ужесточились требования и гранулометрическому составу, растворяемого металлического порошка. С другой стороны, в немагнитном продукте содержится значительное количество металлического никеля (единичных пробах 37,8 % масс.) существенно выше регламентных показателей, который не может быть переработан на АО «Кольская ГМК», что увеличивает транспортное плечо, оборот практически товарного продукта, а также мощность всего производства. Таким образом, существующая схема разделения магнитного и немагнитного продукта требует значительных корректировок, изменений и соответствующих исследований по подбору цепи аппаратов и их режимов работы.

1.6 Выводы по главе 1

Литературные данные показывают, что восстановление закиси никеля – сложный гетерогенный процесс, происходящий с перестраиванием кристаллической решетки.

¹ ВЗН - восстановленная закись никеля, продукт трубчатой печи

Важнейшими вопросами при восстановлении закиси никеля различными восстановителями являются механизм и кинетика процесса. В каждом конкретном случае следует отдельно рассматривать возможность проведения процесса с достаточными для производства скоростями и получением качественного продукта.

Отдельные авторы обсуждают факторы, влияющие на степень восстановления никелевого порошка при использовании различных видов восстановителей. Основными из них являются:

- температура процессов обжига никелевого концентрата и восстановления закиси никеля;
- остаточное содержание углерода и серы в продукте восстановления;
- состояние поверхности и наличие дефектов решетки никелевого порошка.

Некоторые авторы считают, что активность никелевого порошка, независимо от способа его получения, однозначно зависит от остаточного содержания кислорода, уменьшаясь с его увеличением. Также отрицательно сказывается на активности содержание в никелевом продукте углерода и серы. Также отмечалось, что на степень восстановления влияет крупность кристаллитов закиси никеля, образующихся при обжиге никелевого концентрата. Исследователи, высказывавшие эту точку зрения, связывали укрупнение образований при обжиге в кипящем слое с повышенными температурами процесса и наличием в шихте повышенного содержания серы.

Таким образом, анализ литературного материала по восстановлению закиси никеля различными видами восстановителей показал, что процесс восстановления изучен достаточно полно. Особенно много материалов по применению твердого восстановителя (древесного и каменного угля, кокса, штыба и др.) и газовых смесей на основе водорода, оксида углерода, метана и других углеводородов. Также имеются данные по сложным газовым системам, образованным при конверсии природного газа или жидкого углеводородного топлива. Однако в литературных данных практически полностью отсутствует информация о спекообразовании в трубчатых печах, поведении микропримесей и шлакообразующих компонентов таких как SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO . Ключевым же является отсутствие литературных данных о влиянии гранулометрического состава, доли углерода и шлакообразующих, а также металлизации металлического порошка трубчатых печей на показатели разделения участка магнитной сепарации и растворения при реализации хлорного выщелачивания. Основными задачами настоящего исследования являются:

1. Поведение диоксида кремния в технологической схеме переработки никелевого концентрата от разделения фэйнштейна
2. Механизмы образования спеченных конгломератов из металлического порошка в трубчатых печах

3. Определение рациональных параметров восстановительного обжига трубчатых печей.
4. Определение взаимосвязи эффективности магнитной сепарации от крупности исходного питания и параметров сепаратора
5. Разработка схемы участка магнитной сепарации соответствующей регламентным требованиям при переработке металлического порошка электроэкстракционными методами.

ГЛАВА 2 ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИБОРЫ И УСТАНОВКИ

В разделе представлены лабораторные и укрупненно-лабораторные установки, а также программное обеспечение, используемое для исследований и анализа продуктов, полученных в ходе экспериментов.

2.1 Приборное и программное обеспечение при проведении исследований

2.1.1 Аналитическая химия

Анализ исходных компонентов объектов исследования выполнялся методами аналитической химии, которые позволяют с достаточно высокой точностью определять содержания основных компонентов как в исходных веществах, так и получаемых продуктах. Аналитические исследования по определению элементов, таких как: Na, K, Ca, Mg, Al, Cr, Sn, Pb, Zn S, C, Cu, Ni, Co Fe_{общ}, Fe_(II) проб выполнялись:

- методами атомно-эмиссионная (с индуктивно-связанной плазмой) при использовании спектрометров «AtomScan 25», IRIS Advantage, iCAP 6500 Duo SSEA и iCAP 7600 Radial;
- ИК-спектроскопия при использовании газоанализаторов SC-144DR и CS-444 (LECO);
- атомно-абсорбционная спектроскопия при использовании спектрометра SOLAAR S2.

Металлы и оксиды металлов, фосфор

Современные методы исследования при определении состава вещества используют в настоящее время атомно-эмиссионную спектрометрию с индуктивно связанной плазмой (АЭС с ИСП). При помощи данного метода возможно определение значительного числа элементов, которые встречаются в пирометаллургии цветных металлов, а именно: Cu, Ni, Co, Fe, Al₂O₃, SiO₂, MgO, CaO, Cr₂O₃, FeO/Fe₂O₃, Mn₂O₃, TiO₂, K₂O, Na₂O и др.

Фотоизображения спектрометров iCAP 6500 Duo SSEA и iCAP 7600 Radial используемых в настоящей работе представлены на рисунке 2.1.



а



б

Рисунок 2.1 – Фотографии аналитического оборудования: а- iCAP 6500 Duo SSEA; б - iCAP 7600 Radial фирмы Thermo Scientific

Данное использует индуктивно-связанную плазму Ar, возбуждение происходит при помощи электромагнитного генератора.

Сера и углерод

Оборудование, используемое для определения серы и углерода, представлено рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Фотографии анализатора серы и углерода SC 144 DR

Оборудование использует инфракрасные методы анализа. Элементарный углерод и серу переводят в газообразную форму, после чего измеряют величины поглощения инфракрасного спектра для оксидов серы и углерода. Окисление (горение) исследуемого объекта производится в трубчатой печи анализатора.

2.1.2 Электронная микроскопия и микроанализ

В настоящей работе основные исследования и опираются на результаты, полученные при использовании методов РЭМ-РСМА. Исследования проводились на растровом электронном микроскопе Tescan 5130MM (Чехия) с системой микроанализа INCA (Oxford Instruments, UK) на базе энергодисперсионного спектрометра. Данные методы анализа являются наиболее информативными из локальных способов исследования вещества, позволяют получить качественную и количественную информацию об отдельных структурных составляющих крупностью от первых микрон, а также не требуют предварительного превращения или разрушения образца. Подробное описание оборудования и методик исследования представлено в работах [63,115,116]. Локальность микроанализа позволяет оценивать химический состав объектов, площадью более 1-3 мкм² [39]. Фотография оборудования представлена на рисунке 2.3



Рисунок 2.3 – Фотография растрового электронного микроскопа Tescan 5130MM

2.1.3 Рентгенофазовый анализ

В качестве объекта исследований использовался рентгенофазовый анализ, который использует в основе метода рентгеновскую дифракцию, что позволяет получать информацию об элементном и минералогическом составе пробы. Рентгенофазовый анализ определяет вещество по набору его межплоскостных расстояний (d) и относительным интенсивностям (I) соответствующих линий на рентгенограмме. Условие Брегга — Вульфа является теоретическим обоснованием метода. Фазовый состав при исследовании многофазных объектов, фазы которых представлены малыми образованиями, не превышающими по размеру 1-3 мкм, реализован при использовании рентгенофазового анализа (РФА). Исследования производились на дифрактометре «Дифрей 401м» аналитическая рентгеновская линия $\text{Cr K}\alpha+\beta$ ($\lambda = 2.28970 \text{ \AA}$), фотография которого представлена на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Фотографии дифрактометра Дифрей 401м

2.1.4 Термодинамическое моделирование

Термодинамическое моделирование химических процессов широко распространено в отечественной и мировой практике. Обычно для проведения термодинамического моделирования используют специально программное обеспечение. Одним из таких продуктов,

применяемых в пирометаллургии является FactSage, которые разрабатывается с в 1976 году [164]. Термодинамические базы данных FactSage содержат различную информацию от термодинамических свойств стехиометрических соединений и реальных растворов до мощного комплекса подпрограмм, позволяющего реализовывать моделирование сложных процессов, строить разнообразные фазовые диаграммы и определять свойства рассчитанных расплавов. Работа комплекса основана на поиске минимума энергии Гиббса системы, может использоваться как автономно, так и в составе пользовательского ПО. Работа с термодинамическими базами данных позволяет выполнять расчеты в программном обеспечении, получать информацию о составе продуктов при заданных условиях, определять необходимые добавки для протекания процессов, вносимые оператором, оценивать тепловые эффекты реакций, составлять тепловые и материальные балансы рассматриваемых систем. [159,160].

2.2 Лабораторные и укрупнённые установки

2.2.1 Дробильное оборудование

Подготовка материалов до требуемой крупности производилась при помощи щековой дробилки. Схема щековой дробилки, представлена на рисунке 2.5. Измельчение материалов позволяет соблюдать пропорции при моделировании окислительного или восстановительного обжига в лабораторных условиях, а также подготовить используемые материалы под требования, предъявляемые на производстве.

На щековой дробилке производилось дробление никелевые концентраты и шихта на её основе, которая слеживалась в процессе транспортировки, а также твердый восстановитель, применяемый при восстановлении.

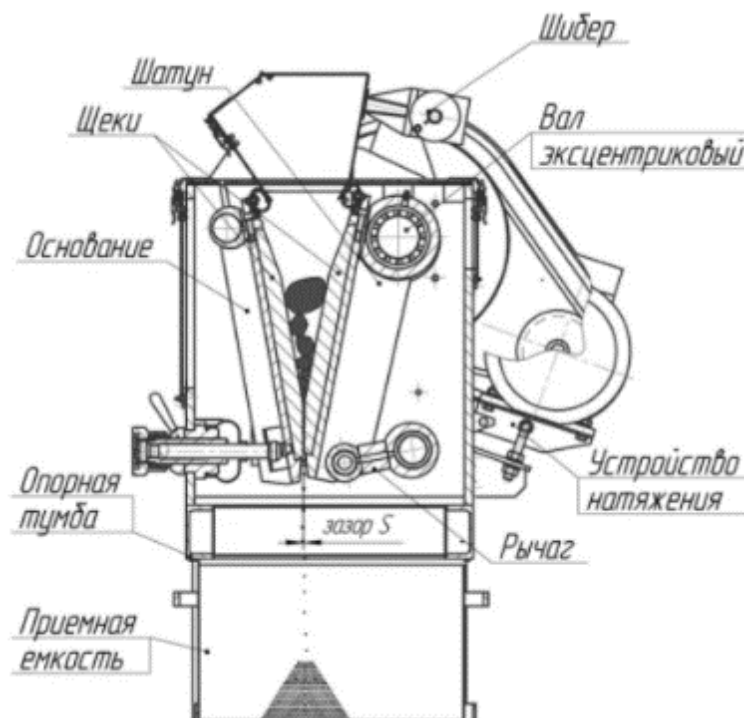


Рисунок 2.5 - Схема работы щековой дробилки

2.2.2 Трубчатые горизонтальные и вертикальные печи

Для проведения восстановительного обжига применялись вертикальные и горизонтальные трубчатые печи, представленные на рисунках 2.6-2.7

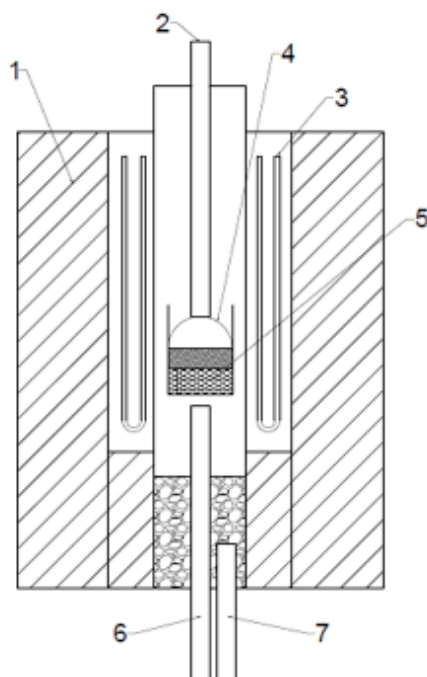


Рисунок 2.6 - Схема установки для восстановления никелевого огарка. 1 – изоляция, 2,7 – трубка для подачи аргона, 3 – нагревательный элемент, 4 – крышка, 5 – исследуемая навеска, 6 – термопара.

Вертикальная трубчатая печь оснащена шестью хромит-лантановыми нагревательными элементами, которые позволяют регулировать температуру с точностью до 1°С до температуры 1600°С и позволяют производить длительную температурную выдержку. Для контроля температуры, снизу в горячую зону подведена термопара типа S (платинородий-платиновая). Управление осуществляется терморегулятором «ВАРТА ТП-703». Терморегулятор-измеритель предназначен для измерения температуры и программного автоматического регулирования тепловых процессов в однофазных и трехфазных электрических печах сопротивления, оснащенных тиристорами или симисторами. Регулятор обеспечивают аналого-цифровое преобразование сигналов термопар с номинальными статическими характеристиками преобразования.

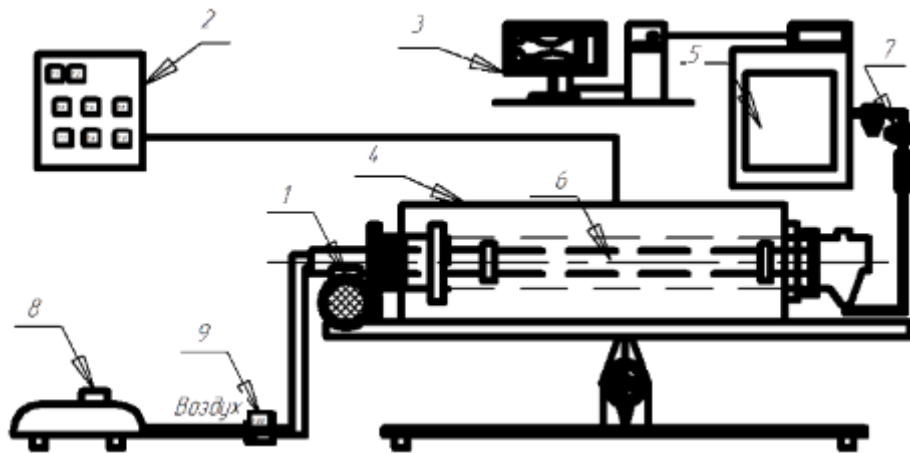


Рисунок 2.7 – Схема лабораторной печи

1 – электродвигатель; 2 – блок регулятора температуры; 3 – персональный компьютер; 4 – корпус печи; 5 – масс-спектрометр; 6 – кварцевый реактор; 7 – система фильтров; 8 – компрессор; 9 - расходомер

Печь состоит из корпуса печи, стального вращающегося реактора, электродвигателя и трех нагревательных зон, независящих друг от друга. Электродвигатель приводит в движение стальной реактор, скорость вращения реактора задается с помощью блока управления. Наклон корпуса печи и реактора возможно регулировать под различным углом. В центре стального реактора расположен малый кварцевый реактор, в котором в настоящей работе реализовывался обжиг предоставленных проб. Управление осуществляется также, как и в первом случае при помощи терморегулятора «ВАРТА ТП-703»

2.2.3 Магнитные сепараторы и аэросепараторы

Пробы продуктов трубчатой печи исследовались в лабораторных условиях на сухих магнитных сепараторах серии СМБМ и аэросепараторах Зиг-Заг с целью удаления класса крупности $-0,1+0\text{мм}$ (подача потока воздуха 450 оборотов в минуту) и $-0,05+0\text{мм}$ (подача потока воздуха 230 оборотов в минуту). На рисунках 2.8 -2.9 представлены схемы и изображения сухого магнитного сепаратора, участвовавшего в исследовании и определении параметров сепарации и аэросепарации тонких классов.

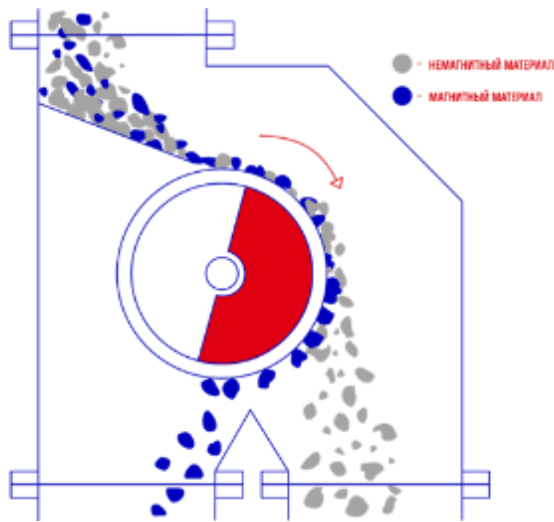


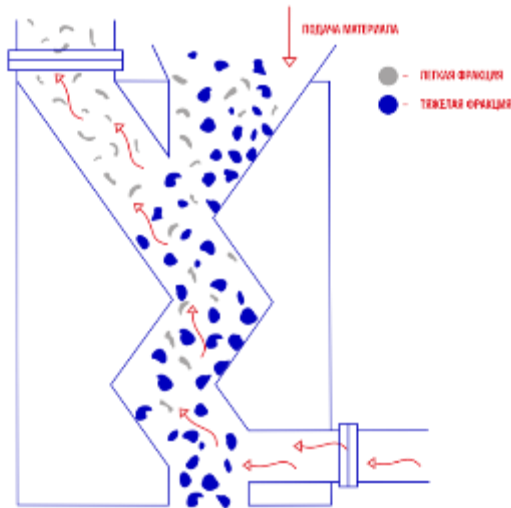
Схема работы магнитного сепаратора
барабанного типа СМБМ



Общий вид

Рисунок 2.8 – Общий вид и схема работы магнитного сепаратора типа СМБМ

Подача магнитного и немагнитного материала осуществляется с верха и должна быть равномерно распределена по ширине сепаратора. Магнитно-восприимчивые частицы под воздействия поля притягиваются и удерживаются барабаном, до окончания влияния магнита на материал, что и приводит к сепарации материала на две фракции магнитную и немагнитную.



Принцип работы аэросепаратора Зиг-Заг



Общий вид

Рисунок 2.9 – Общий вид и схема работы аэросепаратора Зиг-Заг

Представленная на рисунке 2.9 схема аэросепаратора осуществляет разделение легких и тяжелых фракции исследуемого вещества за счет подачи воздуха при помощи вентилятора в зигзагообразную камеру. Наиболее легкие вещества, характеризующиеся низкой плотностью, покидают установку сильным потоком воздуха, где в последствие улавливается циклоном.

Разгрузка производится в отдельную емкость. Тяжелая фракция проходит сквозь зигзагообразную часть камеры концентрируясь в разгрузочном устройстве, расположенном ниже установки.

2.3 Выводы по главе 2

Представленное оборудование в главе 2, используемое как для разностороннего исследования вещества при использовании различных методов исследования, так и представленные схемы лабораторных установок обеспечивают полноценное и разностороннее исследование по теме настоящей работы, направленной на развитие технологии получения никелевого порошка в части пирометаллургического передела и участка магнитной сепарации.

В настоящем исследовании применяются как широко используемые методы исследования, используемые в аналитической химии - методы атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой, так и локальные методы исследования, направленные на изучения фазового состава вещества и распределения отдельных компонентов, элементов или минералов и анализируемом веществе - растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ, рентгенофазовый анализ.

ГЛАВА 3 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ КОНЦЕНТРАТОВ ОТ РАЗДЕЛЕНИЯ ФАЙНШТЕЙНА

Применение такого инструмента как термодинамическое моделирование позволяет проводить прогнозную оценку поведения веществ в широком диапазоне заданных условий, не прибегая к значительным финансовым затратам, которые сопровождают лабораторный или промышленный эксперимент. В тоже время полученные результаты термодинамического моделирования достаточно полно и с высокой степенью достоверности описывают процессы, протекающие в реальном промышленном агрегате. В настоящем разделе проведено термодинамическое моделирование окислительного обжига никелевого концентрата и восстановительного обжига никелевого огарка, полученного в результате переработки никелевого концентрата от разделения фэйнштейна в печах кипящего слоя.

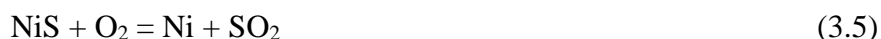
3.1 Окислительного обжига никелевого концентрата

Печи кипящего слоя является одним из передовых пирометаллургических агрегатов в мировой практике, который позволяет производить переработку сульфидных руд и концентратов, в частности никелевое сульфидное сырье от разделения фэйнштейна. Достаточно подробно мировой и отечественный опыт работы такого типа агрегатов с технологическими показателями, достоинствами и недостатками представлен в работе В. М. Парецкого и Л. Ш. Цемехмана [147]. Работа печей КС на зарубежных предприятиях при реализации окислительного обжига представлена в следующих публикациях [167,191,198]. В компании «Норильский Никель» в настоящее время окислительному обжигу в печах КС подвергается только никелевый концентрат, который получен при разделении предварительно выплавленного и медленно охлажденного медно-никелевого фэйнштейна. Продуктом печей кипящего слоя является обессеренный продукт, состоящий из оксидов цветных металлов никелевый огарок.

Режимы окислительного и иного типа обжигов, а также поддержания рабочего процесса требуют серьезного опыта работы с печами такого типа, в связи с этим многие исследователи провели достаточно большое количество работ по анализу поведению псевдосжиженного слоя печей КС [165,202] в том числе и сульфидных концентратов [189,200]. Термодинамика и кинетика процесса окислительного обжига печей КС, также подробно исследовалась [4, 10, 12, 13, 75, 76, 85, 94, 95, 125, 140, 162, 166, 171, 173, 181, 183, 184, 188, 201]. В тоже время следует отметить, что используемые установки и программное обеспечение в ранее проведенных исследованиях не всегда в полной мере позволяет рассчитывать на представительные данные. Выполнение термодинамических расчетов окисления сульфидного никелевого концентрата кислородом воздуха и сравнение их с промышленными данными представляет интерес для понимания процессов и совершенствования работы текущего оборудования. Расчеты в

настоящей работе производились при использовании программного обеспечения FactSage версии 7.3 (2019 г), с базами данных FactPS, FTmisc, FToxid (все перечисленные базы также версии 7.3).

Стандартные реакции взаимодействия сульфидов цветных металлов с кислородом воздуха протекает по реакциям, представленным ниже (формулы 3.1-3.5):



Процессе окисления в зависимости от условий проведения расчетов могут быть получены различные результаты и продукты, такие как: закись никеля, сульфат никеля, металлический никель. Рассмотрим систему никель-кислород, прежде чем перейти к термодинамическим расчетам.

3.2 Термодинамическое моделирование окислительного обжига

Энергия Гиббса (изобарно-изотермический потенциал) представляет собой потенциальную химическую энергию системы, которая определяет возможность протекания химической реакции или процесса в случае более сложных систем. Эта фундаментальная величина зависит от внешних факторов, в частности от температуры. При невысоких температурах, ниже 400°C система склонна к образованию сульфатов, в температурной зоне температур 400-1000°C происходит образование оксидов никеля, а при температурах свыше 1150°C благоприятные условия складываются для перехода сульфидов никеля в металлическую форму. Аналогичное поведение наблюдается и у других металлов таких как Cu, Co и Fe В настоящей работе расчёты произведены в диапазоне температур от 300 до 1200°C с шагом 50°C.

Парциальное давление кислорода в газовой фазе - P_{O_2} является основной характеристикой, отвечающей за окислительно-восстановительные процессы в рассматриваемых системах. Расчеты производились в программном комплексе FactSage, описание которого представлено в предыдущем разделе. При произведении расчетов P_{O_2} системы корректировалось за счет изменения количества подаваемого кислорода при фиксированном количестве азота в системе $\lg P_{\text{O}_2}$ изменялся от -20 до -2 с шагом 2.

Термодинамические расчеты произведены для системы: 100 г исходного концентрата, 8 г воды, 50 г азота, количество кислорода изменяемая величина. Вводимая вода в состав расчета имитирует влажность перерабатываемого концентрата, а азот вводится как составная часть окислительной среды, подаваемой в печь – воздуха. Состав исходного вещества представлен в таблице 3.1. На представленных ниже рисунках показано общее извлечение металлов в три группы фаз – оксиды; сульфаты; сульфиды и металлы.

Таблица 3.1 – Содержание основных компонентов в составе никелевого концентрата, используемого в термодинамических расчетах

Содержание % масс.					
Cu	Ni	Co	Fe	S	O
5,22	64,7	1,38	2,95	24	0,56

На рисунке 3.1 представлено распределение никеля между группами фаз в зависимости от температуры при постоянном $\lg P_{O_2}$, равном -20. На графиках рисунка 3.1 показано три зоны формирования фаз: до $\sim 350^\circ\text{C}$ преобладают сульфаты никеля (NiSO_4); при температуре $350\text{-}500^\circ\text{C}$ происходит переход сульфатов в оксиды никеля, свыше 500°C никель в системе представлены преимущественно сульфидной фазой.

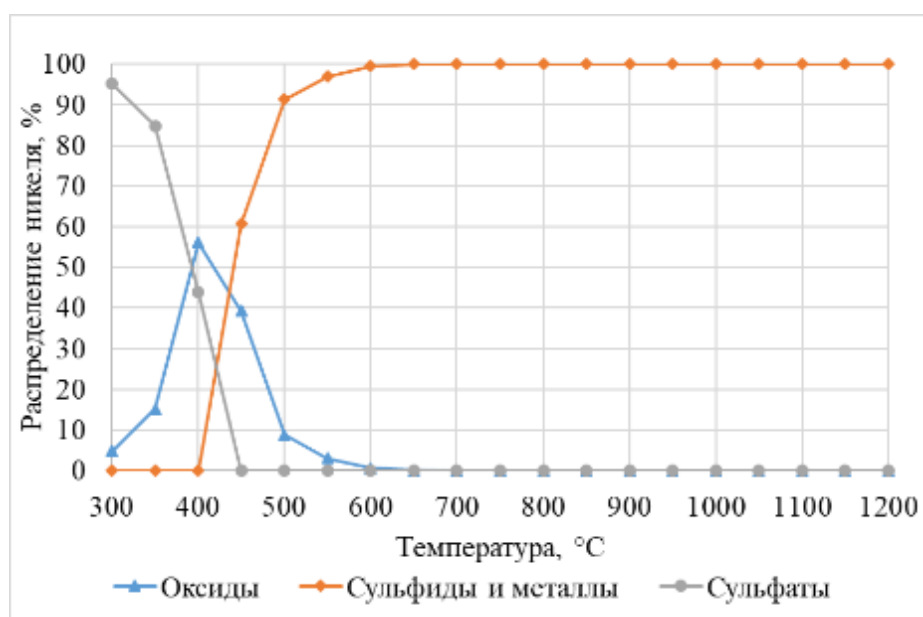
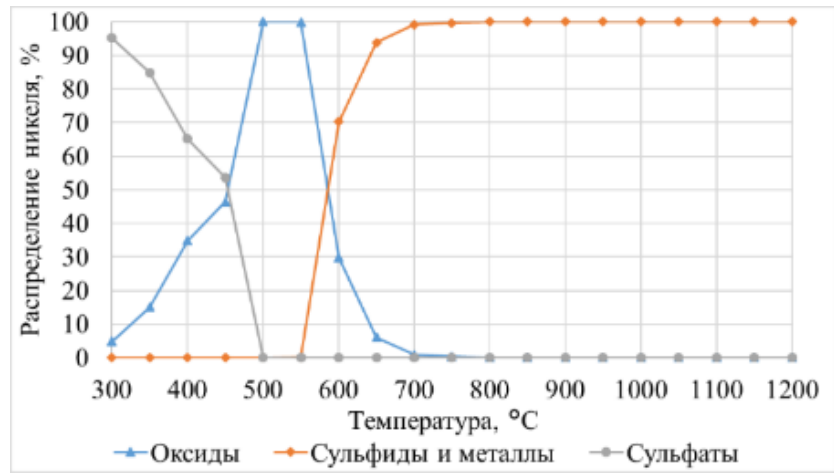
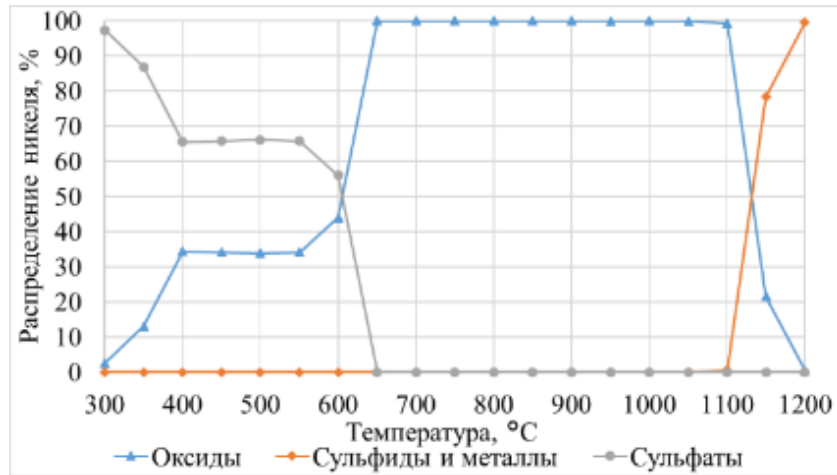


Рисунок 3.1 - Зависимость распределения никеля между фазами от температуры при $\lg P_{O_2} = -20$

На рисунке 3.2а и 3.2б представлены аналогичные зависимости поведения сульфида никеля, но для парциальных давлений $\lg p_{O_2} = -16$ и $\lg p_{O_2} = -8$, т.е. для более окислительной среды. Представленные результаты показывают аналогичное поведение кривых существования различных соединений на основе никеля в сравнении с рисунком 3.1. Однако, отмечается смещение зоны образования сульфатов и оксидов в сторону более высоких температур, также отмечается и расширение зоны существования оксида никеля. Чем выше окислительный потенциал рассматриваемой системы, тем сильнее расширяется область существования оксидов.



а



б

Рисунок 3.2 - Зависимость распределения никеля между фазами от температуры

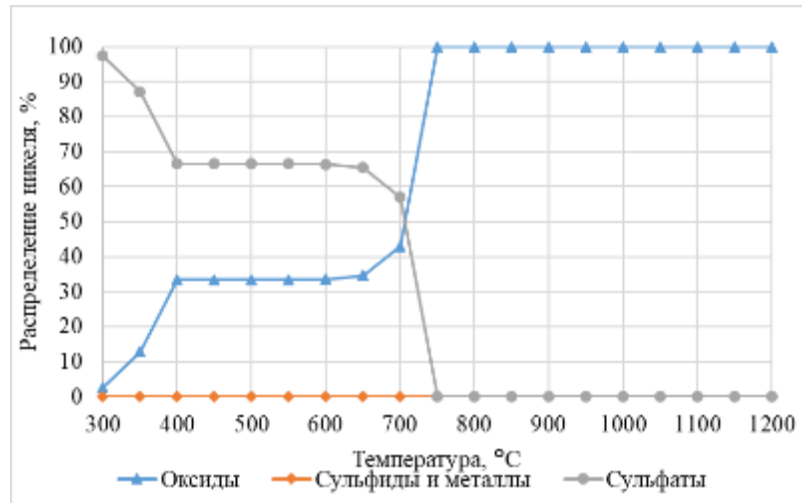
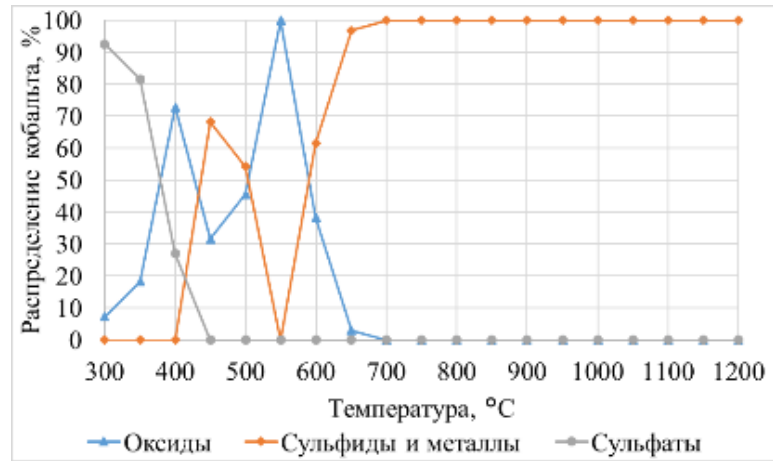
а - lg P_{O2} = -16; б - lg P_{O2} = -8

Рисунок 3.3 - Зависимость распределения никеля между фазами

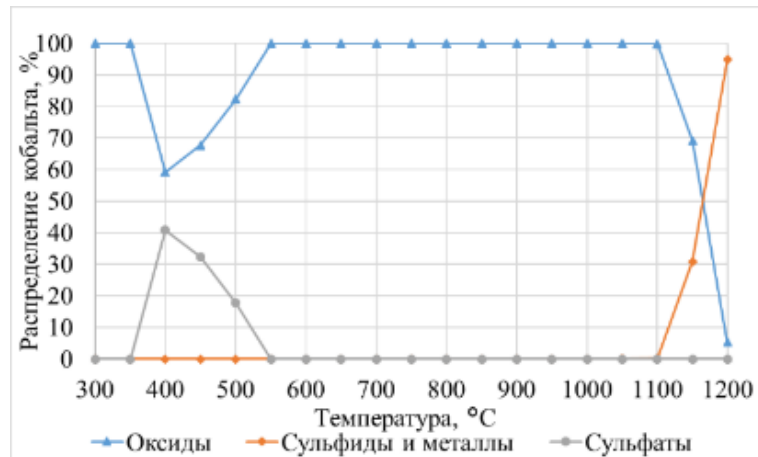
от температуры при lg P_{O2} = -4

На рисунке 3.3 представлена зависимость распределения никеля между фазами при $\lg P_{O_2} = -4$, где показано практически полное отсутствие фаз сульфидов или металлов. В рассматриваемом диапазоне температур фазы никеля представлены сульфатами и оксидами.

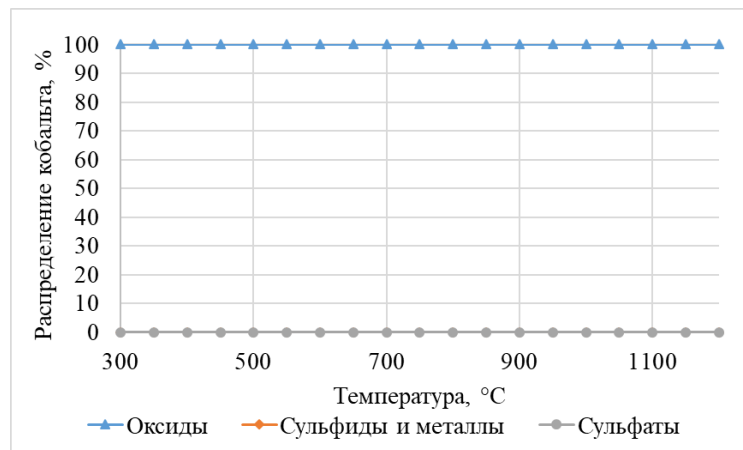
Аналогичная картина наблюдается и для Co , графические изображения которого представлены на рисунке 3.4.



а



б



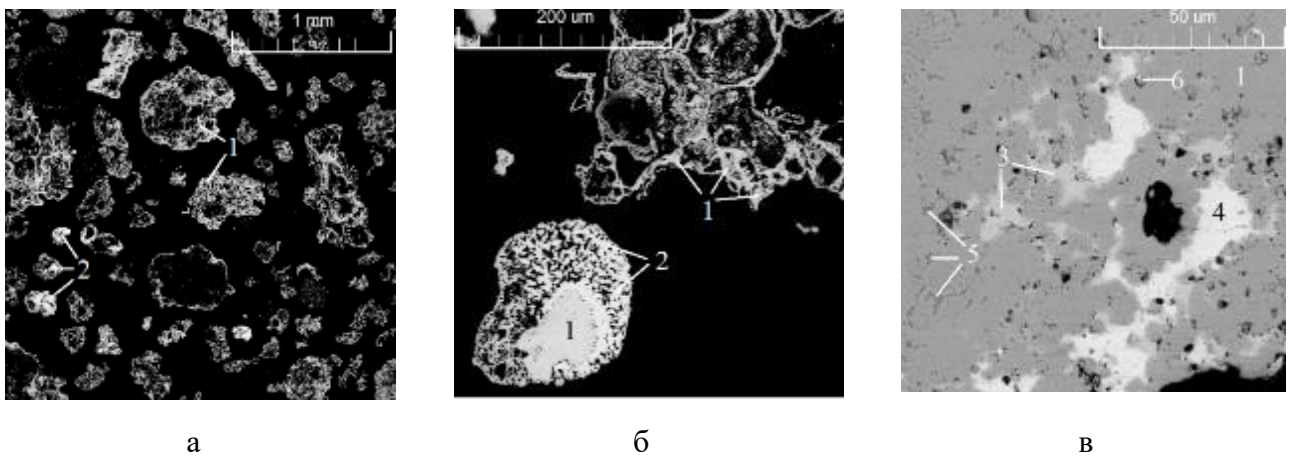
в

Рисунок 3.4 - Зависимость распределения кобальта между фазами от температуры при а - при $\lg P_{O_2} = -20$; б - при $\lg P_{O_2} = -8$, в - при $\lg P_{O_2} = -4$

Итак, результаты расчётов по поведению Co вполне согласуются с изложенными выше сведениями. Также, как и в случае с никелем, образование сульфатов кобальта отмечается в области низких температур, которое постепенно смещается в зону высоких температур при увеличении окислительного потенциала системы от $\lg P_{O_2} = -20$ до $\lg P_{O_2} = -4$

Проведем сравнение результатов расчёта с данными исследования обожженных огарков, отобранных с производства. При использовании инструментальных методов исследования воспользуемся методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) [39,49,63,148]. Изображения некоторых из таких образцов в сигнале отражённых электронов показаны на рисунке 3.5.

Методы анализа РЭМ-РСМА одни из наиболее популярных локальных методов исследования различных объектов. Данный метод исследования позволяет получить как качественную, так и количественную информацию не только о среднем составе вещества, но и об отдельных структурных составляющих. Разрешение локального метода начинается от первых микрон, кроме того применение данного метода не приводит к разрушению исследуемого объекта, что позволяет проводить повторные исследования с тем же самым веществом в будущем. Подробное описание оборудования и методик исследования представлено в работах [114-116].



1- оксид никеля, 2 – оксид меди, 3 – сульфид никеля, 4 – сульфид меди, 5 – ферриты, 6 – фазы благородных металлов

Рисунок 3.5 – Строение огарка от обжига никелевого концентрата при температуре $1100^{\circ}C$

Пробы огарка представлены блочными пористыми частицами закиси никеля, размером от 20-100 мкм до 1 мм. Силикатная составляющая и частицы закиси меди расположены по межзёрненным границам оксида никеля

В исследуемых объектах определены следующие включения:

- ферриты никеля;
- сростки металлической фазы на основе никеля с сульфидами меди и никеля;

- единичные включения металлов платиновой группы, серебра, соединений свинца, мышьяка, селена.

В пробах промышленных огарков сульфаты металлов обнаружены не были, что обусловлено режимами обжига окислительного процесса такими как температура и окислительный потенциал системы. В тоже время анализ пылей печей кипящего слоя содержит в составе сульфаты металлов, что обусловлено иными параметрами процесса, существенно меньшим пребыванием в зоне высоких температур ввиду их невысокой плотности. Таким образом, полученные результаты в полной мере соответствуют результатам ранее проведенных термодинамических расчетов.

Одним из ключевых параметров ведения процесса окислительного обжига в печах кипящего слоя является температура процесса. Неконтролируемое увеличение температуры окислительного обжига может приводить подплавлению и укрупнению частиц огарка печей КС, что негативно скажется на последующей переработке ввиду высокой плотности, крупности и низкой пористости. Такая укрупненная фракция, выгружаемая из печей кипящего слоя, имеет недостаточную реакционную способность для протекания глубоких восстановительных процессов. В предельном случае слой закиси никеля может спекаться и превращаться в неподвижную монолитную массу – «козёл». Произведем термодинамическую оценку теплового эффекта в зависимости от состава поступающего сырья, составы шихты (концентрат+ оборотная пыль) используемые в расчете представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Состав никелевого концентрата

№ пробы	Содержание, % масс.								
	Ni	Cu	Co	Fe	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
1 (среднее)	64,7	5,22	1,38	2,95	17,9	0,390	0,150	0,052	0,024
2	61,8	7,66	1,33	3,09	18,8	0,394	0,170	0,060	0,023
3	67,0	4,29	1,48	2,99	15,0	0,340	0,073	Н/а	Н/а
4	65,4	4,72	1,35	3,08	17,5	0,364	0,147	0,052	0,027
5	63,5	6,34	1,35	2,88	18,6	0,299	0,108	0,050	0,020

В таблице 3.2 представлен вариативный состав шихты, поступающей на обжиг. Проба 1 соответствует усредненным показателям состава шихты. Для окисления шихты в систему подавали кислородно-воздушную смесь с 30% кислорода.

Предварительно рассмотрим поведение концентраций в шихте при изменении состава, результаты представлены на рисунке 3.6.

Рост содержания никеля в концентрате при снижении серы обусловлен тем, что в концентрат вводят оборотную пыль печей кипящего слоя, которая несколько богаче по содержанию никеля, чем другими металлами, а содержание серы не превышает 2-3 % масс.

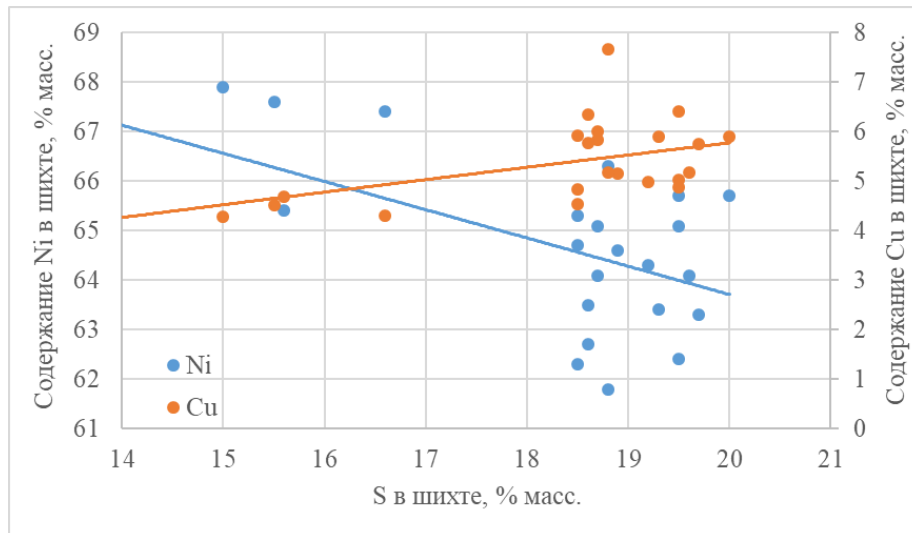


Рисунок 3.6 – Зависимость поведения цветных металлов от содержания серы в шихте

Термодинамические расчеты производились в два этапа. В первом случае условия расчета (расход кислорода) задавались таким образом, чтобы остаточное содержание сульфидной фазы в системе сохранялось на уровне 1% от массы концентрата. По результатам первого этапа расчета был определен расход окислителя (КВС) и тепловой эффект системы при температуре 1100°C. Во втором этапе, определенный тепловой эффект системы фиксировали для усредненной пробы № 1 (таблица 3.2) при 1100°C. После чего производили расчет для следующих составов представленных в таблице 3.3, где определяли температуру системы с фиксированным расходом КВС (результат 1 этапа). Результаты расчётов показаны в графической форме на рисунках 3.7-3.8. [113]

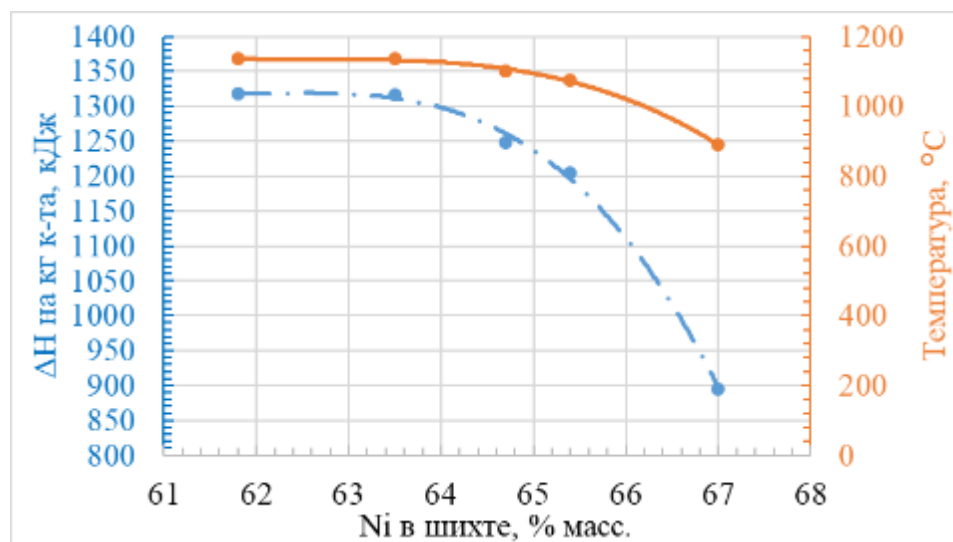


Рисунок 3.7 – Зависимость теплового эффекта и температуры обжига от содержания никеля в концентрате

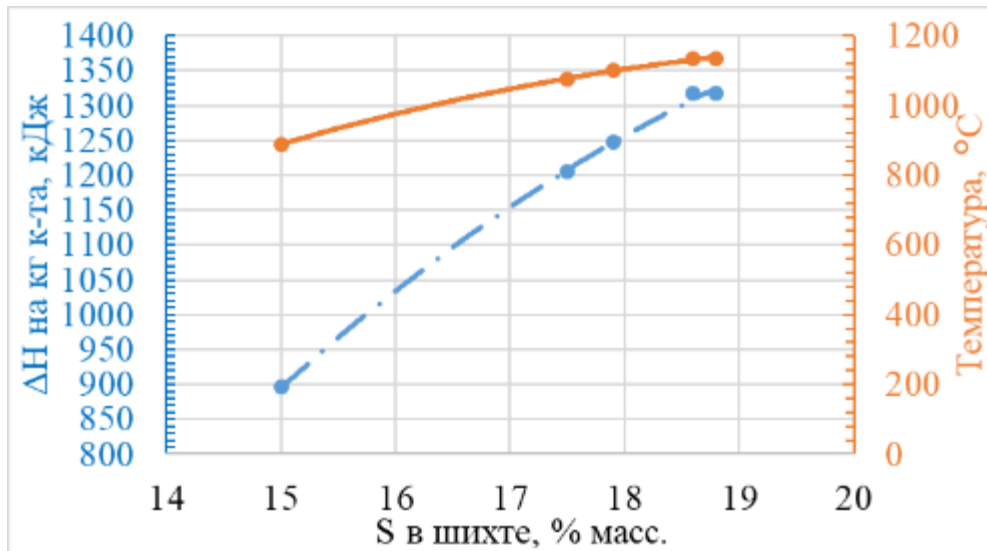


Рисунок 3.8 – Зависимость теплового эффекта обжига от содержания серы в концентрате

Тепловой эффект окислительного обжига растёт при повышении концентрации серы в составе шихты. На рисунке 3.8 представлено существенное изменение температуры процесса в рассматриваемых условиях. Так с ростом концентрации серы от 15 до 18,8% масс. оценочная температура процесса меняется от 889 до 1135°C. Минимальной температурой процесса для оплавления и агломерации частиц является температура 1050°C. Несоблюдение требований, предъявляемых к шихте по содержанию серы и как следствие дефицит тепла в промышленном агрегате приводит к увеличению выхода мелких классов из печи КС. В следующей главе будет показано, что мелкие классы огарка, поступающие в трубчатую печь при наличии благоприятных условий, существенно увеличивают выход крупных конгломератов (спёков). Согласно произведенным термодинамическим расчетам в составе шихты поступающей в печи КС необходимо поддерживать содержание серы не ниже 17,1% масс, что соответствует температуре системы порядка 1050°C. Полученные при выполнении термодинамических расчетов результаты, будут подтверждены в следующей главе, посвященной окислительному и восстановительному обжигу продуктов переработки сульфидного никелевого концентрата. Представленные результаты достаточно достоверно прогнозируют поведение промышленного агрегата при изменении условий процесса, что позволяет использовать термодинамические методы моделирования, как инструмент, позволяющий моделировать и предсказывать протекающие температурные изменения в печи, а, следовательно, и контролировать процесс. Недостаточная концентрация серы в составе шихты приводит к дефициту теплового баланса, необходимости проведения дополнительных мероприятий по разогреву печи, что неблагоприятным образом сказывается на составе никелевого огарка и росту мелких фракций, которые негативно влияют на процессы восстановления в трубчатой печи. В тоже время переработка высокосернистого сырья способствует росту температуры, укрупнению и плотности огарка, снижению его активности. Таким образом, создание системы управления процессом,

оперативно моделирующей процесс обжига в зависимости от состава сырья и позволяющей стабилизировать температуру в печи и качество огарка, весьма актуально.

Применение термодинамического моделирования при использовании программного обеспечения позволяет производить корректировки в режимах работы печей кипящего слоя, своевременно реагировать на отклонения в работе и минимизировать эти риски, а также способствует выбору наиболее рациональных управляющих воздействий.

3.3 Термодинамическое моделирование восстановительного обжига огарка

Как уже было отмечено выше, никелевый огарок является продуктом печей кипящего слоя, который представлен как оксидами цветных металлов и железа, так и единичными включениями ферритов никеля, сульфидных сростков цветных металлов и металлической фазы, мелких вкраплений металлов платиновой группы, серебра, соединений свинца, мышьяка, селена. Оксиды никеля представлены в основной массе бунзенимом (двух валентный оксид никеля), однако встречаются и более упорные, характеризующие более высокой степенью окисления соединения – ферриты никеля.

Таблица 3.3 – Оценочное содержание основных компонентов в пробе никелевого огарка

№	Наименование	Массовая доля, %								
		Cu	Ni	Co	Fe	S	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃
1	Огарок КС	4,9	66,6	1,67	3,64	0,024	0,383	0,02	0,048	0,104

Выполним оценку парциального давления кислорода над системой метал-оксид (Me-Me_xO_y) для наиболее важных элементов рассматриваемой системы результаты равновесия системы Me-Me_xO_y в диапазоне температур от 700 до 1200°C показано на рисунке 3.9.

Зависимость на рисунке 3.9 показывает разницу парциального давления над системами Me-Me_xO_y. Восстановление в трубчатой печи может быть реализовано, как через газовую фазу при взаимодействии восстановительных газов с оксидами цветных металлов, так и твердым углеродсодержащим веществом, добавляемым в шихту трубчатых печей.

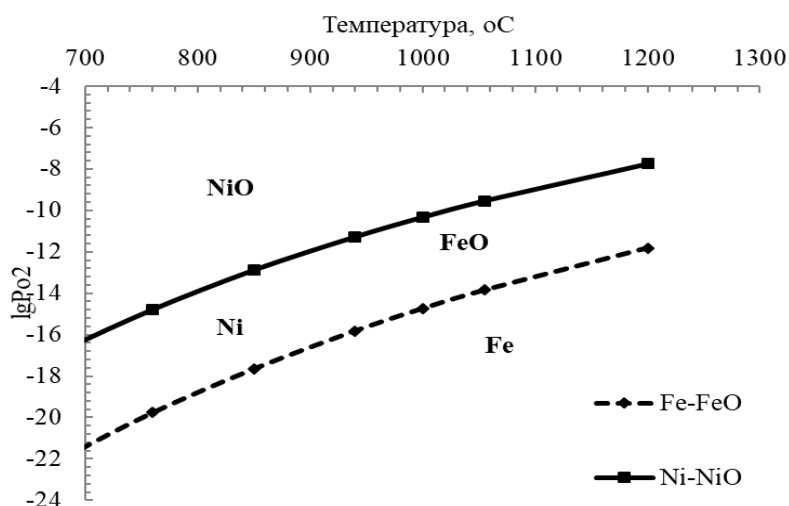


Рисунок 3.9 - Зависимость равновесного парциального давления кислорода над системами Me-O от температуры

Рассмотрим для основных имеющихся систем $Me-Me_xO_y$ в никелевом огарке и парциальное давление над системами C-CO, CO-CO₂, H₂-H₂O. Результаты расчетов для рассматриваемых систем приведены на рисунке 3.10.

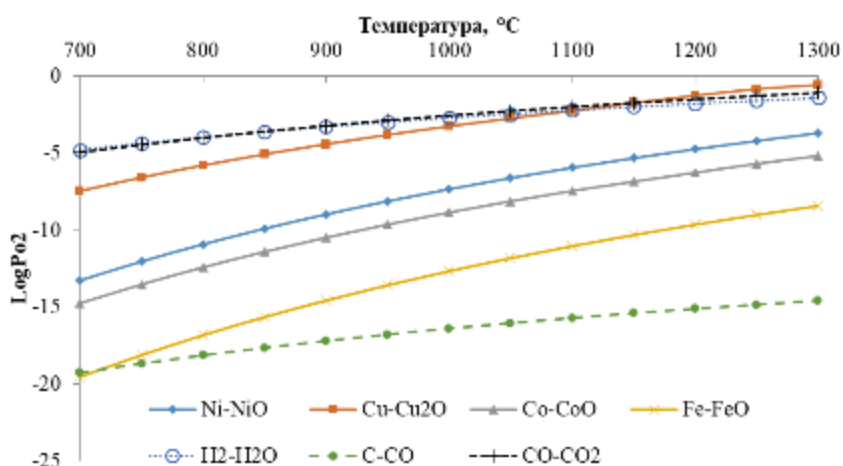


Рисунок 3.10 - Зависимость парциального давления кислорода от температуры

Анализируя данные полученные в ходе расчетов, можно сказать, что в температурном интервале 700°C-1300°C восстановление металлов из их оксидов возможно с помощью таких восстановителей как углерод и его монооксид, водород. Также отметим, на рисунке 3.10 показано, что при температуре ниже 712°C восстановление монооксида железа углеродом с образованием CO термодинамически невозможно, а при температуре свыше 1125°C оксиды меди могут быть восстановлены в атмосфере CO₂ и паров воды. С ростом температуры термодинамическая вероятность восстановления оксидов металлов существенно возрастает. Таким образом, рост температуры существенно упрощает протекание процессов восстановления.

В тоже время с ростом температуры увеличивается потребление энергии и ухудшается экономика процесса, а также возможно оплавление и конгломератообразование образующихся материалов, что затрудняет протекание восстановительных процессов, так как материал начинает подплавляться, что сокращает площадь поверхности твердой фазы и приводит к снижению скорости взаимодействия твердое – газ.

Рассмотрим сродство к кислороду элементов огарка, состав которых был показан в таблице 3.3. Продуктами реакции на первоначальном этапе являлись простые соединения без образования твердых растворов. В результате проведенных термодинамических расчётов был построен график зависимости степени восстановления металлов от доли вводимого углерода и угля к огарку. Зависимости представлены на рисунке 3.11, содержание основных компонентов в угле представлено в таблице 3.4.

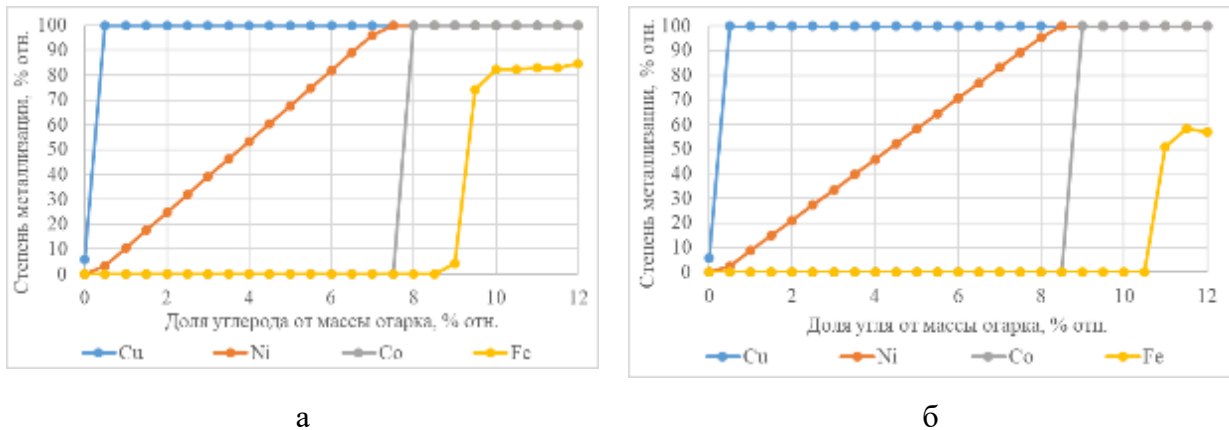


Рисунок 3.11 - Зависимость степени восстановления металлов при температуре 1050°C от расхода: а – чистого углерода; б – угля

В ряду основных металлов присутствующих в огарке при условии, что образование твёрдых растворов не происходит, первую очередь будет восстанавливаться медь, после чего никель и кобальт, эти элементы считаются наиболее легковосстановимыми, в последнюю очередь наблюдается восстановление железа, которое имеет высокое сродство к кислороду, а, следовательно, для перевода оксидов железа в металлическую форму необходимо создавать глубоко восстановительные условия. Восстановление металлов происходит последовательно друг за другом. Восстановление Cu, Ni и Co происходит при 8% отн. от массы никелевого огарка углерода (9% отн. при использовании угля). Наиболее полное восстановление всех оксидов происходит при 9,5% отн (11,5% отн. при использовании угля), однако заметим, что полное восстановление железа не происходит ввиду образования более прочных соединения на основе оксидов кремния и железа ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$), который препятствует при рассматриваемых условиях в полной мере восстановитель оксиды железа. Использование угля в качестве восстановителя приводит к росту в системе количества SiO_2 , а, следовательно, и долю восстанавливаемого оксида железа. В первом варианте расчета оксиды представлены отдельными фазами, при

рассмотрении в качестве продуктов реакции образование твердых растворов показатели восстановления несколько меняется, результаты представлены на рисунке 3.12.

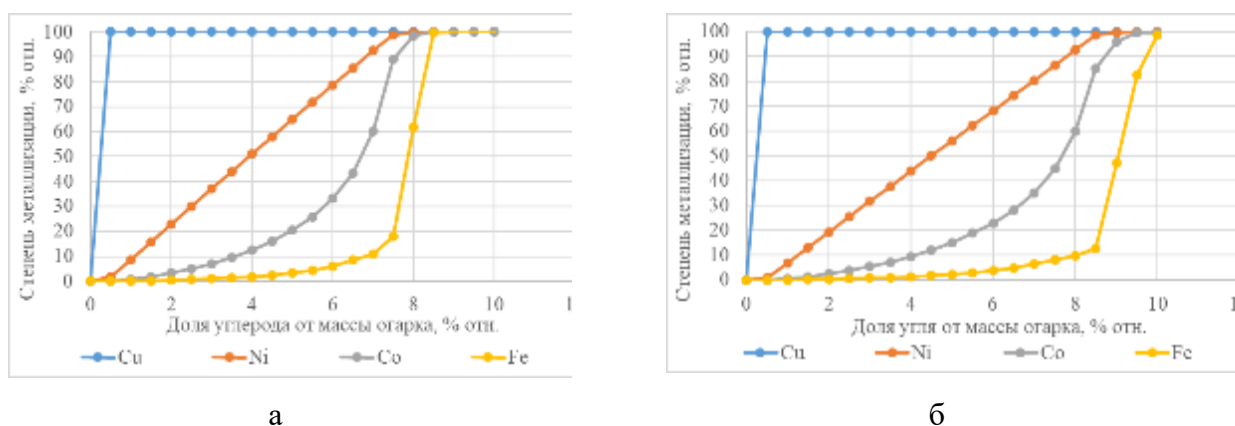


Рисунок 3.12 - Зависимость степени восстановления твердого раствора оксидов металлов от расхода углерода при температуре 1050°C: а – чистого углерода; б – угля

В отличие от ранее рассмотренной схемы, восстановление отдельных элементов огарка происходит не последовательно, а параллельно. Как видно из представленного графика кобальт и железо восстанавливаются уже при введении в систему 1-1,5% отн. углерода или угля. Восстановление всех оксидов металлов происходит при 8,5 % отн. и 10,0 % отн. для углерода и угля, соответственно. Использование твердых растворов при расчете термодинамического равновесия системы оксидов позволяет провести более глубокое восстановление оксидов металлов. Необходимое количество восстановителя для полного восстановления всех компонентов из раствора снижается на 10,5% отн. и 13,0 % отн. для углерода и угля по сравнению с расчетом отдельных компонентов.

На следующем этапе производился расчет по оценке теплового эффекта процесса при введении различного количества восстановителя. Для оценки показателей восстановительного обжига при постоянном составе огарка КС варьировали количество восстановителя и воздуха, для получения соответствующего состава отходящих газов. По результатам промышленных испытаний, о которых пойдет речь в следующей главе были определена производительность КС по огарку и количество подаваемого восстановителя. Производительность по углю варьировалась от 1,4 до 2,9 т/ч, при производительности по огарку порядка 15 т/ч, данные объемы использовались при проведении термодинамических расчетов.

Расчёт выполнен для системы, представленной 100 г огарка КС $T=1050^{\circ}\text{C}$; 0,5-70 г воздуха $T=25^{\circ}\text{C}$; 9-19 г угля $T=25^{\circ}\text{C}$. Состав исходного вещества представлен в таблице 3.3, а состав восстановителя и воздуха представлен в таблице 3.4. Результаты расчётов показаны в графической форме на рисунках 3.13-3.15. [112]

Таблица 3.4 – Содержание компонентов в материалах, используемых в расчетах восстановительного обжига

№	Наименование	Массовая доля, %									
		C	Fe	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Летуч	N ₂	O ₂	Ar
1	Твердый восстановитель	67,63	0,25	4,06	0,06	0,15	1,95	25,80	-	0,1	-
2	Воздух	-	-	-	-	-	-	-	75,4	23,2	1,4

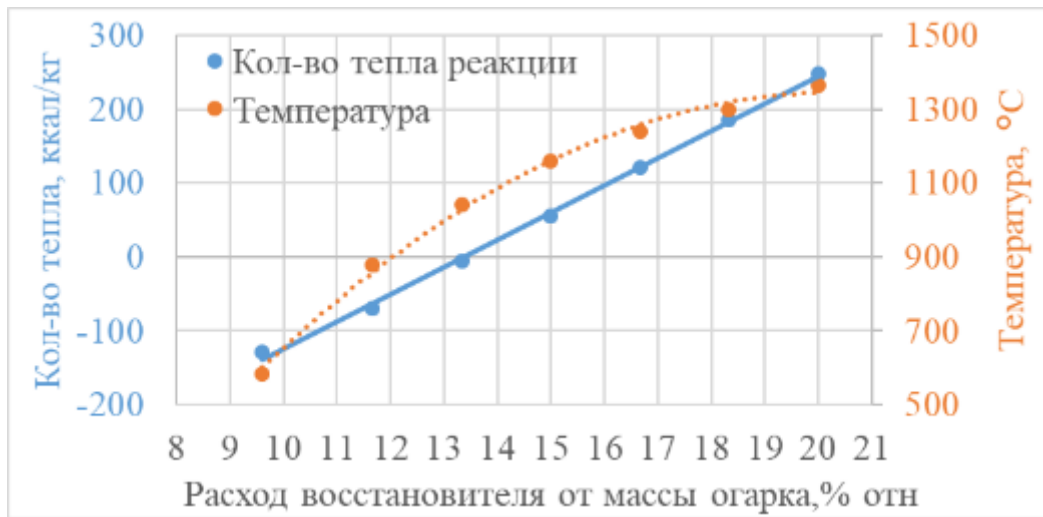


Рисунок 3.13 – Зависимость теплового эффекта и температуры обжига от процента твердого восстановителя при концентрации в отходящих газах CO=0,25% об.



Рисунок 3.14 – Зависимость теплового эффекта и температуры обжига от процента твердого восстановителя при концентрации в отходящих газах CO=1,5% об.



Рисунок 3.15 – Зависимость теплового эффекта и температуры обжига от процента твердого восстановителя при концентрации в отходящих газах $\text{CO}=3\%$ об.

Представленные на рисунках 3.13-3.15 расчеты показывают, что расчётный тепловой эффект восстановительного обжига заметно растёт с увеличением подачи восстановителя. Температура процесса может меняться очень существенно. Так, при содержании в отходящих газах CO на уровне 1,5% об. и 3,0% об. ниже 14-14,5% отн. восстановителя от массы огарка рассматриваемая система работает с дефицитом сырья и температура опускается ниже 1050°C (начальные условия температуры огарка поступающего в восстановительную печь). При более полном сжигании твердого восстановителя, т.е. высоком окислительном потенциале системы, содержание CO в этом случае находится на уровне 0,25% об., необходимое количество восстановителя для поддержания системы в равновесии составляет 13,6% отн. С другой стороны, избыточное количество восстановителя введенной в систему приводит к перегреву металлического порошка до температур $1150\text{-}1350^{\circ}\text{C}$, что в свою очередь будет способствовать подплавлению наиболее легкоплавких соединений (шлаковых и металлических науглероженных частиц), а, следовательно, и росту спёков в трубчатых печах. Полученные в результате моделирования термодинамические данные можно использовать при прогнозировании поведения трубчатых печей и роста спёков в печном агрегате, что в свою очередь способствует лучшему пониманию протекающих процессов и их контролю.

3.4 Выводы по главе 3

1. По результатам термодинамических расчетов для поддержания стабильной работы печи кипящего слоя, содержание серы в шихте, поступающей в печь необходимо поддерживать не ниже 17,1% масс, что соответствует температуре системы порядка 1050°C . Температура 1050°C является минимально необходимой для оплавления и агломерации частиц.

2. Применение термодинамического моделирование позволяет с высокой степени достоверности прогнозировать поведение промышленного агрегата при изменении условий процесса, а, следовательно, и контролировать процесс в промышленном агрегате.

3. Термодинамическое моделирование на базе FactSage или иного аналогичного программного средства может быть с успехом использовано в составе системы управления промышленной печью – для оценки текущего состояния процесса и выбора оптимальных управляющих воздействий.

4. Термодинамические расчеты восстановительного обжига никелевого огарка показывают, что избыточное количество подаваемого восстановителя от 15,0% отн. от массы огарка и выше в зависимости от полноты горения применяемого восстановителя характеризуются значительным избытком тепла. Избыточное количество восстановителя, приводит к росту температуры процесса до 1150-1350°C, что способствует подплавлению наиболее легкоплавких соединений (шлаковых и металлических науглероженных частиц) и росту количества спёков в трубчатых печах.

ГЛАВА 4 ПРОЦЕССЫ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО И ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ОБЖИГОВ ПРИ ПЕРЕРАБОТКИ НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА ОТ РАЗДЕЛЕНИЯ ФАЙНШТЕЙНА

Для получения продукта высокого качества, который бы удовлетворял всем необходимым условиям, к исходным веществам и промежуточным продуктам пирометаллургического комплекса переработки сульфидного никелевого концентрата предъявляется достаточно большое количество требований. Для получения стабильных показателей и качества металлизированного порошка необходимо знать, как состав, температурный режим, крупность промпродуктов, количество восстановителя влияют на пирометаллургический процесс. В главе 4 рассматриваются лабораторные исследования восстановления порошка трубчатых печей, в которых определяются наиболее рациональные показатели и условия восстановительного обжига. В настоящем разделе проводится анализ промышленных испытаний в печах кипящего слоя и трубчатых вращающихся печах, определяется поведение силикатной составляющей проб, оценивается влияние состава концентрата на крупность огарка и последующее спёкообразования в трубчатой вращающейся печи (ТВП), оценивается необходимый объем восстановительного агента для получения высокой степени металлизации при минимизации выхода немагнитной фракции.

4.1 Лабораторные исследования

На первом этапе исследований проведены лабораторные опыты в фильтрующем слое в вертикальной трубчатой электропечи ЭТПМ 0,8/1600 ВП. Восстановление никелевого огарка выполнялось с применением твердого восстановителя, используемого на предприятии АО «Кольская ГМК». Для лабораторных исследований была подготовлена фракция угля крупностью -2,5 мм, после чего производилось приготовление шихты из угольной крошки и огарка. Приготовленную шихту помещали в запаянную с одного конца высокую трубку из кварцевого стекла. Для снижения пылевыноса и влияния окислительной атмосферы окружающей среды в кварцевую трубку помещали слой минеральной ваты. Создание восстановительной (инертной) атмосферы было обеспечено за счет подачи аргона сверху помещенной в кварцевый реактор шихты. По завершению температурной выдержки производилась охлаждение до температуры 100°C в условиях непрерывной подачи аргона.

Условия проведения экспериментов:

- Рабочая температура процесса - 1100°C, 1150°C и 1200°C;
- Время проведения процесса – 30, 60, 90, 120 мин;
- Масса навески огарка – 30 гр;
- Масса навески угля – 4,8; 4,48; 4,2; 3,6; 3 гр;
- Крупность материала – +2,5; -2,5 +1,2; -1,2 + 0,8; -0,8+0,45 мм;

- В качестве газа-носителя применялся аргон марки ХЧ.

Исследования методами аналитической химии проводились при использовании атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (АЭС с ИСП), описание представлено в предыдущем разделе настоящей работы. На рисунках 4.1-4.4 показаны зависимости показателей степени металлизации Ni от класса крупности огарка, температуры и количества подаваемого восстановителя приведенной к массе углерода, содержащегося в угле. [108]

Степень металлизации никеля была определена по формуле (4.1) как отношение никеля металлического к никелю общему, т.е. находящемуся в металлической форме и в форме оксида.

$$\frac{Ni_{мет}}{Ni_{общ}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Характеристики каменного угля, используемого в экспериментах и применяемого на производстве представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики и состав используемого восстановителя

Массовая доля, %										Влажность, % масс	Q _{нр} , ккал/кг
Fe	S	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Zn	Летуч.	C _{ТВ}	∑C _{Г+ТВ}		
0,25	0,28	4,06	0,15	1,95	0,06	0,002	27,12	65,7	79,03	8,3	6756

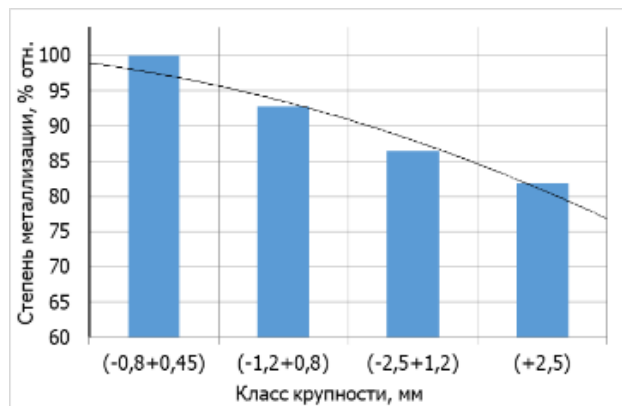


Рисунок 4.1 – Степень металлизации Ni от класса крупности при температуре 1100°C, выдержке 120 минут и доле углерода 12,8% отн.

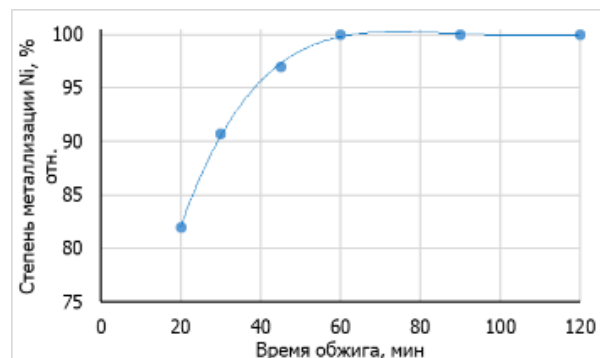


Рисунок 4.2 – Степень металлизации Ni от времени восстановительного обжига при температуре 1100°C, доле углерода 12,8% отн. и крупности -0,8+0,45 мм

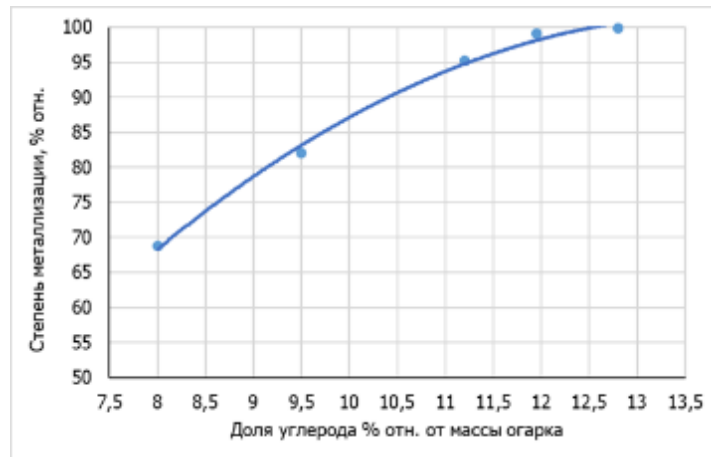


Рисунок 4.3 – Степень металлизации Ni от доли углерода при температуре 1100°C, выдержке 60 минут и крупности $-0,8+0,45$ мм

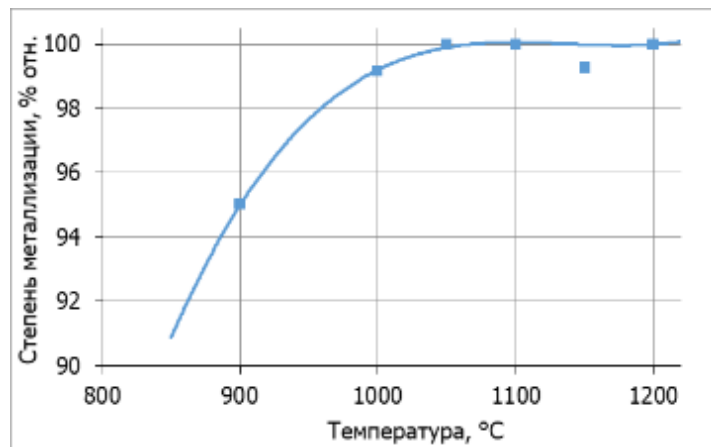


Рисунок 4.4 – Степень металлизации Ni от температуры при доле углерода 12,8% отн., выдержке 60 минут и крупности $-0,8+0,45$ мм

По результатам лабораторных исследований определены условия протекания восстановительного обжига:

- температура процесса 1100°C;
- время выдержки 60 минут;
- доля углерода от массы огарка 12,8% отн.;
- крупность фракции менее 0,8 мм.

4.2 Промышленные испытания

4.2.1 Работа промышленных агрегатов

На АО «Кольская ГМК» в рафинировочном цехе установлено три технологические нитки, включающие в себя печи обжига никелевого концентрата в кипящем слое и трубчатые вращающиеся печи для восстановления никелевого огарка.

Печь кипящего слоя

Кек вакуум-фильтров с содержанием серы от 15 % до 22 % и влажностью от 6 % до 12% подается транспортером в загрузочный бункер (1^{''}). Из него тарельчатым питателем (2^{''}) и транспортером (3^{''}) подается в загрузочную трубу с пневмозатвором (4^{''}). В загрузочную трубу подается сухая пыль, а также огарок при загрузке печи перед разогревом после остановки – через бункер (5^{''}).

Масса загружаемой пыли (от 5 до 45 % от массы концентрата) регулируется по данным о количестве последнего в сгустителе на начало смены, а также по производительности систем гидротранспорта. Содержание серы в такой пыли по данным аналитической химии не превышает 3 % масс.

Окислительный обжиг реализуется в печах кипящего слоя (КС) при помощи воздуха подаваемого через подину пирометаллургического агрегата в интервале от 900°С до 1200°С. Регуляция процесса и поддержание температуры окислительного обжига производится за счет контроля объема шихты (пыль+ концентрат), а также содержания SO₂ в отходящих газах. По практике работы печей КС избыток воздуха варьируется в диапазоне 1,05-1,25. Основными задачами реализации обжига является удаление серы и перевод ее в газовую фазу в виде диоксида, а также укрупнение флотационного концентрата, подвергаемого обжигу, для последующей переработки. Технологическая схема обжига представлена на рисунке 4.5.

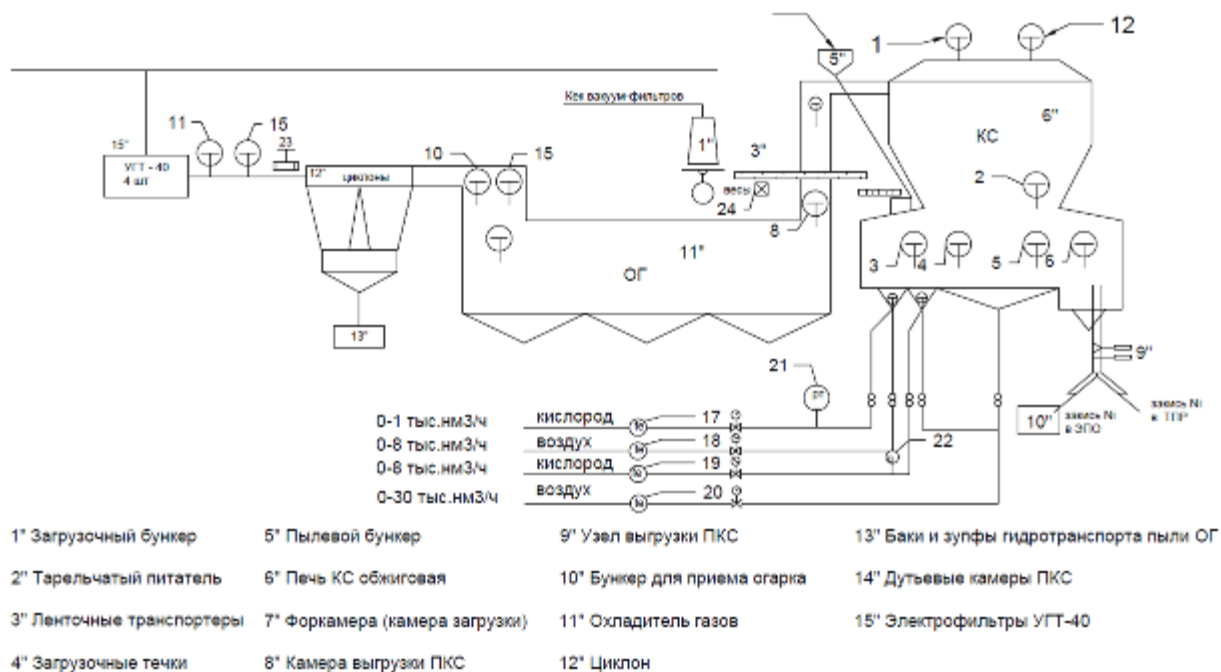


Рисунок 4.5 – Технологическая схема обжига никелевого концентрата в печи КС

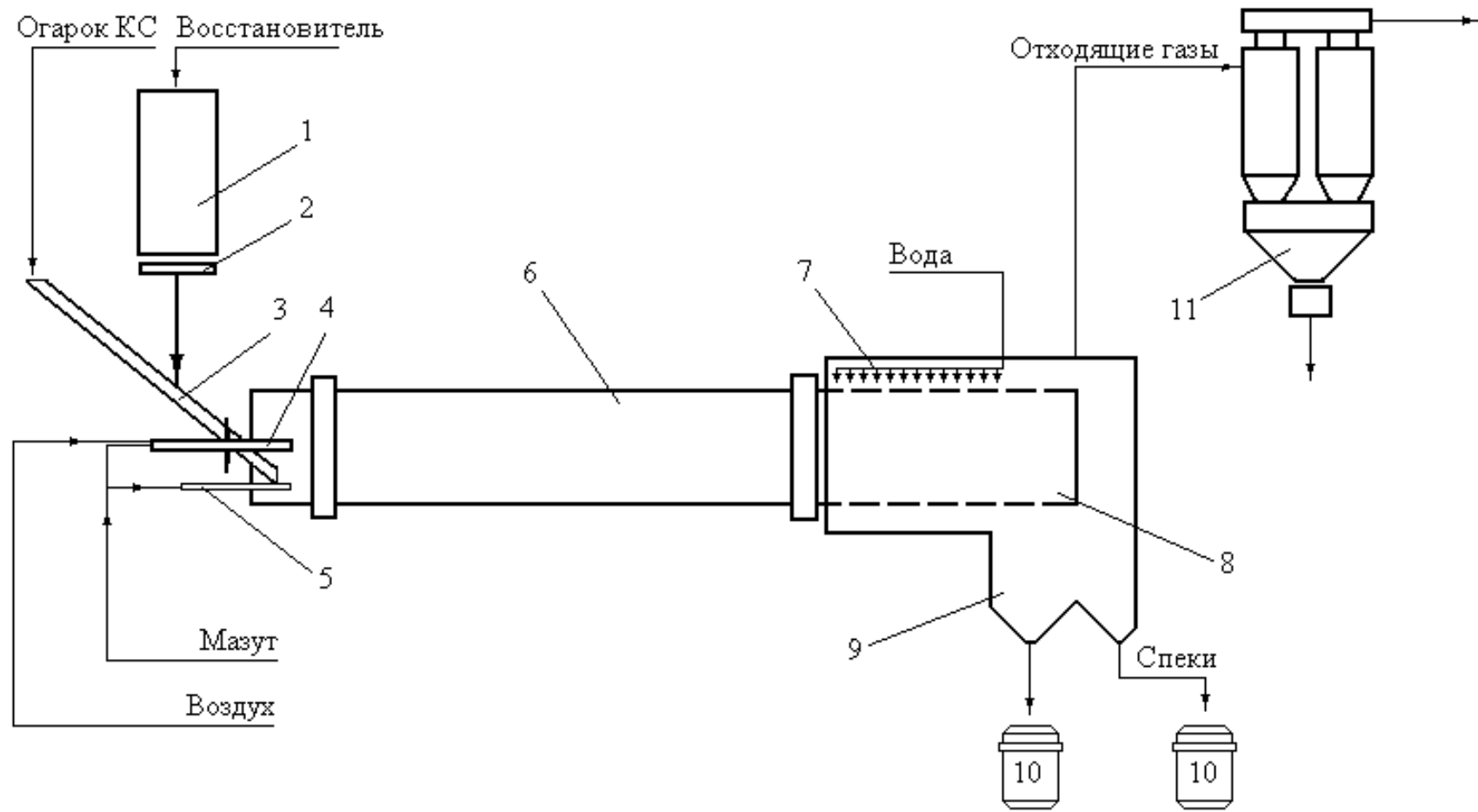
Трубчатая вращающаяся печь

Горячий окисленный материал по течке поступает в ТВП. Выгрузка КС осуществляется в интервальном режиме, который варьируется обычно от 70 до 90 секунд, время открытия 2-3 секунды, такой режим работы позволяет поддерживать своевременную разгрузку КС. Помимо

никелевого огарка в трубчатую печь подают твердый восстановительный агент для перевода оксидов цветных металлов в металлическую форму, который также используется в качестве топлива в трубчатых печах, в настоящее время несмотря на возможность работы горелочных устройств, необходимое тепло образуется за счет горения восстановителя за счет принудительно подаваемого воздуха и подсосов в ТВП. Принципиальная схема трубчатой печи приведена на рисунке 4.6.

Количество подаваемого угля варьируется в диапазоне 1,5-3,0 т/час. Согласно формулам расчета трубчатых вращающихся печей, а также параметрам ТВП (длина – 22 м, диаметр внутренний 1,688 м, угол наклона печи – 3°, коэффициент заполнения 12%, насыпной вес материала 2,3 г/см³) [143,146,190], производительность агрегата при совершении 1 оборота за 90 секунд составляет 12 т/ч, а время пребывания материала в печи порядка 1 часа 10 минут.

После прохождения горячей зоны, восстановленный никелевый огарок через жаропрочную проставку поступает на охлаждение в грохот, температура выгружаемого продукта не должна превышать 200°C во избежание процессов пассивации порошка и вторичного окисления металла. Восстановленная закись никеля, полученная в процессе восстановления в ТВП, разделяется в бутарах (грохотах) по крупности на два продукта: надбутарный продукт (минус 250 + 50мм) – спёки и подбутарный продукт (минус 50 мм). Продукт крупностью более 50 мм, разгружается в отдельный бункер, откуда перегружается в кубели и краном передается.



1 - бункер восстановителя; 2 - тарельчатый питатель; 3 - жаропрочная течка огарка; 4 -основная мазутная горелка;
 5 - дополнительная форсунка подачи мазута в слой огарка; 6 -футерованная трубчатая печь; 7 - душирующее устройство; 8 - бутара-
 холодильник; 9 -бункер кондиционного никелевого порошка; 10 - кубели; 11 - система газоочистки

Рисунок 4.6 – Принципиальная схема трубчатой печи для восстановления закиси никеля

на приемную площадку, расположенную на отметке +9,400 участка подготовки никелевого порошка трубчатых печей (НПП). Продукт менее 50 мм может проходить дальнейшую подготовку двумя путями:

- через приемный бункер подбударного продукта частично (с одной или нескольких ниток обжига) поступает на грохочение на неподвижных ситах (сито -1,25 мм) с выделением узкого класса крупности -1,25 мм или -1,25 - +0,4мм, передаваемого в ЦЭН на медочистку или цементацию, соответственно.

- через виброконвейер и ленточный конвейер материал поступает на 12-й передел, где проходит через операции грохочение, дробление и магнитную сепарацию. Магнитный продукт направляется в ЦЭН-2 для дальнейшей переработки, немагнитная фракция отправляется на комбинаты Заполярного филиала г. Норильск, также для дальнейшей переработки [88]

4.2.2 Методика проведения промышленных испытаний

В период проведения промышленных испытаний, работы проводились на одной из технологических линий рафинировочного цеха АО «Кольской ГМК». Опробование производилось от подачи никелевого концентрата в КС до участка магнитной сепарации, продуктами которой являются магнитная и немагнитная фракции. В процессе работы на отдельном пирометаллургическом оборудовании (2-я технологическая линия) испытания производились при постоянных и контролируемых режимах с фиксированной загрузкой материала (температура процесса в агрегатах, сортность угля, гран состав угля, отсутствие оборотов, их состав и количество).

В ходе проведенных работ опробование продуктов производилось по следующей схеме:

1.1. Огарок

В ходе опыта ежемесячно с интервалом 2 часа на отметке 11.40 производился отбор 2 часовых проб с 5-ти минутным интервалом в тарированную емкость (металлическое ведро) при передаче продукта в ТВП-2 при помощи пробоотборника через смотровое окно. Общая масса пробы составляет ~ 2,5-3 кг, пробу перемешивают методом перекачивания не менее 20-ти раз и выделяют из неё методом квартования пробу ~ 500 г для проведения химического анализа на содержание цветных и драгоценных металлов, а также других требуемых компонентов. Аналогичным методом выделяется проба огарка для проведения гранулометрического анализа массой ~ 500 г. Обозначение часовых проб огарка: «О^{дата}_{время}»;

1.2. Восстановленная закись никеля

В ходе опыта ежемесячно с интервалом 2 часа на отметке 4.80 производился отбор 2 часовых проб с 5-ти минутным интервалом в тарированную емкость (металлическое ведро) на выходе из трубчатой печи. Отбор и подготовка часовых проб (с учетом 5-ти минутного

интервала) восстановленного металлического порошка осуществлялась в соответствии с алгоритмом, изложенным для огарка. Данная проба обозначается: «ВЗН^{дата}_{время}»;

1.3. Порошок никелевый трубчатой печи магнитная фракция и немагнитная фракция

В ходе опыта ежемесячно с интервалом 4 часа отбирали пробы МФ и НФ. Отбор 2 часовых проб с 5-ти минутным интервалом выполнялся в тарированную емкость (металлическое ведро) на выходе 2-го дробильного комплекса.

1.4. Спеки

В ходе работы производилась оценка объема образующихся спеков в зависимости от режимов работы, а также дробление и опробование продукта с последующим направлением на магнитную сепарацию совместно с восстановленным порошком.

1.5. Обороты

В период промышленных испытаний подачу оборотных материалов не производилась.

4.2.3 Поведение силикатной составляющей

Реализация технологии хлорного выщелачивания, которая предполагает переработку никелевого порошка трубчатых печей взамен переработки никелевых анодов, вносит существенные в работу пирометаллургического передела. Отказ от выплавки анодов существенно ужесточает требования к продукции рафинировочного цеха АО «Кольская ГМК» металлизированному никелевому порошку такие как: степень металлизации², цементационная активность определенного класса получаемого продукта, крупность, концентрация углерода, а также концентрация примесей в виде SiO₂ и других элементов составляющих пустую породу в цветной металлургии. Основные требования к получаемой продукции пирометаллургического передела, а именно никелевому порошку представлены в таблице 4.2.

К продукту трубчатых печей – металлизированному никелевому порошку предъявляется 11 различных требований, представленных в таблице 4.2. Ключевыми показателями, значительно влияющими на гидromеталлургическое производство, являются степень металлизации продукта трубчатых печей, концентрация углерода и диоксида кремния. Концентрация углерода в металлическом порошке и степень металлизации регулируется в основном за счет работы трубчатых печей и параметров продукта печей КС, поступающего в печь (температура, крупность). Кроме того, участок магнитной сепарации способен удалить основную часть невосстановленных частиц и остаточного углерода, переведя эти компоненты в немагнитную фракцию. В случае же диоксида кремния ситуация принципиально противоположная.

² Под степенью металлизации понимают отношение содержания восстановленного, несвязанного с кислородом Ni к общему содержанию никеля в анализируемом материале.

Таблица 4.2 - Требования к восстановленному порошку

Компонент	Размерность	Требование к продукции
Ni	% масс.	86,50
SiO ₂		0,60
C		0,12
Fe		3,74
Cu		4,00
Pb		0,0087
Zn		0,0075
As		0,04
Sb		0,0009
Степень металлизации		% отн.
Крупность порошка	мм	-2,5+0,2

Диоксид кремния в производственную цепочку поступает из различных источников и контроль его концентрации является актуальным уже на стадии исходного сырья - никелевого концентрата от разделения фэйнштейна, где диоксид кремния и другие оксиды пустой породы поступают на переработку вместе с фэйнштейном. Следовательно, анализ промпродуктов пирометаллургического производства в технологической схеме получения катодного никеля по содержанию диоксида кремния представляет особый интерес. Диоксид кремния при выщелачивании не растворяется и остается в шламовом продукте богатой драгметаллами, приводит к необходимости проводить операции обескремнивания, увеличивая количество операций по извлечению драгоценных металлов. Кроме того, диоксид кремния существенно снижает скорость фильтрации растворов при попадании его в поры на пресс-фильтрах, что приводит к необходимости увеличивать количество фильтрующего оборудования.

В 2020 году в АО «Кольская ГМК» в рамках совместных работ проводились промышленные испытания и технологический аудит пирометаллургического передела и участка магнитной сепарации. Опробованию подвергались все промпродукты рассматриваемых участков от поступающего никелевого концентрат в составе шихты печей КС до продуктов магнитной сепарации: магнитной и немагнитной фракции. Помимо исходных и конечных продуктов технологической линии производился отбор оборотных материалов поступающих в печи КС. К оборотным материалам относятся различные оборотные продукты и отходы производства АО «Кольская ГМК», в частности, остатки хлорного выщелачивания, зачистки пресс фильтров, которые образуются на гидрометаллургических переделах никелевого производства.

По результатам проведенного аудиты и промышленных испытаний при анализе различных продуктов было установлено три основных канала поступления диоксида кремния в пирометаллургическое никелевое производство. SiO₂ поступает с никелевым концентратом, с оборотными материалами гидрометаллургических переделов, с твердым углеродсодержащим восстановителем, подаваемый в трубчатые печи. По результатам более 50 проб продуктов

установлены наиболее значимые каналы поступления SiO_2 , итоги проведенных исследований представлены в таблице 4.3.

Анализ проведенных исследований показал, что SiO_2 распределяется между продуктами следующим образом:

- с никелевым концентратом приходит порядка 13,9% отн.;
- оборотные материалы производства, которые подают на окислительную стадию в печи КС вносят около 27,0 % отн. от всего объема диоксида кремния в системе;
- основная же масса диоксида кремния в технологической схеме переработки никелевого концентрата поступает с твердым восстановителем в ТВП и составляет 59,1% отн.

Таблица 4.3 – Распределение SiO_2 в продуктах рафинировочного цеха

№	Статья	Размерность	Никелевый концентрат	Оборотные материалы	Восстановитель
1	Содержание SiO_2	% масс.	0,16	0,38-0,66 (0,47)	1,0-1,3 (1,15)
2	Распределение SiO_2 по переделам (продуктам)	% отн.	13,9	27,0	59,1
3	Процент SiO_2 по переделам от регламентных показателей ³	% отн.	36,4	70,5	154,5

Помимо аналитических методов исследования, которые направлены на анализ вещественного состава участвующих в работе материалов, в частности на определение концентрации SiO_2 и его доли вносимой на различных участках производства. На данном этапе работы также использовались и локальные методы исследования - РЭМ-РСМА. Представленный и описанный в предыдущем разделе метод исследования при формировании растрового изображения поверхности объекта позволяет оценить особенности распределения SiO_2 в пробах, определить формы и размеры частиц. Содержание основных компонентов, которые исследовались методами РЭМ-РСМА представлены в таблице 4.4.

Значительная часть исследований, проведенных в настоящей работе используют результаты рентгеноспектрального микроанализа и растровой электронной микроскопии. Основным направлением при исследовании промпродуктов никелевого производства является концентрация диоксида кремния в пробах. В то же время не малое внимание уделяется и наиболее значимым элементам, содержащимся в исследуемых пробах, которое необходимо для понимания состава, общей картины изучаемых объектов.

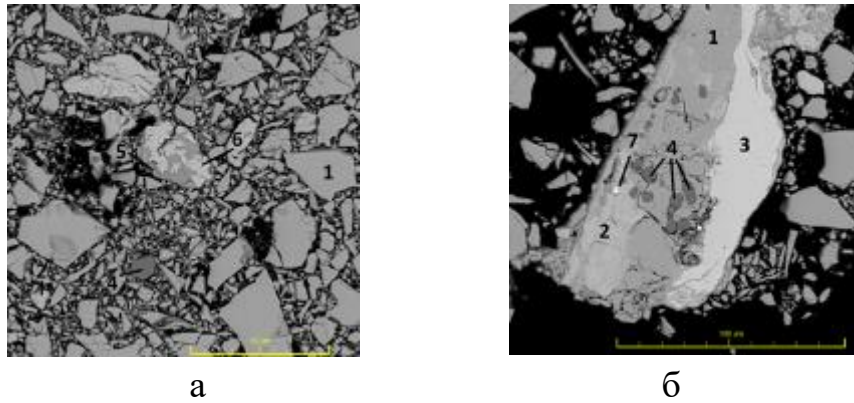
³ Регламентное содержание SiO_2 в магнитной фракции восстановленного никелевого порошка составляет 0,44% масс.

Таблица 4.4 – Содержание основных компонентов в исследуемых материалах

№	Наименование	Массовая доля, %									
		Cu	Ni	Co	Fe	S	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	C
1	Ni концентрат	4,91	67,73	1,69	3,24	18,1	0,139	<0,02	0,027	<0,05	н/а
2	Огарок КС	4,9	66,6	1,67	3,64	0,024	0,383	0,02	0,048	0,104	н/а
3	Порошок трубчатой печи	5,40	80,94	1,87	3,99	0,046	0,97	н/а	н/а	0,44	1,0
4	Магнитная фракция	5,86	85,7	1,92	4,98	0,077	0,75	н/а	н/а	н/а	0,13
5	Зачистки фильтр-пресса	51,1	21,4	0,59	1,51	0,6	5,68	0,14	0,67	2,06	0,63

Исходное сырье - никелевый концентрат

Никелевый сульфидный концентрат представляет собой частицы до 1 мм, что обусловлено сушкой концентрата от разделения фанштейна и его последующим слеживанием. Сульфид никеля является основным компонентом исследуемой пробы, минералогический состав приближен к хизлевудиту с формулой Ni_{3±x}S₂. (рисунок 4.7) Также в пробе отмечается присутствие сульфидов меди, сульфидов железа-никеля, единичные включения сульфида свинца и сульфиде никеля и металлические фазы на основе меди и никеля (рисунок 4.7). Сульфид меди приближен к составу халькозин-борнитового твердого раствора (рисунок 4.7,б). Помимо сульфидных и металлических соединений металлов в структуре никелевого концентрата встречаются продукты шлаков, близких по составу к шлакам медно-никелевого конвертирования фанштейна. В состав оксидной составляющей помимо оксидов железа, содержатся и SiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO и др. компоненты. Отмеченные шлаковые частицы незначительно обогащены оксидами цветных металлами. Доля таких частиц в пробе не превышает 0,1-0,2% масс., обозначим данные шлаковые частицы, как *“тип I”*. Анализ промпродуктов пирометаллургического передела показал, что соединения, содержащие диоксид кремния *“тип I”* встречаются только в исходном концентрате, что свидетельствует о незначительном количестве такого типа соединения и его усреднения с остальными компонентами в печи кипящего слоя



1 – сульфид никеля (а,б), 2 – сульфид меди (б), 3- мет. фаза на основе меди (б), 4 – оксид железа (б), 5- сульфид никеля-железа (а), 6- мет. фаза на основе никеля (а), 7 – сульфид свинца (б)

Рисунок 4.7 - Строение пробы никелевого концентрата

Оборотные материалы – продукты хлорного растворения никелевого порошка, поступающие в КС

Как уже отмечалось ранее, значительное количество оборотных материалов производства АО «Кольская ГМК» поступает в печи кипящего слоя снижения доли незавершенного производства. Значительная часть оборотов представлена продуктами гидрометаллургического передела, которые представлены остатками хлорного выщелачивания никелевого металлизированного порошка, зачистками фильтр-пресса, который также потенциально богат диоксидом кремния и другими шлакообразующими компонентами. Недостатком таких продуктов является широкая вариативность химического состава ввиду целого ряда причин, однако состав фаз таких продуктов практически неизменен, меняется только соотношения фаз.

По данным 2020 года доля оборотных продуктов гидрометаллургического производства ЦЭН-2 от общего количества оборотов варьируется в достаточно широком диапазоне 23-50% отн. при средних годовых показателях в 33% отн. Наибольший объем по данным 2020 года представлен зачистками фильтр-прессов. Зачистки фильтр-пресса, как и остальные оборотные материалы гидрометаллургического производства крайне неоднородны по крупности и химическому составу. Крупность частиц варьируется в диапазоне от 0,1 мкм до 0,5 мм Часть продукта представлена многофазными конгломератами, в качестве связующего в котором выступает тонкодисперсная масса переменного состава. В основе конгломератов встречаются оксиды кремния и алюминия, а также хлориды и сульфаты металлов. Доля конгломератов в исследуемых пробах составляет порядка 30% отн., результаты представлены на рисунке 4.8.а).

В крупной фракции встречаются частицы металлической меди, оксидов никеля. Отмеченные частицы, характеризуются примесями Fe, Ni, Co и O (рис.4.8.а), субмикронными включениями металлической фазы на основе железа и никеля, а также силикатными прожилками. Никель представлен в пробе в оксидной форме. Помимо оксидов никеля встречаются и нерастворенные на гидрометаллургическом переделе губчатые частицы металлического Ni

(рис.4.8.б) с примесями Fe, Cu и Co на уровне 10% масс. суммарно. Определенные многофазные структуры, содержащие оксиды пустой породы таких элементов как Si и Al представлены пробе в широком диапазоне составов и строения. Данные частицы условно можно разделить на несколько типов или подтипов:

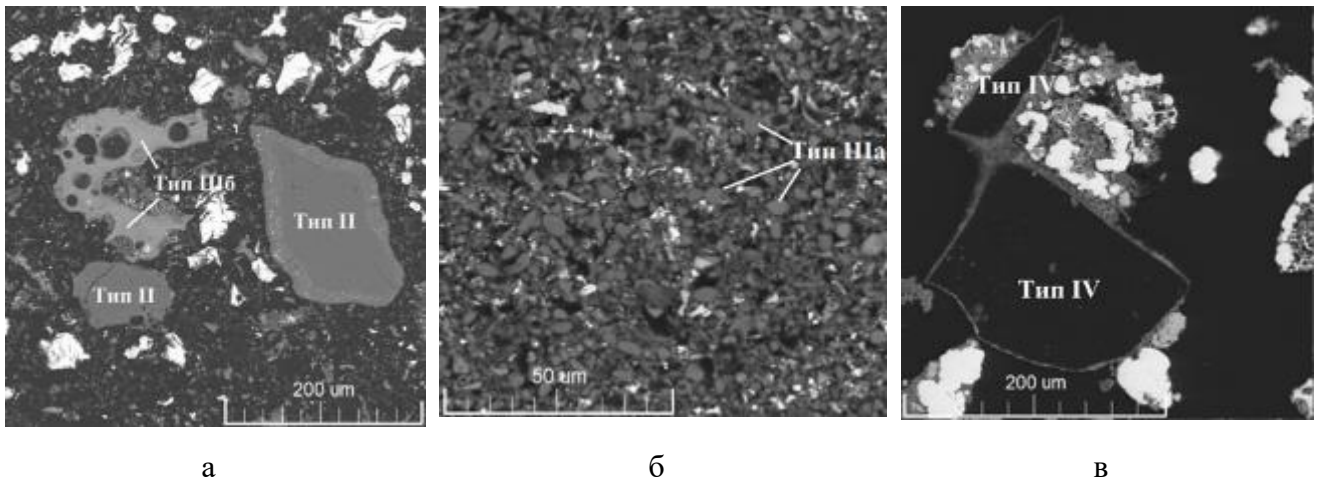
“**Тип II**” представляет собой частицы зольной составляющей углей. Данные частицы являются наиболее распространенным формой, который содержат диоксид кремния и оксиды алюминия. В “*туне II*” плавление отдельных компонентов не наблюдается, как взаимодействие с цветными металлами. По морфологии отмеченные частицы представляют из себя производные угля, подаваемого в трубчатую печь в качестве восстановительного агента. В отдельных и единичных случаях, по поверхности наиболее крупных частиц возможно формирование тонкой пленки взаимодействия оксидов металлов с силикатной составляющей “*тун II*”. Характерной чертой остатков угольной составляющей является наличие групп следующих минералов: кварц, группы калиево-натриевых полевых шпатов (КШП), плагиоклазов, каолинов, шпинелей вариантного состава.

“**Тип IIIa**” в отличие от “*тун II*” представлен плавлеными структурами достаточно однородного шлака, богатого оксидами цветных металлов. Основная фракция представлена частицами крупностью менее 10 мкм. Крупные частицы размером до 3-5 мм, которые встречаются в пробе, представляют собой конгломераты, состоящие из тонкодисперсных частиц. По составу отмеченный “*тун IIIa*” представляет собой капли шлака, которые в том числе содержат примеси фосфора, бария и титана, что характеризует их как плавленую зольную составляющую восстановителя, который подают в трубчатые печи.

“**Тип IIIб**” также представлен плавлеными структурами, которые можно отнести к шлаку. Помимо более высокой концентрации оксидов цветных металлов в сравнении с “*тун IIIa*” на отдельных участках были определены микровключения драгоценных металлов, которые содержатся в виде металлических включений в металлических фазах пробы.

“**Тип IV**” представляет собой непрореагировавший в трубчатой печи восстановитель, который прошел через магнитную сепарацию вместе с магнитной фракцией и поступил на переработку в гидрометаллургическое производство.

На рисунке 4.8. представлены рассматриваемые типы частиц, богатых диоксидами кремния и оксидами алюминия.



Тип II - осколочные частицы золы углей (а); Тип IIIа - мелкие плавленные частицы (б); Тип IIIб – крупные плавленные частицы (а); Тип IV – частицы угля (в)

Рисунок 4.8 – Общий вид и строение продуктов гидрометаллургического передела

Огарок КС

Огарок печей КС является продуктом обжига сульфидного никелевого концентрата. В результате окислительного обжига сульфиды металлов окисляются до оксидов металлов, сера удаляется с отходящими газами. Оксид никеля с достаточно развитой поверхностью является основной фазой, представленной в огарке. Вместе с тем, в пробе огарков печей были определены остаточные сульфиды никеля и меди, металлическая фаза и силикатные продукты. В пробе огарка встречаются следующие типы силикатной составляющей:

“Тип IIIб” – близок по составу и морфологии к структурам, который были описаны ранее оборотных материалах, но в сростках с основной фазой огарка печей КС. “Тип IIIб” представляет гетерогенные многокомпонентные структуры шлака с признаками перекристаллизации, результаты показаны на рисунке 4.9 Данный тип силикатных структур концентрируются в наиболее крупных из рассматриваемых классах крупности +2,5 мм и -1,2+2,5 мм.

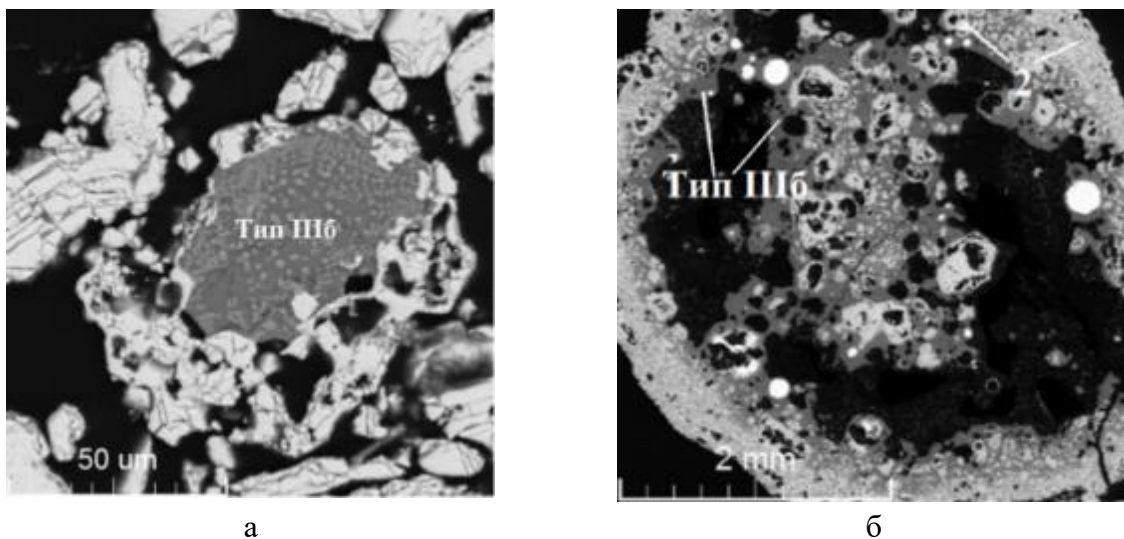


Рисунок 4.9 – Многофазные силикатные составляющие огарков Тип IIIб (а,б)

“Тип IIIa” – так же, как и в продуктах гидрометаллургического передела, рассмотренных выше, является самым распространенным типом, который богат диоксидом кремния. Топография поверхности с частицами “*мина IIIa*” представлена на рисунке 4.10. В отличие от проб оборотных материалов, представленные микро капли шлака достаточно гомогенны и распределены между гранулами оксидов никеля. Средняя крупность также не превышает 10-20 мкм. По результатам анализа “*мина IIIa*” определены примеси фосфора, мышьяка, бария, что свидетельствует об угольной природе этих частиц, который в последствии подверглись превращению в результате влияния высоких температур.

В огарках печей КС отсутствуют “*мина II*” и “*мина IV*”, которые соответствуют реликтовым частям угля или непрореагировавшему углю. Таким образом, можно предположить, что в процессе высокотемпературного взаимодействия, отмеченные ранее структуры “*мина II*” и “*мина IV*” переходят в “тип III” и растворяются в основной фазе огарка печей КС.

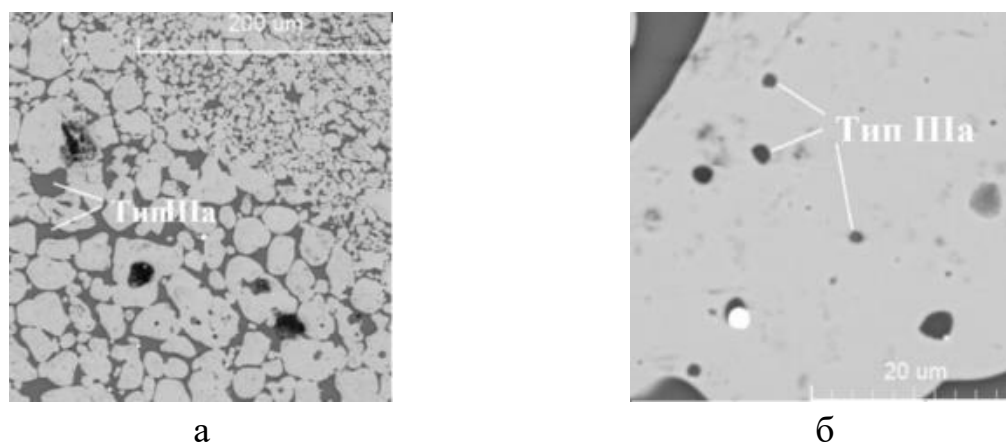


Рисунок 4.10 – Многофазные силикатные составляющие огарков Тип IIIa (а,б)

а – силикатные включения между гранулами оксида никеля, б – микронные силикатные включения сферической формы

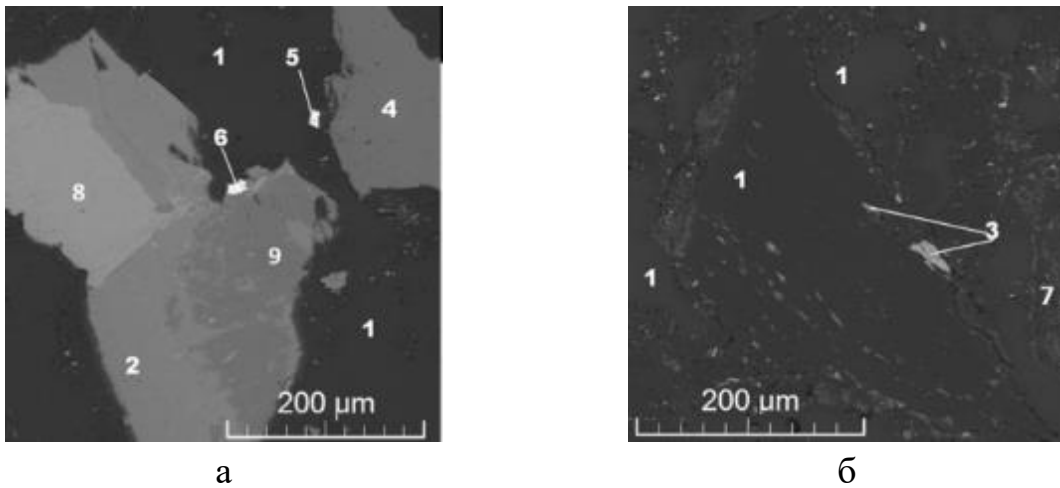
Восстановитель

Изображение микроструктуры восстановителя представлено на рисунке 4.11. Проба состоит из частиц крупностью до 500 мкм. Согласно представленным изображениям углерод представлен отдельными сегментами, которые связываются между собой многофазной силикатной массой. В пробе восстановителя определены следующие включения:

Углерод содержит в качестве включений:

- Нерудные минералы крупностью до 10 мкм характерного состава, присутствующих в природных восстановителях. К нерудным минералам относятся: кварц, каолинит, калиевые полевые шпаты, карбонат кальция-магния, магнетит, хлорит, серпентин, тальк, плагиоклаз, апатит, гидроксиды железа, кальцит.

- тонкодисперсные структуры сульфидов железа, никеля и меди в виде минералов пентландита, пирротина, халькопирита. Крупность отмеченных частиц не превышает 20 мкм.

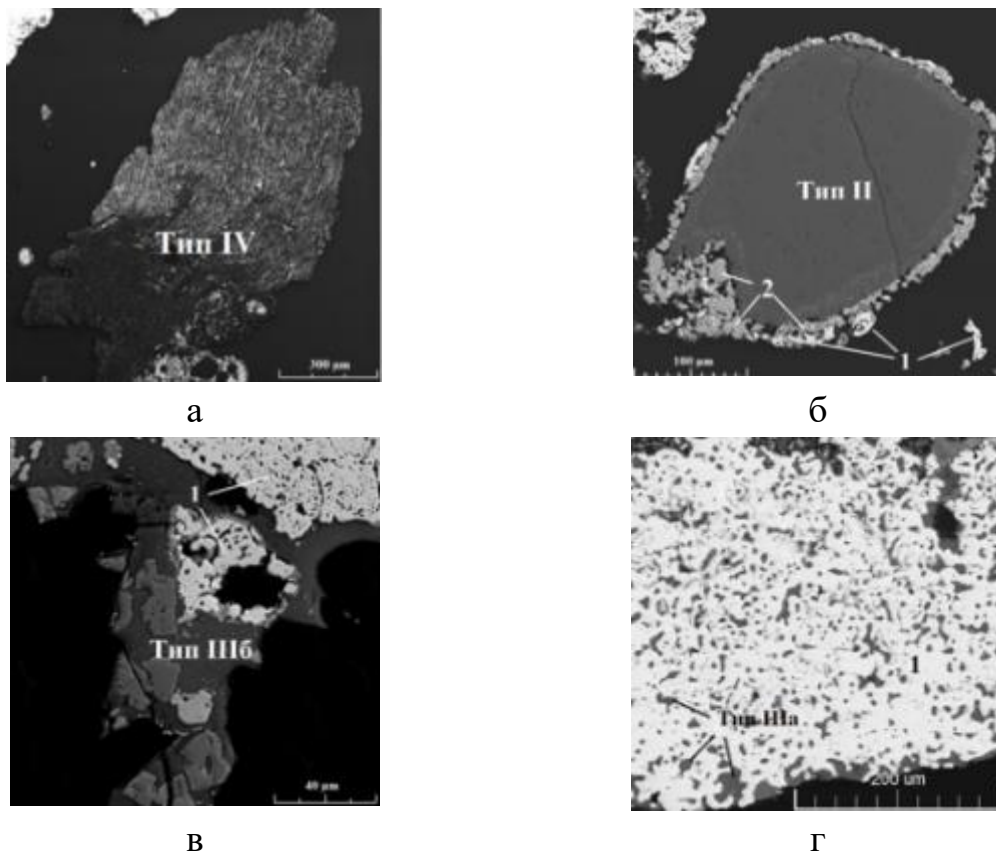


а
 б
 1 – уголь (а,б); 2 – КПШ (а); 3 – карбонаты (б) ; 4 – кварц (а); 5 – пентландит (а); 6 – пирротин (а); 7 – дисперсная смесь минералов (б); 8 – хлорит (а); 9 – каолинит (а)

Рисунок 4.11 – Морфология минералов в пробе угля

Восстановленный порошок трубчатых печей

Изображение микроструктуры металлизированного порошка трубчатых печей представлено на рисунке 4.12.



а
 б
 в
 г
 1 – металлическая фаза, 2 – силикат на основе никеля

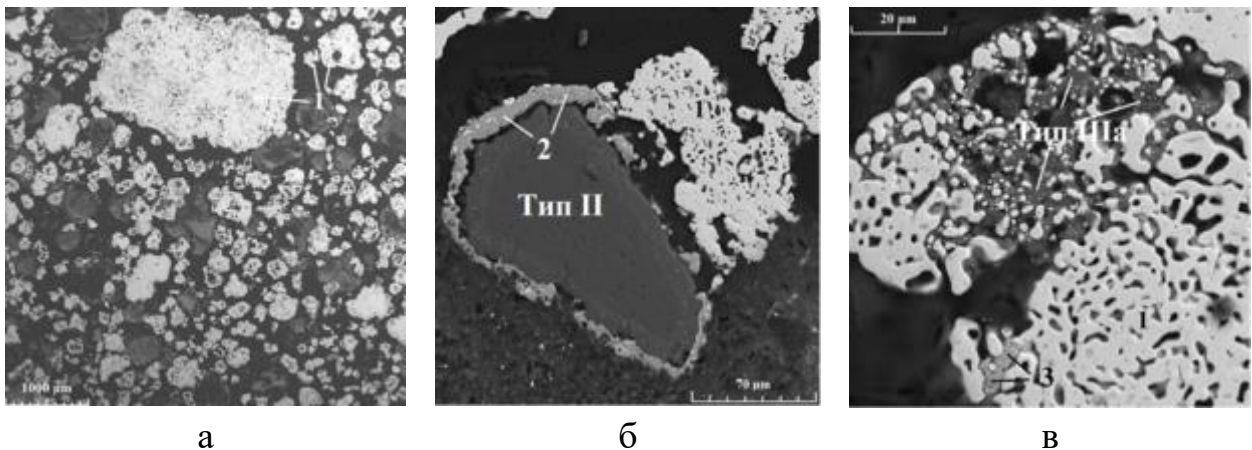
Рисунок 4.12 – Строение восстановленной окиси никеля

а - изображение частицы Тип IV; б - изображение частицы Тип II; в - изображение частицы Тип IIIа; г - изображение частицы Тип IIIб

Исследуемый материал представляет собой смесь отдельных продуктов, в основе которой металлическая фаза никеля с примесями меди, кобальта и железа, а также остатки зольной составляющей углей и непрореагировавшего восстановителя. Доля металлической фазы более 95% отн. Силикатные компоненты, представленные в исследуемой пробе и показанные на рисунке 4.12 не превышают 1-3% об. В продуктах трубчатых печей встречаются все ранее описанные типы силикатной составляющей за исключением *“mina I”*. Морфология и концентрация отмеченных типов силикатов аналогична отмеченным ранее в оборотных продуктах гидрометаллургического производства.

Магнитная фракция НППП

Металлизированный никелевый порошок подвергается магнитной сепарации, где производится разделение на два класса различающихся магнитной восприимчивостью. Общий вид и строение магнитной фракции представлено на рисунке 4.13. Крупность частиц магнитной фракции варьируется от 10 мкм до 2,5 мм. Доля примесей, состоящая из оксидов металлов, силикатных составляющих восстановителя и частиц угля, не превышает 2% объемных. Силикатные составляющие представлены всеми ранее описанными типами за исключением *“mina I”*, который встречается только в исходном концентрате от разделения файнштейна. По полученным данным можно сказать, что на этапе магнитной сепарации из магнитной фракции удаляются преимущественно *“min II”* и *“min IV”* и частично *“min IIIб”*. В то время как удаление *“min IIIа”* практически невозможно ввиду плотной ассоциации с металлической фазой.



1 – металлическая фаза, 2 – силикат никеля, 3 – остаточные оксиды

Рисунок 4.13 – Общий вид и строение пробы магнитной фракции.

а – общий вид пробы; б - изображение частицы Тип II; в - изображение частицы Тип IIIа

Результаты исследования промпродуктов поступающих в переработку на пирометаллургической участок, а также получаемые продукты передела показывают, что возвращающиеся в печи кипящего слоя частицы *“min II”* и *“min IV”* под воздействием высоких

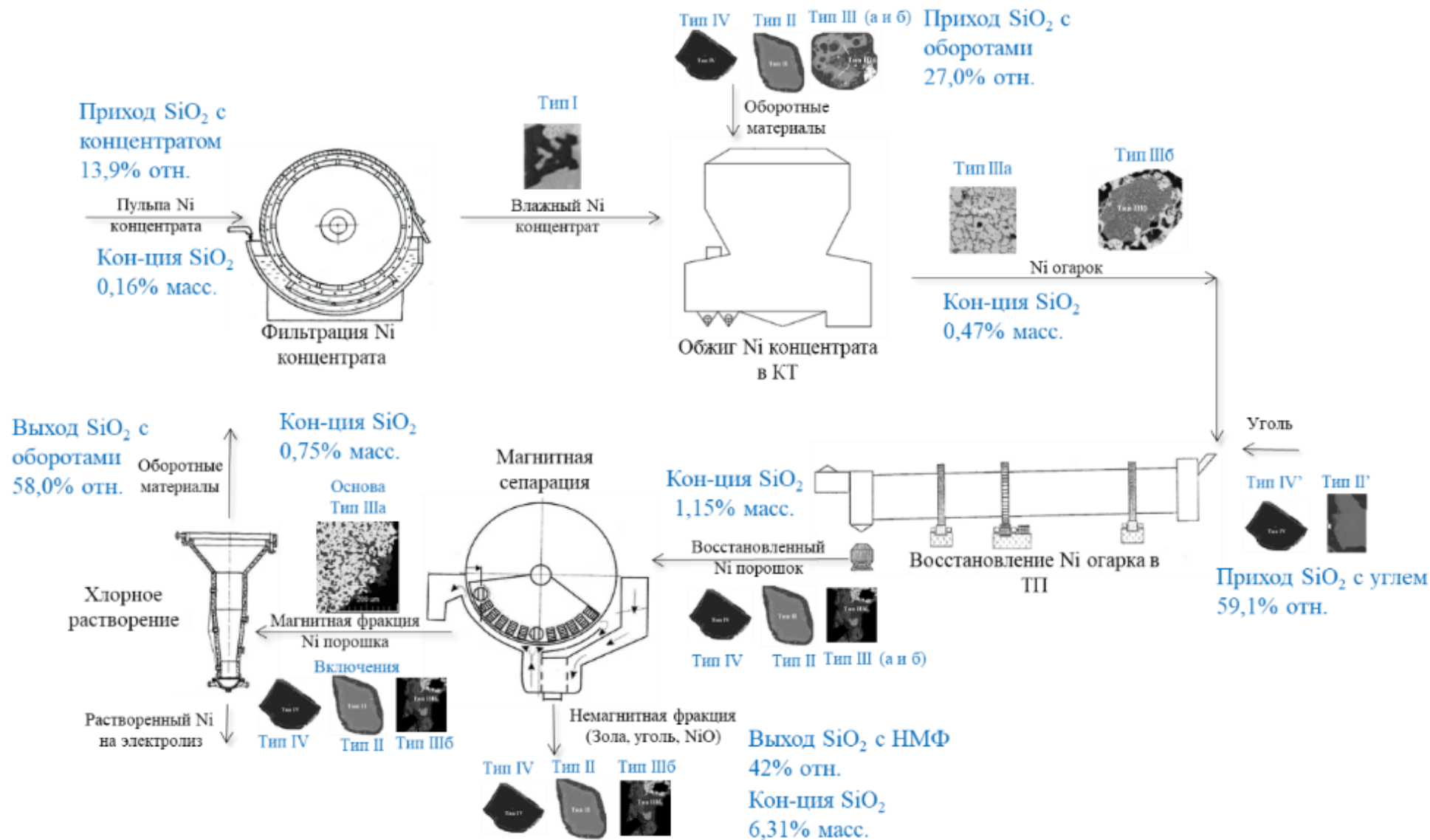


Рисунок 4.14 – Схема движения силикатных частиц при переработке никелевого концентрата.

температур, активно взаимодействуют с оксидами цветных металлов при их переходе от сульфида к оксиду, формируя при этом мелкодисперсную массу силикатных составляющих “*muna IIIa*” или “*muna IIIб*”, которые представлены крупными плавленными силикатными включениями вблизи оксидов никеля. По результатам проведенных исследований составлена технологическая карта движения различных типов зольной составляющей, а также произведена оценка остаточного содержания диоксида кремния и распределения его по продуктам по схеме рафинировочного производства АО «Кольская ГМК». Результаты представлены на рисунке 4.14. [110]

Результаты исследований, представленные на рисунке 4.14 показывают недостаточную эффективность работы магнитной сепарации. Остаточная концентрации диоксидов кремни в магнитной фракции может достигать 0,75% масс. Основу силикатных включений в магнитной фракции составляет “*muna IIIa*”, однако встречаются и остальные типы содержащие силикаты и описанные ранее. Последующая переработка магнитной фракции приводит к концентрированию шлакообразующих компонентов в каналах вывода гидрометаллургического производства таких как остатки хлорного выщелачивания, зачистки пресс-фильтров и другие промпродукты цеха электролиза никеля. Значительная часть оборотов возвращается в печи кипящего слоя, что приводит к превращению частиц “*muna II*” и “*muna IV*” под воздействием температуры в их производные “*muna III*”, который попав вновь на передел магнитной сепарации уже не может быть отделен от металлизированного продукта под воздействием температуры.

Рассмотрим изменение состава магнитной фракции никелевого порошка и выход оборотного продукта гидрометаллургического передела при полном возврате продуктов гидрометаллургии и немагнитной фракции (НМФ) трубчатых печей в голову процесса. Обороты гидрометаллургического производства отправляются в печи КС, немагнитная фракция направляется в трубчатые печи частично или полностью заменяя твердый восстановитель. Результаты расчетов роста доли кремния и выхода оборотных материалов представлены на рисунке 4.15.

Как видно из графика рисунка 4.15, содержание SiO_2 и выход оборотов стабилизируются примерно на 40-ой итерации. Отклонение в значениях между 40-й и 50-й итерацией не превышают 0,7% отн. Содержание SiO_2 в магнитной фракции стабилизируется, достигая содержания 4,5% масс., в тоже время количество оборотных продуктов возрастает до 8,6% от количества никелевого порошка магнитной фракции.

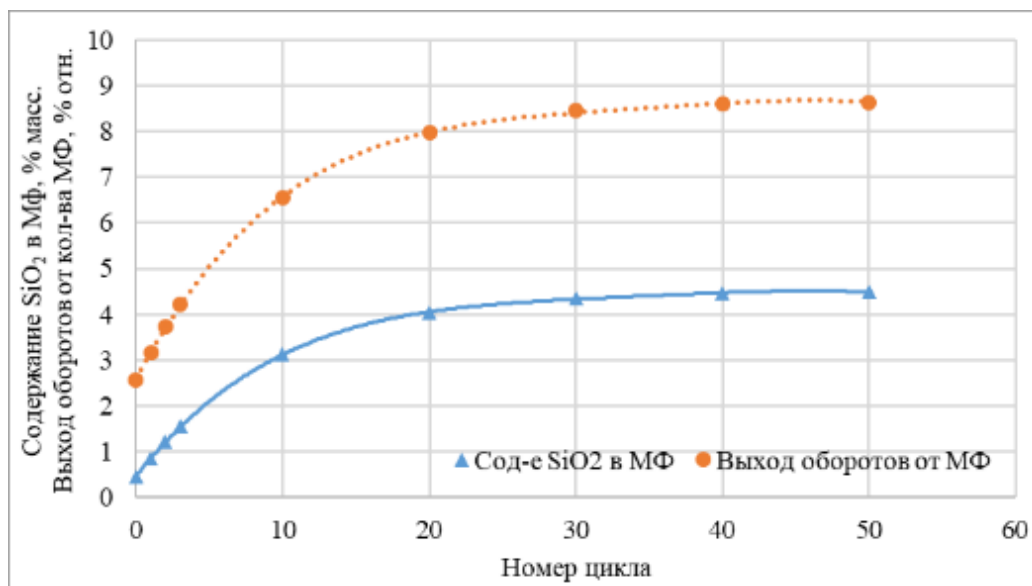


Рисунок 4.15 – Зависимость содержания SiO₂ в магнитной фракции (МФ) и выхода оборотов гидрометаллургических переделов (в % отн. от количества магнитной фракции (МФ) никелевого порошка) в зависимости от итерации

Рассмотрим оборотные материалы, которые поступают в пирометаллургическую технологию на переработку. Содержание основных компонентов, рассматриваемых продуктов представлено в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Содержание основных компонентов в оборотных материалах, поступающих в пирометаллургическую технологию

№	Наименование	% масс.					
		Cu	Ni	Co	Fe	C	SiO ₂
1	Осыпь никеля	13,15	77,18	1,87	4,50	0,09	0,58
2	Зачистки фильтров	51,10	21,37	0,59	1,51	4,54	5,68
3	ОХВ	1-1,3	36-52	2-2,4	н/а	4-13	10-20
4	Огарок обжига синтеза	30	30	10	н/а	н/а	-
5	Обороты РЦ (пыль)	3,2	66,7	1,6	2,8	-	1,8
6	Немагнитная фракция	0,2-1,3	2-18	0,1-0,4	0,3-2	70-80	6-12

В представленной таблице наиболее богатыми продуктами, содержащими SiO₂ являются немагнитная фракция и продукты гидрометаллургического производства, содержание в которых SiO₂ может превышать 10 % масс.

Таким образом, для выполнения регламентных показателей по содержанию диоксида кремния в металлическом порошке трубчатых печей, необходимо исключить из переработки немагнитную фракцию трубчатых печей, используемую повторно в качестве восстановителя. Также необходимо исключить и значительную часть оборотных материалов

гидрометаллургических переделов, особенно оборотов с высоким содержанием SiO₂, богатых зольной и углеродной составляющей углей, которые подают в печи КС и трубчатые печи. Кроме того, требуется анализ работы участка магнитной сепарации, проведение исследований по совершенствованию участка и как следствие разработке и реализации новой технологической схемы переработки восстановленного порошка трубчатых печей методами магнитной сепарации.

В Главе 5 будут рассмотрены результаты исследований участка магнитной сепарации. Ниже представлены результаты промышленных испытаний, которые позволяют снизить долю углеродной составляющей и шлакообразующих компонентов в восстановленном металлическом порошке трубчатых печей.

4.2.3 Обжиг концентрата в печах КС

Содержание основных компонентов в сульфидном кеке

В период промышленных испытаний производилась оценка влажности и содержания основных компонентов в никелевом кеке, который представляет из себя смесь никелевого концентрата и оборотной пыли печи КС. Влажность и содержание серы в поступающем на обжиг кеке, представляющем собой шихту из никелевого концентрата и оборотной пыли печей КС, изменялись в достаточно широких пределах, что проиллюстрировано на графиках рисунке 4.16. Часть анализов отбиралась регулярно технологическим персоналом завода по технологическим картам в течении трех смен, а часть проб отбиралась дополнительно в период с 8.00 до 16.00 с периодичностью раз в два часа.

Содержание серы варьируется от 14 до 21,5 % масс., при средних показателях 18,7 % масс., наиболее стабильный участок по содержанию S в шихте отмечается в период ОПИ 19-21 июля. Влажность шихты, состоящей из никелевого концентрата и оборотной пыли, в период ОПИ ведет себя более стабильно и варьируется в диапазоне от 6,5 до 11,8 % масс., при средних показателях 8,6 % масс. Диапазон составов основных анализируемых элементов в шихте, представлен в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Вариативность содержания основных компонентов в пробе сульфидной шихты

Наименование	Массовая доля, %										
	Ni	Cu	Co	Fe	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Pb	P
Минимум	61,8	3,74	1,32	2,67	13,7	0,245	0,073	0,037	0,018	0,036	0,023
Максимум	67,9	7,66	1,48	3,21	20	0,574	0,299	0,061	0,032	0,067	0,042
Ср. знач.	64,70	5,22	1,38	2,95	17,90	0,39	0,15	0,05	0,02	0,046	0,031

Полный список проанализированных проб представлен в *приложении Б*. Рассмотрите работу печей КС при переработке шихты, состоящей из никелевого концентрата и оборотной пыли.

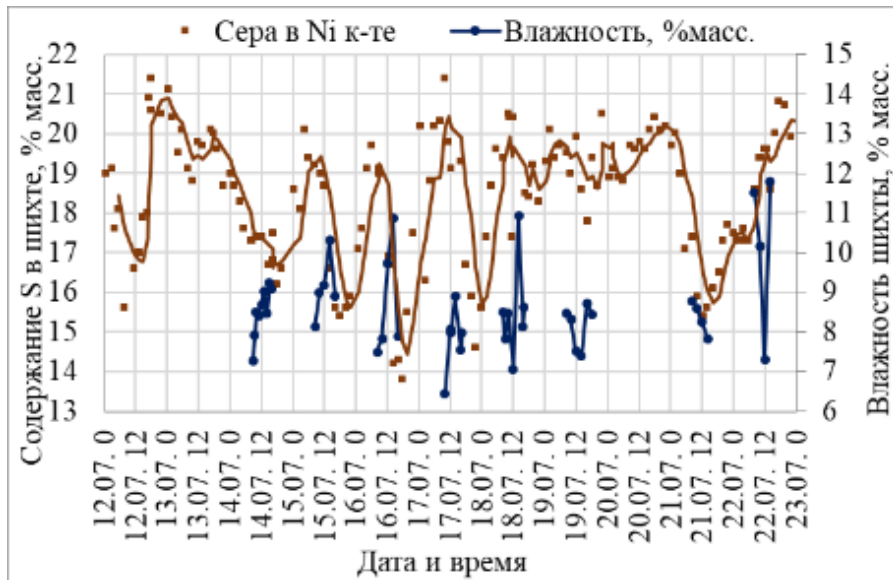


Рисунок 4.16 – Содержание серы и влажности в исходном питании КС-2 в период опытно-промышленных испытаний (ОПИ)

Температура в печах КС

Особый интерес представляет связь температуры и содержание серы в поступающем материале, в предыдущей главе были проведены термодинамические расчеты, которые рекомендовали поддерживать содержание серы в сульфидном кеке на уровне не менее 17% масс. На рисунке 4.17 представлена зависимость температуры от содержания серы в шихте, поступающей в печи КС.

Результаты, представленные на графике рисунка 4.17 показывают, что температура в печи снижается при содержании серы в шихте менее 16,5-17,0% масс., что в целом подтверждает ранее проведенные термодинамические расчеты о выбранной нижней границе содержания серы в шихте не ниже 17% масс. Проведем гранулометрический анализ, образующихся огарков печей КС, которые направляются в трубчатые вращающиеся печи.

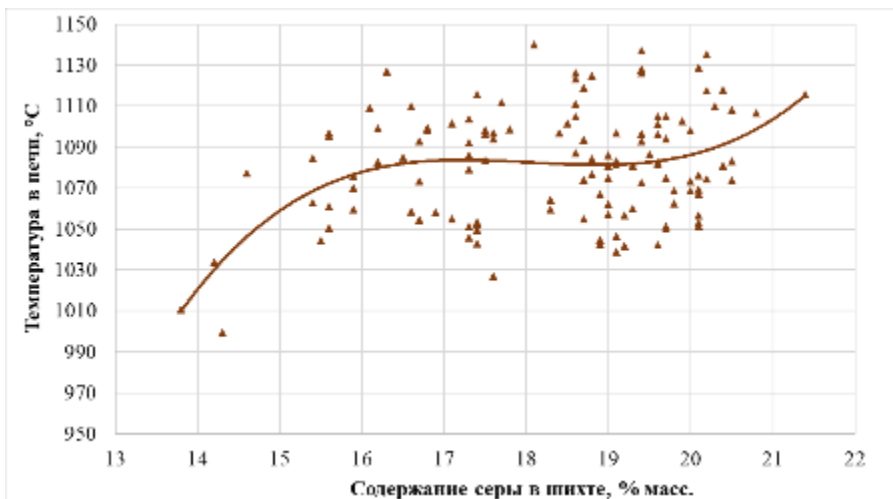


Рисунок 4.17 – Зависимость температуры от содержания серы в шихте

Гранулометрический состав огарка печей КС

Анализ данных по классификации огарков печей кипящего слоя на рисунке 4.18-4.20 показывает, несколько явных всплесков по тонкому классу $-0,2$ мм в период промышленных испытаний. При этом обратная связь крупных частиц и тонких классов не наблюдается, что свидетельствует о более сложном механизме протекания процесса в печах КС, чем обратная зависимость выхода мелких и тонких классов. На крупность огарка влияет и расход воздуха, и разрежение, и температура, и содержание серы в поступающем сырье. На рисунке 4.18-4.19 представлена связь содержания серы в концентрате от доли фракции $-0,2$ мм в огарке. На рисунке 4.20 представлено поведение классов $-0,2$ мм и $+1,2$ мм в рассматриваемый период. [111]

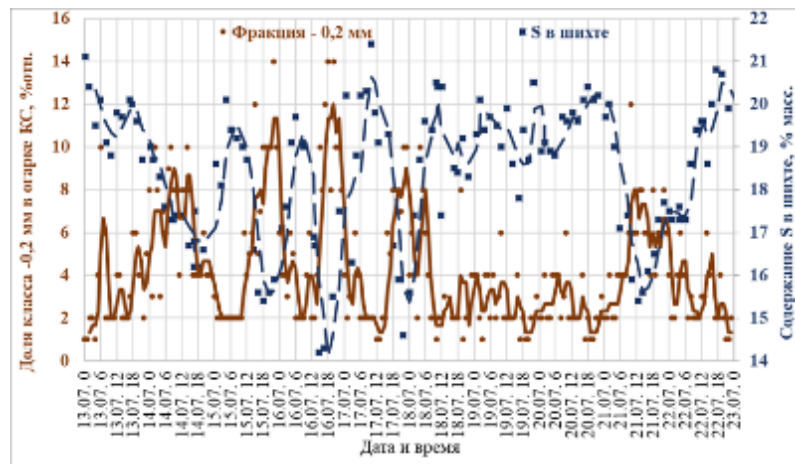


Рисунок 4.18 - Доля тонкого класса ($-0,2$ мм) в печи КС, и содержание серы в сульфидном концентрате, поступающем на окисление в печи КС

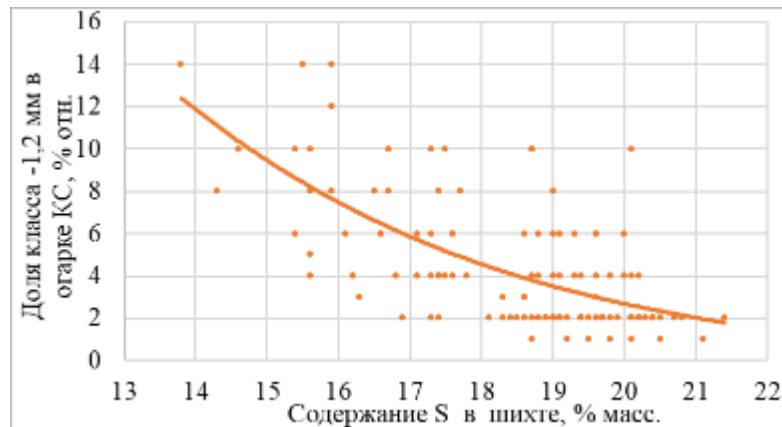


Рисунок 4.19 – Зависимость доли класса $-1,2$ мм от содержания серы в шихте

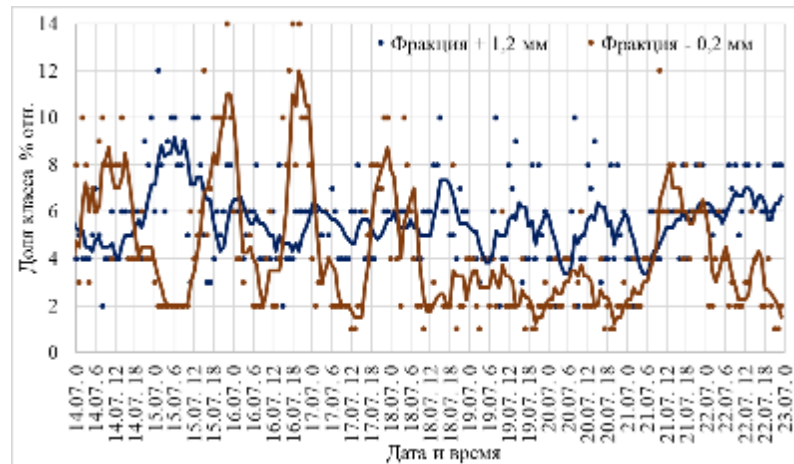


Рисунок 4.20 – Доля класса +1,2 мм и -0,2 мм в период испытаний

Максимальный выход класса -0,2 мм, отмеченный в период промышленных испытаний, достигал значения 14% отн., при этом средним показателем в период стабильной работы является значение порядка 2-4% отн. Рост мелкого класса в огарке КС обусловлен значительным количеством подаваемой пыли в поступающем на окисление сырье. Одной из причин роста мелких классов в огарке может быть и значительное изменение состава сырья в ограниченном периоде времени, и как следствие невозможность оперативно изменить реагировать на изменения, корректируя параметры работы печей кипящего слоя.

Гранулометрический состав огарка, значительной степени влияет и на спёкообразования в ТВП, куда поступает горячий огарок КС. Рост мелкого класса в огарке КС обусловлен значительным количеством подаваемой пыли в поступающем на окисление сырье, что и продемонстрировано на рисунках 4.18-4.20.

4.2.4 Результаты промышленных испытаний ТВП

Механизм восстановления

Прежде чем рассмотреть параметры влияющие на глубину восстановления и чистоту получаемого продукта трубчатых печей, рассмотрим механизм восстановления. Изучение микроструктур (см. рисунок 4.12) восстановленного порошка позволяет предложить следующий механизм восстановления: процесс начинается как на поверхности частиц в отдельных блоках закиси, так и в объеме материала. Однако внутри значительного количества частиц закиси никеля процесс ограничивается появлением мелких выделений металла в форме капель и тонких пластинок по границам кристаллитов оксида.

Прекращение процесса, на наш взгляд, обусловлено образованием на поверхности этих частиц сплошного металлического слоя, затрудняющего поступление газообразного восстановителя в объем материала. В остальных случаях процесс восстановления протекает достаточно полно.

Время пребывания в печи

На основе данных, представленных в литературе [44], возможно произвести оценку работы пирометаллургического агрегата и выполнить расчет времени пребывания материала в печи от параметров работы агрегата. Результаты расчетов времени пребывания, производительности и скорости движения материала, представлены на рисунке 4.21.

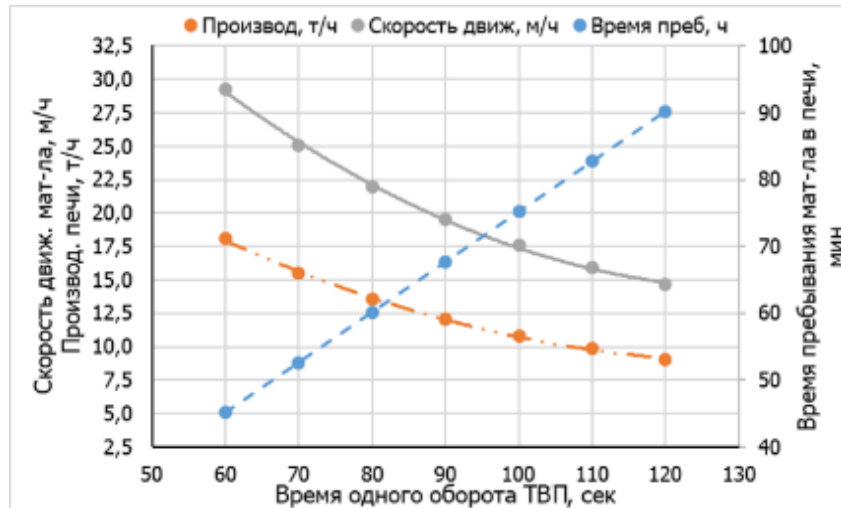


Рисунок 4.21 – Зависимость производительности печи по продукту, скорости движения материала и времени пребывания вещества от времени одного оборота

Зафиксированные в период технологического аудита и промышленных испытаний данные работы трубчатой печи и проведенные расчеты показывают, что время пребывания материала в печи составляет 68-70 минут, при прохождении одного оборота трубчатой печи за 90 сек. Такого времени пребывания материала в печи оказывается достаточно для поддержания степени металлизации на высоком уровне. В условиях лабораторного эксперимента достаточное время обжига составляет не менее 60 минут. Таким образом, можно предположить, что увеличение скорости вращения барабана трубчатой печи до 75-80 сек за один оборот с одной стороны повысит производительность агрегата, а другой не приведет к снижению показателей степени металлизации.

Расход восстановителя

Подача восстановителя в ТПР осуществляется через тарельчатый питатель и расположенный над ним бункер с материалом. Показатели расхода восстановителя и показателей степени металлизации никелевого порошка в период опытно-промышленных испытаний представлены на рисунке 4.22



Рисунок 4.22 – Расход восстановительного агента и степень металлизации порошка в рассматриваемый период

Результаты, представленные на графиках рисунка 4.22 показывают, что при средней производительности подачи угля в печь на уровне 2 т/ч, расход варьировался в довольно широком диапазоне от 1,4 до 2,9 т/ч, что составляет порядка 12-25% отн. от массы металлизированного никелевого порошка трубчатых печей. В рамках ОПИ проводилась работа по снижению расхода восстановителя с целью снижения выхода немагнитной фракции при сохранении показателей степени металлизации конечного продукта. Вместе с тем на представленном графике стоит отметить, что снижение количества подаваемого угля не связано со снижением показателей восстановимости никелевого огарка печей кипящего слоя. На процесс восстановления могут влиять следующие факторы: - снижение температуры в печи; - снижение доли СО в отходящих газах (подача воздуха, подсосы); - высокая температура выгружаемого металлического порошка, которая приводит к процессам вторичного окисления.

В работе промышленного агрегата достаточность количества подаваемого восстановителя определяют по содержанию СО в отходящих газа. Анализ СО производится в непрерывном режиме при помощи датчика контроля угарного газа, расположенного в конце трубчатой печи. Дополнительным, но менее оперативным параметром, может служить количество оставшегося углерода на выгрузке трубчатой печи. Результаты расхода восстановителя и остаточного содержания угарного газа в отходящих газах трубчатой вращающейся печи, представлены на рисунках 4.23 и 4.24. В период ОПИ производительность трубчатой печи по металлизированному никелевому порошку составляла 11,5-13,5 т/ч.

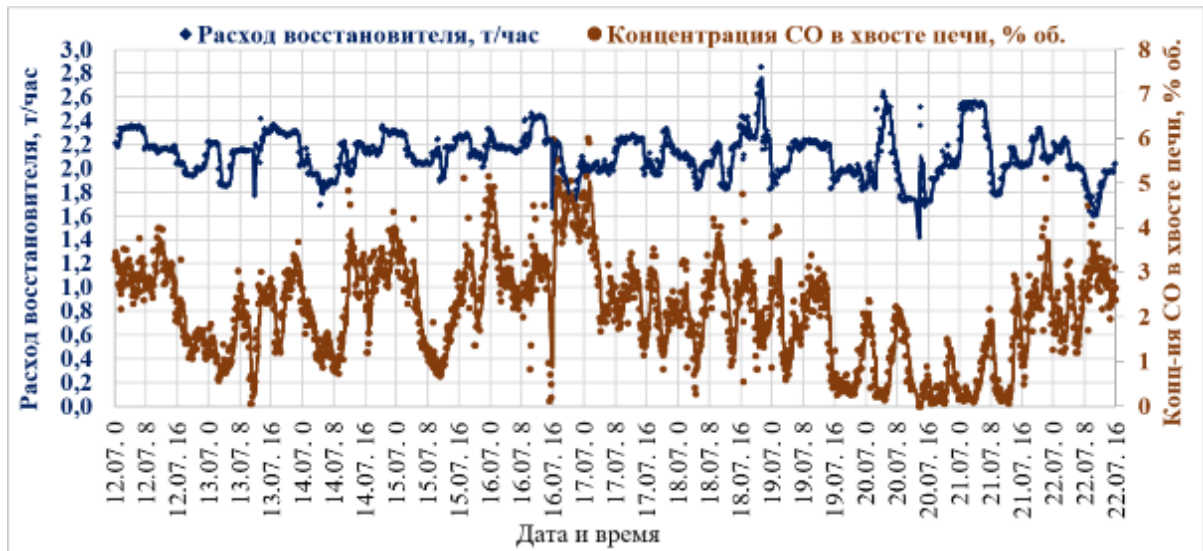


Рисунок 4.23 – Расход восстановительного агента и остаточная концентрация СО в отходящих газах трубчатой печи

В период работы пирометаллургического участка в дневные смены с 19-21 июля в концентрации СО в отходящих газах не превышала 0,1-1 % об., в тоже время степень металлизации сохранялась выше 98% отн. Таким образом, остаточное содержание СО не превышающее 0,1-1% отн. достаточно для ведения процесса. Рассматриваемый период работы, представленные на рисунке 4.23 свидетельствует по результатам состава отходящих газов о перерасходе восстановительного агента

Произведем оценку количества вводимого восстановительного агента в ТВП в период ОПИ. Паспорт используемого угля, проведённый анализ восстановителя, систем АСУ и собственных инструментальных замеров позволяет оперировать следующими данными:

Восстановитель

- Содержание летучих -23,4 % об. (более 90% представлено формой С и Н);
- Содержание углерода – 62,6% масс.;
- Влажность – 10% масс.

ТВП

- Производительность по ВЗН – 10 т/час;
- Расход воздуха 1,25-2,84 тыс. нм³/час;
- Производительность по углю для проведенных ОПИ может быть рассчитана по линейной формуле $0,03109 \cdot (\text{Напряжение тарелки кокса}) - 0,90069$.
- Отходящие газы 90% об. СО₂, 10% об. СО.

Произведённые расчеты избытка восстановительного агента в период ОПИ, на основе предложенных исходных данных, представлены на рисунке 4.24.

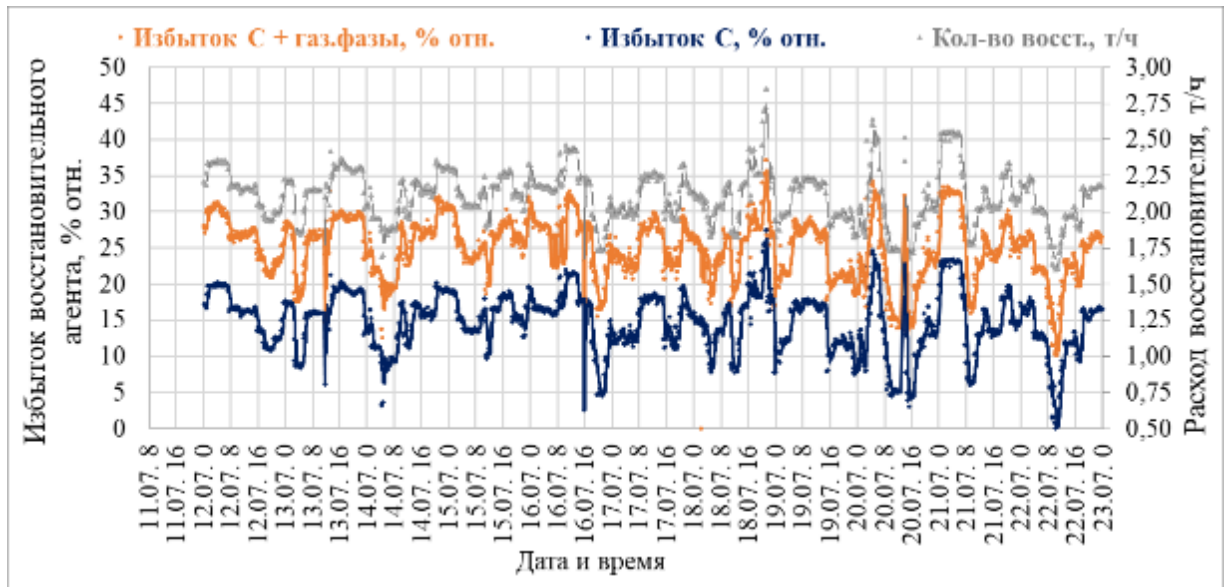


Рисунок 4.24 – Расчетный избыток восстановителя в период промышленных испытаний

Представленные результаты показывают, что при учете летучих составляющих, как элемента, участвующего в процессах восстановления, избыток восстановительного агента в среднем не опускался ниже 20-30 % отн. от общего вводимого в печь угля. Снижение избытка восстановительного агента в продукте трубчатых печей на 10 % отн. с одной стороны не приведет к снижению металлизации, а с другой позволит снизить расход восстановительного агента и выход немагнитной фракции. Рекомендуемое снижение восстановительного агента по произведенным расчётам составляет 1,75-1,8 (1,78) т/час, т.е. в среднем на 0,35 т/час или на 3103 т/год.

Произведем оценку количества немагнитной фракции в продукте трубчатой печи в рассматриваемый период времени.

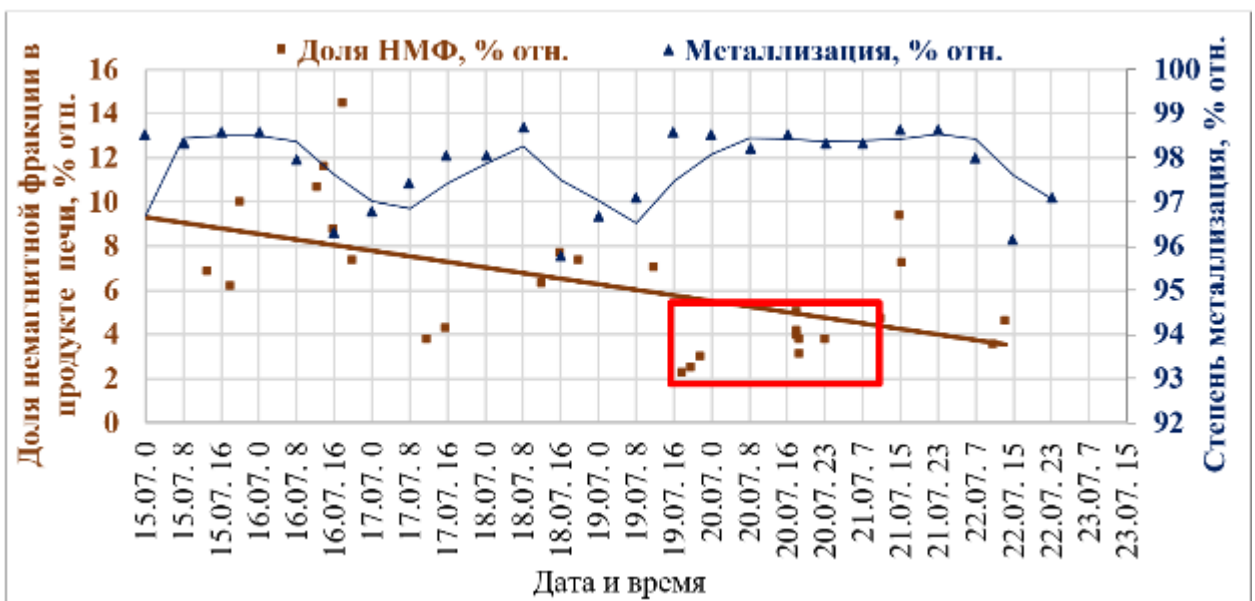


Рисунок 4.25 – Остаточное содержание немагнитной фракции в продукте трубчатой печи и показатели металлизации металлического порошка

Результаты, представленные на графиках рисунков 4.25-4.26 показывают, что снижение расхода восстановителя в период с 19 по 21 июля привело к значительному снижению выхода НМФ, которое составило 2-4% отн от массы получаемого продукта, при сохранении показателей металлизации выше 98% масс.



Рисунок 4.26 – Концентрация СО в отходящих газах и температура в хвосте трубчатой печи

На рисунке 4.26 представлены результаты изменения температуры в трубчатой печи в рассматриваемый период. Температура в печах ТПВ определяется при помощи термопары, расположенной в зоне выгрузки материала из печи в водоохлаждаемую бутару. Температура в печи составляла 810-840°С, что в среднем на 300°С ниже, чем температура в горячей зоне трубчатой печи. Фактическая температура процесса в ТПР оценивается в районе 1110-1140°С. По результатам испытаний по снижению количества восстановителя в печи показано, что контроль СО в отходящих газах на уровне 0,1-1% об. позволяет снизить выход НМФ с 8,1 % отн. до 3,6 % отн., т.е. в 2,25 раза. [108]

4.2.5 Спёкообразование

В зависимости от параметров ведения процесса восстановления закиси никеля в трубчатой печи образуется от 3 до 10% масс. частиц, крупность которых не позволяет им пройти через отверстия грохота (бутары). Такие частицы восстановленной закиси принято называть спёками. Размеры спёков может достигать 300-500 мм, изображение спёка представлено на рисунке 4.27. Разгрузка спёков осуществляется через торец трубчатой печи в специально предназначенный для этого кубель. Далее спёки направляются на электродуговую плавку для выплавки анодов, либо на участок магнитной сепарации.



Рисунок 4.27 – Изображение металлизированных конгломератов трубчатой печи

К слёкам могут быть отнесены и крупные частицы, прошедшие бутару, так как механизм их образования идентичен тому, по которому образуются и крупные слёки. Размер «мелких» слёков составляет около 20–30 мм. Такие частицы находятся как бы в промежуточном состоянии между порошкообразной восстановленной закисью никеля и оплавленными конгломератами частиц, размер которых может достигать до 500 мм и более.

Известно, что важнейшим параметром ведения процесса восстановительного обжига в ТВП с точки зрения образования слёков является температура. При росте температуры выше 1150°C процесс слёкообразования интенсифицируется, и выход слёков может достигать до 25–30% от производительности трубчатой печи по металлсодержащему продукту.

В рассматриваемый период промышленных испытаний, проводимых в июле 2021 года, значительное (более 2 т/ч) образование металлизированных конгломератов (слёков) отмечено на рисунке 4.28. К наиболее благоприятному интервалу следует отнести диапазон с 19.07.21 16:00 по 21.07.21 12:00, где образование слёков не превышало 1 т/ч при производительности агрегата 11,5–13,5 т/ч по металлическому никелевому порошку, т.е. не более 6,9–8,0 % отн.

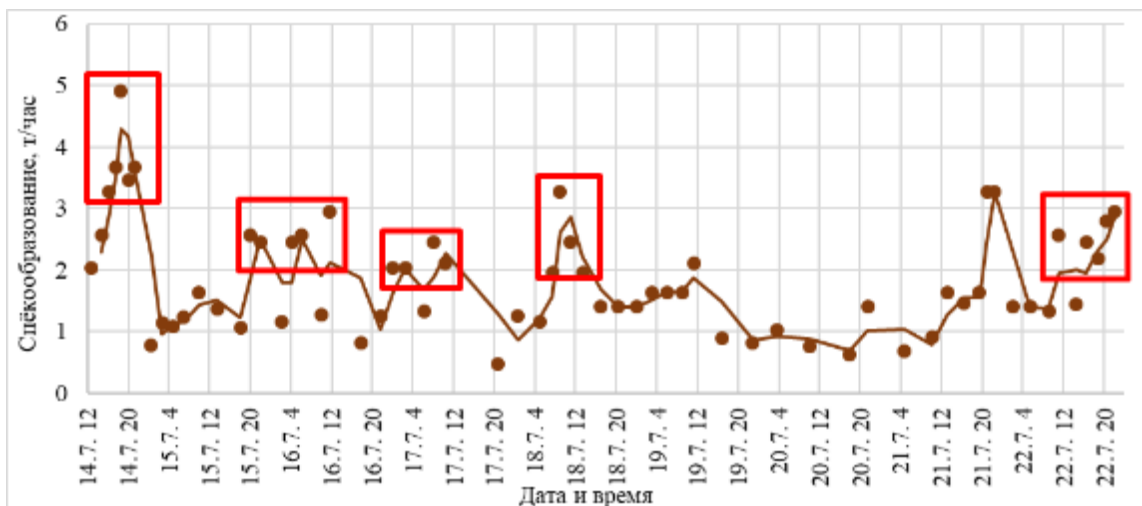


Рисунок 4.28 – Выгрузка спечённой массы из трубчатой печи в рассматриваемый период

На рисунке 4.29 представлены данные слёкообразования и концентрации CO в отходящих газах трубчатой печи второй линии производства рафинировочного цеха АО «Кольская ГМК»

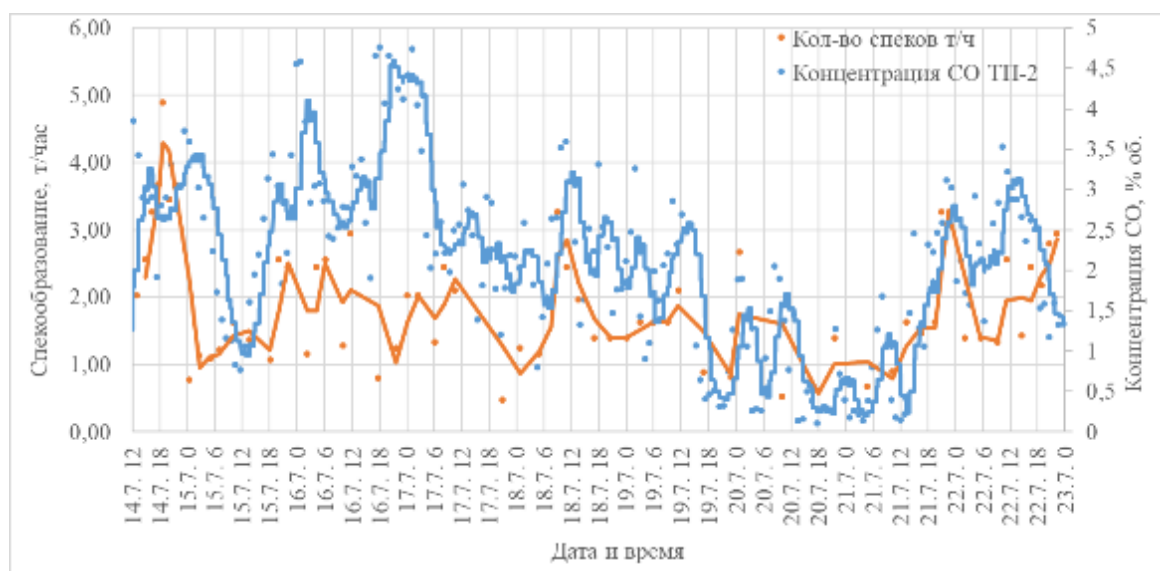


Рисунок 4.29 – Выгрузка спечённой массы из трубчатой печи и содержание СО в отходящих газах в рассматриваемый период

Повышенный расход восстановителя может приводить к росту спёков, так как при горении дополнительного количества углерода угля высвобождается значительное количество тепла, что может приводить к локальному разогреву, науглероживанию металлических частиц, снижению температуры плавления и как следствие подплавлению и формированию конгломератов. Доля угарного газа в отходящих газах восстановительных печей не должна превышать 1% об. Одним из факторов роста спёков в трубчатых печах является и гранулометрический состав огарка, поступающий в трубчатые печи восстановления. Количество мелких фракций (-0,2 мм) огарка на выгрузке печей КС необходимо поддерживать на уровне 4-5% отн. или ниже. Что может быть реализовано за счет контроля подаваемой пыли, а, следовательно, и концентрации серы в шихте, которая играет значительную роль в процессе и гранулометрическом составе огарка.

Температура процесса

Проведем анализ проб, отобранных при разных температурах процесса. Условия восстановительного обжига и результаты гранулометрического состава проб представлены в таблице 4.7-4.8.

Таблица 4.7 - Параметры работы ТВП при отборе промышленных проб

№ пробы	Температура, °С	Расход твердого восстановителя, %	Расход мазута на доп. форсунку, кг/ч
1	1120	15	160
2	1040	19	200
3	1100	15	200
4	1070	19	0
5	1000	15	0

Температура процесса в ТВП РЦ контролируется по косвенным показателям, а именно по температуре отходящих газов перед циклонами, после циклонов и в бункере восстановленной закиси никеля. Как уже сообщалось выше, температура в хвосте печи в среднем на 300°C ниже температуры в горячей зоне трубчатой печи. Расход восстановителя задается изменением напряжения на тарельчатом питателе, которое варьируется в диапазоне 80-120 В. Мазут подается на сжигание при необходимости через основную и дополнительную форсунку в слой закиси никеля.

Полученные пробы были рассеяны на четыре класса по крупности. Классы рассева соответствуют используемым для экспресс-анализа на АО «КГМК».

Таблица 4.8 - Гранулометрический состав промышленных проб восстановленной закиси никеля трубчатых печей

Класс крупности, мм	Выход фракции, %				
	1000 °C	1040 °C	1070 °C	1100 °C	1120 °C
+1,0	10,84	9,62	4,51	25,20	27,62
-1,0+0,5	58,13	35,67	51,91	51,91	52,25
-0,5+0,2	30,02	40,98	37,36	20,98	18,63
-0,2	1,00	13,73	6,22	1,91	1,50

Анализируя выход фракции +1 мм в зависимости от температуры процесса восстановления, можно отметить, что минимальное количество крупных частиц образуется в интервале температур 1000–1070°C. При повышении температуры выше 1100°C количество класса +1 мм резко возрастает, что свидетельствует об увеличении интенсивности процесса спексообразования. Зависимость выхода фракции +1 мм представлена на рисунке 4.30.

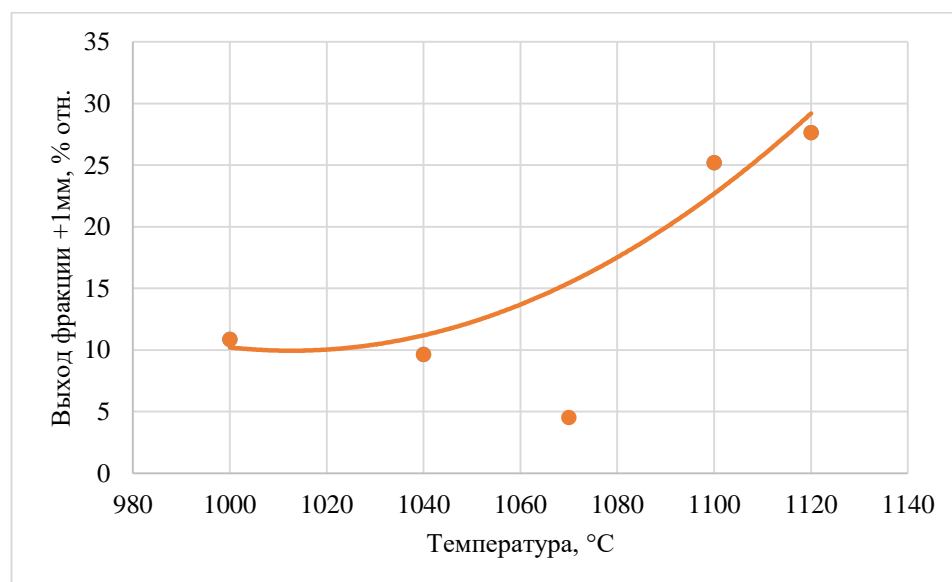


Рисунок 4.30 - Зависимость выхода фракции +1 мм от температуры ведения процесса восстановления в трубчатой печи

Помимо проб восстановленной закиси никеля в трубчатой печи были отобраны спёки, образовавшиеся при различных условиях восстановления. Прочность полученных спёков была исследована на гидравлическом прессе. Методика исследования заключается в помещении частиц спёков различной крупности под пресс с контрольным манометром, по которому фиксируется момент начала разрушения частицы. На рисунке 4.31 приведена зависимость прочности на сжатие спёков от температуры их образования.

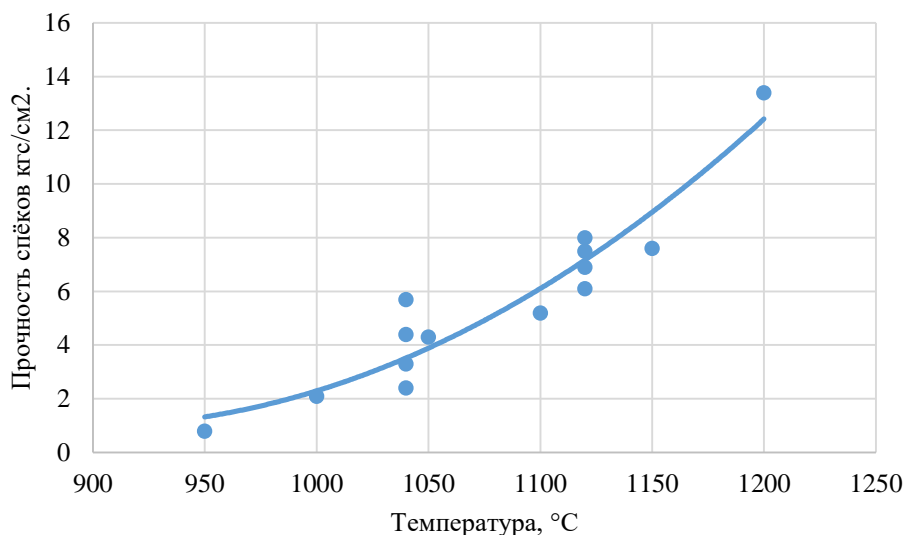


Рисунок 4.31 - Зависимость прочности спёков на сжатие от температуры их образования

Выход спёков оценивался по времени наполнения кубеля для спёков при работе агрегата в стационарном режиме с заданными параметрами температуры на восстановление. Затем масса спёков соотносилась со средней производительностью цепи агрегатов "печь КС – трубчатая печь" по закиси никеля. Результаты расчетов представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 - Выход спёков при различных режимах работы ТВП

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7
Температура, °C	950	1000	1050	1100	1150	1200	1040
Выход спёков, % отн.	0,8	2,1	4,3	5,2	7,6	13,4	2,4
№ опыта	8	9	10	11	12	13	14
Температура, °C	1040	1040	1040	1120	1120	1120	1120
Выход спёков, % отн.	3,3	4,4	5,7	8	7,5	6,9	6,1

Как следует из приведенной зависимости (рисунок 4.31), прочность спёка прямо пропорционально возрастает с увеличением температуры восстановления (в рабочем интервале 1000–1150°C). Отсутствие экстремумов на описываемой зависимости делает необходимым проводить анализ оптимального режима по данному параметру в сочетании с другими данными. На наш взгляд наиболее представительным является такой параметр, как выход спёков. Однако

выход спёков аналогично зависит от температуры процесса, увеличиваясь с ее ростом (рисунок 4.32).

Ограничивающим фактором и в том и в другом случае является получение достаточно высокой конечной степени восстановления закиси никеля, что приводит нас к нижней границе интервала температур 1050°C. При повышении температуры в агрегате на 30–40°C интенсивность спёкообразования еще не велика, следовательно, можно вести процесс без повышенного выхода спёков до температуры 1090°C.

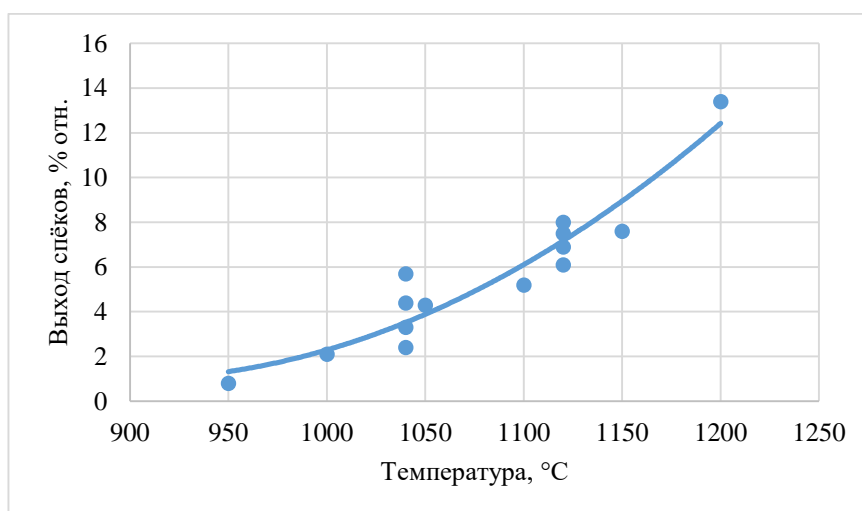


Рисунок 4.32 - Зависимость выхода спёков при восстановлении закиси никеля в трубчатой печи от температуры процесса

Механизм формирования спёков

Для формирования представлений о механизмах образования конгломератов из металлизированного никелевого порошка, проведем исследования методами РЭМ и РСМА, описание которых представлено в предыдущем разделе [35,194,203]. Результаты химического анализа представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 - Содержание основных компонентов в спёках трубчатых печей восстановления

Cu	Ni	Co	Fe	Ni _{мет}	Co _{мет}	Fe _{мет}	S	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	C
6,58	85,8	1,79	3,72	79,6	1,67	3,44	0,0141	0,95	0,123	0,35	0,175	0,176
6,30	85,5	1,83	3,53	81,6	1,76	3,45	0,0163	0,77	0,193	0,3	0,045	0,092

Результаты степени металлизации спёков для никеля, кобальта и железа превышает 93-95% отн., что несколько ниже металлизации порошка трубчатых печей регламентированной крупности. Кроме того, в анализируемых конгломератах доля силикатной составляющей несколько выше, чем в рядовых пробах никелевого порошка. Методами РЭМ-РСМА проанализировано три типа спёков принципиально отличающихся по внешнему виду, которые были выделены в отдельные категории. Как уже отмечалось ранее крупность спёченной

металлической массы может достигают 250-350 мм, при этом конгломераты остаются достаточно хрупкими. Крупность объектов, поступивших на исследование составляет от 30 мкм до 2мм, средний размер составляет порядка 200 мкм, результаты на рисунке 4.33.

Спекание частиц восстанавливаемой закиси никеля происходит главным образом по металлической фазе, которая образуется вследствие восстановления металлов из оксидов. В спёки могут входить также и невосстановленные частицы закиси никеля, покрытые плотной оплавленной металлической фазой, которая препятствует проникновению газообразных восстановителей вглубь образования.

Крупный спёк может образоваться вследствие окатывания первоначального «зародыша» при прохождении материала по трубчатой печи. Поэтому важным представляется не только гранулометрический состав закиси никеля печей кипящего слоя, но и местный перегрев материала в головной части печи до температур подплавления металлического сплава на основе никеля. Именно в случае образования жидкой фазы в первой трети агрегата спёкообразование может привести к получению на выходе из печи агломератов крупностью до 500 мм.

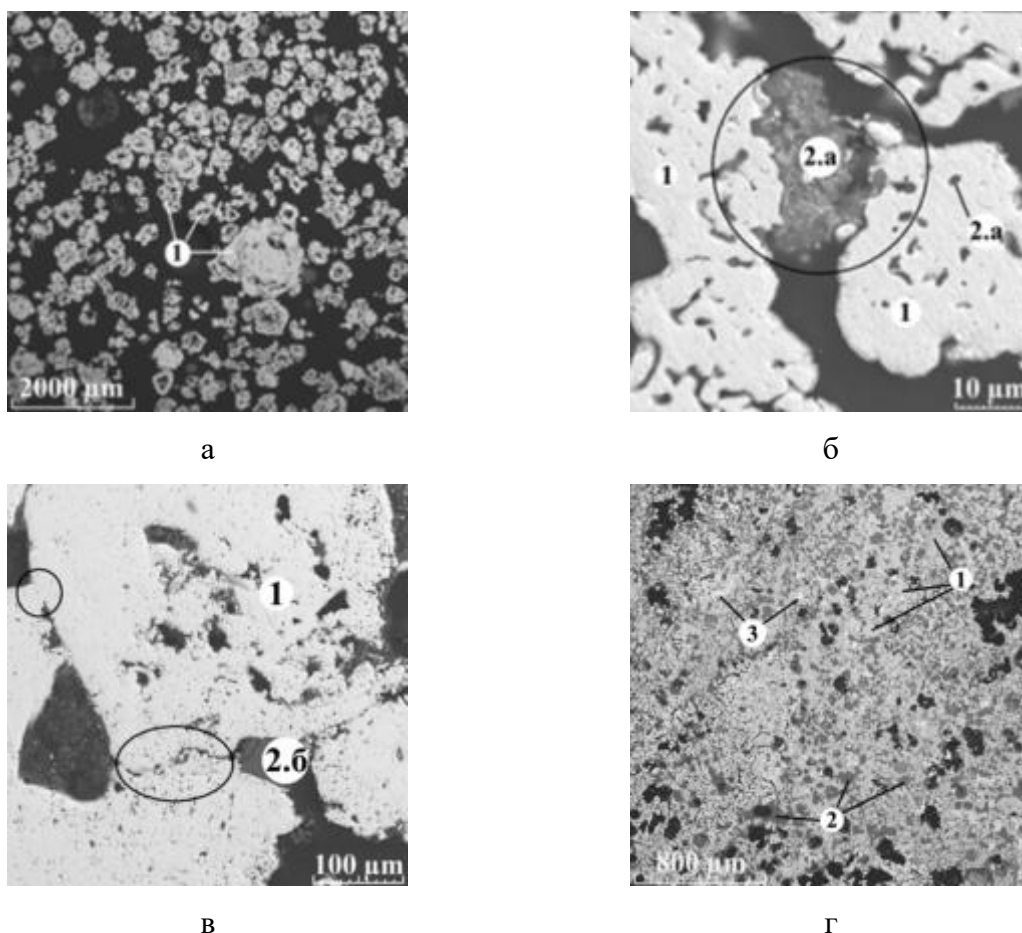


Рисунок 4.33 –Изображение микроструктуры проб спёков

а – общий вид пробы 1; б – тип связи отдельных частиц силикатным связующим 1; в – сплавление отдельных частиц; г – гетерогенная силикатная масса пробы 3 (1 – металлическая фаза; 2 – силикатные компоненты: а – плавленые силикатные массы, б – реликтовые силикатные минералы без признаков плавления, 3 – силикаты на основе никеля)

Исследование микроструктуры спеченной массы методами РЭМ-РСМА позволило определить несколько механизмов формирования и сцепления металлических частиц. В первом случае связующим является силикатная масса, которая соответствует продуктам превращения зольной составляющей углей, содержащая в основе оксиды кремния и алюминия в соотношении 2,5 к 3,5. Составы основных компонентов шлаковых структур представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Содержание основных компонентов в шлаковых структурах исследуемых проб

Составляющая	Состав, %масс.							
	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ba	Pb
Свободные шлаковые частицы	1,7	0,2	20,7	12,4	0,2	3	0,2	0,3
Плавленные силикатные включения	5,1	0,4	9,6	30,5	1,7	0,6	0,3	0,1
Микронные силикаты в объеме металлической массы	2,5	0,2	6,3	23	0,6	3,6	0,2	0,1
Силикат никеля	-	-	0,5	13,5	-	-	-	-

Продолжение таблицы 4.11

Составляющая	Состав, %масс.						
	P	S	Fe	Co	Ni	Cu	O
Свободные шлаковые частицы	0,1	0,2	4,2	0,9	14	1,1	40
Плавленные силикатные включения	0,1	0,1	0,5	0,1	3,2	0,3	47
Микронные силикаты в объеме металлической массы	0,2	0,1	2,1	0,5	18,6	1,2	41
Силикат никеля	-	-	0,6	1,6	50,6	2,2	31

Второй механизм может быть описан, как «прямого» сплавление металлических частиц. Избыточное содержание восстановителя в трубчатой печи в отдельные периоды времени с одной стороны приводит к локальному росту температуры, а с другой способствует науглероживание уже восстановленных металлических частиц. Науглероживание металла снижает температуры плавления вещества и может выступать как центр формирования и последующего укрупнения спёков. Расчет температуры ликвидус для металлического сплав из таблицы 4.11 показывает снижение температуры плавления с 1300°C на 20°C при добавлении 1% отн. углерода к металлическому раствору. Дальнейшее пребывание науглероженного сплава в печи в условиях окислительной атмосферы (реагирование углерода с атмосферой и огарком) приводит к удалению углерода из полученного металла.

По третьему механизму связующим является силикатная масса из продуктов гидрометаллургического передела, характеризующаяся более низкими температурами плавления

Отметим также, что в процессе движения материала по трубчатой печи помимо укрупнения частиц в процессе окатывания и конгломерации, при перемешивании порошкообразного материала во вращающейся печи происходит и разрушение образовавшихся агломератов. Этот процесс может получить развитие при достаточно низкой прочности спёка,

полученного в предшествующих зонах агрегата. Таким образом, динамическое равновесие процессов окатывания (укрупнения) и разрушения образовавшихся ранее спёков и приводит к конечному выходу спёка в процессе. Приведенные рассуждения хорошо иллюстрируются наличием частиц различной крупности и образования, приведенными на рисунке 4.33.

4.3 Выводы по главе 4

1. Лабораторные исследования позволили установить рациональные показатели восстановительного обжига. Рекомендуемая температура обжига 1100°C , температурная выдержка 60 минут, расход восстановителя 12,8% отн. от массы огарка и крупность огарка в диапазоне 0,2-0,8 мм

2. По результатам испытаний показан избыточный расход угля, что приводит к увеличенному выходу немагнитной фракции, интенсифицирует процессы конгломератообразования в трубчатой печи и усложняет переработку магнитной фракции на гидрометаллургическом участке. Избыток восстановителя составляет порядка 20-35 % отн, снижение расхода на 10 % отн. позволяет снизить выход немагнитной фракции и количество восстановителя при сохранении показателей металлизации. Ежегодное снижение расхода угля составляет до 3103 т угля в год.

3. Установлены основные формы нахождения силикатов в продуктах и промпродуктах никелевого производства АО «Кольская ГМК». К Типу I относится фаза, близкая к конвертерному шлаку при получении фанштейна. Доля SiO_2 вносимая данной фазой не превышает 14% отн. от всего объема SiO_2 поступающего в технологию переработки сульфидного никелевого концентрата с получением никелевых катодов высокой чистоты. Тип II (зольная составляющая углей) и Тип IV (частицы угля), относится к природным компонентам, содержащимся в угле, который используется в трубчатых печах в качестве восстановителя никелевого огарка.

4. Анализ продуктов участка магнитной сепарации показал, что удаление SiO_2 и других шлакообразующих соответствующих типу IIIa при существующей схеме магнитной сепарации практически невозможен. В тоже время в немагнитной фракции присутствуют Тип II, IIIб и IV, что показывает принципиальную возможность удаления таких форм силикатов. Последующая переработка магнитной фракции приводит к концентрированию шлакообразующих компонентов в каналах вывода гидрометаллургического производства. Для снижения силикатов в продуктах, необходимо исключить введение оборотных материалов гидрометаллургического передела, богатых зольной составляющей углей в печи КС, произвести реконструкцию участка магнитной сепарации.

5. Выполнены расчеты изменения содержания SiO_2 в магнитной фракции никелевого порошка и изменения выхода оборотных продуктов в схеме переработки магнитной фракции.

Показано, что при отсутствии канала вывода оборотов из технологической цепочки содержание SiO_2 в магнитной фракции никелевого порошка вырастает до 4% масс., т.е. фактически на порядок, а выход оборотов достигает 8,5%, возрастая в 3,5 раза. Полученные данные однозначно свидетельствуют о необходимости вывода существенной части оборотов из технологической схемы получения никелевого порошка.

6. Наиболее значимым технологическим параметром для процесса спёкообразования является температура: при ее чрезмерном увеличении (свыше 1150°C) резко увеличивается выход спёка. Прочность образующегося спёка также увеличивается с ростом температуры процесса при оплавлении металлической фазы, полученной при восстановлении металлов из оксидов. Процесс разрушения агломератов может развиваться при низкой прочности спёка, образующегося в предшествующих зонах агрегата.

7. Оптимальным температурным режимом работы агрегата с точки зрения подавления интенсивного спёкообразования является интервал температур от 1050 до 1080°C . В этом интервале наименьший выход материала класса +1 мм. Снижение выхода спёков возможно при обеспечении постоянного фракционного состава огарка КС за счет равномерной подачи компонентов шихты в печи КС. Установка весоизмерительного оборудования для подачи оборотной пыли в печи КС позволит стабилизировать гранулометрический состав огарка, что приведет к снижению выхода спёков.

8. Определены три типа возможных способа формирования конгломератов в трубчатых печах. По первому типу и третьему типу связующим выступает масса силикатов либо соответствующей золе углей, либо продуктам гидрометаллургического передела возвращаемых в печи КС. К третьему механизму реализуется за счет «прямого» сплавления металлических частиц, ввиду избытка восстановителя, последующего науглероживания металлической фазы и снижения ее температуры плавления. В дальнейшем окислительный потенциал атмосферы трубчатой печи по мере прохождения конгломерата снижает концентрацию углерода до минимальных (нулевых) значений

9. В результате промышленных испытаний в технологической цепи: «окислительный обжиг – восстановительный обжиг» сформулированы следующие рекомендации по оптимальному ведению процесса:

9.1 Контроль за равномерностью подачи оборотной пыли и оборотов гидрометаллургических переделов с целью обеспечения содержания серы в шихте печей КС не менее 17%, что обеспечит эффективную агломерацию тонких классов оборотных материалов и снижение выхода спеченных конгломератов.

9.2 Контроль за расходом подаваемого угля. Целесообразно отказаться от практики избыточного расхода угля, так как это:

- увеличивает температуру в печи и, следовательно, растет выход спеченных конгломератов;

- увеличивает выход немагнитной фракции и снижает качество магнитной фракции за счет увеличения содержания в ней С и зольной составляющей угля (SiO_2).

Оптимизация параметров работы печей КС и ТВП на основе сформулированных рекомендаций позволит снизить долю мелких классов в огарке печей КС до 2% и выход спеченных конгломератов до 5%, что в сочетании с совершенствованием схемы магнитной сепарации позволит стабилизировать работу гидрометаллургических переделов хлорного выщелачивания никелевого порошка.

ГЛАВА 5 МАГНИТНАЯ СЕПАРАЦИЯ НИКЕЛЕВОГО ПОРОШКА

Основной задачей проведенных работ является наладка оборудования с целью улучшения показателей работы гидрометаллургического передела при растворении металлического порошка. Неудовлетворительная крупность, присутствие силикатной и углеродной составляющих затрудняют процесс переработки, увеличивают выход шламовых и оборотных продуктов, снижают эффективность производства. В настоящем разделе проводится анализ работы участка магнитной сепарации, рассматривается баланс металлов и недостатки существующей схемы. Отдельным подразделом в Главе 5 приводятся результаты укрупненных исследований по подбору режимов работы и разработке технологической схемы участка магнитной сепарации, которая бы позволила получать магнитную и немагнитную фракцию регламентного состава.

5.1 Результаты промышленных испытаний

Опробование передела проведено в июле 2021 года в период с 14.07.21 по 22.07.21 г. Начало опробований – в 12.00, окончание – в 20.00; 19.07.21 опробование продолжалось до 00.00. Периодичность отбора проб в основном составляла 2 часа.

Отбор проб продуктов разделения осуществлялся из установленных на конвейерных линиях участка пробоотборников путем открытия шиберных заслонок пробоотборников на 4 - 7 секунд с выпуском сыпучего продукта массой до 32 кг для магнитной фракции (МФ) и 4,5 кг для немагнитной фракции (НМФ) в заранее подготовленную тару. Отобранный продукт сокращался на месте при помощи желобчатого делителя с выделением 1/8 массы исходного, упаковывался и направлялся на дальнейшие исследования

В *приложении В* представлены средние пробы магнитной и немагнитной фракций, проанализированных на широкий список элементов, в таблице 5.1 представлены только средние значения, максимум и минимум для основных элементов.

Представленные результаты показывают значительное зарабатывание и попадание большой доли металлического никеля в немагнитную фракцию, содержание никеля в пробе НМФ в отдельные периоды достигало 44,7% масс. (средние показатели 14,8% масс.) при этом он был представлен восстановленной формой, т.е. обладал магнитными свойствами. В тоже время следует отметить, что участок магнитной сепарации удовлетворительно работает по удалению из магнитной фракции зольной составляющей, содержание угля не превышает 0,2% масс., а средние показатели диоксида кремния составляют 0,6 % масс. Эффективность работы магнитной сепарации и ручного магнита в графическом виде представлена на рисунке 5.1.

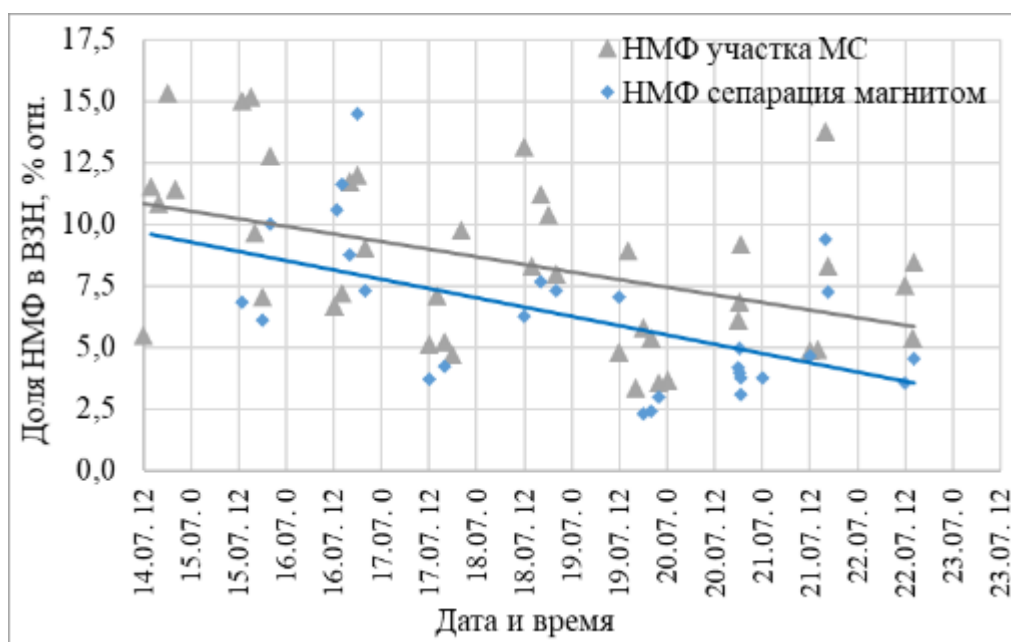


Рисунок 5.1 – Доля немагнитной фракции в пробах участка магнитной сепарации и механического разделения магнитом ВЗН

Результаты, представленные на рисунке 5.1, показывают, что доля немагнитной фракции в продуктах разделения магнитной сепарации от 3,4 до 15,3% отн. от подаваемого на передел восстановленной закиси никеля (ВЗН), при средних показателях порядка 8,5 % отн., средние показатели доли немагнитной фракции в ВЗН, которые были проанализированы вручную при помощи магнита, составляют 6,2 % отн. Таким образом, доля немагнитной фракции возрастает в среднем на 36,7% на существующем производстве в сравнении с ручным разделением. Выход немагнитной фракции увеличивается за счет попадания металлического порошка в немагнитную фракцию. Средние показатели металлического порошка, попавшего в немагнитную фракцию, составляет порядка 17,6% масс. или 1,69 % отн. от общего количества металлического порошка, выгружаемого из печи. Средняя производительность печи по никелевому порошку трубчатых печей (НПП) составляет порядка 10 т/ч.

Для отобранных с участка магнитной сепарации продуктов проведены исследования по распределению как основных компонентов, так и их микропримесей между продуктами, которые представлены в таблицах 5.2-5.4.

Ввиду худшего разделения продуктов на промышленной установке АО «КГМК» по сравнению с ручными методами, доля микропримесей и Ni в НМФ значительно растёт. Потери никеля с немагнитной фракцией в среднем составляют 1,69% отн. или 1832 т/год (по никелевому порошку 2181,9 т/год) при производительности 130000 т/год по никелю.

Таблица 5.1 – Диапазон содержаний основных компонентов в МФ и НМФ

Мат-л	Наим-е	Содержание, % масс.												
		Ni	Ni _{мет.}	Cu	Co	Co _{мет.}	Fe	Fe _{мет.}	S	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	C
МФ	Ср. знач.	85,40	80,83	6,09	1,81	1,70	3,79	3,44	0,04	0,63	0,06	0,21	0,05	0,23
МФ	Минимум	81,48	72,29	5,29	0,29	1,50	3,48	2,98	0,01	0,40	0,05	0,16	0,04	0,04
МФ	Максимум	87,24	86,77	6,70	1,98	1,90	4,40	4,20	0,13	0,98	0,09	0,36	0,07	0,71
НМФ	Ср. знач.	17,56	15,18	1,23	0,39	0,36	1,29	0,82	0,26	6,31	0,24	3,07	0,15	65,84
НМФ	Минимум	7,04	4,04	0,49	0,16	0,13	0,57	0,40	0,11	4,26	0,14	2,30	0,09	41,60
НМФ	Максимум	44,66	43,94	2,82	0,94	0,76	2,03	1,58	0,38	8,91	0,39	4,03	0,25	84,30

Таблица 5.2 - Распределение основных металлов между МФ и НМФ

Мат-л	Наим-е	Распределение, % отн.									
		Ni	Ni _{мет.}	Cu	Co	Fe	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	C	
МФ	Ср. знач.	98,31	98,46	98,34	98,25	97,21	56,48	52,50	42,92	3,22	
МФ	Минимум	93,76	93,79	93,90	93,77	93,30	26,62	33,53	21,15	0,82	
МФ	Максимум	99,50	99,60	99,50	99,47	98,81	88,86	72,88	65,38	8,84	
НМФ	Ср. знач.	1,69	1,54	1,66	1,75	2,79	43,52	47,50	57,08	96,78	
НМФ	Минимум	0,50	0,40	0,50	0,53	1,19	11,14	27,12	34,62	91,16	
НМФ	Максимум	6,24	6,21	6,10	6,23	6,70	73,38	66,47	78,85	99,18	

Таблица 5.3 - Баланс микропримесей МФ и НМФ

Мат-л	Наимен-е	Распределение, % отн.									
		Zn	Pb	P	As	Sn	Sb	Cd	Bi	Se	Te
МФ	Ср. знач.	80,28	80,95	88,06	92,42	96,81	96,51	90,53	95,03	92,22	96,32
МФ	Минимум	59,53	71,11	81,41	89,09	95,50	90,89	77,16	92,28	86,95	95,00
МФ	Максимум	91,76	89,87	93,56	95,07	97,79	98,68	95,98	96,90	95,81	97,30
НМФ	Ср. знач.	19,72	19,05	11,94	7,58	3,19	3,49	9,47	4,97	7,78	3,68
НМФ	Минимум	8,24	10,13	6,44	4,93	2,21	1,32	4,02	3,10	4,19	2,70
НМФ	Максимум	40,47	28,89	18,59	10,91	4,50	9,11	22,84	7,72	13,05	5,00

Таблица 5.4 - Распределение микропримесей в НМФ между никелевым порошком и зольной составляющей

Наименование	Zn	Pb	P	As	Sn	Sb	Cd	Bi	Se	Te
В порошке	12,14	11,34	21,49	34,89	80,57	72,83	28,04	57,69	33,37	73,77
В золе и углеводе	87,86	88,66	78,51	65,11	19,43	27,17	71,96	42,31	66,63	26,23

5.2 Исследования по разработке двухстадийной схемы Анализ текущей схемы при различной крупности

По результатам опробования и представленным в разделе 5.1. результатам было установлено, что продукт получаемый на магнитной сепарации не соответствует регламентным содержаниям по диоксиду кремния и углероду. [106]

По гранулометрическому составу проанализированные продукты превышают предельную крупность 8 мм: в пределах 0,5 -1,9% отн. Отмечается, что значительная часть балластных компонентов НППП распределяется в классы крупнее 2,5 мм и составляет порядка 11,6 - 30,5% SiO₂ и 31,1 - 90,4% отн. углерода для различных отобранных проб. При этом выход класса крупности +2,5 мм для НППП соответствует всего 4,1 – 8,0% отн. Результаты гранулометрии трубчатых печей представлены в таблице 5.5 и на рисунке 5.2. Содержание основных компонентов и их распределение по двум продуктам представлено в таблицах 5.6 и 5.7. Таблица 5.5 – Гранулометрическая характеристика подбударного продукта разгрузки трубчатой печи №2 и № 3

Класс крупности	Трубчатая печь № 2			Трубчатая печь № 3		
	Выход частный, %	Выход Σ, %		Выход частный, %	Выход Σ, %	
		по минусу	по плюсу		по минусу	по плюсу
7	2,38	97,62	2,38	5,08	94,92	5,08
-2	0,85	96,78	3,22	1,54	93,39	6,61
-2,5	1,68	95,09	4,91	2,22	91,17	8,83
-1,5	9,98	85,12	14,88	4,96	86,21	13,79
-0,5	52,22	32,9	67,1	31,59	54,62	45,38
-0,185	26,08	6,81	93,19	37,16	17,46	82,54
-0,215	6,68	0,14	99,86	16,33	1,13	98,87
-0,029	0,06	0,08	99,92	0,37	0,76	99,24
-0,026	0,02	0,06	99,94	0,21	0,54	99,46
-0,045	0,06		100	0,54		100
ИТОГО	100			100		

Распределение балластных компонентов в класс крупности -0,1 мм значительно меньше и соответствует 0,4-3,1 % отн. для SiO₂ и 1,5 - 16,2% отн. для углерода.

Помимо высокого содержания шлакообразующих компонентов и углерода в пробах магнитной сепарации, важным критерием работы данного передела является также и доля никеля, попавшая в немагнитную фракцию при разделении восстановленной закиси никеля, может достигать 15-19% масс. (в единичных пробах до 40,5% масс.) при регламентных показателях не более 8% масс.

Таблица 5.6 – Результаты гранулометрического, химического анализов, а также распределение компонентов по классам крупности в МФ при работе линии №1

Класс крупности	Выход частный, %	Выход суммарный, %		Содержание, %								
		по минусу	по плюсу	Ni	Ni Σ -	Ni Σ +	Nimet.	Nimet. Σ -	Nimet. Σ +	Cu	Cu Σ -	Cu Σ +
+7,0	1,01	98,99	1,01	76,90	85,80	76,90	69,40	75,04	69,40	5,37	5,87	5,37
-7,0+5,0	2,48	96,51	3,49	78,30	85,99	77,89	73,40	75,08	72,24	5,29	5,88	5,31
-5,0+2,5	3,07	93,44	6,56	81,20	86,15	79,44	77,40	75,00	74,66	5,58	5,89	5,44
-2,5+1,0	10,20	83,24	16,76	83,60	86,46	81,97	76,70	74,79	75,90	5,85	5,90	5,69
-1,0+0,5	41,69	41,55	58,45	86,10	86,82	84,92	77,60	71,98	77,11	5,97	5,82	5,89
-0,5+0,315	28,52	13,03	86,97	87,40	85,55	85,73	70,30	75,64	74,88	5,80	5,88	5,86
-0,315+0,1	12,85	0,18	99,82	85,60	81,70	85,71	75,90	57,30	75,01	5,88	5,56	5,86
-0,1+0,071	0,04	0,14	99,86	81,70		85,71	57,30		74,98	5,56		5,86
-0,071+0,045	0,04	0,10	99,90									
-0,045	0,10		100,00									
ИТОГО	100,00			85,71			74,98			5,86		

Продолжение таблицы 5.6

Класс крупности	Выход частный, %	Выход суммарный, %		Содержание, %											
		по минусу	по плюсу	Fe	Fe Σ -	Fe Σ +	S	S Σ -	S Σ +	SiO ₂	SiO ₂ Σ -	SiO ₂ Σ +	C	C Σ -	C Σ +
+7,0	1,01	98,99	1,01	6,52	4,97	6,52	0,100	0,07	0,10	2,51	0,73	2,51	1,8	0,11	1,80
-7,0+5,0	2,48	96,51	3,49	5,73	4,95	5,96	0,079	0,07	0,08	1,49	0,71	1,79	1,88	0,07	1,86
-5,0+2,5	3,07	93,44	6,56	5,85	4,92	5,91	0,074	0,07	0,08	1,60	0,68	1,70	0,91	0,04	1,41
-2,5+1,0	10,20	83,24	16,76	5,70	4,82	5,78	0,075	0,07	0,08	1,34	0,60	1,48	0,15	0,02	0,64
-1,0+0,5	41,69	41,55	58,45	4,94	4,71	5,18	0,076	0,07	0,07	0,63	0,57	0,87	0,014	0,04	0,19
-0,5+0,315	28,52	13,03	86,97	4,66	4,80	5,01	0,074	0,08	0,07	0,56	0,60	0,77	0,024	0,06	0,14
-0,315+0,1	12,85	0,18	99,82	4,79	5,77	4,98	0,083	0,14	0,07	0,58	1,77	0,75	0,04	1,48	0,13
-0,1+0,071	0,04	0,14	99,86	5,77		4,98	0,140		0,08	1,77		0,75	1,48		0,13
-0,071+0,045	0,04	0,10	99,90												
-0,045	0,10		100,00												
ИТОГО	100,00			4,98			0,077			0,75			0,13		

Продолжение таблицы 5.б. по распределению компонентов

Класс крупности	Выход частный, %	Выход суммарный, %		Распределение, %								
		по минусу	по плюсу	Ni	Ni Σ -	Ni Σ +	Nimet.	Nimet. Σ -	Nimet. Σ +	Cu	Cu Σ -	Cu Σ +
+7,0	1,01	98,99	1,01	0,91	99,09	0,91	0,94	99,06	0,94	0,93	99,07	0,93
-7,0+5,0	2,48	96,51	3,49	2,26	96,83	3,17	2,43	96,64	3,36	2,24	96,84	3,16
-5,0+2,5	3,07	93,44	6,56	2,91	93,92	6,08	3,17	93,46	6,54	2,93	93,91	6,09
-2,5+1,0	10,20	83,24	16,76	9,95	83,97	16,03	10,43	83,03	16,97	10,18	83,73	16,27
-1,0+0,5	41,69	41,55	58,45	41,88	42,09	57,91	43,15	39,89	60,11	42,46	41,28	58,72
-0,5+0,315	28,52	13,03	86,97	29,08	13,01	86,99	26,74	13,15	86,85	28,22	13,06	86,94
-0,315+0,1	12,85	0,18	99,82	12,84	0,17	99,83	13,01	0,14	99,86	12,89	0,17	99,83
-0,1+0,071	0,04	0,14	99,86	0,17	0,00	100,0	0,14	0,00	100,00	0,17	0,00	100,00
-0,071+0,045	0,04	0,10	99,90									
-0,045	0,10		100,00									
ИТОГО	100,00			100,00			100,00			100,00		

Продолжение таблицы 5.б. по распределению компонентов

Класс крупности	Выход частный, %	Выход суммарный, %		Распределение, %											
		по минусу	по плюсу	Fe	Fe Σ -	Fe Σ +	S	S Σ -	S Σ +	SiO2	SiO2 Σ -	SiO2 Σ +	C	C Σ -	C Σ +
+7,0	1,01	98,99	1,01	1,32	98,68	1,32	1,32	98,7	1,32	3,39	96,61	3,39	14,17	85,83	14,17
-7,0+5,0	2,48	96,51	3,49	2,85	95,83	4,17	2,56	96,1	3,88	4,94	91,67	8,33	36,25	49,59	50,41
-5,0+2,5	3,07	93,44	6,56	3,61	92,22	7,78	2,97	93,2	6,85	6,57	85,10	14,90	21,76	27,83	72,17
-2,5+1,0	10,20	83,24	16,76	11,66	80,55	19,45	9,99	83,2	16,8	18,26	66,83	33,17	11,90	15,93	84,07
-1,0+0,5	41,69	41,55	58,45	41,33	39,23	60,77	41,36	41,8	58,2	35,10	31,73	68,27	4,54	11,39	88,61
-0,5+0,315	28,52	13,03	86,97	26,67	12,56	87,44	27,55	14,3	85,8	21,34	10,39	89,61	5,32	6,07	93,93
-0,315+0,1	12,85	0,18	99,82	12,35	0,21	99,79	13,93	0,33	99,7	9,96	0,42	99,58	4,00	2,07	97,93
-0,1+0,071	0,04	0,14	99,86	0,21	0,00	100,0	0,33	0,00	100,	0,42	0,00	100,00	2,07	0,00	100,0
-0,071+0,045	0,04	0,10	99,90												
-0,045	0,10		100,00												
ИТОГО	100,00			100,00			100,00			100,00			100,00		

Таблица 5.7 – Результаты гранулометрического, химического анализов, а также распределение компонентов по классам крупности в НМФ при работе линии №1

Класс крупности	Выход частный, %	Выход суммарный, %		Содержание, %								
		по минусу	по плюсу	Ni	Ni Σ -	Ni Σ +	Nimet.	Nimet. Σ -	Nimet. Σ +	Cu	Cu Σ -	Cu Σ +
+7,0	33,23	66,77	33,23	19,3	8,50	19,30	10,1	4,44	10,10	1,27	0,69	1,27
-7,0+5,0	22,74	44,02	55,98	1,87	11,92	12,22	0,57	6,44	6,23	0,198	0,95	0,83
-5,0+2,5	13,74	30,28	69,72	0,51	17,10	9,91	0,354	9,20	5,07	0,034	1,36	0,68
-2,5+1,0	11,32	18,96	81,04	5,73	23,89	9,33	2,08	13,44	4,65	0,496	1,88	0,65
-1,0+0,5	4,72	14,25	85,75	23,5	24,01	10,11	15,7	12,69	5,26	1,83	1,89	0,72
-0,5+0,315	3,67	10,57	89,43	31,1	21,55	10,97	15,1	11,86	5,66	2,16	1,80	0,78
-0,315+0,1	6,31	4,26	95,74	22,9	19,56	11,75	15,9	5,87	6,34	2,13	1,32	0,86
-0,1+0,071	0,90	3,36	96,64	22,4	18,8	11,85	4,13	6,33	6,32	1,31	1,32	0,87
-0,071+0,045	1,11	2,25	97,75	18,8		12,09	6,33		6,32	1,32		0,88
-0,045	2,25		100,00									
ИТОГО	100,00			12,09			6,32			0,88		

Продолжение таблицы 5.7

Класс крупности	Выход частный, %	Выход сумм, %		Содержание, %											
		по -	по +	Fe	Fe Σ -	Fe Σ +	S	S Σ -	S Σ +	SiO ₂	SiO ₂ Σ -	SiO ₂ Σ +	C	C Σ -	C Σ +
+7,0	33,23	66,77	33,23	1,48	1,69	1,48	0,110	0,16	0,11	11,9	17,36	11,90	61,1	61,91	61,10
-7,0+5,0	22,74	44,02	55,98	1,39	1,85	1,44	0,150	0,17	0,13	11,5	20,38	11,74	77,4	53,90	67,72
-5,0+2,5	13,74	30,28	69,72	0,95	2,25	1,35	0,160	0,17	0,13	17,8	21,56	12,93	76,2	43,79	69,39
-2,5+1,0	11,32	18,96	81,04	2,24	2,26	1,47	0,150	0,19	0,14	22,9	20,75	14,32	54,5	37,39	67,31
-1,0+0,5	4,72	14,25	85,75	2,42	2,21	1,52	0,160	0,20	0,14	20	21,00	14,64	35,5	38,02	65,56
-0,5+0,315	3,67	10,57	89,43	2,44	2,13	1,56	0,170	0,21	0,14	21,8	20,73	14,93	32,1	40,08	64,19
-0,315+0,1	6,31	4,26	95,74	2,01	2,32	1,59	0,170	0,26	0,14	21,5	19,58	15,36	40,7	39,15	62,64
-0,1+0,071	0,90	3,36	96,64	1,96	2,41	1,59	0,180	0,28	0,14	15,00	20,80	15,36	50,60	36,10	62,53
-0,071+0,045	1,11	2,25	97,75	2,41		1,62	0,280		0,15	20,80		15,54	36,10		61,64
-0,045	2,25		100,00												
ИТОГО	100,00			1,62			0,145			15,54			61,64		

Продолжение таблицы 5.7 по распределению компонентов

Класс крупности	Выход частный, %	Выход суммарный, %		Распределение, %								
		по минусу	по плюсу	Ni	Ni Σ -	Ni Σ +	Nimet.	Nimet. Σ -	Nimet. Σ +	Cu	Cu Σ -	Cu Σ +
+7,0	33,23	66,77	33,23	53,06	46,94	53,06	53,11	46,89	53,11	47,73	52,27	47,73
-7,0+5,0	22,74	44,02	55,98	3,52	43,42	56,58	2,05	44,83	55,17	5,09	47,17	52,83
-5,0+2,5	13,74	30,28	69,72	0,58	42,84	57,16	0,77	44,06	55,94	0,53	46,65	53,35
-2,5+1,0	11,32	18,96	81,04	5,37	37,48	62,52	3,73	40,34	59,66	6,35	40,30	59,70
-1,0+0,5	4,72	14,25	85,75	9,18	28,30	71,70	11,72	28,61	71,39	9,77	30,53	69,47
-0,5+0,315	3,67	10,57	89,43	9,44	18,86	81,14	8,77	19,84	80,16	8,97	21,56	78,44
-0,315+0,1	6,31	4,26	95,74	11,96	6,89	93,11	15,89	3,96	96,04	15,21	6,35	93,65
-0,1+0,071	0,90	3,36	96,64	1,66	5,23	94,77	0,59	3,37	96,63	1,33	5,02	94,98
-0,071+0,045	1,11	2,25	97,75	5,23	0,00	100,0	3,37	0,00	100,00	5,02	0,00	100,00
-0,045	2,25		100,00									
ИТОГО	100,00			100,00			100,00			100,00		

Продолжение таблицы 5.7 по распределению компонентов

Класс крупности	Выход частный, %	Выход суммарный, %		Распределение, %											
		по минусу	по плюсу	Fe	Fe Σ -	Fe Σ +	S	S Σ -	S Σ +	SiO2	SiO2 Σ -	SiO2 Σ +	C	C Σ -	C Σ +
+7,0	33,23	66,77	33,23	30,33	69,67	30,33	25,18	74,8	25,18	25,44	74,56	25,44	32,94	67,06	32,94
-7,0+5,0	22,74	44,02	55,98	19,50	50,17	49,83	23,50	51,3	48,67	16,83	57,73	42,27	28,56	38,50	61,50
-5,0+2,5	13,74	30,28	69,72	8,05	42,12	57,88	15,14	36,2	63,82	15,74	41,99	58,01	16,99	21,51	78,49
-2,5+1,0	11,32	18,96	81,04	15,64	26,48	73,52	11,69	24,5	75,51	16,67	25,32	74,68	10,01	11,50	88,50
-1,0+0,5	4,72	14,25	85,75	7,04	19,44	80,56	5,20	19,3	80,71	6,07	19,25	80,75	2,72	8,79	91,21
-0,5+0,315	3,67	10,57	89,43	5,52	13,91	86,09	4,30	15,0	85,01	5,15	14,10	85,90	1,91	6,88	93,12
-0,315+0,1	6,31	4,26	95,74	7,83	6,08	93,92	7,39	7,6	92,40	8,73	5,37	94,63	4,17	2,71	97,29
-0,1+0,071	0,90	3,36	96,64	1,08	5,00	95,00	1,11	6,49	93,51	0,86	4,50	95,50	0,74	1,97	98,03
-0,071+0,045	1,11	2,25	97,75	5,00	0,00	100,0	6,49	0,00	100,0	4,50	0,00	100,00	1,97	0,00	100,00
-0,045	2,25		100,00												
ИТОГО	100,00			100,00			100,00			100,00			100,00		

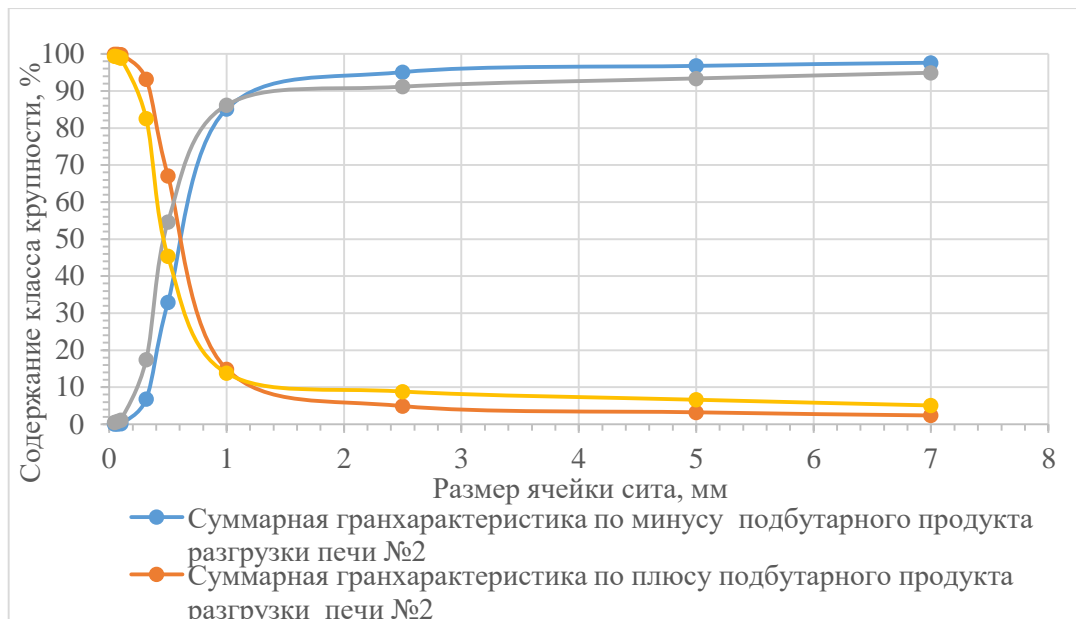


Рисунок 5.2 – Гранулометрические характеристики подбударного продукта разгрузки печей №2 и №3

Проведенное опробование, реализованное в период промышленных испытаний, позволило выявить недостатки технологической схемы участка магнитной сепарации, а также определить состав продуктов, получаемых в настоящее время. Усредненные значения получаемых продуктов на магнитной сепарации восстановленного порошка трубчатых печей представлены в таблице 5.8

Таблица 5.8 – Показатели работы магнитной сепарации, работающей в настоящее время на АО «Кольская ГМК»

Наименование	Размерность	Сущ. схема
Годовой объем производства никеля	т	130000
Доля МФ	% отн.	91,47
Доля НМФ	% отн.	8,53
Содержание Ni в Магнитной фракции	% масс.	85,4
Содержание Ni в НМФ	% масс.	17,56
Содержание SiO ₂ в Магнитной фракции	% масс.	0,75
Содержание SiO ₂ в НМФ	% масс.	6,31
Содержание С в Магнитной фракции	% масс.	0,23
Содержание С в НМФ	% масс.	65,84
Крупность >5	мм	9,63

Таким образом, неудовлетворительная работа реализованной технологической схемы на участке магнитной сепарации, представленной в главе 1 на рисунке 1.3, привела к необходимости ее замены на двухстадийную, схема которой представлена на рисунке 5.3.

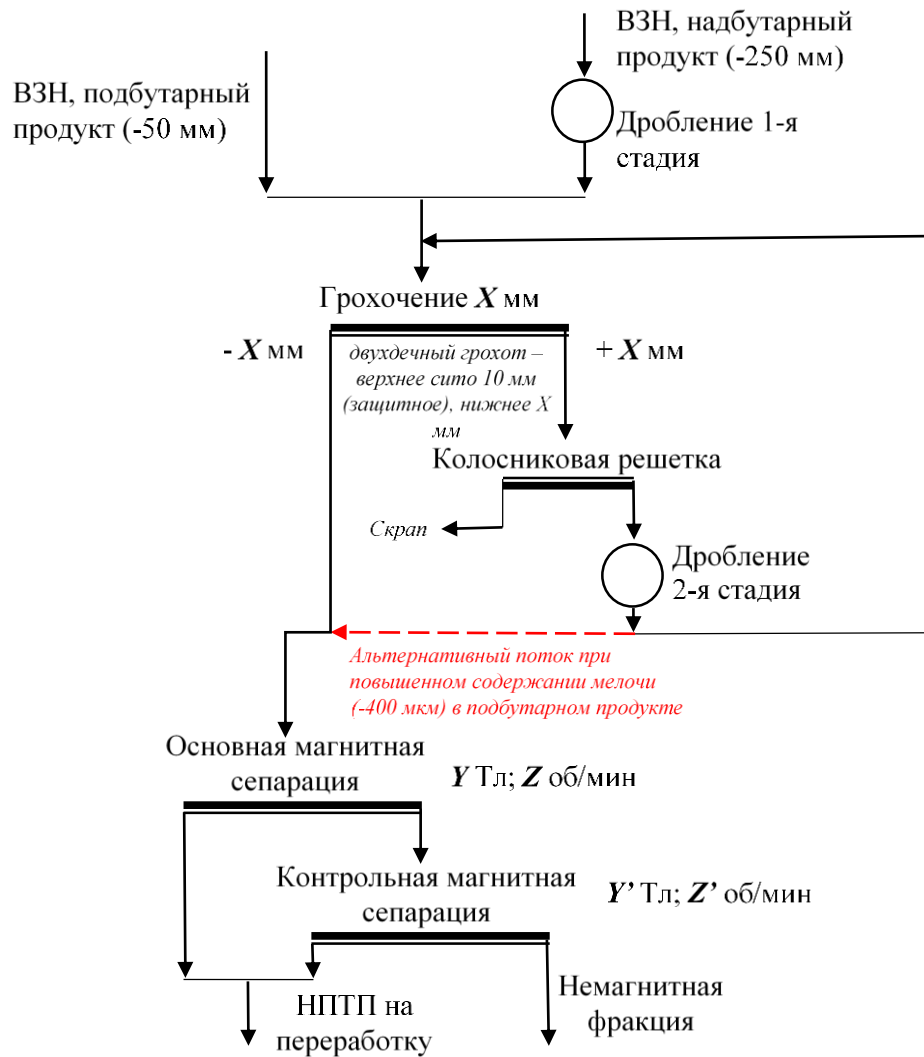


Рисунок 5.3 – Рекомендованная технологическая схема подготовки НППП к дальнейшей гидрометаллургической переработке

В представленной технологической схеме предполагается два основных технологических узла: дробление продукта разгрузки трубчатых печей и магнитная сепарация дробленого продукта. Узел дробления реализуется в две стадии. На первой стадии осуществляется дробление в открытом цикле спеков +250 мм, полученный продукт после дробления объединяется с восстановленной закисью никеля трубчатых печей и додрабливается в замкнутом цикле до требуемой крупности.

Узел магнитной сепарации состоит из двух операций сепарации – основной и контрольной, совмещенных в одном обогатительном аппарате. Подрешетный продукт грохочения вибропитателем подается в магнитный двухбарабанный сепаратор. На первом барабане (основная сепарация) магнитная фракция притягивается к поверхности барабана, удерживается на ней, захватывается сбрасывателями и, перемещаясь за пределы рабочей зоны, поступает в приемный бункер готового магнитного продукта. Немагнитный продукт, не притянутый к поверхности барабана основной сепарации, под действием силы тяжести,

собственной скорости и сил инерции, полученных в момент соприкосновения с вращающейся поверхностью барабана основной сепарации, поступает на второй барабан сепаратора с повышенной индукцией магнитного поля на поверхности – барабан контрольной сепарации.

Магнитный продукт контрольной сепарации аналогично магнитной фракции основной сепарации, перемещается и сбрасывается в приемный бункер магнитной фракции, немагнитный продукт является оборотным материалом, разгружается через течку немагнитного продукта и передается на дальнейшую пирометаллургическую переработку. Полученный магнитный продукт отправляется на гидromеталлургическую переработку. Помимо требований по степени металлизации продукта и массовой доле примесных компонентов в нем, важным критерием качества НППП является также крупность металлического порошка, избыточное переизмельчение которого негативно сказывается на процессе хлорного выщелачивания.

По результатам работы по схеме (рисунок 5.3) будут определены: крупность дробления восстановленной закиси никеля (X), величина магнитной индукции, частота вращения барабана основной (Y, Z) и контрольной магнитной сепарации (Y', Z'). Для определения оптимальных параметров представленной на рисунке 5.3 схемы, а также целесообразности применения пневмокласификации для доводки магнитного продукта на базе сепараторов, производимых ООО «ЭРГА», была проведена серия экспериментов с восстановленным порошком трубчатых печей.

5.2.1 Работа основной сепарации и пневмокласификации

При проведении 1-го этапа исследований из общей среднесменной накопительной пробы восстановленной закиси никеля трубчатой печи, методами усреднения и сокращения выделялись три пробы общей массой 60 кг, после чего каждая из трех частей подвергалась дроблению в замкнутом цикле с грохочением до крупности $-2+0$ мм, $-1+0$ мм, $-0,5+0$ мм на валковой дробилке. Химический состав исследуемой пробы представлен в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Содержание основных компонентов в исследуемой пробе 1-го этапа

Ni _{общ.}	Ni _{мет.}	Cu	Fe	S	C	SiO ₂
79,62	57,9	4,8	3,67	0,036	1,4	0,98

В ходе испытаний проба каждого класса крупности подвергалась сепарации в магнитных полях с индукцией на поверхности барабана сепаратора в 0,18 Тл, 0,12 Тл и 0,08 Тл. Таким образом, определялась не только оптимальная напряженность (индукция) магнитного поля, но и оценивалось влияние крупности исходного питания сепаратора. Для оценки влияния отсева мелких (менее 100 мкм) классов крупности на качество готового НППП на каждом из полученных магнитных продуктов проводилась пневмокласификация по классу 100 мкм. На рисунке 5.4 представлена общая схема экспериментов 1-го этапа исследований.

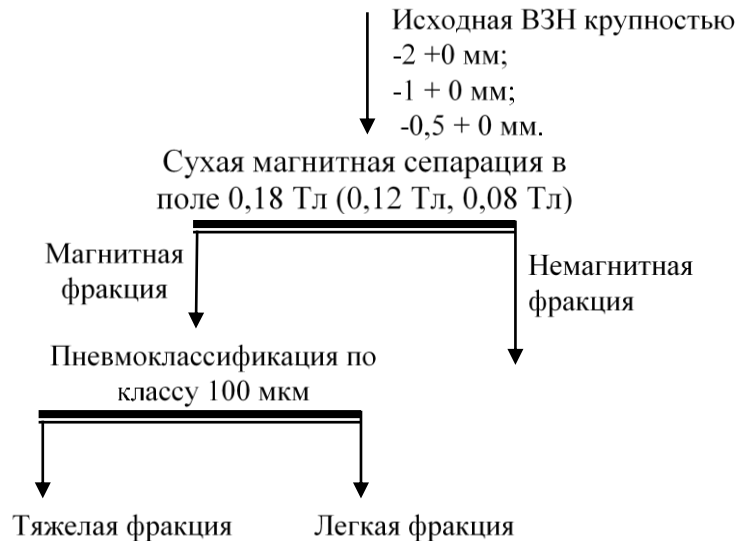


Рисунок 5.4 – Схема экспериментов по магнитной сепарации и пневмокласификации восстановленной закиси никеля

Сравнение показателей работы обогатительных аппаратов при разделении на два продукта (магнитная и немагнитная фракции) проводилось, исходя из эффективности обогащения E (формула Ханкока-Луйкена 5.1), предложенной еще в 1918 году [190]. Формула Ханкока-Луйкена имеет вид:

$$E = (\varepsilon - \gamma_k) / (100 - \alpha) \cdot 100 \quad (5.1)$$

Где γ_k – выход концентрата, %; ε – извлечение целевого компонента в концентрат, %; α – содержание целевого компонента в исходном питании, %. Следует отметить, что в нашем случае рассматривая эффективность выделения из восстановленной закиси никеля балластных примесей в виде угля и диоксида кремния концентратом будет считаться немагнитная фракция питания процесса разделения и легкая фракция пневмокласификации.

Принято считать, что сепарационный процесс является эффективным, если критерий эффективности, рассчитанный по формуле Хэнкока – Луйкена, составляет более 50%, весьма эффективным - более 75% и неэффективным при <25%.

В общей сложности было проведено 9 тестов, для расчета технологических балансов проанализировано 27 продуктов. Результаты балансовых расчетов и эффективность процесса разделения относительно балластных компонентов представлены на рисунках 5.5-5.7.

Согласно представленным на рисунке 5.5 данным, наблюдается снижение извлечения общего никеля в магнитный продукт с понижением магнитной индукции, при этом крупность питания не влияет на показатели извлечения никеля в магнитную фракцию. Эффективность магнитной сепарации в большей степени влияет на содержание углерода и в меньшей степени диоксида кремния в магнитном продукте, кроме того, следует отметить, что со снижением

магнитной индукции эффективность магнитной сепарации по удалению диоксида кремния растёт.

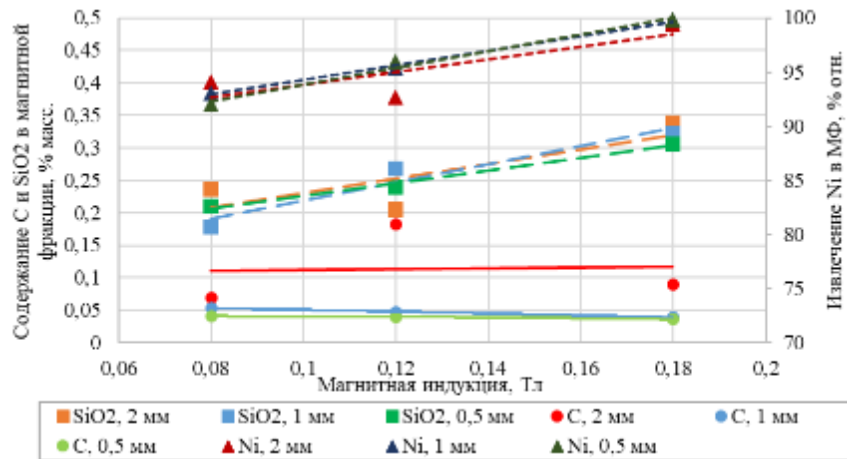


Рисунок 5.5 - Зависимость содержания балластных примесей и извлечение Ni в магнитный продукт в полях с различной магнитной индукцией

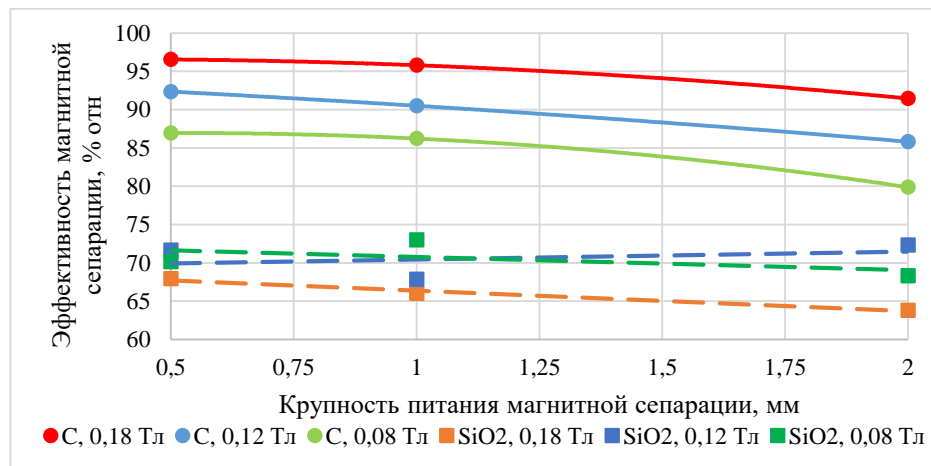


Рисунок 5.6 – Эффективность магнитной сепарации, рассчитанная по Хэнкоку- Луйкену в отношении выделения балластных примесей в немагнитный продукт.

Учитывая приоритет получения НППП, максимально обедненного в первую очередь диоксидом кремния, во вторую – углеродом, не допуская неоправданного снижения извлечения никеля в магнитный продукт, рекомендуется принять в качестве оптимального значения индукцию магнитного поля в 0,12 Тл. Учитывая близкие значения извлечений никеля, можно говорить о том, что питание магнитной сепарации может быть загрублено (с 0,5 мм) до крупности не более 1 мм без потери качества магнитного продукта и с минимальным сокращением извлечения полезных компонентов в него. Вышесказанное подтверждается расчётом эффективности процесса разделения относительно балластных примесей в зависимости от крупности питания сепаратора. На рисунке 5.6 приведена зависимость эффективности обогащения для углерода и диоксида кремния от крупности питания сепаратора для различных показателей магнитной индукции на поверхности барабана сепаратора. Эффективность разделения относительно углерода значительно выше эффективности разделения относительно

диоксида кремния. Для обоих балластных компонентов отмечается снижение эффективности разделения с ростом крупности питания, причем это снижение менее выражено для диоксида кремния по сравнению с углеродом. В среднем по результатам проведенных экспериментов снижение эффективности разделения при повышении крупности с 0,5 мм до 1 мм снижается на 1-2%, для углерода и 2-4% для SiO_2 и с 0,5 мм до 2 мм снижается на 5-7%, для углерода и 0-4% для SiO_2 .

На рисунке 5.7 показана эффективность пневмокласификации при различной индукции поля и крупности питания. Эффективность применения пневмокласификации оценивалась по классу крупности -100 мкм как операции доводки магнитной фракции в части доизвлечения из неё балластных примесей.

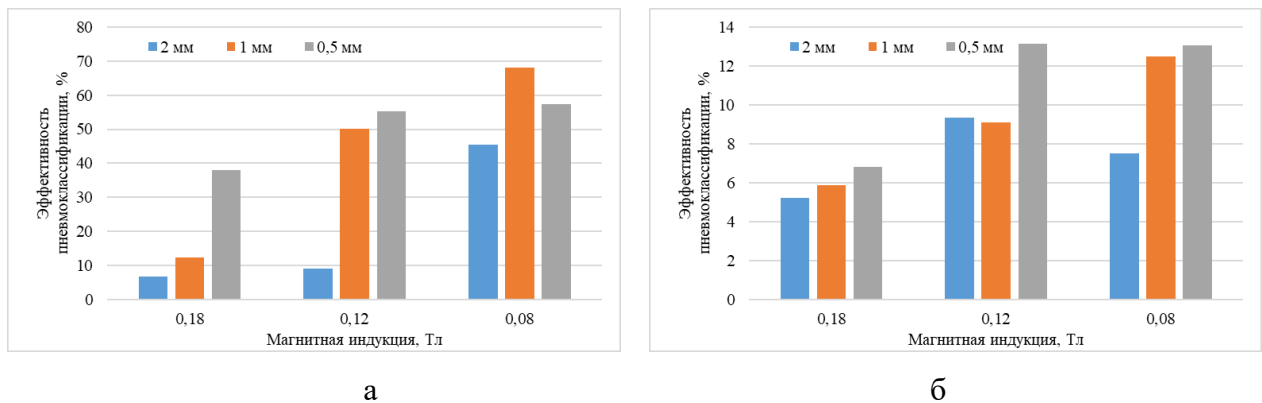


Рисунок 5.7 – Эффективность пневмокласификации по выделению углерода (а) или диоксида кремния (б) в легкий продукт в зависимости от магнитной индукции на поверхности барабана в предшествующем процессе магнитной сепарации.

Процесс может считаться эффективным только в отношении выделения углерода и только в относительно слабых полях и при пониженной крупности питания процесса предшествующей магнитной сепарации. В отношении диоксида кремния процесс не эффективен для всех условий переработки (критерий эффективности составляет в максимуме 13,16%). Таким образом, пневмокласификация не может быть рекомендована в качестве операции доводки магнитного продукта, так как эффективность удаления диоксида кремния невысокая и не превышает 13,2%. Приемлемые показатели эффективности сепарации относительно углерода достигаются при условии мелкого (до крупности менее 1 мм) дробления и в слабых полях (менее 0,12 Тл). При этом ввод технологическую цепочку операции пневмокласификации практически не влияет на качество магнитного продукта.

Помимо аналитических методов исследования были использованы и локальные методы исследования такие, как РЭМ-РСМА. На исследование поступило три образца: исходный продукт, магнитная фракция и легкая фракция (продукт пневмокласификации).

При анализе исходной пробы установлено, что основу пробы образует металлическая масса на основе никеля (с существенными примесями меди, железа и кобальта) (рис.5.8.а-б). Отмечается, что состав металлической фазы, которая составляет не менее 90% об., стабилен и не зависит от крупности и морфологии частиц.

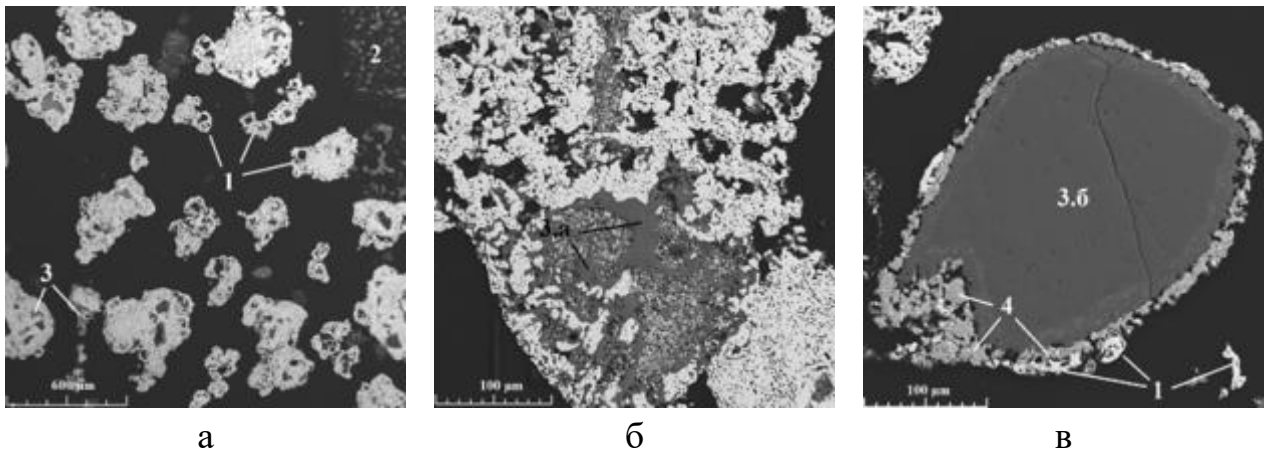
В объеме металлической массы присутствуют микронные и субмикронные включения остаточных оксидов системы «Ni-Fe-O»), доля которых составляет не более 1% об. Признаков вторичного окисления металла не отмечается (все оксидные компоненты локализованы во внутреннем объеме металлических частиц и представляют собой остаточные невосстановленные оксиды никелевого огарка).

Также в образце присутствуют силикатные компоненты, содержание которых находится на уровне первых объемных процентов. По составу и морфологии силикатные составляющие можно разделить на два типа:

- наиболее распространённая форма - плавленные перекристаллизованные структуры (рис.5.8.б). Преимущественно представлены в форме мелких включений в объеме металлической массы.

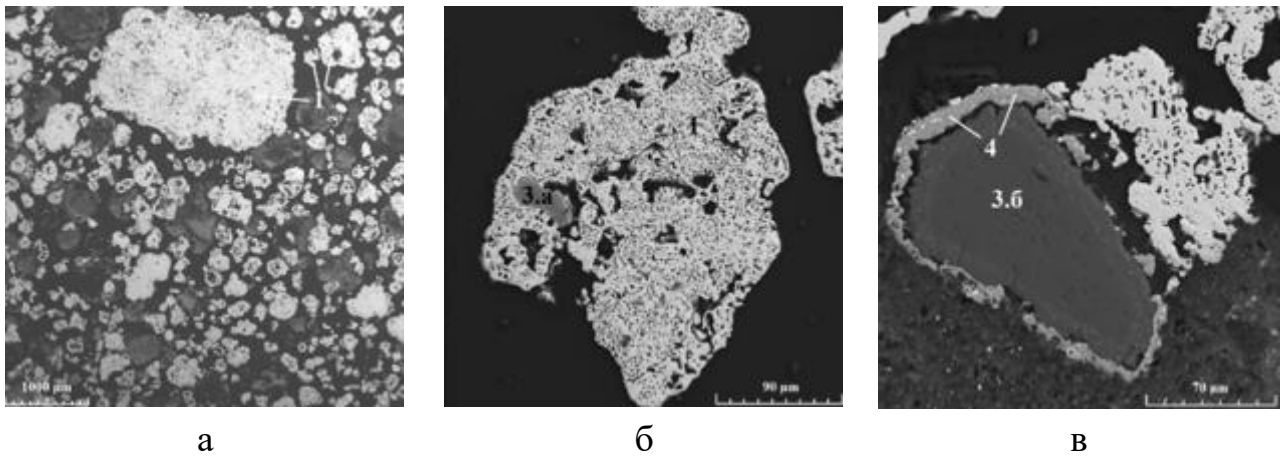
- свободные силикатные частицы без признаков плавления крупностью от 50 мкм до 400 мкм (рис.5.8.в). По составу соответствуют минералам зольной составляющей восстановителя (в основном – кварц, калиевый полевой шпат, магнетит).

Помимо металлической и оксидных составляющих в материале присутствуют крупные (до 2,5 мм) частицы восстановителя (с включениями зольных силикатных компонентов) (рис.5.8.а), содержание которых находится также на уровне первых объёмных процентов.



1 – металлическая фаза, 2 – частицы восстановителя (с включениями зольных компонентов), 3 – силикатные составляющие (а – плавленная силикатная (шлаковая) масса, б – реликтовые силикатные составляющие без признаков плавления), 4 – силикат на основе никеля

Рисунок 5.8 – Общий вид (а) и строение (б-в) пробы исходного питания



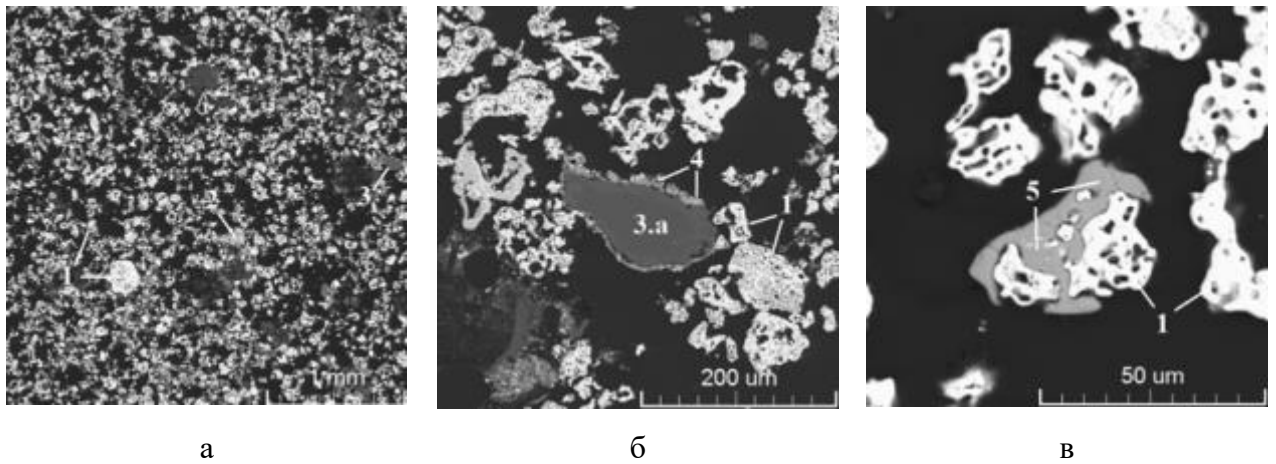
1 – металлическая фаза, 2 – магнетит, 3 – силикатные составляющие (а – плавленная силикатная (шлаковая) масса, б – реликтовые силикатные составляющие без признаков плавления), 4 – силикат никеля, 5 – остаточные оксиды

Рисунок 5.9 – Общий вид (а) и строение пробы (б-г) магнитной фракции основной сепарации

Основу пробы магнитной фракции основной сепарации представляют частицы крупностью от 10 мкм до 2,5 мм (рис.5.9.а). Данная проба характеризуется минимальным содержанием «примесных» компонентов и, соответственно, максимальным – металлической массы. Так, суммарная объемная доля остаточных оксидов, представленных микронными прожилками в металлической фазе, силикатных компонентов, ассоциированных с металлической фазой (рис.5.9.б), и единичные зольные реликты (рис.5.9.в) составляют не более 2% об. суммарно.

Образец легкой фракции по вещественному составу приближается к исходному материалу, однако заметно отличается от такового по гранулометрическому. Так, крупность составляющих варьируется от 10 мкм до 0,4 мм (рис.5.10.а). Средний размер не превышает 80 мкм. Содержание остаточных оксидов и силикатных компонентов не превышает первых объемных процентов, а морфология и их распространённость совпадает с исходной пробой. Также в материале отмечается порядка 2% об. магнетита, что заметно больше, чем в исходном материале.

Проведенные исследования методами РЭМ-РСМА подтвердили ранее полученные выводы об эффективности магнитной сепарации, а также показали, что состав легкой фракции, получаемой при пневмокласификации, практически не отличается от состава исходного продукта. Отличительной чертой данного продукта является его фракционный состав, средний размер которого не превышает 80 мкм.



1 – металлическая фаза, 2 – магнетит, 3 – силикатные составляющие (а – реликтовые силикатные составляющие без признаков плавления), 4 – силикат никеля, 5 – остаточные оксиды

Рисунок 5.10 – Общий вид (а) и строение (б-в) пробы легкой фракции

Проведем анализ работы контрольной магнитной сепарации, представленной в следующем разделе.

5.2.2 Работа контрольной сепарации

Испытания по работе контрольной магнитной сепарации проводились в три этапа, на первом этапе в лабораторных условиях имитировали работу текущей схемы переработки при условии реализации контрольной сепарации. На втором этапе проверялась работа двухстадийной схемы переработки при классе крупности -1,0 мм. На третьем этапе проводились исследования с классом крупности -2,5 мм. [107] Решение увеличить крупность питания сепараторов до -2,5 мм было вызвано более жесткими требованиями по содержанию мелких классов крупности предъявляемыми к продукту магнитной сепарации при реализации хлорного выщелачивания металлического порошка.

На первом этапе проба массой 500 кг в полном объеме доводилась до крупности -10 мм при помощи валковой дробилки ДВГ 200 x 125 в замкнутом цикле с грохочением по указанному классу крупности; после чего сокращалась в четыре раза. Контрольная проба ВЗН продукта трубчатых печей крупностью менее 10 мм подвергалась магнитной сепарации с имитацией условий работы промышленного сепаратора при соблюдении следующих режимных параметров: магнитная индукция - 0.24 Тл, скорость вращения барабана 88,5 об/мин, расход материала из питающего бункера подбирался исходя из геометрических параметров барабана промышленного и лабораторного сепараторов и должен был симулировать подачу ВЗН с расходом 25 т/ч для промышленных условий. Далее немагнитная фракция подвергалась контрольной сепарации в идентичных условиях с основной сепарацией. Полученные в ходе основной и контрольной

сепарации продукты собирались в отдельные контейнеры и взвешивались, после чего анализировались методами аналитической химии и РЭМ-РСМА.

На втором этапе исследования проба массой 500 кг в полном объеме дробилась до крупности менее 1 мм на валковой дробилке ДВГ 200 x 125 в замкнутом цикле с грохочением, затем производилось сокращение и выделение 100 кг материала в качестве контрольного образца. Сформированная 400 кг проба крупностью -1 мм подвергались основной магнитной сепарации в следующем режиме: магнитная индукция на поверхности барабана сепаратора 0,12 Тл, скорость вращения барабана 90 об/мин. На этом этапе нарабатывалась немагнитная фракция ВЗН для дальнейших исследований и подтверждались ранее полученные показатели качества магнитного продукта. Полученная немагнитная фракция усреднялась и делилась на 6 частей массой примерно по 5 кг каждая, после чего было реализовано две серии экспериментов по три опыта в каждой серии: в поле с индукцией 0,12 Тл и 0,18 Тл при скорости вращения барабана сепаратора 55, 65 и 75 об/мин.

На третьем этапе также проба массой 500 кг измельчалась до класса -2,5 мм на аналогичном оборудовании после чего производилось сокращение до 250 кг. Режим основной сепарации предполагал индукцию магнитного поля на поверхности барабана в первом случае 0,12 Тл, а во втором 0,18 Тл, частоту вращения 90 об/мин. Продукты сепарации собирались в отдельные контейнеры и взвешивались. Немагнитная фракция каждой из основных сепараций разделялась на роторном делителе на 2 продукта, которые подвергались контрольной сепарации в режиме: один в поле 0,18 Тл с частотой вращения барабана 55 и 75 об/мин. Технологические схемы трех этапов работы представлены на рисунке 5.11, химический состав исследуемых проб трех этапов представлен в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Содержание основных компонентов в исследуемых пробах этапов 1-3

Этап	Класс крупности, мм	% масс.						
		Ni _{общ.}	Ni _{мет.}	Cu	Fe	S	C	SiO ₂
1	0-10,0	81,42	80,56	4,99	4,25	0,05	4,65	0,81
2	0-1,0	81,58	80,43	5,78	4,29	0,08	4,03	1,00
3	0-2,5	81,90	80,46	5,05	4,25	0,03	4,49	0,84

В общей сложности было проведено 9 тестов, в каждом из тестов анализировались продукты как основной, так и контрольной сепарации. Для расчета технологических балансов проанализировано 43 продукта. Результаты балансовых расчетов и эффективность процесса разделения относительно балластных компонентов представлены на рисунках 5.12-5.14.

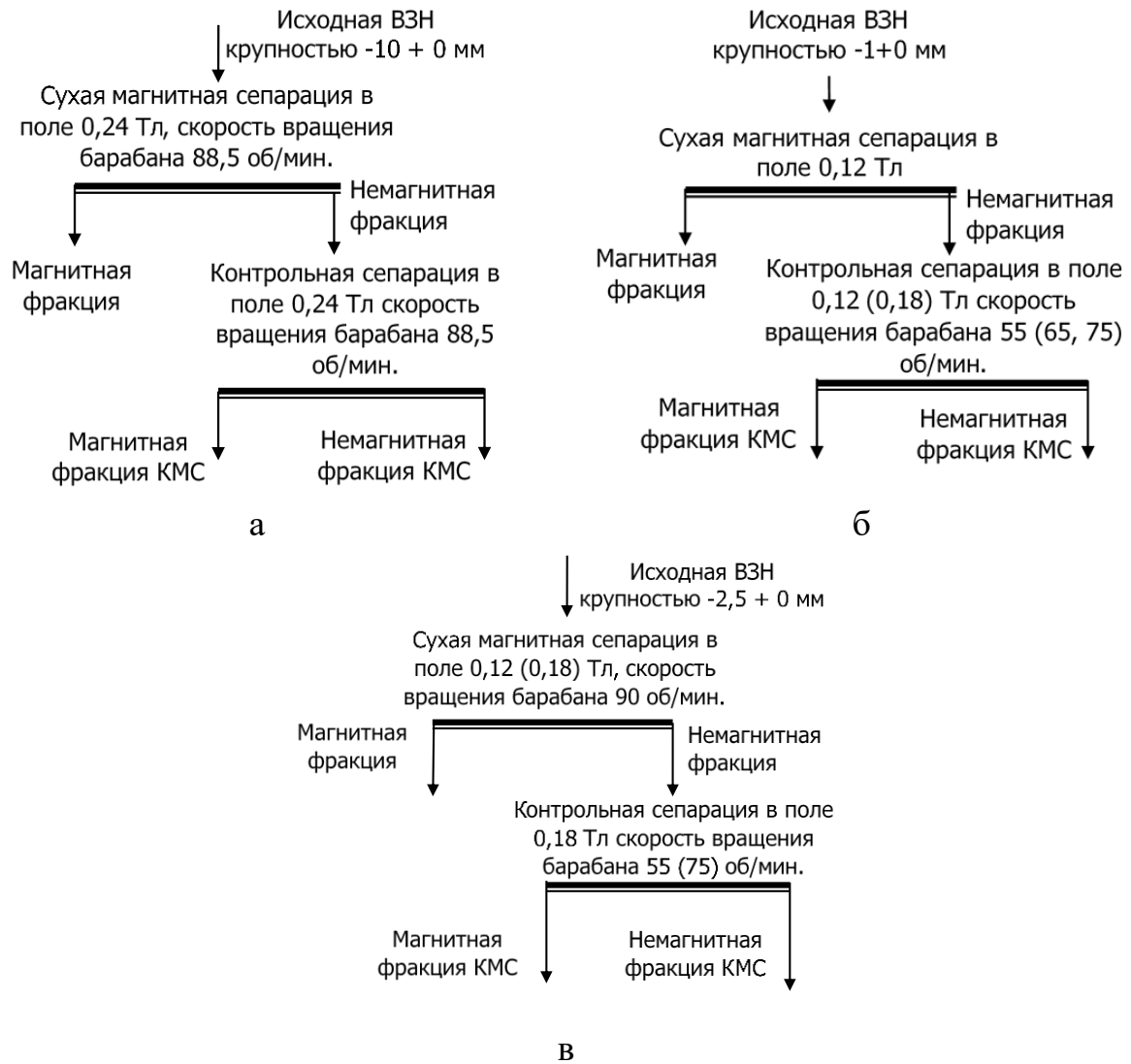


Рисунок 5.11 – Схема экспериментов по определению оптимальных параметров работы сепараторов контрольной магнитной сепарации: а – этап 1 класс -10 мм; б –этап 2 класс -1,0 мм; в – этап 2 класс -2,5 мм

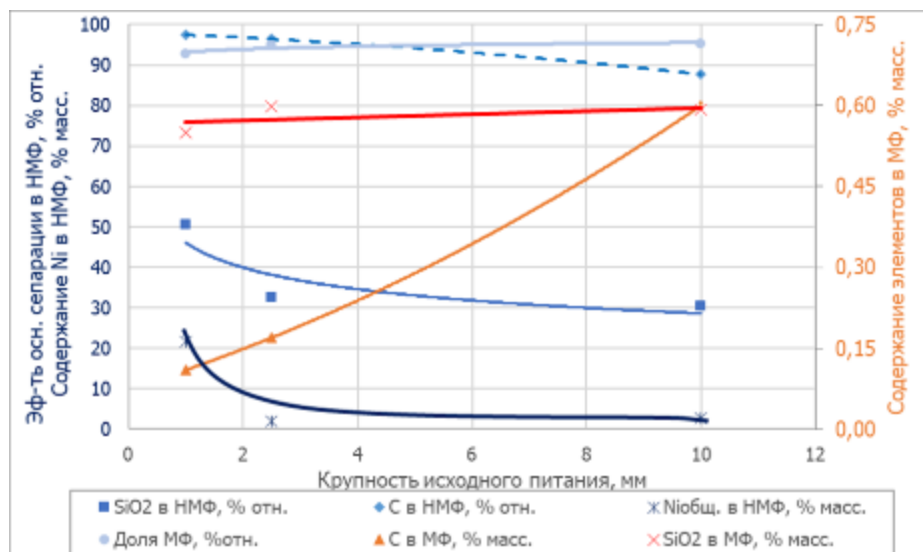


Рисунок 5.12 – Эффективность основной магнитной сепарации от крупности исходного питания

На рисунке 5.12 представлены показатели разделения основной магнитной сепарации от класса крупности питания, как видно из представленных графиков показатели разделения существенно ухудшаются при переходе на класс крупности -10 мм, доля углерода в МФ растет в 3-5 раз до содержания 0,6% масс., а показатели эффективности удаления углерода и диоксида кремния снижаются с 97,5% отн. и 50,6% отн. до 87,7% отн. и 30,5% отн., соответственно. В тоже время отмечается рост концентрации никеля в НМФ при уменьшении крупности исходного питания, извлечение никеля в МФ снижается с 99,9% отн. до 98,0% отн. при переходе на класс крупности -1 мм.

Рассмотрим показатели эффективности работы контрольной магнитной сепарации при крупности исходного питания -1 мм, силе магнитного поля и частоты вращения основной сепарации на уровне 0,12 Тл и 90 об/мин, при работе контрольной магнитной сепарации на 0,12 Тл и 0,18 Тл при частоте вращения барабана контрольной сепарации 55, 65 и 75 об/мин. Результаты представлены на рисунке 5.13.

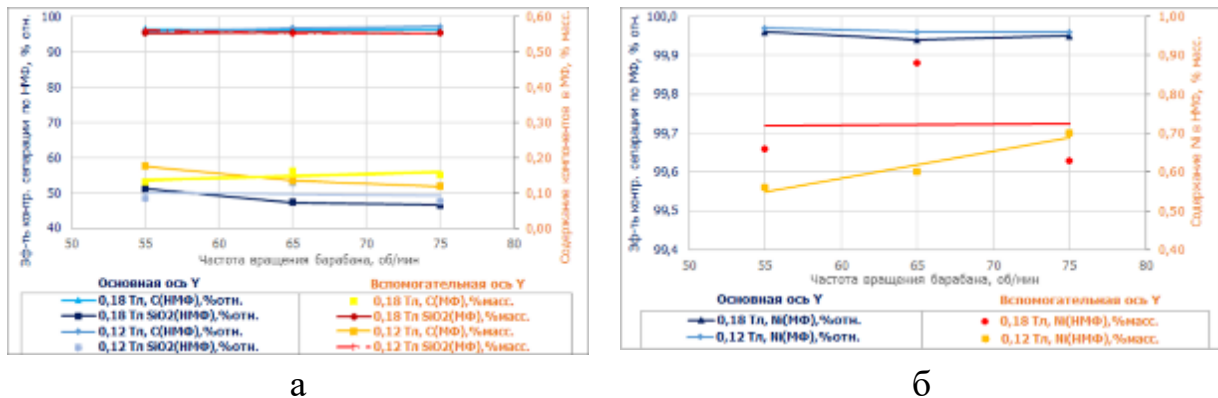


Рисунок 5.13 – Эффективность контрольной магнитной сепарации от частоты вращения барабана для класса крупности -1 мм. а – поведение SiO_2 и C; б – поведение Ni

По представленным на рисунке 5.13 графикам можно сказать, что применение контрольной магнитной сепарации положительно влияет на показатели извлечения никеля в магнитный продукт, которое составляет свыше 99,9 % отн. и практически не зависит от скорости вращения барабана контрольной сепарации. Снижение частоты вращения барабана контрольной магнитной сепарации незначительно повышает показатели извлечения никеля в магнитный продукт для поля с индукцией 0,12 Тл и увеличивает показатели эффективности удаления диоксида кремния для магнитных полей 0,12 и 0,18 Тл. Влияние на показатели удаления углерода из магнитной фракции не установлено.

Ужесточение требования к фракционному составу продукта магнитной сепарации привело к необходимости проведения дополнительных испытаний по увеличению крупности питания до 2,5 мм и сохранению показателей разделения. На рисунке 5.14 представлены результаты проведенных исследований для следующих режимных параметров: частота вращения барабана основной сепарации 90 об/мин, индукция магнитного поля основной сепарации 0,12 Тл

и 0,18 Тл, магнитное поле контрольной сепарации 0,18 Тл, частота вращения барабана 55 и 75 об/мин.

Представленные на рисунке 5.14 результаты показывают, что при работе основной сепарации на 0,12 Тл показатели разделения несколько выше, чем при использовании более сильного магнитного поля 0,18 Тл, т.е. эффективность удаления углерода и диоксида кремния выше при сохранении показателей разделения никеля. Изменение скорости вращения барабана контрольной сепарации влияет некоторым образом на концентрацию никеля в немагнитной фракции, при этом не оказывая значительного влияния на показатели извлечения никеля в магнитный продукт.

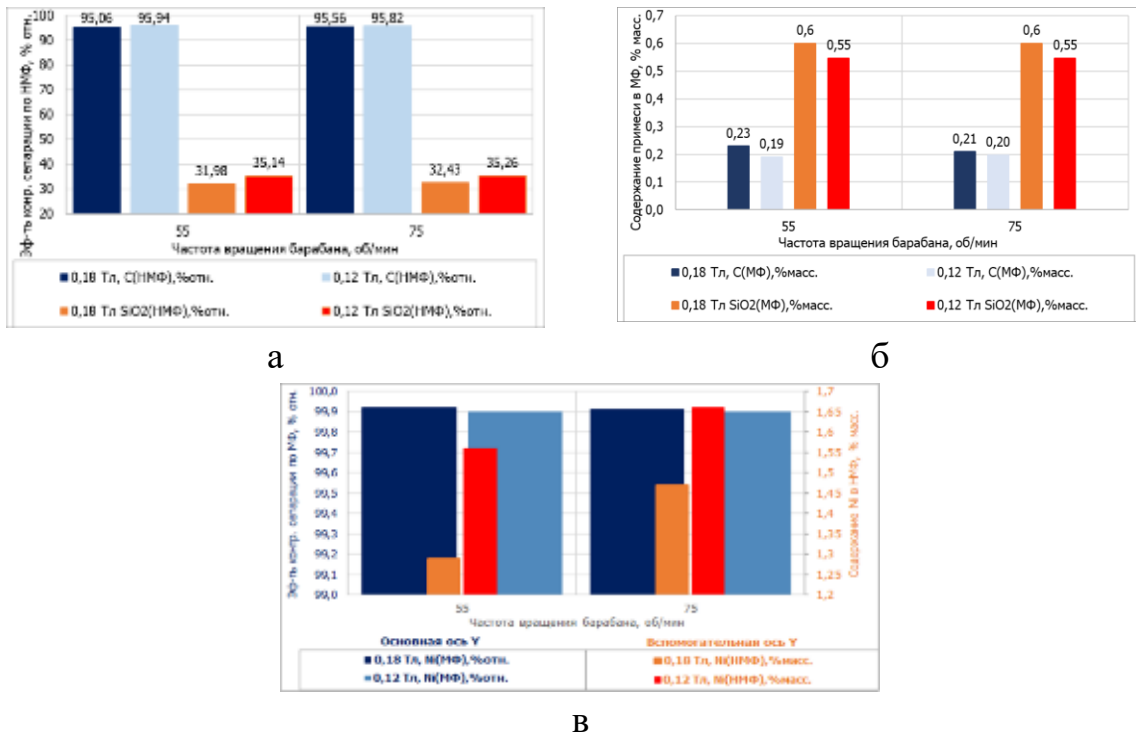


Рисунок 5.14 – Эффективность контрольной магнитной сепарации от частоты вращения барабана для класса крупности -2.5 мм. . а – поведение SiO₂ и С в НМФ; б – содержание SiO₂ и С в МФ; в – поведение Ni

Таким образом, оптимальными показателями работы двухстадийной магнитной сепарации разделения никелевого порошка трубчатых печей является:

- крупность питания -2,5 мм;
- поле магнитной индукции основной сепарации 0,12 Тл при частоте вращения барабана 90 об/мин;
- поле магнитной индукции контрольной сепарации 0,18 Тл при частоте вращения барабана в пределах 55-75 об/мин.

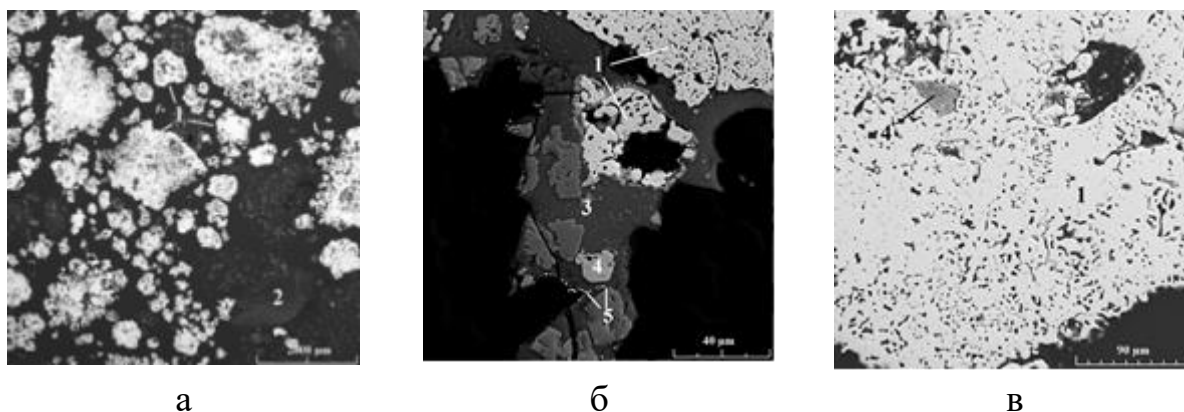
Продукты сепарации также подвергались исследованию методами РЭМ-РСМА. В качестве объекта исследований методами РЭМ-РСМА, рассматривались пробы класса -2,5мм из

третьего этапа работы. Анализ исходных продуктов методами аналитической химии представлен в таблице 5.11.

Таблица 5.11 - Содержание основных компонентов по данным химического анализа

Тип материала	Выход продукта	Массовая доля, %							
		Ni _{общ}	Ni _{мет}	Cu	Fe	S	C	SiO ₂	Zn
Исходный материал	100,00	82,6	80,9	5,09	4,27	0,001	4,41	0,68	0,0025
МФ (основная сепарация)	94,44	85,8	85,6	5,28	4,36	0,005	0,001	0,38	0,0029
МФ (контрольная сепарация)	0,57	64,4	59,3	4,07	5,56	0,066	16,7	1,97	0,0027
НМФ (контрольная сепарация)	4,99	1,56	0,092	0,136	0,610	0,335	86,0	5,63	0,0023

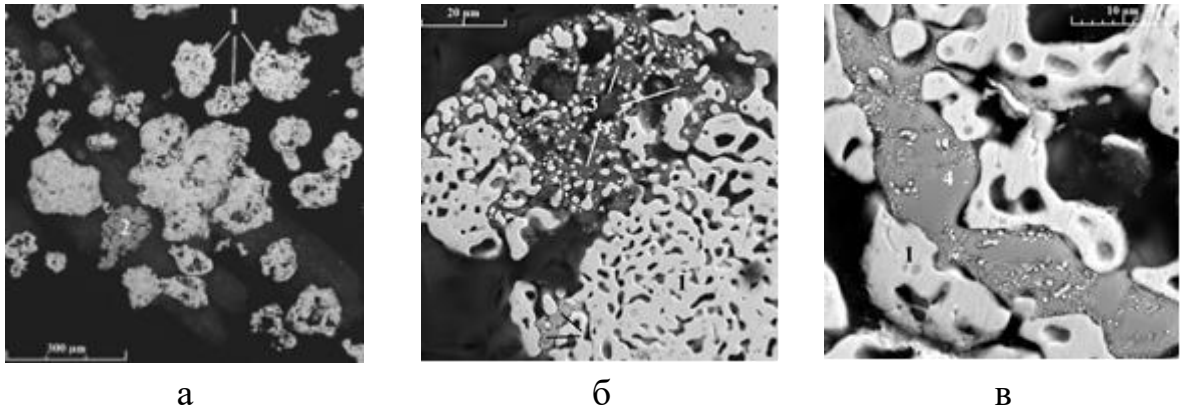
Проба исходного материала трубчатых печей (рисунок 5.15) образована частицами вариативного состава и морфологии крупностью от 20 мкм до 2,5 мм. Основа представлена металлическим никелем с примесями меди, железа и кобальта. В объеме металлической массы также присутствуют микронные и субмикронные включения остаточных оксидов на основе системы Ni-Fe-O, доля которых не превышает 1 % об. Силикатные компоненты в пробе металлического порошка представлены в виде плавленых перекристаллизованных структур в качестве мелких включений в объеме металлической массы, а также в виде свободных силикатных частиц без признаков плавления на основе магнетита и кварца. В пробе также отмечены крупные частицы восстановителя, доля которых составляет порядка первых объемных процентов.



1 – металлическая фаза, 2 – частицы восстановителя (с включениями зольных компонентов), 3 – силикатные составляющие 4 – остаточные оксиды, 5 – фазы на основе драгоценных металлов

Рисунок 5.15 – Общий вид и строение пробы исходного питания

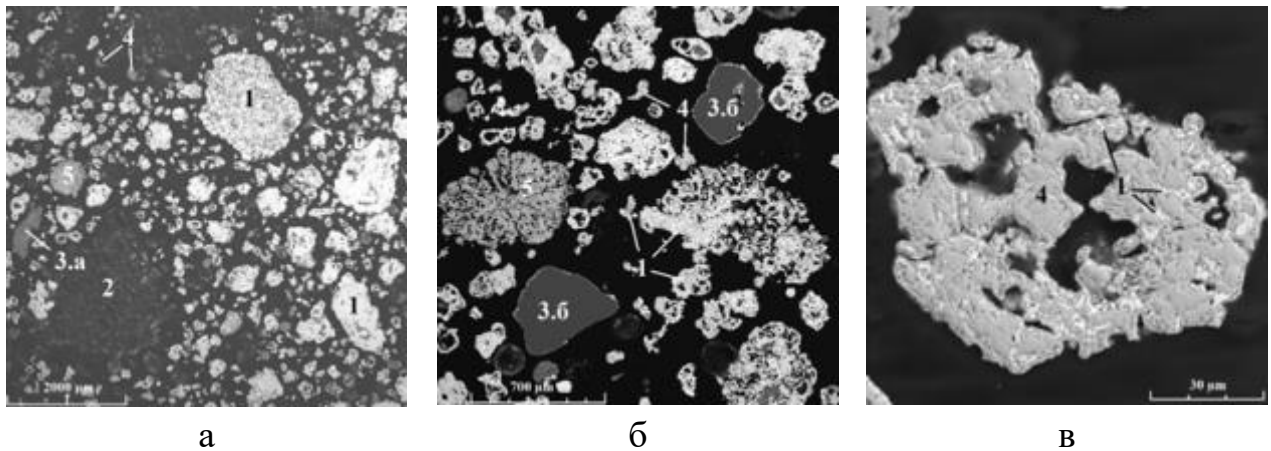
Продукты основной магнитной сепарации также представлены частицами до 2,5 мм. (рисунок 5.15). Проба характеризуется незначительным количеством примесных компонентов, таких как плавленая силикатная масса, зольные компоненты угля и остаточных оксидов, сумма которых не превышает 2% об.



1 – металлическая фаза, 2 – магнетит, 3 – силикатные, 4 – остаточные оксиды

Рисунок 5.16 – Общий вид (а) и строение пробы (б-г) магнитной фракции основной сепарации

Магнитный продукт контрольной сепарации также, как и исходный продукт представлен крупностью от 20 мкм до 2мм. По вещественному составу настоящий образец существенно отличается от пробы исходного материала, в котором содержание металлической массы снижается до 60-65 % об. В исследуемом образце присутствуют крупные свободные оксидные частицы, оксидно-металлические структуры с преобладанием оксидной составляющей. Содержание частиц восстановителя возросло до 20%об. Присутствуют пористые частицы магнетита крупностью до 1мм (до 5 % об), который соответствует по морфологии компонентам золы угля. Микроизображения представлены на рисунке 5.17.

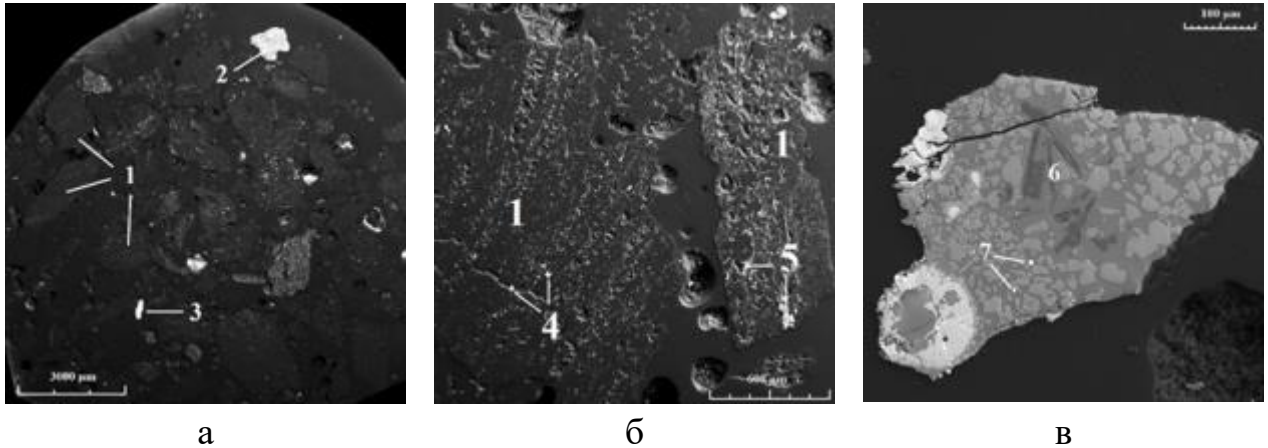


1 – металлическая фаза, 2 – частицы восстановителя (с включениями зольных компонентов), 3 – силикатные составляющие (а – плавленная силикатная (шлаковая) масса, б – реликтовые силикатные составляющие без признаков плавления), 4 – остаточные оксиды, 5 – зольный магнетит

Рисунок 5.17 – Общий вид и строение пробы магнитного продукта контрольной сепарации

Образец немагнитной фракции контрольной сепарации (рисунок 5.18) резко неоднороден по составу. Наиболее распространённым типом частиц являются многофазные структуры на основе восстановителя, в объеме которого сугубо подчинённо присутствуют зольные компоненты широкого диапазона состава (от кварца и силикатов/алюмосиликатов до шпинелей

и карбонатов кальция-магния). Помимо минеральных частиц, в объеме материала в количестве не более первых объемных процентов обнаружены частицы металлической фазы с развитой поверхностью крупностью до 100мкм, плавленные силикатные (шлаковые) частицы крупностью до 0,5 мм, а также единичные микронные корольки на основе Cu-Ni (с существенными примесями драгоценных металлов).



1 – восстановитель, 2 – кварц, 3 – металлическая фаза на основе никеля, 4 – силикатные/алюмосиликатные минералы, 5 – магнетит, 6 – плавленная силикатная (шлаковая) масса, 7 – фазы на основе драгоценных металлов

Рисунок 5.18 – Общий вид и строение пробы немагнитная фракция контрольной сепарации

Проведенные исследования методами РЭМ-РСМА подтвердили ранее полученные выводы об эффективности применения контрольной магнитной сепарации, которая доизвлекает из немагнитной фракции основной магнитной сепарации запутавшиеся металлические частицы никелевого порошка при сохранении требований по содержанию углерода и шлакообразующих компонентов (оксидов металлов и полуметаллов) в конечном продукте.

На основании выполненных исследований определены параметры двухстадийной магнитной сепарации, схема которой представлена на рисунке 5.19

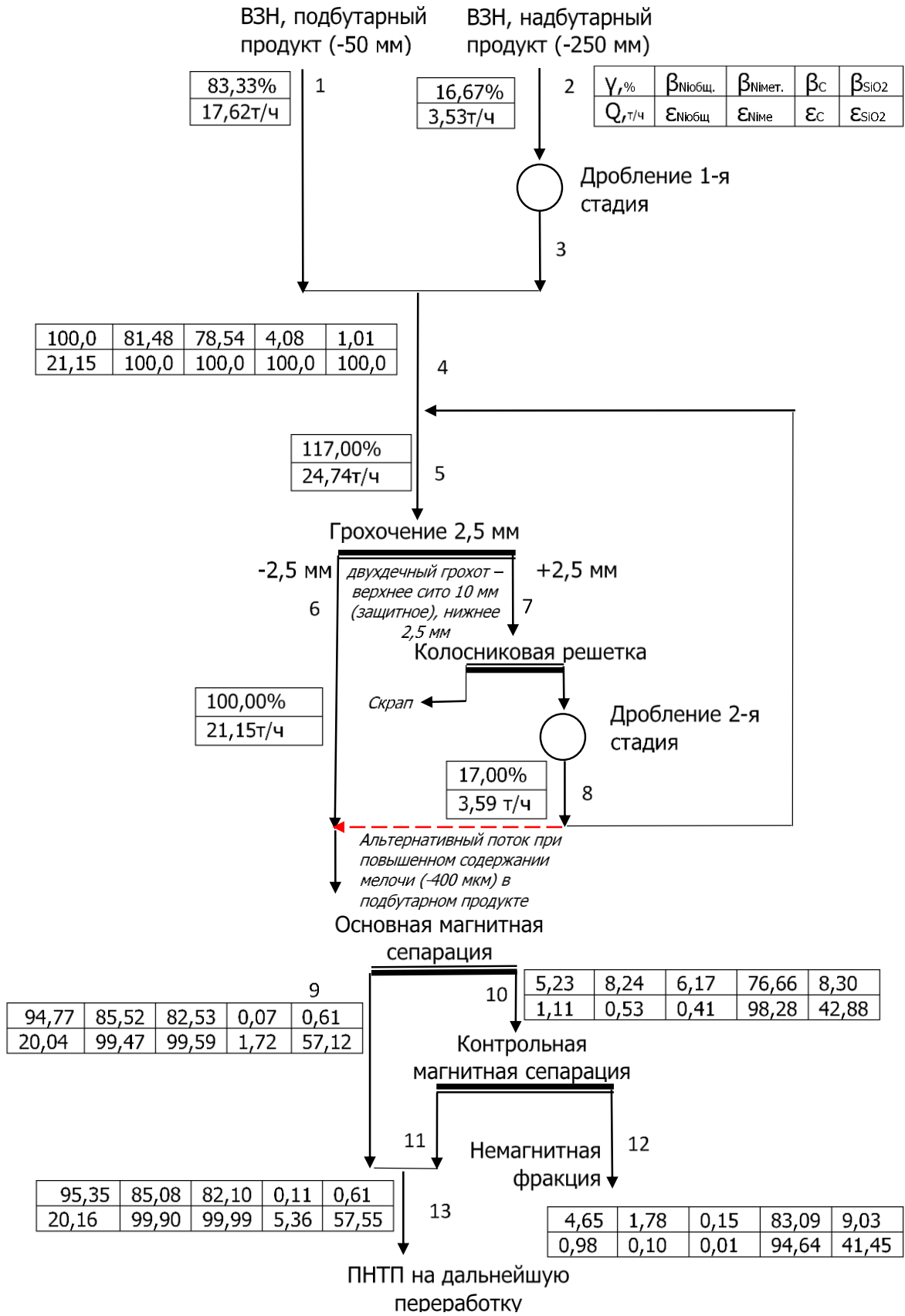


Рисунок 5.19 – Усовершенствованная качественно-количественная схема подготовки ПНТП

Анализ полученных результатов позволяет оценить годовые показатели переработки никелевого порошка, определить доли потерь и произвести сравнение текущей и перспективных схем.

Для определения эффективности применения перспективного участка магнитной сепарации, необходимо рассмотреть существующую схему оборота никеля, поступающего вместе с НМФ в технологическую цепочку Норильского Никеля. Оборот никеля НМФ в производстве представлен на рисунке 5.20.

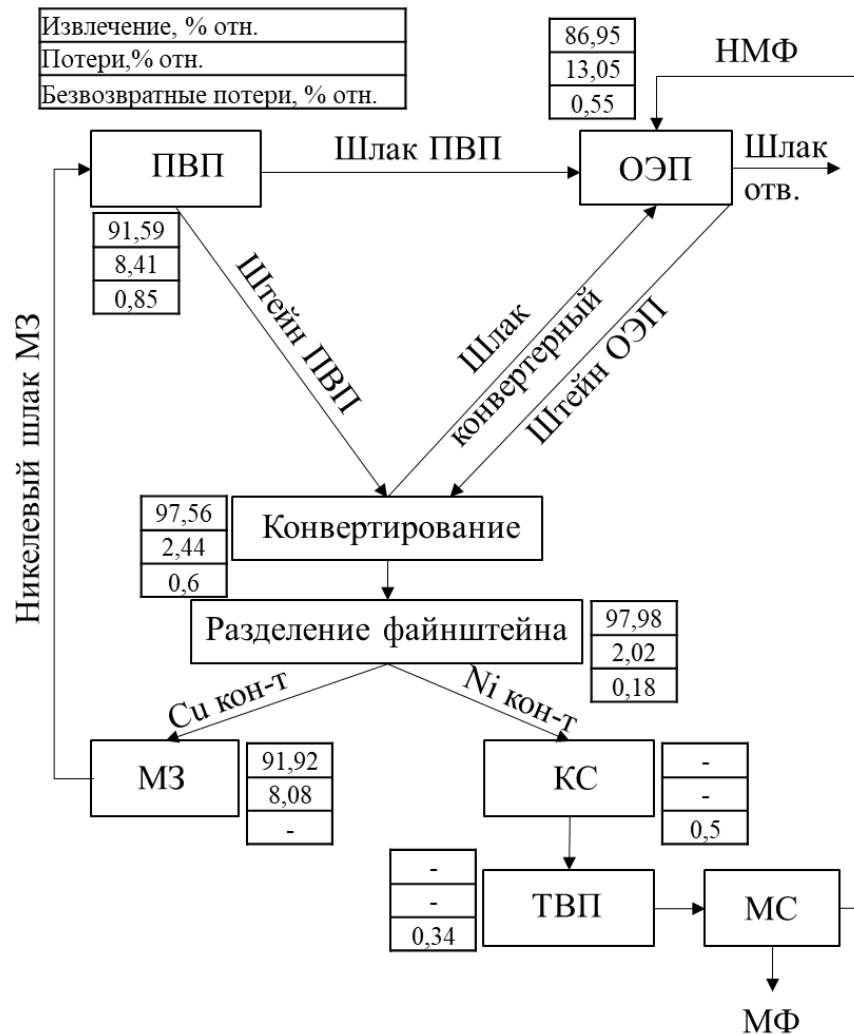


Рисунок 5.20 – Схема движения оборотного никеля НМФ

На представленной схеме показаны показатели безвозвратных потерь, а также распределение в донную фазу и шлаки. Часть никеля при разделении фанштейна переходит в медный концентрат и вовлекается на переработку на Медном заводе (МЗ). Образующийся оборотный никелевый шлак возвращается в никелевое производство на Надеждинский металлургический завод (НМЗ). Каждый передел характеризуется определенной долей безвозвратных потерь Ni. Проведя серию итерационных расчетов возможно определить долю потерь никеля в производственной цепочке при его обороте, которая составляет 15,22% отн. Рассмотрим сравнительные показатели работы перспективного участка магнитной сепарации и

существующего в настоящее время. Результаты расчетов для существующего и перспективного участка магнитной сепарации представлены в таблице 5.12.

Таблица 5.12 – Сравнительные показатели работы двух участков магнитной сепарации

Наименование	Размерность	Существующая схема ⁴	Сущ. схема (уточненные данные)	Предлагаемая схема
Годовой объем производства никеля	т	130000	130000	130000
Содержание Ni в Магнитной фракции	% масс	85,4	85,4	85,08
Содержание Ni в НМФ	% масс	14,8	17,56	1,78
Доля МФ	% отн.	92,12	91,47	95,35
Доля НМФ	% отн.	7,88	8,53	4,65
Содержание SiO ₂ в Магнитной фракции	% масс.	0,75	0,75	0,6
Содержание SiO ₂ в НМФ	% масс.	6,31	6,31	9,03
Содержание С в Магнитной фракции	% масс.	0,25	0,23	0,11
Содержание С в НМФ	% масс.	65,84	65,84	83,09
Крупность >5 мм	% отн.	9,63	9,63	100 (-2,5 мм)
Потери никеля с НМФ (оборот)	% отн.	1,46	1,88	0,10
Потери никеля с НМФ (оборот)	т/год	1899	2493	133
Безвозвратные потери никеля в результате оборотного производства	т/год	425	379	20
Дельта потерь производства Ni	т/год	359		

По произведенным расчетам, модернизация участка магнитной сепарации позволит снизить оборот никеля в количестве 2360 т в год, а сумма безвозвратных потерь в результате оборота никеля снизится на 359 т в год.

5.3 Экономическая эффективность предлагаемых мероприятий

В настоящем подразделе производится технико-экономическое обоснование сравнительной экономической эффективности реализации проекта «РЦ. ОО. Модернизация передела подготовки НПП» на площадке Мончегорск.

Стоимостные параметры рассчитаны в стоп-ценах 2022 г. и номинальных (прогнозных ценах) в рублевом исчислении в соответствии с макроэкономическим ценовым прогнозом ПАО «ГМК «Норильский никель» (шаблон версии 5.11.0).

⁴ Первоначальные результаты были представлены в публикации Рябушкин М.И. Анализ работы и модернизация участка магнитной сепарации в новой технологии переработки никелевого концентрата в АО «Кольская ГМК». Часть 2// М.И. Рябушкин, А.Л. Романов, Р.А. Пахомов Л.Б. Цымбулов; -М. изд. «Руда и Металлы»; - Цветные металлы; - № 4 – 2022 год; – стр. 12-19.

При определении финансовых результатов налог на прибыль принят в соответствии с действующим законодательством в размере 20% от налогооблагаемой прибыли, налог на имущество – 2,2%.

Источник финансирования инвестиционной деятельности – собственные средства.

В качестве основного критерия для оценки сравнительной эффективности вариантов принят чистый дисконтированный доход (ЧДД) при ставке дисконта 20%.

В разделе 5.3.1 представлены технико-экономические показатели экономической эффективности по изменяющимся статьям затрат по сравнению с существующим положением за период рассмотрения в условиях стоп цен и номинальных цен в рублевом исчислении.

5.3.1 Техничко-экономические показатели сравнительной экономической эффективности

В таблице 5.13 представлены технико-экономические показатели проведенной работы.
Таблица 5.13 – Техничко-экономические показатели эффективности

Наименование показателя	Ед. изм.	Расчетный год		Период 14 лет	
		стоп-цены	номинальные цены	стоп-цены	номинальные цены
I. Товарная продукция в натуральном выражении - никель	т	359,0	359,0	4 308,0	4 308,0
II. Стоимость товарной продукции	млн руб.	573,8	418,7	6 885,1	6 455,4
III. Операционные затраты					
3.1 РЦ (ОО)	млн руб.	-8,9	-9,1	-109,0	-143,8
Материалы	млн руб.	-18,5	-19,6	-221,8	-294,9
Ремонт и эксплуатация ОС	млн руб.	8,2	9,0	98,0	135,5
Налог на имущество	млн руб.	1,4	1,4	14,8	15,6
3.2 ХМЦ	млн руб.	-3,7	-4,0	-44,8	-59,6
Материалы	млн руб.	-1,8	-1,9	-21,1	-28,1
Энергозатраты	млн руб.	-2,0	-2,1	-23,7	-31,5
3.3 Транспорт полупродуктов КГМК-3Ф	млн руб.	-34,4	-38,0	-412,5	-570,5
3.4 Рафинирование на КГМК	млн руб.	26,9	29,7	322,7	446,3
Итого затрат	млн руб.	-20,2	-21,4	-243,7	-327,6
Амортизация РЦ (ОО)	млн руб.	27,2	28,8	326,6	345,2
3.5 Коммерческие расходы	млн руб.	12,5	13,8	149,8	207,2
Всего затрат	млн руб.	19,5	21,2	232,8	224,9
4. Инвестиционные затраты	млн руб.	7,9	9,0	500,0	567,1
Капитальные вложения	млн руб.	0,0	0,0	380,4	402,1
Затраты на замену оборудования	млн руб.	10,2	11,2	121,8	168,5
Изменение оборотных средств	млн руб.	-2,3	-2,3	-2,3	-3,5
V. Показатели эффективности					
5.1 Налог на прибыль	млн руб.			1 330,5	1 246,1
5.2 Чистая прибыль	млн руб.			5 321,9	4 984,4
5.3 Денежный поток проекта	млн руб.			5 211,9	4 829,6
5.4 EBITDA	млн руб.			6 979,0	6 575,8
5.5 EBITDAmargin	%			101,4%	101,9%
5.6 Чистый дисконтированный доход при норме дисконта 20 %	млн руб.			1 438,3	1 194,1
5.7 Модифицированная внутренняя норма доходности	%			38,4%	36,3%
5.8 Индекс дисконтированной доходности	ед.			5,0	4,1
5.9 Срок окупаемости простой	лет			2,7	3,0
5.10 Срок окупаемости дисконтированный	лет			2,8	3,2

5.3.2 Капитальные вложения

Капитальные вложения определены сводным сметным расчетом в ценах 2022 г. в рублевом исчислении, результаты в таблице 5.14.

Таблица 5.14 – Капитальные вложения по проекту «РЦ. ОО. Модернизация передела подготовки НППП» тыс. руб. с учетом НДС

Наименование	Строительные работы	Монтажные работы	Оборудование	Прочие работы	Всего
Глава 2. Объекты основного строительства	29496	38781	103241		171519
АО «Кольская ГМК» г. Мончегорск. РЦ.ОО. Модернизация передела подготовки НППП	29496	38781	90150		158427
Разработка программного и математического обеспечения			9296		9296
Адаптация прикладного программного обеспечения			1427		1427
Разработка КДНО			2369		2369
Глава 4. Объекты энергетического хозяйства	976	5424	47992		54392
Итого по главам 1-7	30472	44206	151234		225911
Глава 8. Временные здания и сооружения	634	919			1553
Глава 9. Прочие работы и затраты	1210	1755	1712	14704	19381
Глава 10. Содержание службы Заказчика. Строительный контроль				14657	14657
Глава 12. ПИР, авторский надзор				46303	46303
Резерв средств на непредвиденные работы и затраты - 3%	969	1406	4588	2270	9234
Итого	33285	48287	157534	77934	317040
НДС	6657	9657	31507	15587	63408
ВСЕГО	39942	57944	189041	93521	380448

Суммарные капитальные вложения составили 380,5 млн руб. Освоение капитальных затрат предусматривается в течение 2 лет:

- 1-ый год – предпроектные работы;
 - 2-ой год – проектирование, рабочая документация строительство, ПНР.
- Эксплуатация - с 3 года.

Укрупненно, стоимость оборотных средств принята в размере 25% от себестоимости без учета амортизационных отчислений и налога на имущество, затраты на замену оборудования рассчитаны в % от его балансовой стоимости в размере 4%.

5.3.3 Товарная продукция

Расчет изменения стоимости товарной продукции на основании цены на никель 2022 г. в соответствии с актуальным макроэкономическим прогнозом ГО, результаты в таблице 5.15.

Ежегодное увеличение выпуска товарного никеля составит 359 т.

Таблица 5.15 – Расчет увеличения стоимости товарной продукции в условиях цен 2022 года

Наименование	Ед. изм.	Цена, руб.	Кол-во	Сумма, тыс. руб.
Никель	т	1 598 220	359	573 761

5.3.4 Эксплуатационные расходы

Расчет эксплуатационных расходов выполнен по изменяющимся статьям затрат в условиях текущих цен 2022 года на основании стоимостных показателей АО «Кольская ГМК» на 2022 год и актуального макроэкономического прогноза по Шаблону ГО и представлен в таблицах 5.16-5.23.

Переменные затраты определены прямым счетом на основании изменения расходов ресурсов и цен.

Расчет изменения транспортных расходов полупродуктов в ЗФ произведен аналогично доставки фанштейна из ЗФ в КГМК.

Учтены переменные затраты на получение дополнительного никеля на пл. Мончегорск.

Амортизационные отчисления на вновь вводимые основные средства рассчитаны исходя из стоимости основных средств и срока полезного использования. Капитальные вложения, балансовая стоимость основных средств и амортизационные отчисления представлены в таблице 5.21.

Затраты на ремонт основных средств приняты в размере 30 % от сумм амортизационных отчислений.

Налог на имущество рассчитан в размере 2,2% от остаточной стоимости основных фондов (недвижимого имущества), облагаемых налогом, и учтен в себестоимости ОО РЦ.

Затраты, связанные с реализацией никеля, коммерческие расходы, приняты по Шаблону ГО.

Таблица 5.16 – Расчет снижения годовых эксплуатационных затрат по РЦ (ОО)

Наименование	Ед. изм.	Цена, руб.	Кол-во	Сумма, тыс. руб.
Материалы:				
Уголь	т	5 956	3 103	-18 483
Ремонт и эксплуатация ОС 30% от амортизации				8 166
Налог на имущество				1 368
Амортизация				27 219
Итого				18 269

Таблица 5.17 – Расчет снижения годовых эксплуатационных затрат по ХМЦ

Наименование	Ед. изм.	Цена, руб.	Кол-во	Сумма, тыс. руб.
Материалы				1 761
Натрия тиосульфат пятиводный	т	38 377	2	83
Известь негашеная кальциевая	т	10 972	23	254
Коксовая мелочь, КМ-2	т	21 064	10	208
Электрод графитированный	т	131 463	7	937
Мешок тканевый/полипропиленовый	шт.	265	635	169
Мешок полиэтиленовый	шт.	87	1 271	110
Кислота техническая, 100%	т	1	282	0
Энергозатраты				1 976
Сжатый воздух	тыс.м3	590	3 348	1 976
Итого				3 737

Таблица 5.18 – Расчет снижения годовых транспортных расходов

Наименование	Ед. изм.	Тариф, руб.	Кол-во	Сумма, тыс. руб.
Никелевый порошок и несработавший уголь в ТПР	т	4 885	7035,8	34 373

Таблица 5.19 – Расчет затрат на получение дополнительного никеля (рафинирование)

Наименование	Ед. изм.	Переменные затраты, руб.	Кол-во	Сумма, тыс. руб.
Никель	т	74 900	359	34 373

Таблица 5.20 – Расчет коммерческих расходов

Наименование	Ед. изм.	Тариф	База	Сумма, тыс. руб.
Никель	руб./т	8 851	359 т	3 178
	% от реал.	1,6%	573 761 тыс. руб.	9 308
Итого				12 486

Таблица 5.21 – Капитальные вложения, балансовая стоимость основных средств, амортизационные отчисления тыс. руб.

Наименование	Сметная стоимость					Балансовая стоимость			Норма амортизации		Амортизационные отчисления		
	Строительные работы	Монтажные работы	Оборудование	Прочие работы	Всего	Здания и сооружения	Машины и оборудование	Всего	Здания и сооружения	Машины и оборудование	Здания и сооружения	Машины и оборудование	Всего
Глава 2. Объекты основного строительства	29496	38781	103241		171519	61745	180831	242576	1,7%	10,4%	1050	18815	19865
АО"Кольская ГК" г. Мончегорск. РЦ.ОО. Модернизация передела подготовки НПП	29496	38781	90150		158427	61745	162959	224704	1,7%	10,0%	1050	16296	17346
Разработка программного и математического обеспечения			9296		9296		12690	12690	1,7%	15,0%		1904	1904
Адаптация прикладного программного обеспечения			1427		1427		1948	1948	1,7%	15,0%		292	292
Разработка КДНО			2369		2369		3234	3234	1,7%	10,0%		323	323
Глава 4. Объекты энергетического хозяйства	976	5424	47992		54392	1542	72922	74464	4,0%	10,0%	62	7292	7354
Итого по главам 1-7	30472	44206	151234		225911	63287	253753	317040	1,8%	10,3%	1111	26107	27219
Глава 8. Временные здания и сооружения	634	919			1553								
Глава 9. Прочие работы и затраты	1210	1755	1712	14704	19381								
Глава 10. Содержание службы Заказчика. Строительный контроль				14657	14657								
Глава 12. ПИР, авторский надзор				46303	46303								
Резерв средств на непредвиденные работы и затраты - 3%	969	1406	4588	2270	9234								
Итого	33285	48287	157534	77934	317040	63287	253753	317040	1,8%	10,3%	1111	26107	27219
НДС	6657	9657	31507	15587	63408								
ВСЕГО	39942	57944	189041	93521	380448								

Таблица 5.22 – Динамика эксплуатационных затрат в условиях стоп-цен млн руб.

Наименование показателя	Годы												Итого
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1 РЦ (ОО)	-8,9	-9,0	-9,0	-9,0	-9,0	-9,1	-9,1	-9,1	-9,1	-9,2	-9,2	-9,2	-109,0
Материалы	-18,5	-18,5	-18,5	-18,5	-18,5	-18,5	-18,5	-18,5	-18,5	-18,5	-18,5	-18,5	-221,8
Ремонт и эксплуатация ОС	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	98,0
Налог на имущество	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	14,8
2 ХМЦ	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7	-44,8
Материалы	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-21,1
Энергозатраты	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	-23,7
3 Транспорт полупродуктов КГМК-ЗФ	-34,4	-34,4	-34,4	-34,4	-34,4	-34,4	-34,4	-34,4	-34,4	-34,4	-34,4	-34,4	-412,5
4 Рафинирование на КГМК	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	322,7
Итого затрат	-20,2	-20,2	-20,2	-20,2	-20,3	-20,3	-20,3	-20,3	-20,3	-20,4	-20,4	-20,4	-243,7
Амортизация РЦ (ОО)	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	326,6
5 Коммерческие расходы	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	149,8
Всего затрат	19,5	19,5	19,5	19,5	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,3	19,3	19,3	232,8

Таблица 5.23 – Динамика эксплуатационных затрат в условиях номинальных цен млн руб.

Наименование показателя	Годы												Итого
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1 РЦ (ОО)	-9,1	-9,6	-10,1	-10,6	-11,1	-11,6	-12,1	-12,7	-13,3	-13,9	-14,5	-15,2	-143,8
Материалы	-19,6	-20,4	-21,2	-22,1	-23,0	-23,9	-24,8	-25,8	-26,9	-27,9	-29,1	-30,2	-294,9
Ремонт и эксплуатация ОС	9,0	9,4	9,8	10,1	10,6	11,0	11,4	11,9	12,3	12,8	13,4	13,9	135,5
Налог на имущество	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	15,6
2 ХМЦ	-4,0	-4,1	-4,3	-4,5	-4,6	-4,8	-5,0	-5,2	-5,4	-5,6	-5,9	-6,1	-59,6
Материалы	-1,9	-1,9	-2,0	-2,1	-2,2	-2,3	-2,4	-2,5	-2,6	-2,7	-2,8	-2,9	-28,1
Энергозатраты	-2,1	-2,2	-2,3	-2,4	-2,5	-2,6	-2,7	-2,8	-2,9	-3,0	-3,1	-3,2	-31,5
3 Транспорт полупродуктов КГМК-ЗФ	-38,0	-39,5	-41,1	-42,7	-44,4	-46,2	-48,0	-50,0	-52,0	-54,0	-56,2	-58,4	-570,5
4 Рафинирование на КГМК	29,7	30,9	32,1	33,4	34,7	36,1	37,6	39,1	40,6	42,3	44,0	45,7	446,3
Итого затрат	-21,4	-22,3	-23,3	-24,3	-25,4	-26,5	-27,6	-28,8	-30,0	-31,3	-32,6	-34,0	-327,6
Амортизация РЦ (ОО)	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	345,2
5 Коммерческие расходы	13,8	14,3	14,9	15,5	16,1	16,8	17,4	18,1	18,9	19,6	20,4	21,2	207,2
Всего затрат	21,2	20,8	20,4	20,0	19,5	19,1	18,6	18,1	17,6	17,1	16,6	16,0	224,9

5.3.5 Финансовые результаты и выводы

В результате расчетов получены следующие показатели сравнительной экономической эффективности по изменяющимся статьям затрат за период рассмотрения в рублевом исчислении в условиях стоп-цен и номинальных цен.

В таблицах 5.24-5.27 приведены расчеты финансовых показателей в динамике за период рассмотрения.

Таблица 5.3.5.24 – Финансовые результаты проекта стоп цены, млн руб.

Наименование показателя	Годы														Итого
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Выручка от реализации	0	0	574	574	574	574	574	574	574	574	574	574	574	574	6 885
Затраты на производство	0	0	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-244
Амортизация	0	0	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	327
Себестоимость	0	0	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	83
Валовая прибыль	0	0	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	567	6 802
Управленческие и коммерческие расходы	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	150
Прибыль от основной деятельности	0	0	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	6 652
Налог на прибыль	0	0	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	1 330
Чистая прибыль проекта	0	0	443	443	443	443	443	443	443	444	444	444	444	444	5 322
ЕВИТ	0	0	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	554	6 652
ЕВИТДА	0	0	581	581	581	582	582	582	582	582	582	582	582	582	6 979
ЕВИТДА margin	0%	0%	101%	101%	101%	101%	101%	101%	101%	101%	101%	101%	101%	101%	101%

Таблица 5.3.5.15 – Чистый дисконтированный доход проекта и внутренняя норма прибыли (дохода) стоп цены, млн руб.

Наименование показателя	Годы														Итого
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Операционная деятельность															
Денежные притоки															
Выручка от реализации	0	0	574	574	574	574	574	574	574	574	574	574	574	574	6 885
Амортизация	0	0	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	327
Возмещение НДС	3	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63
Итого	3	60	601	601	601	601	601	601	601	601	601	601	601	601	7 275
Денежные оттоки															
Операционные расходы	0	0	20	20	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	233
Налоги и платежи	0	0	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	1 330
Итого	0	0	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	1 563
Денежный поток от операционной деятельности	3	60	471	471	471	471	471	471	471	471	471	471	471	471	5 712
Инвестиционная деятельность															
Денежные оттоки															
Первоначальные капитальные вложения	19	361	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	380
Замена оборудования	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	122
Прирост оборотных средств	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2
Итого	19	361	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	500
Денежный поток от инвестиционной деятельности	-19	-361	-8	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-500
Показатели эффективности реализации проекта															
Денежный поток проекта	-16	-301	463	460	460	461	461	461	461	461	461	461	461	461	5 212
То же, нарастающим итогом	-16	-317	146	606	1 067	1 527	1 988	2 448	2 909	3 369	3 830	4 291	4 751	5 212	5 212
Чистый дисконтированный доход проекта	-16	-251	321	266	222	185	154	129	107	89	74	62	52	43	1 438
То же, нарастающим итогом	-16	-267	54	321	543	728	882	1 011	1 118	1 207	1 282	1 344	1 395	1 438	1 438
Чистый поток денежных средств	-16	-301	463	460	460	461	461	461	461	461	461	461	461	461	5 212
Модифицированная внутренняя норма прибыли (дохода)		-100%	32%	56%	58%	56%	53%	50%	47%	45%	43%	41%	40%	38%	38%

Таблица 5.3.5.26 – Финансовые результаты проекта номинальные цены, млн руб.

Наименование показателя	Годы														Итого
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Выручка от реализации	0	0	419	457	467	504	517	520	539	560	583	606	630	655	6 455
Затраты на производство	0	0	-21	-22	-23	-24	-25	-26	-28	-29	-30	-31	-33	-34	-328
Амортизация	0	0	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	345
Себестоимость	0	0	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-3	-4	-5	18
Валовая прибыль	0	0	411	450	462	499	514	518	537	560	584	608	634	661	6 438
Управленческие и коммерческие расходы	0	0	14	14	15	16	16	17	17	18	19	20	20	21	207
Прибыль от основной деятельности	0	0	398	436	447	484	497	501	520	542	565	589	614	639	6 231
Налог на прибыль	0	0	80	87	89	97	99	100	104	108	113	118	123	128	1 246
Чистая прибыль проекта	0	0	318	349	357	387	398	401	416	434	452	471	491	511	4 984
ЕВИТ	0	0	398	436	447	484	497	501	520	542	565	589	614	639	6 231
ЕВИТДА	0	0	426	465	475	513	526	530	549	571	594	618	642	668	6 576
ЕВИТДА margin	0%	0%	102%	102%	102%	102%	102%	102%	102%	102%	102%	102%	102%	102%	102%

Таблица 5.3.5.27 – Чистый дисконтированный доход проекта и внутренняя норма прибыли (дохода) номинальные цены, млн руб.

Наименование показателя	Годы														Итого
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Операционная деятельность															
Денежные притоки															
Выручка от реализации	0	0	419	457	467	504	517	520	539	560	583	606	630	655	6 455
Амортизация	0	0	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	345
Возмещение НДС	3	64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67
Итого	3	64	448	485	496	533	546	549	567	589	611	635	659	684	6 868
Денежные оттоки															
Операционные расходы	0	0	21	21	20	20	20	19	19	18	18	17	17	16	225
Налоги и платежи	0	0	80	87	89	97	99	100	104	108	113	118	123	128	1 246
Итого	0	0	101	108	110	117	119	119	123	127	131	135	139	144	1 471
Денежный поток от операционной деятельности	3	64	347	377	386	416	427	429	445	462	481	500	520	540	5 397
Инвестиционная деятельность															
Денежные оттоки															
Первоначальные капитальные вложения	19	383	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	402
Замена оборудования	0	0	11	12	12	13	13	14	14	15	15	16	17	17	168
Прирост оборотных средств	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3
Итого	19	383	9	12	12	13	13	14	14	15	15	16	16	17	567
Денежный поток от инвестиционной деятельности	-19	-383	-9	-12	-12	-13	-13	-14	-14	-15	-15	-16	-16	-17	-567
Показатели эффективности реализации проекта															
Денежный поток проекта	-16	-319	338	366	374	403	414	416	431	448	465	484	503	523	4 830
То же, нарастающим итогом	-16	-335	3	369	743	1 146	1 560	1 976	2 406	2 854	3 319	3 803	4 307	4 830	4 830
Чистый дисконтированный доход проекта	-16	-266	235	212	180	162	139	116	100	87	75	65	56	49	1 194
То же, нарастающим итогом	-16	-282	-47	164	345	507	645	762	862	948	1 024	1 089	1 145	1 194	1 194
Чистый поток денежных средств	-16	-319	338	366	374	403	414	416	431	448	465	484	503	523	4 830
Модифицированная внутренняя норма прибыли (дохода)		-100%	9%	40%	47%	47%	46%	45%	43%	41%	40%	39%	37%	36%	36%

5.4 Выводы по главе 5

На основании проведенных исследований были разработаны рекомендации по процессу магнитной сепарации, а также предложена новая технологическая схема участка обогащения НППП. По предложенной схеме реализуется двухстадийная схема дробления до класса -2,5 мм. Подрешетный продукт грохочения крупность менее 2,5 мм вибропитателем подается в магнитный двухбарабанный сепаратор. Индукция поля на барабане основной сепарации 0,12 Тл, на контрольном барабане - 0,12 Тл. Приводы сепараторов должны обеспечивать переменную (регулируемую) скорость вращения барабанов для регулирования качества получаемых продуктов, рекомендуемая частота вращения 55 об/мин.

В ходе проведенной работы показано, что применение пневмокласификации показывает низкую эффективность по углероду и диоксиду кремния. Таким образом, применение данной операции при модернизации участка магнитной сепарации нецелесообразно.

По результатам исследований определены рекомендуемые параметры питания, основной и контрольной магнитной сепарации, результаты представлены на рисунке 5.19. Рекомендуемыми параметрами являются:

- крупность питания -2,5 мм;
- поле магнитной индукции основной сепарации 0,12 Тл при частоте вращения барабана 90 об/мин;
- поле магнитной индукции контрольной сепарации 0,18 Тл при частоте вращения барабана в пределах 55-75 об/мин.

Извлечение магнитную фракцию при рекомендуемых параметрах вырастает с 98,3% отн. до 99,9 % отн, показатели эффективности удаления углерода и диоксида кремния в немагнитную фракцию 95,3% отн. и 32,2 % отн., соответственно.

В настоящей работе выполнена технико-экономическая оценка сравнительной экономической эффективности реализации проекта модернизации передела подготовки НППП в рафинировочном цехе на площадке Мончегорск.

Расчет выполнен по изменяющимся статьям затрат, результаты в таблице 5.28.

В результате расчетов получены следующие показатели сравнительной экономической эффективности за период рассмотрения.

Таблица 5.28 – Основные технико-экономические показатели сравнительной экономической эффективности млн руб.

Наименование показателя	Стоп цены	Номинальные цены
Стоимость товарной продукции	6 885	6 455
Операционные затраты	233	225
В том числе амортизация	327	345
Инвестиционные затраты	500	567
Капитальные вложения	380	402
Затраты на замену оборудования	122	168
Изменение оборотных средств	-2	-3
Показатели эффективности		
Налог на прибыль	1 330	1 246
Чистая прибыль	5 322	4 984
Денежный поток проекта	5 212	4 830
ЕВИТДА	6 979	6 576
NPV при норме дисконта 20 %	1 438	1 194
MIRR, %	38,4%	36,3%
Индекс дисконтированной доходности	5,0	4,1
Срок окупаемости простой	2,7	3,0
Срок окупаемости дисконтированный	2,8	3,2

- Реализация проекта потребует 380 млн руб. капитальных затрат в условиях стоп-цен, в номинальных – 402 млн руб.
- Прирост стоимости товарной продукции составит 6885 млн руб. в условиях стоп-цен, в номинальных – 6455 млн руб.
- Прирост операционных затрат составит 233 млн руб. в условиях стоп-цен, в номинальных – 225 млн руб.
- Увеличение чистого дисконтированного дохода составит 1438 млн руб. в условиях стоп-цен, в номинальных – 1194 млн руб.
- Дисконтированный срок окупаемости в условиях номинальных цен составил 3,2 года.

Приведенные показатели свидетельствуют о высокой инвестиционной привлекательности реализации проекта модернизации передела подготовки НПТП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация предлагает решение актуальной научной задачи по развитию технологии получения никелевого порошка, полностью пригодного для последующей переработки по технологии хлорного выщелачивания. В рамках данного исследования был проведён комплекс теоретических и экспериментальных исследований процессов окислительного обжига никелевого концентрата, восстановительного обжига огарка и магнитной сепарации никелевого порошка.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Выполнен термодинамический анализ окислительного обжига никелевого концентрата и восстановительного обжига огарка с получением никелевого порошка. Установлена зависимость между тепловым эффектом процесса и содержанием серы в шихте для обжига в печах КС и тепловым эффектом процесса, и расходом угля для обжига в печах ТВП. Показано, что на основе термодинамического моделирования может быть разработан алгоритм эффективного управления температурными режимами печей КС и ТВП.

2. Изучено поведения SiO_2 в технологической цепи: «окислительный обжиг-восстановительный обжиг-магнитная сепарация». Определены основные источники поступления SiO_2 в технологический процесс. На основании исследований продуктов технологической схемы методами РЭМ-РСМА установлен механизм и степень накопления SiO_2 в никелевом порошке. Показано, что при отсутствии канала вывода оборотов из технологической схемы содержание SiO_2 в магнитной фракции никелевого порошка может вырасти до 4,5% масс., а выход оборотов - до 8-9%, т.е. многократно выше регламентных значений. В связи с этим даны рекомендации по каналам вывода оборотных материалов из технологической схемы процесса.

3. В результате промышленных испытаний в технологической цепи: «окислительный обжиг – восстановительный обжиг» сформулированы следующие рекомендации по рациональному ведению процесса:

3.1 Контроль за равномерностью подачи оборотных материалов с целью обеспечения содержания серы в шихте печей КС не менее 17%, что обеспечит эффективную агломерацию тонких классов оборотных материалов и снижение выхода спеченных конгломератов.

3.2 Контроль за расходом подаваемого угля. Целесообразно отказаться от практики избыточного расхода угля, так как это:

- увеличивает температуру в печи и, следовательно, растёт выход спеченных конгломератов;

- увеличивает выход немагнитной фракции и снижает качество магнитной фракции за счёт роста содержания в ней С и SiO_2 .

Установлено, что расхода угля может быть снижен минимум на 10% отн., без снижения степени металлизации, что дает экономию 18,484 млн. руб./год.

Оптимизация параметров работы печей КС и ТВП на основе сформулированных рекомендаций позволит снизить долю мелких классов в огарке печей КС с 10-12% до 2-4% и выход спеченных конгломератов с 20-25% до 5-6%, что в сочетании с совершенствованием схемы магнитной сепарации позволит стабилизировать технологический процесс хлорного выщелачивания никелевого порошка.

4. На основании проведенных опытно-промышленных испытаний магнитной сепарации предложена новая технологическая схема, включающая основную и контрольную магнитную сепарацию. Рекомендуемыми параметрами новой схемы являются:

- крупность питания -2,5 мм;
- поле магнитной индукции основной сепарации 0,12 Тл при частоте вращения барабана 90 об/мин;
- поле магнитной индукции контрольной сепарации 0,18 Тл при частоте вращения барабана в пределах 55-75 об/мин.

При рекомендуемых параметрах извлечение Ni в МФ составляет 99,9%, показатели эффективности удаления C и SiO₂ в немагнитную фракцию 95,3% отн. и 32,2 % отн., соответственно, что обеспечивает их регламентные содержания в никелевом порошке.

Предложенные усовершенствования пирометаллургических переделов и магнитной сепарации показали свою высокую инвестиционную привлекательность. При инвестиционных затратах в 0,567 млрд. руб. дополнительная стоимость товарной продукции составит 6,455 млрд. руб./год, дисконтированный срок окупаемости – 3,2 года.

5. Основные задачи, сформулированные в работе, решены полностью, достигнута цель проводимого исследования.

6. Дальнейшее развитие технологии получения никелевого порошка должно быть направлено на разработку алгоритмов и последующую автоматизацию систем управления печами КС и ТВП, что позволит стабилизировать происходящие в печах процессы и улучшить достигнутые в настоящем исследовании технологические показатели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. В 3 т. – 2-е изд., стер., - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004 г. Т.1 Обогачительные процессы и аппараты. - стр.70
2. Алексеев, Ю.В. Еще раз о факторах, влияющих на качество никелевого порошка. – Цв. металлы, 1962. - №12.
3. Астафьев, А. Ф., Алексеев Ю. В. Переработка в кипящем слое полупродуктов никелевого производства. – М.: Металлургия, 1997. - 253 с.
4. Астафьев, А.Ф., Алексеев Ю.В. Переработка в кипящем слое полупродуктов никелевого производства. – М.: Металлургия. – 1991.
5. Астафьев, А.Ф., Клементьев В.В. // Цветные металлы. – 1975. - №1. – С. 4-8.
6. Аэров, М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – Л.: Химия, 1968. –512 с.
7. Бабушкин, В.Н., Тихонов А.И. Восстановление закиси никеля природным газом в кипящем слое / Тр. Урал. политехн. ин-та. – 1972. - №204. – С. 36-40.
8. Байков, А.А. Собрание трудов. Т. 2: Труды в области металлографии (металловедения), теории металлургических процессов, общей и физической химии – М. Изд-во АН СССР, 1948. 592 с
9. Баландин, А.К. Вопросы химической кинетики, реакционной способности и катализа. – М.: Изд-во АН СССР, 1955.
10. Барам, И. И. Макрокинетические закономерности окислительного обжига сульфидов // Комплексное использование минерального сырья. – 1984. - № 6(72). – С. 14-17.
11. Барский, Л.А. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых// Л.А. Барский, В.З. Козин. - М. - «Недра», - 1978, - 486с.
12. Блатов, И. А., Клементьев В. В., Портов А. Б. Цемехман Л. Ш., Паршуков А. Б. Некоторые особенности кинетики и механизма протекания процессов при окислительном обжиге рудных медно-никелевых концентратов // Металлы. – 1999. - №2. – С. 21-28
13. Блатов, И. А., Клементьев В. В., Портов А. Б., Цемехман Л. Ш. Исследование кинетики окисления медно-никелевого сульфидного концентрата // Цветные металлы. – 1995. - № 4. – С. 48-50.
14. Богацкий, Д.П. Восстановление оксидов никеля водородом. – Металлург, 1937. - №4.
15. Богацкий, Д.П. Диаграмма состояния системы никель – кислород и физико-химическая природа твердых фаз в этой системе. – Общая химия, 1951.

16. Богданди, Л.Ф., Энгель Г.Ю. Восстановление железных руд. – М. Металлургия, 1971.
17. Бондаренко, Б.И. Восстановление оксидов металлов в сложных газовых системах. – Киев: Наукова думка, 1980.
18. Бондаренко, Б.И., Пекач В.Ф. Кинетика процесса газового восстановления промышленной закиси никеля // Цв. металлы. –1970. - №12. – С. 10-13.
19. Бондаренко, Б.И., Пекач В.Ф., Евланов С.Ф. и др. Исследование возможности использования природного газа для восстановления промышленной закиси никеля. – Использование газа в нар. хоз-ве. – 1971. – Вып. 6. – С. 3-9.
20. Бондаренко, Б.И., Пекач В.Ф., Шамро Э.Ф. и др. Псевдооживление промышленного порошка никеля. // Цв. металлы. – 1971. - №5. – С. 24.
21. Брусаков, Ю.И., Варюшенков А.М., Исаева Е.П. Влияние типа углеродистого восстановителя на изменение физико-химических свойств шихты для получения алюминиево-кремниевых сплавов. – Труды ВАМИ. -№ 74 1971. - С.43-52
22. Ван Бюрен, Дефекты в кристаллах. – М. Ин. лит., 1962.
23. Ванюков, А.В. Комплексная переработка медного и никелевого сырья: учебник для вузов / А.В. Ванюков, Н.И. Уткин. Челябинск: Металлургия. – 1988. – 432 с.
24. Варюшенков, А.М., Аракелян О.И., Исаева Е.П. Процесс восстановления кремнезема углеродом применительно к получению кристаллического кремния. – Сб. науч. тр. ВАМИ Л.: 1971. -С. 104-118.
25. Варюшенков, А.М., Киселев А.М., Исаева Е.П. Исследование восстановительной способности углеродистых материалов. – Труды ВАМИ, 1973, с.102-106.
26. Веселов, В.В., Дорохович В.П. Взаимодействие метана с оксидами металлов //ЖПХ. – 1965. - №10. – С. 2292-2298.
27. Веселов, В.В., Дорохович В.П. Восстановление оксидов металлов группы железа метаном. – В кн.: Механизм и кинетика восстановления металлов. М.: Наука, 1970. – С. 108-115.
28. Веселов, В.В., Дорохович В.П. Кинетика восстановления закиси никеля метаном // Изв. АН СССР. Металлы. - 1969. - №6. – С. 30-33.
29. Веселов, В.В., Дорохович В.П. Кинетика низкотемпературного восстановления оксида железа метаном //УХЖ. – 1967. - №9. – С. 205.
30. Веселов, В.В., Рафал А.Н. Состав газа конверсии углеводородов. – Киев: Наук. думка, 1976. – 188 с.
31. Веселов, В.В., Сигов Ф.Ф., Дорохович В.П. К вопросу о восстановлении железа из оксидов неконвертированным природным газом //ПМ. – 1966. - №10. – С. 107-108.

32. Волгина, Л.М. Взаимодействие углеводородов с оксидами никеля и железа в присутствии водяного пара: Автореферат. – Саратов, 1969.
33. Воронцов, Е.С. Исследование механизма, кинетики и катализа реакции восстановления. – Челябинск, 1970.
34. Воронцов, Е.С., Михайлов Г.Г., Пашкеев И.Ю. Явление импеданса в реакциях косвенного восстановления металлов из оксидов. – М. Наука, 1970.
35. Гельд, П.В., Есин О.А. Процессы высокотемпературного восстановления. - Свердловск: Metallurgizdat, 1957.
36. Гельперин, Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдооживления. – М.: Химия, 1967. 664 с.
37. Герасимов, Я.М., Крестовников А.Н., Шахов Ф.С. и др. Химическая термодинамика в цветной металлургии: В 6-ти т. – М.: Metallurgizdat, 1960-1974. – Т. 1-6.
38. Глазковский, А.А. Никель. – М., 1963.
39. Гольдштейн, Н.Л., Хромченко Н.С. Реакция водяного газа в условиях доменного процесса. – Сталь, 1965, №3.
40. Гоулдстейн, Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Э. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: в 2-х книгах. Книга 2// М., Мир, 1984., 348 с.
41. Грег, С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. – М. Мир, 1970.
42. Губин, Г.В. Предварительное восстановление руд и концентратов природным газом. Автореферат. – М., 1971.
43. Губин, Г.В., Бережной Н.Н., Великородный И.Г. Получение металлизированных окатышей на полупромышленной установке решетка – трубчатая печь. – Механобрчермет., 1971.
44. Данилов, М. П., Гладков А. С., Назмутдинов Ш. Г., Грейвер М. Б., Негрей Н. В. Получение активного никелевого порошка в трубчатой печи / 1998 г.
45. Девидсон, И.Ф., Харрисон Д. Псевдооживление твердых частиц. – М. Химия, 1965.
46. Дорохович, В.П. Исследование кинетики восстановления оксидов металлов метаном. – Киев, 1969.
47. Егоров, Ю.С., Шевцов В.М. Восстановление закиси никеля с подачей восстановителя в кипящий слой // Цв. металлы. – 1975. - №3.
48. Елютин, В.П., Павлов Ю.А., Поляков В.П. Взаимодействие оксидов металлов с углеродом. – М.: Металлургия, 1976.
49. Ерцева, Л. Н., Цемехман Л. Ш., Цымбулов Л. Б. и др. О строении твёрдых штейнов никелевого производства // Цветные металлы, 2008. - № 3. - С. 21-23.

50. Есин, О.А., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов. – Свердловск, 1962.
51. Жунусов, М.Т. Metallургия никеля на комбинате «Североникель». / М.Т. Жунусов, А.В. Синько, Н.А. Мальцев / Избранные лекции. – 1994. – 153 с.
52. Жуховицкий, А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия. – 2-е изд. – М.: Metallургия, 1968. – 520 с.
53. Зельдович, Я.Б., Полярный А.И. Расчеты тепловых процессов при высокой температуре. – М.: БНТ, 1947. – 48 с.
54. Зоря, В.Н., Аникин А.Е., Волынкина Е.П., Федякина А.Н. - Исследование обогащения отходов, накопленных в шламохранилище ОАО "ЕВРАЗ ЗСМК", методом магнитной сепарации - четвёртая международная научно-практическая конференция "управление отходами - Основа восстановления экологического равновесия промышленных регионов России" – СибГИУ – 2012 – стр. 190 – 198
55. Зубарев, А.И. - Экспериментальные исследования магнитной индукции и перспективы обогащения зернистых марганецсодержащих отходов методом сухой магнитной сепарации - ГВУЗ «Национальный горный университет» - Научные труды Донецкого национального технического университета. серия: Горно-геологическая - № 2(21) – 2014 – стр. 55-59
56. Иванов, П.В. Анализ термокинетики процессов химических превращений в трубчатых вращающихся печах и совершенствование режимов их работы: Дис. к.т.н. – СПб. – 2008. – 198 с.
57. Изербах, Ю.Ф., Сидак Н.А. Производство газового никелевого порошка высокой активности. – Норильск, 1965.
58. Казенас, Е.К., Чижиков Д.М. Давление и состав пара над оксидами химических элементов. – М.: Наука, 1976. – 342 с.
59. Козлов, В.М., Гусева Н.С. Влияние углеродистых материалов на газификацию диоксида кремния. – Труды ВАМИ, 1986, с. 70-77.
60. Корнилов, И.И. Никель и его сплавы. – М: Изд-во АН СССР, 1958.
61. Косягин, В.Г. Взаимодействие метана с оксидами железа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 1967. – 27 с.
62. Криштал, М. М., Ясников И. С., Полуниин В. И., Филатов А. М., Ульянинков А. Г. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения. – М.: Техносфера, 2009. 208 с.

63. Куликов, И.С. Закономерности равновесных давлений кислорода в системах оксид металла – металл – кислород. – В кн.: Процессы восстановления и плавления железа. М.: Наука, 1965, с. 23-28.
64. Куликов, И.С. Термическая диссоциация соединений. – 2-е изд. – М.: Metallurgy, 1969. – 432с.
65. Кунии, Д., Левеншпиль О. Промышленное псевдоожигение. – М.: Химия, 1976. – 448 с.
66. Лавров, Н.В., Евланов С.Ф., Бондаренко Б.И. и др. Термогравиметрическая установка для совместного проведения кинетических и микроструктурных исследований при восстановлении оксидов металлов. – В кн.: Новые методы исследования процессов восстановления цветных металлов. М.: Наука, 1973. – С 94-96.
67. Лапин, Ю.Д., Сухов М.Н. Восстановление закиси никеля генераторным газом в кипящем слое. – ЦНИИ, 1965.
68. Ласточкина М.А., Вергизова Т.В., Четверкин А.Ю., Калашникова М.И., **Рябушкин М.И.**; заявитель Публичное акционерное общество "Горно-металлургическая компания "Норильский никель", Общество с ограниченной ответственностью "Институт Гипроникель", Акционерное общество "Кольская горно-металлургическая компания". – 18 с.: ил.
69. Лева, М. Псевдоожигение. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 400 с.
70. Леонтьев, Л.И. О механизме и кинетике восстановления ферритов кальция: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Свердловск, 1964. – 14 с.
71. Львов, В.В., Кусков В.Б. – Исследование возможности обогащения железных руд Бакчарского месторождения высокоинтенсивной магнитной сепарацией – Обогащение руд - № 1 – 2015 – стр. 26-30
72. Любан, А.П. Анализ явлений доменного процесса. – М. Metallurgy, 1962.
73. Люмкис, С.Е., Чермак Л.Л., Каган А.С. Пути повышения активности никелевого порошка. – ЦИИИцветмет, 1960, №11.
74. Манчинский, В.П., Шкодин К.К. Обзор развития и современного состояния кинетики восстановительных процессов. – М.: Metallurgizdat, 1963.
75. Маргулис, Е. В. К теории окислительного обжига сульфидных материалов. Metallurgy цветных металлов и методы их анализа / Сборник научных трудов института ВНИИЦветмет. - М. - 1962. - № 7. - С. 9-30.
76. Маргулис, Е. В. Адсорбционно-диссоционная теория окисления сульфидов. Труды института ВНИИЦветмет. – 1968. - № 17. – С. 5-10.
77. Махорин, К.Е. Высокотемпературные процессы в кипящем слое: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. –Киев, 1967. – 33 с.

78. Мень, А.Н., Воробьев Ю.П., Чуфаров Г.И. Физико-химические свойства нестехиометрических оксидов. – Л.: Химия, 1973. – 233 с.
79. Миркин, Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов - М., 1961.
80. Мовсесов, Э.В., Васютинский Н.А., Печенкин В.П. Восстановление арizonитового концентрата природным газом. – В кн.: Проблемы металлургии титана. – М.: Наука, 1967. – С. 31-36.
81. Морозов, А.Н. Водород и азот в стали. – М. Металлургия, 1968.
82. Некрасов, З.И., Еременко Д.П. Восстановление оксида железа природным газом в изотермических условиях. – Доменное пр-во. 1976. №2.
83. Некрасов, З.И., Сидорова Л.Я., Гладков Н.А. Термодинамический анализ восстановления оксидов железа метаном. – Доменное пр-во.,1975.
84. Носкова, Н.И., Павлов В.А. ФММ. – 1962. - №14. – С. 899.
85. Окунев, А. И., Галимов М. Д. Окисление железа и серы в оксидно-сульфидных системах. - М.: Наука, 1983. – 128 с.
86. Острик, П.Н. Физико-химические и технологические особенности получения железного порошка: Автореферат. – Днепропетровск, 1976.
87. Отмер, Д. Процессы в кипящем слое. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 205 с.
88. Патент №2144098 С1 Российская Федерация, Способ электролитического рафинирования никеля/ Мироевский Г.П, Голов А.Н., Ермаков И.Г., Козырев В.Ф., Одинцов В.А., Хомченко О.А.; заявитель и патентообладатель ОАО “Кольская горно-металлургическая компания”. - № 99110458/02 заявл. 27.05.1999; опубл. 10.01.2000. 4 с.: 0 ил.
89. Патент №2303086 С2 Российская Федерация. Способ получения электролитного никеля/ Демидов К. А., Беседовский С. Г., Шелестов Н. б.А., Хомченко О. А., Садовская Г. И., Жиличкин С. И.; заявитель и патентообладатель ОАО “Кольская горно-металлургическая компания”. - №2005126382/02; заявл. 20.02.2007; опубл. 20.07.2007, Бюл. № 20. 10 с.: 2 ил.
90. Патент №2359049 С2 Российская Федерация, Способ получения активного никелевого порошка/ Демидов К.А. Беседовский С.Г. и др.; заявитель и патентообладатель ОАО “Кольская горно-металлургическая компания”. - № 2007122867/02; заявл. 18.06.2007; опубл. 20.06.2009, Бюл № 17. 8 с.: 0 ил.
91. Патент №2458742 ФГАОУВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (RU) Способ обогащения окисленных никелевых руд В03В7/00 В03С1/00 С22В23/00 20.08.2012
92. Писаренко, В.Н., Погорелов К.Г. Планирование кинетических исследований. – М.: Наука, 1969. – 176 с.

93. Позняков, В.Я., Черкесов В.И. // Цветные металлы. - 1978. - №3. - С. 3-5.
94. Попов, В. А., Савинова Ю. А. Термодинамическое моделирование окислительного обжига медного концентрата от разделения фэйнштейна // Цветные металлы. — 2020. — № 9. — С. 14-18. — doi:10.17580/tsm.2020.09.02
95. Портов, А. Б., Озеров С. С., Савинова Ю. А., Цемехман Л. Ш. Отработка технологии обжига рудного медно-никелевого концентрата на укрупненно-лабораторной установке кипящего слоя // Цветные металлы. – 2014. - № 9. – С. 44-51
96. Применение пропана для восстановления закиси никеля. М, 1961.
97. Продан, Е.А., Павлюченко М.М. Закономерности топохимических реакций. – Минск: Наука и техника, 1976.
98. Пушкарев, В.А. Влияние структуры оксида и образующегося металла на предел течения реакции газового восстановления в химическом режиме. – М. Наука, 1970.
99. Ребу, П. Кипящий слой. – М.: ЦНИИНЦветмет, 1959. – 156 с.
100. Розовский, А.Я. Расчет кинетики и определение кинетических параметров реакций металлов с газами. – В кн.: Механизм взаимодействия металлов с газами. – М.: Наука, 1964. – С. 69-76.
101. Ростовцев, С.Т. Некоторые вопросы кинетики и механизм восстановления оксидов железа в железнорудных материалах газами. – В кн.: Физико-химические основы металлургических процессов. – М.: Наука, 1969. – С. 5-9.
102. Ростовцев, С.Т. Теория металлургических процессов. – М.: Металлургиздат, 1956.
103. Руденко, Л.Н., Ростовцев С.Т. Восстановление оксидов железа оксидом углерода, водородом и их смесями. – М, Чер.Металлургия, 1959
104. Руденко, Л.Н., Симонов В.К., Лагунов Ю.В. Кинетика восстановления железа рудной части боксита газами и углеродом. – В кн.: Физикохимия прямого получения железа. М.: Наука, 1977. С. 110-115.
105. Руденко, Л.Н., Симонов В.К., Ростовцев С.Т. Методика исследования комплексного восстановления рудных материалов. – М. Наука, 1974.
106. **Рябушкин, М.И.** Анализ работы и модернизация участка магнитной сепарации в новой технологии переработки никелевого концентрата в АО «Кольская ГМК». Часть 1// М.И. Рябушкин, А.Л. Романов, Р.А. Пахомов Л.Б. Цымбулов; -М. изд. «Руда и Металлы»; - Цветные металлы; - № 3 – 2022 год; – стр. 60-68.
107. **Рябушкин, М.И.** Анализ работы и модернизация участка магнитной сепарации в новой технологии переработки никелевого концентрата в АО «Кольская ГМК». Часть 2// М.И. Рябушкин, А.Л. Романов, Р.А. Пахомов Л.Б. Цымбулов; -М. изд. «Руда и Металлы»; - Цветные металлы; - № 4 – 2022 год; – стр. 12-19.

108. **Рябушкин, М.И.** Анализ работы пирометаллургического участка по получению металлизированного никелевого порошка на АО «Кольская ГМК»// М.И. Рябушкин, Р.А. Пахомов Л.Б. Цымбулов, С.С. Озеров; -М. изд. «Руда и Металлы»; - Цветные металлы; - № 11 – 2022 год; – стр. 17-25.

109. **Рябушкин, М.И.** Глубокая медочистка никель-кобальтовых растворов акционерного общества «Кольская ГМК»// М.И. Рябушкин, Д.С. Савоськин, АП. Тюкин, А.В. Рабчук, К.В. Смирнов; Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 2. С. 218–222

110. **Рябушкин, М.И.** Поведение SiO₂ при реализации новой технологии переработки никелевого концентрата от разделения фэйнштейна на предприятии АО «Кольская ГМК»// М.И. Рябушкин, Р.А. Пахомов Л.Б. Цымбулов, Ю.А. Савинова. М.И.; -М. изд. «Руда и Металлы»; - цветные металлы; - № 12 – 2021 год; – стр. 14-24

111. **Рябушкин, М.И.** Поведение печей кипящего слоя при переработке сульфидного никелевого концентрата вариативного состава// М.И. Рябушкин, Р.А. Пахомов, Л.Б. Цымбулов; - LX Международная научно-практическая конференция "Российская наука в современном мире", 2024.

112. **Рябушкин, М.И.** Термодинамическое моделирование восстановительно обжига оксидов металлов в трубчатых печах// М.И. Рябушкин, Р.А. Пахомов, Л.Б. Цымбулов; - Международная научно-практическая конференция «Научно-технический прогресс: информация, технологии, механизм» Стерлитамак, 2024.

113. **Рябушкин, М.И.** Термодинамическое моделирование окислительного обжига никелевого концентрата от разделения фэйнштейна в печах кипящего слоя// В. А. Попов, М.И. Рябушкин, Р.А. Пахомов, Л. Ш. Цемехман; -М. изд. «Руда и Металлы»; - Цветные металлы; - № 4 – 2022 год; – стр. 20-26

114. Савинова, Ю.А. Исследование состава и строения материалов технологического происхождения локальными методами анализа в контексте решения конкретных производственных задач// Ю.А. Савинова, О.С. Новожилова, **М.И. Рябушкин**, Д.В. Румянцев, М.А. Ласточкина; - Международная конференция "MELTS" (г. Екатеринбург, 12-18 сентября 2021 года), Екатеринбург, 2021, с. 44.

115. Савинова, Ю.А. Разработка технологии переработки рудных сульфидных концентратов цветных металлов с применением окислительного обжига в печах кипящего слоя.: дис. канд. тех. наук: 05.16.02 / Савинова Юлия Александровна. –Санкт-Петербург., 2018. 155 с.

116. Савинова, Ю.А., Румянцев Д.В., Мишина О.Ю., Банникова С.А., Сомов П.А. Исследование вещественного состава и морфологии тонкодисперсных металлургических пылей методами сканирующей электронно-ионной микроскопии и рентгеноспектрального

микроанализа. В сб. тезисов докладов XXVIII Российской конференции по электронной микроскопии, 2020. 5-10 сентября 2020, Черноголовка

117. Самсонов, Г.В., Жунковский Г.Л. Некоторые особенности начальной стадии карбидизации в среде оксида углерода. – М. 1967.

118. Семенов, Т.А., Лейтис И.Л., Аксельрод Ю.В. Очистка технологических газов. – М. Химия, 1969.

119. Серегин, П.С. Промышленные испытания антрацита (ОАО «Гуковуголь») в качестве восстановителя на трубчатых печах комбината «Североникель»/ П.С. Серегин; ООО «Институт Гипроникель». – СПб., 2009. – 15 с. – 6 рис. – Деп. В ВИНТИ 13.04.09, № 208–В2009.

120. Серегин, П.С. Промышленные испытания низкозольного угля Бачатского разреза (ОАО «Кузбассразрезуголь») на трубчатых печах комбината «Североникель» / П.С. Серегин; ООО «Институт Гипроникель». – СПб., 2009. – 20 с. – 7 рис. – Деп. В ВИНТИ 13.04.09 № 207–В2009.

121. Серегин, П.С. Промышленные испытания по отработке режимов получения активной фракции никелевого порошка в трубчатых печах комбината «Североникель»/ П.С. Серегин; ООО «Институт Гипроникель». – СПб., 2009. – 13 с. – 0 рис. – Деп. В ВИНТИ 13.04.09 № 209–В2009.

122. Серегин, П.С. Промышленные испытания подачи мазута в качестве восстановителя в трубчатые печи комбината «Североникель»/ П.С. Серегин; ООО «Институт Гипроникель». – СПб., 2009. – 9 с. – 4 рис. – Деп. В ВИНТИ 13.04.09 № 205–В2009.

123. Серегин, П.С. Промышленные испытания слабоспекающегося угля Кузнецкого угольного бассейна в качестве восстановителя на трубчатых печах комбината «Североникель»/ П.С. Серегин; ООО «Институт Гипроникель». – СПб., 2009. – 23 с. – 9 рис. – Деп. В ВИНТИ 13.04.09 № 206–В2009.

124. Сигов, А.А., Веселов В.В., Дорохович В.П. К вопросу о восстановлении железа из оксидов неконвертированным природным газом. – ПМ., 1966. №10.

125. Синявер, Б. В. Практика обжига и плавки никелевых концентратов на заводе фирмы ИНКО Томпсон (Канада) // Цветная металлургия. – 1964. - № 4. - С. 44-49.

126. Скороход, В.В. // Порошковая металлургия. - 1964. - № 1.

127. Скороход, В.В. Рентгенографическое исследование порошков никеля // Порошковая металлургия. – 1965. - №3.

128. Скороход, В.В., Раннева Г.О. Порошковая металлургия. - 1963. - № 3. - С. 25.

129. Сообщение ЛПН «Разработка технологии получения активного никелевого порошка. Полупромышленные испытания по получению активного никелевого порошка в обжиговом цехе никелевого завода». - Норильск, 1999.

130. Справка-аннотация «Производство реагентного никелевого порошка КСВ». Норильск, 1995.
131. Степанов, О.А. Исследование термодинамики и кинетики восстановления оксидов железа метаном и газовыми смесями с его участием: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1971. – 20 с.
132. Степанов, О.А., Ростовцев С.Т., Костелов О.Л. Восстановление оксида железа метаном и его смесями с H_2O и CO_2 . Сообщ. 1.// Изв. вузов. Черная металлургия. – 1971. - №6. – С 12-20.
133. Сухов, М.Н., Брындин В.Г., Свечников Г.С. Разработка процессов и аппаратов для восстановления закиси никеля в кипящем слое. – Норильск НГМК, 1963.
134. Сыромятников, Н.И., Волков, В.Ф. Процессы в кипящем слое. – Свердловск: Металлургиздат, 1959. – 248 с.
135. Танака Минору. Восстановление в кипящем слое. – РЖ. Металлы, 1965, ID130. – Реф. статьи из журн. Тэцу то хаганэ, 1964. - №1.
136. Татосьян, Э.К., Брюквин В.А., Винецкая Т.Н Оценка активности никелевых порошков. – Цв. металлы, 1993. - №5.
137. ТИ 301-01-2021 «Окислительный обжиг никелевого концентрата с восстановлением огарка», ОАО «Кольская ГМК», 2021
138. Уоррэн, Б.Н. Успехи физики металлов, 5, 172, 1963.
139. Фаст, Дж.Д. Взаимодействие металлов с газами. – М. Металлургия, 1975.
140. Френц, Г. С. Окисление сульфидов металлов. – М.: Наука, 1964. – 191 с.
141. Харитиди, Г.П., Тихонов А.И., Смирнов В.И., Рыбников В.И. Применение кипящего слоя в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1969. –С. 140-152.
142. Химическая термодинамика и равновесия / Под ред. М.Х. Карапетьянц. – М.: ВИНТИ, 1972. –408 с.
143. Хомченко, О.А. Разработка внедрение хлорной технологии производства никеля и кобальта в ОАО” Кольская ГМК” Закономерности процессов переработки медно-никелевого фанштейна применительно к хлорной технологии производства электролитного никеля/ О.А. Хомченко, Г.И. Садовская, В.Л. Дубровский, П.В. Смирнов, С.Л. Цапах// Москва, Руда и Металлы, Цветные металлы, № 9 (861), 2014, С. 81-88.
144. Худяков, С.Г., Мелкомукова О.Г., Лановецкий С.В. - Оценка возможности обогащения отходов титанового производства методами механической и магнитной сепарации - Молодежная наука в развитии регионов - Пермский национальный исследовательский политехнический университет – Том 1 – 2018 – стр. 230 -234

145. Цапах, С. Л., Механизм осаждения меди из хлоридных растворов в присутствии элементарной серы и восстановителя/ С.Л. Цапах, Л.С. Лутова, А.Ю. Четверкин// Москва, Руда и Металлы, Цветные металлы, № 4, 2012, С. 26-31.
146. Цапах, С.Л., Закономерности процессов переработки медно-никелевого фанштейна применительно к хлорной технологии производства электролитного никеля/ С.Л. Цапах, К.А. Демидов, О.А. Хомченко, Г.И. Садовская// Москва, Руда и Металлы, Цветные металлы, № 9, 2009, С. 72-75.
147. Цемехман, Л. Ш., Парецкий В. М. Современные методы переработки сульфидных медно-никелевых концентратов: обзор // Цветные металлы. – 2020. - № 1. - С. 24-31.
148. Цемехман, Л. Ш., Фомичев В. Б., Ерцева Л. Н., Н. Г. Кайтмазов, С. М. Козырев, В. И. Максимов, Шнеерсон Я. М., Дьяченко В. Т. Атлас минералогического сырья, технологических продуктов и товарной продукции ЗФ ОАО ГМК «Норильский никель». – М.: Издательский дом руда и металлы, 2010. – 336 с.
149. Черноусенко, Е.В., Вишнякова И.Н., Каменева Ю.С., Нерадовский Ю.Н. - Оценка возможности доизвлечения цветных металлов из лежалых хвостов обогащения медно-никелевых руд - Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) - №7 – 2019 – стр. 196-206
150. Черноусенко, Е.В., Митрофанова Г.В., Вишнякова И.Н., Каменева Ю.С. - Флотационные и магнитные методы для выделения цветных металлов из бедного техногенного сырья - Цветные металлы - № 2 – 2019 год – стр. 11-16
151. Чуфаров, Г.И., Журавлева М.Г. Каталитические явления при восстановлении оксидов металлов и химических соединений. – М.: Металлургиздат, 1964.
152. Чуфаров, Г.И., Журавлева М.Г., Балакирев В.Ф. Состояние теории восстановления металлов. – М.: Наука, 1970.
153. Чуфаров, Г.И., Мень А.Н., Балакирев В.Ф. Термодинамика процессов восстановления оксидов металлов. – М.: Металлургия, 1970.
154. Чуфаров, Г.И., Татиевская Е.П. Адсорбционно-кинетическая теория восстановления оксидов металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1953.
155. Чуфаров, Г.И., Татиевская Е.П. Механизм и кинетика восстановления оксидов металлов. – Свердловск, 1956.
156. Шамро, Э.А., Вязьмикин О.А., Евланов С.Ф. Кинетика процесса газового восстановления промышленной закиси никеля в кипящем слое. – Цв. металлы, 1970. - №12.
157. Ширяев, А.А., Величко Ю.В., Ботвинников В.В., Гончаров А.И. - Обогащение отходов богатых окисленных руд Кривого Рога методом сухой магнитной сепарации - Обогащение руд - №2 – 2005 год – стр. 7-10

158. Эллиот, Д.Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавильных процессов. – М.: Metallurgy, 1969.
159. What is new in FactSage 6.4: URL: <http://www.crct.polymtl.ca/fact/facthelp/FS64new.htm> (дата обращения 20.11.2021) Режим доступа: свободный. – Текст: электронный
160. FactSage: URL: <http://www.factsage.com/> (дата обращения 15.02.2022) Режим доступа: свободный. – Текст: электронный
161. Alexander, M., Kinetics and mechanism of oxidation for nickel-containing pyrrhotite tailings/ Alexander M. Klyushnikov, Rosa I. Gulyaeva, Evgeniy N. Selivanov & Sergey M. Pikalov// Springer, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, vol. 28, 2021, pp. 1469–1477
162. Asaki, Z., Mori S., Ikeda M., Kondo Y. Oxidation of pyrrhotite particles falling through a vertical tube // Metallurgical Transactions. - 1985. - V. 16B. - № 3. - P. 627-638
163. Boutouchent-Guerfi, N., Boussourdi, M.A., Lami, A. et al. Dry Magnetic Separation on the Recovery of Metal Fragments from Kerf Slurry Waste Produced during the Manufacture of Photovoltaic Solar Cells. Silicon 13, 149–153 (2021)
164. Bale, C. W., E. Bélisle, P. Chartrand, S. A. Decterov, G. Eriksson, A.E. Gheribi, K. Hack, I. H. Jung, Y. B. Kang, J. Melançon, A. D. Pelton, S. Petersen, C. Robelin. J. Sangster, P. Spencer and M-A. Van Ende. FactSage Thermochemical Software and Databases - 2010-2016 // Calphad. — 2016. — Vol. 54. — P. 35-53. <www.factsage.com>
165. Chernyavskiy, N.V., Roskolupa, A.I. & Batrak, A.A. Fluidized bed co-combustion of carbon-containing material from ash dumps at anthracite thermal power plants with sludge. Power Technol Eng 46, 59–64 (2012)
166. Diaz, C., Conard B. R., Gordon J. R., Marcuson S. W., Burgess K. I. Deep roasting of nickel concentrate // CIM Bulletin. – 1994. - V. 87. - № 981. – P. 72-78.
167. Dong Lu, Lv, G., Zhang, TA. *et al.* Roasting Pre-Treatment of High-Sulfur Bauxite for Sulfide Removal and Digestion Performance of Roasted Ore. *Russ. J. Non-ferrous Metals* 59, 493–501 (2018).
168. Dong Soo Lee, A Kinetics of Hydrogen Reduction of Nickel Oxide at Moderate Temperature/ Dong Soo Lee, Dong Joon Min// Springer, Metals and Materials International, vol. 25, 2019, pp. 982–990
169. Edstorm, J.O. Reactions forlopp vid Ralsinering och järnmalsre duction. –Jernkontor. ann. – 1958. - №7. – S. 400-406.
170. Eketorp, S., Brabie V. Energy consideratios in reduction processes // Met. and Metal Form. – 1974. – 41. - №12. – P. 363-368.

171. Ganguly, N. D., Mukherjee S. K. Studies on mechanism and kinetics of the oxidation of copper sulphide. I. Oxidation of copper sulphide in a fixed bed // *Chemical Engineering Science*. – 1967. – V. 22. - № 8. – P. 1091-1105.
172. Gao, L., Liu, Z., Pan, Y. et al. Separation and Recovery of Iron and Nickel from Low-Grade Laterite Nickel Ore Using Reduction Roasting at Rotary Kiln Followed by Magnetic Separation Technique. *Mining, Metallurgy & Exploration* 36, 375–384 (2019)
173. Habashi, F. Chalcopyrite, its chemistry and metallurgy. Ch. 5. - New York. - 1978. - P. 45-62.
174. Jeangros, Q., Reduction of nickel oxide particles by hydrogen studied in an environmental TEM/ Q. Jeangros, T. W. Hansen, J. B. Wagner, C. D. Damsgaard, R. E. Dunin-Borkowski, C. He'bert, J. Van herle, A. Hessler-Wyser// *Energy materials & thermoelectrics, Mater Sci*, № 48, 2013, pp 2893–2907
175. Khachatur, V. Manukyan, Nickel Oxide Reduction by Hydrogen: Kinetics and Structural Transformations/ Khachatur V. Manukyan, Arpi G. Avetisyan, Christopher E. Shuck, Hakob A. Chatilyan, Sergei Rouvimov, Suren L. Kharatyan, and Alexander S. Mukasyan// *The Journal of Physical Chemistry C*, 2015, Vol. 28, pp. 16131–16138
176. Lahiri, A.K. Kinetic of reaction between gas and solids // *J. Iron and Steel Inst.* – 1968. - №11. – P. 1118-1123.
177. Leitner, J. Kinetika hematitovych pelet kislienikem uhelnatum. – *Hutn. Listy* – 1970. – 25. - №4. – S. 211-221.
178. Lubker, R.A., Bruland K.W. H-iron production by Alan Wood // *J. Metals*. – 1960. – 12. - №4. – P. 321-324.
179. Mamyán, S., Kinetic features of nickel oxide reduction by methane at non isothermal conditions/ S. Mamyán, H. A. Chatilyan, and S. L. Kharatyan// *S. Mamyán et al.*, XV International Symposium on Self-Propagating High-Temperature Synthesis, Moscow, 2019, pp. 254-256]
180. Ma, N., Houser, J.B., Wood, L.A. et al. Enhancement of Iron Recovery from Steelmaking Slag Fines by Process Optimization of Upgrading the Slag Fines with Dry Magnetic Separation. *J. Sustain. Metall.* 3, 280–288 (2017).
181. Mao, C., Lin J. Kinetic study of roasting of nickel sulfide concentrates // *Zhongnan Kuangye Xuegan Xuebao (China)*. - 1988. - V. 19. - № 3. - P. 333-339.
182. Nakada Tetsuro, Vamada Pyuyi, Narito Voshihito. Jshikawajama. – *Harima Eng. Rev.* – 1975. – 15. - №3. –P. 329-339.
183. Oprea, F. Mechanism of the oxidation of iron and copper sulfides // *Rudarsko-metalurski zbornik*. – 1963. - № 3. – P. 193-212.

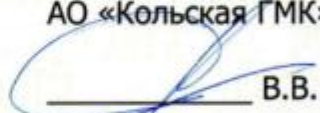
184. Orr, R., Warner A. Fluid bed roasting in the Thompson smelter // The 13th Annual Conference of Metallurgists. Toronto (Ontario, Canada), - 1974. - 21 p.
185. Pat. CN212167778 (U) Magnetite dry separation belt devic/ Yu Xiaoyuan, Fu Yu. applicant Linyi Hui Bao Ling Iron Co LTD; 2020-12-18
186. Pat. CN212143048 (U) Dry-separation magnetic roller ore separation device/ LIU ZHUANQING. Applicant Xinjiang Kalatongke Mining Co LTD; 2020-12-15
187. Pat. CN211838464 (U) Segmented dry magnetic separation device for powdery magnetic materials/ Wang Yucheng; Cheng Baojun. Applicant Western Heavy ind Co LTD of Gansu Jiuquan Iron & Steel Group; 2020-11-03
188. Rosenqvist, T., Hofseth A. Phase relations and thermodynamics of the copper-iron-sulphur-oxygen system at 700-1000°C // Scandinavian journal of metallurgy. – 1980. V. 9. - № 1. – P. 129-138.
189. Savinova, Y.A., Popov, V.A., Portov, A.B. et al. Roasting of a sulfide polymetallic concentrate in a fluidized bed furnace. Russ. Metall. 2014, 351–357 (2014).
190. Seryogin, P.S. Production of reduced nickel power// P.S. Seryogin; OAO Gipronickel Institute; TMS fall extraction and processing division: Sohn international symposium, 2006, pp 485-495
191. Shamsuddin, M., Sohn, H.Y. Constitutive Topics in Physical Chemistry of High-Temperature Nonferrous Metallurgy—A Review: Part 1. Sulfide Roasting and Smelting. *JOM* 71, 3253–3265 (2019).
192. Tien, H., Turkdtogan E. Gaseous reduction of iron oxides. Pt. 4. // Met. Trans. – 1972. - №8. – P. 2039-2048.
193. Upgrading pyrite cinders for iron and steel production // Sulphur. - 1973. - №106. – P. 52-57.
194. Закрытие никелевого завода: URL: <https://www.nornickel.ru/sustainability/projects/plant-closure/> (дата обращения 15.05.2022) Режим доступа: свободный. – Текст: электронный
195. Vagner, C. *Acta Metallica*, 5, 427, 1957.
196. V E Quiroz Cabascango, Nickel oxide reduction in CO/CO₂ gas mixtures in reverberatory furnaces/ V E Quiroz Cabascango and V Yu Bazhin// *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1515,2020, pp. 1-9
197. Wang, J., Zu, P., Yi, S. et al. Preconcentration of Iron, Rare Earth, and Fluorite from Bayan Obo Ore Using Superconducting Magnetic Separation. *Mining, Metallurgy & Exploration* 38, 701–712 (2021).
198. Xi, Z., Wang, Z., Li, X. *et al.* Improving the Desulfurization Degree of High-Grade Nickel Matte via a Two-Step Oxidation Roasting Process. *Metall Mater Trans B* 49, 1834–1840 (2018).

199. Yan-ling Zhang, Reduction mechanism of $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-NiO}$ system by carbon/ Yan-ling Zhang, Wen-ming Guo, Yang Liu & Xin-lei Jia// Journal of Central South University, vol. 23, 2016, pp. 1318–1325
200. Yu, D., Utigard, T.A. & Barati, M. Fluidized Bed Selective Oxidation-Sulfation Roasting of Nickel Sulfide Concentrate: Part II. Sulfation Roasting. Metall Mater Trans B 45, 662–674 (2014)
201. Yu, D., Utigard, T., Barati, M. Fluidized Oxidation-Sulfation Roasting of Nickel Sulfide Concentrate // Metallurgical and Materials Transactions. – 2014. – V. 45B. – No. 2. – P. 653-674.
202. Zhao, Q., Xue, J. & Chen, W. Upgrading of Iron Concentrate by Fluidized-Bed Magnetizing Roasting of Siderite to Magnetite in $\text{CO-H}_2\text{-N}_2$ Atmosphere. Trans Indian Inst Met 72, 1381–1391 (2019)
203. Zhao, Xi. Improving the Desulfurization Degree of High-Grade Nickel Matte via a Two-Step Oxidation Roasting Process/ Zhao Xi, Zhixing Wang, Xinhai Li, Huajun Guo, Guochun Yan & Jiexi Wang// Springer, Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 49, 2018, PP.1834–1840

**НОРНИКЕЛЬ**

КОЛЬСКАЯ ГМК

УТВЕРЖДАЮ
И.о. Первого заместителя
генерального директора –
Главного инженера
АО «Кольская ГМК»


В.В. Баранов

« 01 » 12 2023 г.

**Акт внедрения**

Снижения восстановительного агента в трубчатые печи и организации
перечистки немагнитной фракции

г. Мончегорск

« 01 » 12 2023 г.

Комиссия в составе:

От АО «Кольская ГМК»:

- Первый заместитель генерального директора – главный инженер Рябушкин Максим Игоревич;
- Начальник Технического управления Рабчук Алексей Викторович;
- Начальник Инженерного центра Копылов Вадим Витальевич;
- Начальник Научно-технического центра Савоськин Дмитрий Сергеевич;
- начальник Отдела научно-технического развития, к.т.н. Тюкин Александр Павлович;
- главный инженер Рафинировочного цеха Михалев Константин Викторович,

От ООО «Институт Гипроникель»:

- директор Департамента по исследования и разработкам, д.т.н. Цымбулов Леонид Борисович;
- заведующий Лабораторией пирометаллургии Румянцев Денис Владимирович,

- старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии, к.т.н. Пахомов Роман Александрович

подтверждают внедрение перечистой операции немагнитной фракции для увеличения показателей извлечения металлизированного порошка в продукт пирометаллургического передела, а также применение рекомендаций по снижению расхода восстановителя при реализации восстановительного обжига окисленного никелевого огарка в трубчатых печах в рафинировочном цехе АО «Кольская ГМК», разработанных соискателем ученой степени кандидата технических наук, Первым заместителем генерального директора – Главным инженером АО «Кольская ГМК» Рябушкиным Максимом Игоревичем в рамках диссертационного исследования.

1. Описание технологического процесса

Пирометаллургический комплекс переработки никелевого сульфидного концентрата включает в себя печи окислительного обжига и трубчатые вращающиеся печи. Полученный металлический порошок трубчатых подвергается магнитной сепарации для отделения балластных примесей и невозстановленных оксидов металлов от магнитного продукта, для последующей переработки в гидрометаллургическом производстве.

На АО «Кольская ГМК» в рафинировочном цехе установлено три технологические нитки, включающие в себя печи обжига никелевого концентрата в кипящем слое и трубчатые вращающиеся печи для восстановления никелевого огарка. В печи кипящего слоя поступает кек вакуум-фильтров влажностью 6-9% масс, состоящий из никелевого концентрата от разделения фанштейна и оборотной пыли печей кипящего слоя, а также оборотные материалы производства. Обжиг ведется в интервале от 900 °С до 1200 °С. Загрузку шихты регулируют по температуре в слое, по концентрации диоксида серы (SO₂) в отходящих газах, по заданному расходу воздуха. Коэффициент избытка воздуха поддерживается в пределах от 1,05 до 1,25. Продуктом обжига является усредненный и укрупненный обессеренный продукт – никелевый огарок.

Горячий окисленный материал по течке поступает в трубчатые вращающиеся печи, где при взаимодействии восстановителя и температуры восстанавливается до металлического состояния, после чего охлаждается до температуры менее 200 °С и подвергается сухой магнитной сепарации. Магнитный продукт отправляется на гидрометаллургическое производство, немагнитная фракция выводится из технологической линии.

Магнитный продукт включает частицы немагнитных включений, которые не полностью удаляются при магнитной сепарации восстановленного порошка.

Помимо требований, предъявляемых к магнитному продукту, определенные требования предъявляются и к немагнитной фракции. Основным требованием является низкая концентрация металлического никеля в немагнитной фракции.

Значительные концентрации никеля в немагнитной фракции будут приводить к снижению извлечения никеля в готовую продукцию, а также увеличат количество незавершенного производства (оборот немагнитной фракции через головное плавильное производство).

2. Описание внедряемого решения

В ходе технологического опробования и проведения опытно-промышленных испытаний на пирометаллургическом участке и магнитной сепарации в 2021 году на АО «Кольская ГМК» производилось опробование различных продуктов, в том числе и продуктов разделения участка магнитной сепарации.

Анализ продуктов восстановительного обжига позволил установить перерасход восстановительного агента, который приводит к увеличенному выходу немагнитной фракции, а также усложняет переработку продукта богатого как углеродной, так и зольной составляющей.

Анализ отобранных продуктов участка магнитной сепарации позволил установить, что в текущей конфигурации при сепарации происходит значительный проскок и попадание металлизированной фракции в немагнитный продукт. В различные периоды содержание металлической фазы в немагнитной фракции достигало 44,7% масс. при средних показателях 17,6% масс. В тоже время магнитный продукт в целом отвечал требованиям, предъявляемым к магнитной фракции, содержание угля не превышало 0,2% масс., а средние показатели диоксида кремния составили 0,6 % масс.

По проведенным лабораторным исследованиям по разделению магнитной и немагнитной фракции при сравнении с результатами промышленных испытаний было установлено, что доля немагнитной фракции за счет более высокой плотности металлизированного продукта возрастает на 36,7 % отн.

Ввиду худшего разделения продуктов на промышленной установке АО «КГМК» по сравнению с лабораторными методами разделения, доля микропримесей и никеля в НМФ значительно растёт. Потери никеля с немагнитной фракцией в среднем составляют 1,69% отн. или 1832 т/год (по никелевому порошку 2181,9 т/год) при производительности 130000 т/год по никелю.

Неудовлетворительные показатели состава немагнитной фракции привели к необходимости разработки новой технологической схемы участка магнитной сепарации, проект которой утвержден, согласован и принят к реализации на заседании инвестиционного комитета ПАО «ГМК Норильский Никель» от 10.11.2021 года. Как временное решение на АО «Кольская ГМК» реализована перечистная операция немагнитной фракции для удаления металлизированного продукта из отсева.

3. Достигнутые практические результаты

Анализ работы позволил установить, что;

3.1. Работа трубчатой восстановительной печи, характеризуется избытком восстановителя, который составляет 20-35 % отн. от вводимого в работу угля. По результатам работы показано, что снижение данного показателя на 10 % отн. с одной стороны не приведет к снижению металлизации, а с другой позволит снизить расход восстановительного агента и выход немагнитной фракции.

3.2. Организованный в период реконструкции участка магнитной сепарации дополнительный перечистный передел немагнитной фракции позволил существенно снизить долю металлизированного порошка в немагнитной фракции, что благоприятно сказалось на экономике производственного цикла.

Реализация мероприятий по снижению расхода восстановителя и внедрение перечистной операции немагнитной фракции при сравнительном анализе работы 2021 и 2022 годов показывает, что выход немагнитной фракции снизился на 10% отн. (до 11,5 т/сутки), при этом содержание металлического никеля в немагнитном продукте снизилось с 11,1% масс. до 2,6 % масс, что соответствует снижению оборота никеля на 370 т/год. Сумма безвозвратных потерь никеля снижается на 56 т/год.

Выводы

В промышленную практику внедрены рекомендации по снижению расхода восстановителя, подаваемого в трубчатую печь, а также перечистная операция немагнитной фракции. Произведенные мероприятия позволили снизить содержание никеля в немагнитной фракции до 2,6 % масс., что в годовом выражении снижает оборот никеля через головное плавильное производство на 370 тонн, а выпуск товарного никеля увеличивается на 56 т/год.

От АО «Кольская ГМК»:

М.И. Рябушкин

А.В. Рабчук

В.В. Копылов

Д.С. Савоськин

А.П. Тюкин

К.В. Михалев

От ООО «Институт Гипроникель»:

Л.Б. Цымбулов

Д.В. Румянцев

Р.А. Пахомов

Подписи Верны
Ведущий специалист *В.А. Мухомов*
01.12.2023





НОРНИКЕЛЬ

КОЛЬСКАЯ ГМК

УТВЕРЖДАЮ
И.о. Первого заместителя
генерального директора –
Главного инженера
АО «Кольская ГМК»

 В.В. Баранов

« 01 » 12 2023 г.



Акт внедрения

Модернизация участка магнитной сепарации

г. Мончегорск

« 01 » 12 2023 г.

Комиссия в составе:

От АО «Кольская ГМК»:

- Первый заместитель генерального директора – главный инженер Рябушкин Максим Игоревич;
- Начальник Технического управления Рабчук Алексей Викторович;
- Начальник Инженерного центра Копылов Вадим Витальевич;
- Начальник Научно-технического центра Савоськин Дмитрий Сергеевич;
- начальник Отдела научно-технического развития, к.т.н. Тюкин Александр Павлович;
- главный инженер Рафинировочного цеха Михалев Константин Викторович,

От ООО «Институт Гипроникель»:

- директор Департамента по исследования и разработкам, д.т.н. Цымбулов Леонид Борисович;
- заведующий Лабораторией пирометаллургии Румянцев Денис Владимирович,

- старший научный сотрудник лаборатории пиromеталлургии, к.т.н.
Пахомов Роман Александрович

подтверждают утверждение и принятие в работу технологических решений по модернизации участка магнитной сепарации в рафинировочном цехе АО «Кольская ГМК», разработанных соискателем ученой степени кандидата технических наук, Первым заместителем генерального директора – Главным инженером АО «Кольская ГМК» Рябушкиным Максимом Игоревичем в рамках диссертационного исследования, с целью повышения показателей извлечения металлизированного продукта в магнитную фракцию, а также повышения показателей удаления примесных компонентов - диоксида кремния и углерода.

1. Описание технологического процесса

Пиromеталлургический комплекс переработки никелевого сульфидного концентрата включает в себя печи окислительного обжига и трубчатые вращающиеся печи, продуктом которых является металлический порошок, подвергаемый магнитной сепарации для отделения балластных примесей и невозстановленных оксидов металлов. Магнитная фракция участка магнитной сепарации направляется в гидрометаллургическое производство для последующей переработки.

На АО «Кольская ГМК» в рафинировочном цехе установлено три технологические нитки, включающие в себя печи кипящего слоя и трубчатые вращающиеся печи. В печи кипящего слоя поступает кек вакуум-фильтров, состоящий из никелевого концентрата от разделения фанштейна и оборотной пыли печей кипящего слоя. В результате окислительного обжига образуется усредненный и укрупненный обессеренный продукт – никелевый огарок, который направляется на следующий передел.

Горячий окисленный материал по течке поступает в трубчатые вращающиеся печи, где при взаимодействии угля и температуры восстанавливается до металлического состояния, после чего охлаждается до температуры менее 200°C.

Смесь из восстановленного металлического порошка и немагнитной фракции, в которой содержатся остатки непрореагировавшего угля, зольная составляющая, невозстановленные оксиды металлов и металлические частицы, поступает на участок магнитной сепарации.

Участок магнитной сепарации включает в себя предварительное дробление в роторной дробилке до крупности -8 мм. Дробленый продукт совместно с подрешетным продуктом грохота самотеком поступают на магнитные сепараторы, где происходит разделение материала на магнитную и немагнитную фракции.

Магнитный продукт отправляется на гидрометаллургическое производство, а немагнитная фракция выводится из технологической линии.

Однако, в настоящее время эффективность реализованной схемы магнитной сепарации невысока, так как содержание углерода и диоксида кремния в магнитной фракции превышают регламентные значения. Кроме того, в процессе перехода на новую технологию хлорного выщелачивания никелевого порошка и последующей электроэкстракции никеля, существенно ужесточились требования к химическому и гранулометрическому составам растворяемого металлического порошка. С другой стороны, в немагнитном продукте содержится значительное количество металлического никеля (единичных пробах 44,7 % масс.) существенно выше регламентных показателей, который не может быть переработан на АО «Кольская ГМК», что увеличивает транспортное плечо, оборот практически товарного продукта, а также снижает выпуск товарного никеля.

Существующая схема разделения магнитного и немагнитного продукта была подвергнута значительным изменениям и корректировкам, которым предшествовали соответствующие исследования по подбору цепи аппаратов и их режимов работы.

2. Описание внедряемого решения

В ходе технологического опробования и проведения опытно-промышленных испытаний на пирометаллургическом участке и магнитной сепарации в 2021 году на АО «Кольская ГМК» проведен отбор продуктов для укрупненных исследований по подбору параметров и разработки технологической схемы участка магнитной сепарации.

Испытания по работе контрольной магнитной сепарации проводились в три этапа, на первом этапе в лабораторных условиях имитировали работу текущей схемы переработки при условии реализации контрольной сепарации. На втором этапе проверялась работа двухстадийной схемы переработки при классе крупности -1,0 мм. На третьем этапе проводились исследования с классом крупности -2,5 мм. Решение увеличить крупность питания сепараторов до -2,5 мм было вызвано более жесткими требованиями по содержанию мелких классов крупности предъявляемыми к продукту магнитной сепарации при реализации хлорного выщелачивания металлического порошка.

По результатам исследований была разработана технологическая схема двухстадийной магнитной сепарации, представленная на рисунке 1.

Однако, в настоящее время эффективность реализованной схемы магнитной сепарации невысока, так как содержание углерода и диоксида кремния в магнитной фракции превышают регламентные значения. Кроме того, в процессе перехода на новую технологию хлорного выщелачивания никелевого порошка и последующей электроэкстракции никеля, существенно ужесточились требования к химическому и гранулометрическому составам растворяемого металлического порошка. С другой стороны, в немагнитном продукте содержится значительное количество металлического никеля (единичных пробах 44,7 % масс.) существенно выше регламентных показателей, который не может быть переработан на АО «Кольская ГМК», что увеличивает транспортное плечо, оборот практически товарного продукта, а также снижает выпуск товарного никеля.

Существующая схема разделения магнитного и немагнитного продукта была подвергнута значительным изменениям и корректировкам, которым предшествовали соответствующие исследования по подбору цепи аппаратов и их режимов работы.

2. Описание внедряемого решения

В ходе технологического опробования и проведения опытно-промышленных испытаний на пирометаллургическом участке и магнитной сепарации в 2021 году на АО «Кольская ГМК» проведен отбор продуктов для укрупненных исследований по подбору параметров и разработки технологической схемы участка магнитной сепарации.

Испытания по работе контрольной магнитной сепарации проводились в три этапа, на первом этапе в лабораторных условиях имитировали работу текущей схемы переработки при условии реализации контрольной сепарации. На втором этапе проверялась работа двухстадийной схемы переработки при классе крупности -1,0 мм. На третьем этапе проводились исследования с классом крупности -2,5 мм. Решение увеличить крупность питания сепараторов до -2,5 мм было вызвано более жесткими требованиями по содержанию мелких классов крупности предъявляемыми к продукту магнитной сепарации при реализации хлорного выщелачивания металлического порошка.

По результатам исследований была разработана технологическая схема двухстадийной магнитной сепарации, представленная на рисунке 1.

Извлечение в магнитную фракцию при рекомендуемых параметрах вырастает с 98,3% отн. до 99,9 % отн, показатели эффективности удаления углерода и диоксида кремния в немагнитную фракцию 95,3% отн. и 32,2 % отн., соответственно.

Анализ полученных результатов позволяет оценить годовые показатели переработки никелевого порошка, определить доли потерь и произвести сравнение текущей и перспективных схем. Для определения эффективности применения рассмотрена существующая схема оборота никеля, содержащегося в НМФ через плавильное производство ЗФ ПАО «ГМК Норильский Никель».

По произведенным расчетам, модернизация участка магнитной сепарации позволит снизить оборот никеля в количестве 2360 т/год, а сумма безвозвратных потерь в результате оборота никеля снизится на 359 т/год.

Разработанный проект модернизации участка магнитной сепарации рафинировочного цеха АО «Кольская ГМК» одобрен к внедрению на заседании инвестиционного комитета ПАО «ГМК Норильский Никель» от 10.11.2021г и принят к реализации в первом квартале 2024 г.

Выводы

Разработана и принята к внедрению инвестиционным комитетом ПАО «ГМК Норильский Никель» новая технологическая схема участка магнитной сепарации рафинировочного цеха. Проведенные исследования показывают, что при рекомендованных параметрах извлечение в магнитную фракцию вырастает с 98,3% отн. до 99,9 % отн, показатели эффективности удаления углерода и диоксида кремния в немагнитную фракцию 95,3% отн. и 32,2 % отн., соответственно. В результате реализации схемы оборот никеля снизится на 2360 т/год, а выпуск товарного никеля увеличится на 359 т/год.

От АО «Кольская ГМК»:

М.И. Рябушкин

А.В. Рабчук

В.В. Копылов

Д.С. Савоськин

А.П. Тюкин

К.В. Михалев

От ООО «Институт Гипроникель»:

Л.Б. Цымбулов

Д.В. Румянцев

Р.А. Пахомов

Людмила Березина
 Ведущий специалист
 01.12.2023



ПРИЛОЖЕНИЕ Б Содержание основных компонентов в пробах кека поступающего в печи КС

Таблица Б.1 - Результаты аналитической химии проб сульфидной шихты поступающей в печи КС

Тип материала	Массовая доля, %										
	Ni	Cu	Co	Fe	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Pb	P
Кек	64,6	4,91	1,4	2,99	18,1	0,332	0,116	0,047	0,028	0,0479	0,029
Кек	64,5	5,11	1,41	3,13	15,7	0,375	0,128	0,059	0,027	0,052	0,031
Кек	65,3	5,4	1,36	3,21	17,8	0,333	0,299	0,056	0,021	0,048	0,031
Кек	65,4	4,72	1,35	3,08	17,5	0,364	0,147	0,052	0,027	0,052	0,027
Кек	64,4	3,98	1,33	2,85	16,2	0,475	0,196	0,054	0,027	0,061	0,023
Кек	63,4	3,74	1,33	2,82	14,4	0,574	0,246	0,061	0,032	0,067	0,023
Кек	65,9	4,53	1,39	3,18	13,7	0,506	0,179	0,054	0,028	0,06	0,027
Кек	65,7	5,89	1,34	2,88	20	0,245	0,099	0,041	0,022	0,04	0,035
Кек	64,1	5,17	1,33	2,67	19,6	0,297	0,103	0,041	0,018	0,037	0,029
Кек	65,1	4,88	1,36	2,75	19,5	0,39	0,161	0,058	0,025	0,046	0,027
Кек	65,7	5,02	1,36	2,76	19,5	0,356	0,128	0,037	0,023	0,044	0,028
Кек	64,7	4,84	1,36	2,71	18,5	0,418	0,173	0,053	0,023	0,045	0,027
Кек	64,1	6,01	1,32	2,9	18,7	0,316	0,105	0,053	0,02	0,043	0,034
Кек	63,5	6,34	1,35	2,88	18,6	0,299	0,108	0,05	0,02	0,042	0,036
Кек	63,3	5,74	1,35	2,88	19,7	0,385	0,174	0,056	0,024	0,042	0,034
Кек	63,4	5,9	1,33	2,91	19,3	0,442	0,178	0,047	0,019	0,044	0,032
Кек	62,4	6,42	1,34	2,92	19,5	0,437	0,194	0,059	0,023	0,042	0,034
Кек	61,8	7,66	1,33	3,09	18,8	0,394	0,17	0,06	0,023	0,036	0,042
Кек	62,7	5,77	1,36	2,88	18,6	0,482	0,188	0,044	0,027	0,039	0,034
Кек	62,3	5,92	1,34	2,93	18,5	0,535	0,206	0,06	0,026	0,039	0,033
Кек	66,3	5,17	1,37	2,92	18,8	0,392	0,17	0,045	0,021	0,041	0,027
Кек	67,4	4,31	1,46	3,04	16,6	0,34	0,079	н/а	н/а	н/а	н/а
Кек	67,6	4,52	1,46	3,06	15,5	0,33	0,082	н/а	н/а	н/а	н/а
Кек	67,9	4,29	1,48	2,99	15	0,34	0,073	н/а	н/а	н/а	н/а
Кек	65,4	4,69	1,42	3,01	15,6	0,33	0,083	н/а	н/а	н/а	н/а
Кек	65,3	4,54	1,41	2,97	18,5	0,44	0,16	н/а	н/а	н/а	н/а
Кек	64,6	5,16	1,43	3,08	18,9	0,47	0,18	н/а	н/а	н/а	н/а
Кек	64,3	4,99	1,4	2,91	19,2	0,4	0,13	н/а	н/а	н/а	н/а
Кек	65,1	5,84	1,44	3,14	18,7	0,31	0,099	н/а	н/а	н/а	н/а

ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты анализов аналитической химии различных продуктов

Таблица В.1 - Результаты аналитической химии общих проб магнитной фракции

Дата	Время	Содержание, %											
МФ		Ni	Nimet.	Cu	Co	Сомет.	Fe	Фемет.	S	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO
16.07.21	12:00	84,3	75,4	5,96	1,73	1,57	3,61	3,12	0,054	0,46	0,046	0,174	0,035
16.07.21	16:00	86,5	78,9	6,18	1,81	1,61	3,81	3,26	0,089	0,66	0,085	0,23	0,067
16.07.21	20:00	83,9	79,1	6	1,77	1,62	3,75	3,39	0,073	0,56	0,053	0,22	0,04
17.07.21	12:00	87,1	78,6	6,82	1,83	1,62	3,84	3,43	0,09	0,54	0,050	0,23	0,036
17.07.21	16:00	84,2	82,6	6,69	1,78	1,69	3,66	3,53	0,121	0,57	0,067	0,23	0,044
17.07.21	20:00	84,7	78,8	7,61	1,79	1,6	3,75	3,35	0,125	0,71	0,068	0,24	0,052
МФ		C	Zn	Pb	P	As	Sn	Sb	Cd	Bi	Se	Te	
16.07.21	12:00	0,119	0,015	0,0058	0,047	0,013	0,00117	0,127	0,000019	0,00053	0,00260	0,00097	
16.07.21	16:00	0,099	0,0014	0,0128	0,044	0,018	0,00112	0,128	0,000015	0,00096	0,00340	0,00176	
16.07.21	20:00	0,140	0,0012	0,0084	0,047	0,016	0,00118	0,128	0,000012	0,00064	0,00250	0,00141	
17.07.21	12:00	0,081	0,0011	0,0058	0,053	0,012	0,00113	0,130	0,000011	0,00038	0,00350	0,00120	
17.07.21	16:00	0,074	0,0012	0,0064	0,051	0,014	0,00115	0,124	0,000012	0,00040	0,00300	0,00110	
17.07.21	20:00	0,082	0,0012	0,0086	0,056	0,018	0,00117	0,118	0,000014	0,00055	0,00310	0,00180	

Таблица В.2 - Результаты аналитической химии общих проб немагнитной фракции

Дата	Время	Содержание, %												
		HMФ	Ni	Nimet.	Cu	Co	Сомет.	Fe	Фемет.	S	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO
16.07.21	12:00		37,8	37,8	2,54	0,76	0,76	1,72	1,58	0,117	4,12	0,150	2,24	0,092
16.07.21	16:00		8,17	6,5	0,541	0,18	0,13	0,88	0,40	0,338	6,42	0,390	3,37	0,25
16.07.21	20:00		28,3	24,6	1,87	0,55	0,51	1,31	1,03	0,197	4,12	0,139	2,36	0,096
17.07.21	12:00		18,8	18,6	1,25	0,39	0,39	1,09	0,86	0,238	5,33	0,205	2,88	0,126
17.07.21	16:00		9,73	7,28	0,77	0,20	0,16	0,77	0,43	0,268	7,92	0,207	3,94	0,147
17.07.21	20:00		14,7	11,3	1,1	0,29	0,23	1,09	0,60	0,423	5,49	0,330	2,91	0,184
HMФ		C	Zn	Pb	P	As	Sn	Sb	Cd		Bi	Se	Te	
16.07.21	12:00	51,1	0,002	0,0097	0,048	0,010	0,00056	0,00041	0,000018		0,00025	0,00330	0,00051	
16.07.21	16:00	75,3	0,0022	0,0381	0,062	0,010	0,00020	0,00013	0,000005		0,00027	0,00109	0,00044	
16.07.21	20:00	65,1	0,0025	0,0118	0,048	0,010	0,00043	0,00030	0,000011		0,00021	0,00266	0,00051	
17.07.21	12:00	65,5	0,002	0,0087	0,048	0,010	0,00031	0,00024	0,000009		0,00014	0,00215	0,00041	
17.07.21	16:00	66,8	0,002	0,0143	0,055	0,010	0,00023	0,00110	0,000007		0,00030	0,00117	0,00027	
17.07.21	20:00	69,7	0,0037	0,0144	0,058	0,010	0,00025	0,00021	0,000019		0,00021	0,00211	0,00043	

Таблица В.3 - Результаты аналитической химии средних проб МФ 12-го передела по классам крупности

Дата	Время	Класс крупности	Содержание, %													
			Ni	Nimet.	Cu	Co	Сомет.	Fe	Фемет.	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	C	Zn	Pb	P
14.07.21	12:00	+5,0	83,60	82,50	5,46	1,79	1,78	3,92	3,78	0,03	0,94	0,22	0,62	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	82,00	82,00	5,57	1,80	1,77	4,59	4,39	0,05	0,95	0,24	0,26	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	82,60	80,80	5,58	1,79	1,75	4,10	4,05	0,02	0,98	0,27	0,19	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	83,50	82,30	6,23	1,79	1,78	3,67	3,58	0,03	0,79	0,20	0,07	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	84,10	83,70	5,81	1,78	1,78	3,46	3,46	0,03	0,53	0,14	0,03	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	84,00	83,60	5,37	1,75	1,75	3,41	3,33	0,02	0,56	0,13	0,03	н/а	н/а	н/а
		-0,2	83,50	83,20	5,21	1,74	1,71	3,61	3,50	0,03	0,64	0,16	0,17	н/а	н/а	н/а
14.07.21	14:00	+5,0	79,50	79,50	4,64	1,73	1,72	3,65	3,59	0,05	0,85	0,29	3,49	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	79,10	79,00	5,25	1,76	1,70	4,04	3,86	0,03	0,95	0,34	3,06	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	81,40	81,00	5,54	1,76	1,72	3,88	3,67	0,07	0,77	0,23	0,91	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	84,70	84,30	5,59	1,82	1,77	3,62	3,47	0,02	0,57	0,17	0,32	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	84,10	84,10	5,22	1,72	1,72	3,29	3,27	0,03	1,28	0,14	0,11	н/а	н/а	н/а

Продолжение таблицы В.3

Дата	Время	Класс крупности	Содержание, %													
			Ni	Nimet.	Cu	Co	Сомет.	Fe	Фемет.	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	C	Zn	Pb	P
14.07.21	14:00	-0,45+0,2	85,60	85,60	5,20	1,75	1,73	3,39	3,33	0,03	0,51	0,14	0,07	н/а	н/а	н/а
		-0,2	81,20	79,80	5,02	1,73	1,67	3,59	3,32	0,05	1,01	0,34	1,14	н/а	н/а	н/а
14.07.21	16:00	+5,0	83,90	82,60	5,21	1,78	1,76	4,03	3,84	0,11	0,83	0,31	3,12	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	84,80	84,80	5,41	1,83	1,83	4,26	4,11	0,01	0,82	0,24	1,94	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	85,60	85,60	5,74	1,84	1,83	3,96	3,85	0,00	0,76	0,25	0,51	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	87,70	87,20	5,74	1,85	1,81	3,71	3,58	0,07	0,50	0,17	0,17	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	88,50	88,50	5,52	1,87	1,85	3,61	3,53	0,02	0,37	0,12	0,04	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	86,50	86,40	5,33	1,80	1,78	3,49	3,45	0,01	0,39	0,12	0,03	н/а	н/а	н/а
14.07.21	18:00	-0,2	86,00	86,00	5,22	1,80	1,78	3,76	3,63	0,03	0,79	0,23	0,65	н/а	н/а	н/а
		+5,0	83,20	82,90	5,42	1,79	1,79	3,61	3,57	0,05	0,69	0,21	0,61	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	82,00	81,90	5,29	1,80	1,80	4,10	4,06	0,02	0,77	0,21	1,10	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	81,20	81,00	4,95	1,77	1,75	4,07	3,90	0,03	1,12	0,30	0,36	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	83,80	83,80	5,67	1,82	1,79	3,71	3,64	0,02	0,76	0,17	0,14	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	84,50	83,30	5,43	1,78	1,78	3,42	3,34	0,02	0,50	0,13	0,03	н/а	н/а	н/а
14.07.21	20:00	-0,45+0,2	83,60	83,40	5,12	1,75	1,69	3,40	3,21	0,02	0,52	0,12	0,06	н/а	н/а	н/а
		-0,2	85,40	81,00	5,38	1,76	1,65	3,62	3,27	0,02	0,67	0,19	0,36	н/а	н/а	н/а
		+5,0	84,96	83,76	5,29	1,84	1,82	4,10	4,03	0,01	1,11	0,31	1,20	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	85,09	84,33	5,35	1,84	1,84	4,44	4,33	0,03	1,13	0,33	0,68	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	85,85	84,77	5,64	1,80	1,79	4,32	4,06	0,07	0,95	0,27	0,37	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	87,61	87,14	5,65	1,86	1,85	3,62	3,59	0,01	0,64	0,17	0,10	н/а	н/а	н/а
15.07.21	13:00	-0,8+0,45	87,89	86,32	5,67	1,82	1,80	3,50	3,46	0,01	0,49	0,13	0,02	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	86,58	85,96	5,63	1,82	1,80	3,56	3,46	0,01	0,54	0,14	0,04	н/а	н/а	н/а
		-0,2	85,22	84,28	5,76	1,84	1,79	3,88	3,70	0,03	0,85	0,25	0,51	н/а	н/а	н/а
		+5,0	82,87	75,08	5,70	1,90	1,72	4,32	3,74	н/а	0,73	0,24	н/а	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	83,00	75,33	5,76	1,95	1,79	4,80	4,28	н/а	0,76	0,24	н/а	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	79,93	74,88	5,78	1,83	1,73	4,41	4,08	н/а	0,69	0,23	н/а	н/а	н/а	н/а
15.07.21	13:00	-1,2+0,8	84,42	77,91	6,25	1,80	1,65	3,57	3,21	н/а	0,46	0,16	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	85,67	72,15	6,27	1,82	1,52	3,46	2,89	н/а	0,32	0,11	н/а	н/а	н/а	н/а
15.07.21	13:00	-0,45+0,2	85,72	74,72	6,12	1,82	1,58	3,51	3,06	н/а	0,37	0,12	н/а	н/а	н/а	н/а

Продолжение таблицы В.3

Дата	Время	Класс крупности	Содержание, %													
			Ni	Nimet.	Cu	Co	Сомет.	Fe	Фемет.	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	C	Zn	Pb	P
15.07.21	13:00	-0,2	84,21	73,67	5,93	1,79	1,57	3,89	3,27	н/а	0,87	0,31	н/а	н/а	н/а	н/а
15.07.21	15:00	+5,0	82,57	72,53	5,88	1,82	1,61	4,13	3,55	н/а	1,11	0,38	н/а	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	78,16	73,95	5,57	1,83	1,70	4,54	4,18	н/а	0,73	0,22	н/а	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	83,20	73,15	6,17	1,89	1,66	4,39	3,82	н/а	0,68	0,22	н/а	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	83,73	74,17	6,31	1,79	1,58	3,53	3,08	н/а	0,43	0,14	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	84,20	77,22	6,21	1,80	1,65	3,59	3,15	н/а	0,36	0,14	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	86,37	76,27	6,15	1,84	1,61	3,61	3,15	н/а	0,43	0,15	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,2	83,38	70,87	5,92	1,79	1,51	3,83	3,19	н/а	0,94	0,33	н/а	н/а	н/а	н/а
15.07.21	20:00	+5,0	84,40	н/а	6,40	1,81	н/а	3,98	н/а	н/а	0,96	0,29	н/а	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	85,00	н/а	6,42	1,84	н/а	4,72	н/а	н/а	0,98	0,29	н/а	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	86,10	н/а	6,58	1,82	н/а	4,38	н/а	н/а	0,73	0,21	н/а	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	89,30	н/а	6,67	1,81	н/а	3,70	н/а	н/а	0,49	0,15	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	87,50	н/а	6,60	1,78	н/а	3,57	н/а	н/а	0,42	0,12	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	86,70	н/а	6,57	1,79	н/а	3,66	н/а	н/а	0,46	0,13	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,2	85,50	н/а	6,60	1,77	н/а	3,93	н/а	н/а	0,72	0,21	н/а	н/а	н/а	н/а
16.07.21	12:00	+5,0	84,80	83,30	5,77	1,80	1,77	3,71	3,64	0,03	0,65	0,24	0,27	0,00	0,01	0,19
		-5,0+2,5	82,60	82,60	5,85	1,90	1,90	4,50	4,50	0,02	0,66	0,26	0,77	0,00	0,01	0,14
		-2,5+1,2	84,90	83,00	6,15	1,84	1,83	4,19	4,19	0,02	0,73	0,25	0,51	0,02	0,01	0,03
		-1,2+0,8	86,00	80,90	6,22	1,85	1,72	3,70	3,42	0,02	0,38	0,15	0,02	0,03	0,01	0,02
		-0,8+0,45	84,10	82,50	6,04	1,79	1,77	3,54	3,54	0,02	0,28	0,14	0,05	0,02	0,01	0,03
		-0,45+0,2	86,50	83,90	6,17	1,79	1,77	3,68	3,68	0,02	0,34	0,16	0,07	0,03	0,01	0,03
		-0,2	79,80	79,20	5,70	1,71	1,66	3,78	3,51	0,03	0,71	0,27	0,29	0,04	0,01	0,03
16.07.21	16:00	+5,0	80,10	74,20	5,85	1,73	1,46	4,17	2,82	0,11	1,53	0,52	1,37	0,00	0,03	0,05
		-5,0+2,5	86,60	82,50	5,94	1,91	1,87	5,03	4,79	0,04	0,83	0,32	0,17	0,00	0,02	0,03
		-2,5+1,2	83,30	80,40	6,06	1,83	1,77	4,44	3,98	0,03	0,70	0,29	0,13	0,00	0,03	0,02
		-1,2+0,8	84,30	81,60	6,07	1,81	1,78	3,69	3,45	0,03	0,36	0,19	0,10	0,00	0,02	0,02
		-0,8+0,45	86,40	84,60	6,00	1,79	1,77	3,69	3,52	0,03	0,34	0,17	0,10	0,01	0,02	0,03
		-0,45+0,2	84,60	87,80	5,42	1,88	1,74	4,51	3,53	0,03	0,42	0,20	0,13	0,00	0,02	0,15
		-0,2	83,70	82,00	5,42	1,68	1,22	3,90	2,58	0,04	0,75	0,34	0,22	0,00	0,04	0,04

Продолжение таблицы В.3

Дата	Время	Класс крупности	Содержание, %													
			Ni	Nimet.	Cu	Co	Сомет.	Fe	Фемет.	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	C	Zn	Pb	P
16.07.21	20:00	+5,0	83,02	80,91	6,43	1,89	1,77	4,46	3,90	0,04	0,74	0,34	0,67	0,00	0,00	0,01
		-5,0+2,5	81,65	79,53	6,19	1,90	1,85	5,01	4,60	0,03	0,80	0,35	0,54	0,00	0,00	0,02
		-2,5+1,2	82,47	81,02	6,66	1,90	1,82	4,78	4,27	0,03	0,59	0,30	0,27	0,00	0,00	0,02
		-1,2+0,8	85,09	85,09	6,66	1,84	1,82	3,92	3,70	0,03	0,28	0,19	0,06	0,00	0,00	0,01
		-0,8+0,45	86,54	84,01	6,52	1,82	1,79	3,80	3,60	0,02	0,22	0,17	0,04	0,00	0,00	0,01
		-0,45+0,2	84,36	82,43	6,46	1,85	1,76	3,98	3,61	0,03	0,28	0,19	0,08	0,00	0,00	0,02
		-0,2	82,02	80,61	6,25	1,83	1,74	4,38	3,87	0,03	0,68	0,36	0,41	0,00	0,00	0,01
17.07.21	12:00	+5,0	80,20	79,80	6,22	1,81	1,77	6,44	5,45	0,09	1,11	0,40	0,25	0,00	0,01	0,03
		-5,0+2,5	80,30	79,10	6,35	1,77	1,75	4,95	4,75	0,11	1,04	0,40	0,22	0,00	0,01	0,04
		-2,5+1,2	82,20	82,00	6,52	1,72	1,68	4,24	4,06	0,09	0,80	0,34	0,12	0,00	0,01	0,04
		-1,2+0,8	82,70	82,70	6,62	1,72	1,70	3,55	3,54	0,10	0,62	0,25	0,05	0,00	0,00	0,04
		-0,8+0,45	82,30	82,10	6,41	1,68	1,64	3,59	3,50	0,09	0,64	0,26	0,05	0,00	0,01	0,04
		-0,45+0,2	82,40	81,40	6,26	1,65	1,60	3,66	3,45	0,08	0,66	0,26	0,06	0,00	0,01	0,04
		-0,2	79,90	78,70	6,03	1,62	1,53	3,95	3,48	0,21	1,40	0,54	1,09	0,00	0,01	0,04
17.07.21	16:00	+5,0	80,00	80,00	6,15	1,73	1,65	4,83	4,20	0,23	1,12	0,35	0,27	0,00	0,01	0,03
		-5,0+2,5	80,60	78,40	6,60	1,77	1,69	4,95	4,56	0,10	1,05	0,38	0,19	0,00	0,01	0,04
		-2,5+1,2	80,20	79,60	6,57	1,69	1,64	6,02	3,98	0,13	0,83	0,30	0,06	0,00	0,01	0,04
		-1,2+0,8	83,50	82,10	6,85	1,73	1,64	3,71	3,51	0,13	0,53	0,22	0,04	0,00	0,01	0,03
		-0,8+0,45	80,40	80,40	6,52	1,64	1,62	3,50	3,05	0,12	0,54	0,24	0,05	0,00	0,01	0,04
		-0,45+0,2	83,50	83,50	6,27	1,72	1,72	3,58	3,57	0,15	0,60	0,23	0,05	0,00	0,01	0,03
		-0,2	80,00	79,80	7,80	1,62	1,54	3,66	3,37	0,23	0,95	0,37	0,35	0,00	0,01	0,04
17.07.21	20:00	+5,0	77,30	76,60	6,41	1,73	1,68	4,37	3,88	0,10	0,82	0,34	0,43	0,00	0,01	0,04
		-5,0+2,5	78,70	78,60	7,04	1,78	1,78	4,67	4,50	0,10	0,78	0,32	0,18	0,00	0,01	0,03
		-2,5+1,2	77,30	76,90	7,05	1,68	1,59	4,16	3,92	0,10	1,05	0,38	0,10	0,00	0,01	0,04
		-1,2+0,8	79,90	79,90	7,38	1,67	1,63	3,52	3,47	0,11	0,57	0,23	0,04	0,00	0,01	0,04
		-0,8+0,45	81,60	80,20	7,42	1,71	1,64	3,56	3,51	0,11	0,53	0,22	0,04	0,00	0,01	0,04
		-0,45+0,2	80,50	80,20	7,29	1,66	1,61	3,60	3,48	0,13	0,64	0,24	0,05	0,00	0,01	0,04
		-0,2	77,20	76,80	7,09	1,59	1,51	3,56	3,32	0,21	0,92	0,33	0,15	0,00	0,01	0,05

Продолжение таблицы В.3

Дата	Время	Класс крупности	Содержание, %													
			Ni	Nimet.	Cu	Co	Сомет.	Fe	Фемет.	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	C	Zn	Pb	P
18.07.21	12:00	+5,0	85,40	н/а	6,93	1,77	н/а	4,17	н/а	н/а	1,21	0,40	н/а	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	82,50	н/а	6,93	1,76	н/а	4,76	н/а	н/а	1,19	0,40	н/а	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	85,30	н/а	7,21	1,77	н/а	4,26	н/а	н/а	1,00	0,33	н/а	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	86,90	н/а	7,21	1,76	н/а	3,81	н/а	н/а	0,64	0,23	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	86,20	н/а	7,11	1,74	н/а	3,75	н/а	н/а	0,58	0,21	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	87,90	н/а	7,11	1,75	н/а	3,81	н/а	н/а	0,72	0,25	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,2	80,80	н/а	6,54	1,62	н/а	3,90	н/а	н/а	2,12	0,77	н/а	н/а	н/а	н/а
18.07.21	14:00	+5,0	81,70	н/а	7,00	1,76	н/а	5,78	н/а	н/а	1,73	0,56	н/а	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	84,40	н/а	7,26	1,82	н/а	5,17	н/а	н/а	1,30	0,42	н/а	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	85,70	н/а	7,40	1,77	н/а	4,45	н/а	н/а	0,99	0,33	н/а	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	86,10	н/а	7,33	1,75	н/а	3,81	н/а	н/а	0,63	0,23	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	86,70	н/а	7,25	1,75	н/а	3,77	н/а	н/а	0,60	0,22	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	86,30	н/а	7,26	1,74	н/а	3,81	н/а	н/а	0,70	0,24	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,2	82,90	н/а	6,98	1,66	н/а	4,04	н/а	н/а	1,61	0,54	н/а	н/а	н/а	н/а
18.07.21	16:00	+5,0	78,90	н/а	6,48	1,66	н/а	4,27	н/а	0,03	1,06	0,37	2,98	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	76,60	н/а	6,63	1,66	н/а	4,54	н/а	0,02	1,04	0,36	1,19	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	77,00	н/а	6,71	1,59	н/а	4,08	н/а	0,05	0,86	0,30	0,17	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	80,80	н/а	6,91	1,63	н/а	3,50	н/а	0,03	0,58	0,20	0,06	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	79,30	н/а	6,76	1,59	н/а	3,39	н/а	0,03	0,52	0,19	0,03	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	85,00	н/а	7,20	1,69	н/а	3,63	н/а	0,04	0,61	0,22	0,08	н/а	н/а	н/а
		-0,2	81,70	н/а	7,11	1,66	н/а	3,89	н/а	0,09	1,52	0,51	0,60	н/а	н/а	н/а
18.07.21	18:00	+5,0	72,00	н/а	6,36	1,54	н/а	12,27	н/а	0,06	1,60	0,73	1,39	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	82,80	н/а	7,37	1,80	н/а	5,25	н/а	0,05	1,18	0,38	0,62	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	83,60	н/а	7,51	1,74	н/а	4,29	н/а	0,03	0,95	0,32	0,19	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	84,00	н/а	7,53	1,72	н/а	3,72	н/а	0,04	0,63	0,21	0,07	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	85,20	н/а	7,59	1,75	н/а	3,74	н/а	0,04	0,61	0,21	0,05	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	85,80	н/а	7,47	1,73	н/а	3,74	н/а	0,03	0,72	0,23	0,01	н/а	н/а	н/а
		-0,2	77,40	н/а	7,17	1,67	н/а	3,88	н/а	0,04	1,57	0,50	0,84	н/а	н/а	н/а

Продолжение таблицы В.3

Дата	Время	Класс крупности	Содержание, %													
			Ni	Nimet.	Cu	Co	Сомет.	Fe	Фемет.	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	C	Zn	Pb	P
18.07.21	20:00	+5,0	78,50	н/а	6,79	1,70	н/а	4,35	н/а	0,08	1,28	0,39	5,02	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	79,50	н/а	7,30	1,78	н/а	4,89	н/а	0,15	0,99	0,33	1,99	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	84,50	н/а	7,70	1,76	н/а	4,32	н/а	0,05	0,94	0,32	0,43	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	85,30	н/а	7,66	1,72	н/а	3,71	н/а	0,01	0,59	0,20	0,13	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	84,90	н/а	7,59	1,71	н/а	3,69	н/а	0,05	0,62	0,21	0,03	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	92,20	н/а	7,70	1,76	н/а	3,84	н/а	0,02	0,78	0,23	0,06	н/а	н/а	н/а
		-0,2	84,20	н/а	7,18	1,69	н/а	4,03	н/а	0,05	1,61	0,50	0,89	н/а	н/а	н/а
19.07.21	12:00	+5,0	84,20	н/а	6,33	1,76	н/а	4,36	н/а	н/а	1,34	0,38	н/а	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	84,40	н/а	6,54	1,83	н/а	4,81	н/а	н/а	0,94	0,29	н/а	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	85,50	н/а	6,94	1,79	н/а	4,44	н/а	н/а	0,88	0,26	н/а	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	86,70	н/а	6,94	1,73	н/а	3,63	н/а	н/а	0,63	0,19	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	85,90	н/а	6,62	1,73	н/а	3,51	н/а	н/а	0,56	0,16	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	88,70	н/а	6,48	1,73	н/а	3,48	н/а	н/а	0,62	0,17	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,2	85,40	н/а	6,58	1,72	н/а	3,72	н/а	н/а	1,13	0,30	н/а	н/а	н/а	н/а
19.07.21	20:00	+5,0	83,20	н/а	5,88	1,78	н/а	4,89	н/а	н/а	0,94	0,24	н/а	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	83,20	н/а	6,38	1,77	н/а	4,64	н/а	н/а	1,03	0,26	н/а	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	82,40	н/а	6,83	1,74	н/а	4,25	н/а	н/а	1,06	0,27	н/а	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	85,40	н/а	7,11	1,75	н/а	3,63	н/а	н/а	0,60	0,18	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	83,00	н/а	6,55	1,67	н/а	3,35	н/а	н/а	0,51	0,14	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	85,70	н/а	6,60	1,72	н/а	3,47	н/а	н/а	0,56	0,14	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,2	85,60	н/а	6,37	1,67	н/а	3,65	н/а	н/а	0,97	0,26	н/а	н/а	н/а	н/а
19.07.21	22:00	+5,0	84,90	80,80	6,35	1,74	1,66	4,31	4,04	н/а	1,38	0,31	н/а	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	84,40	82,90	6,43	1,75	1,74	4,63	4,30	н/а	0,93	0,25	н/а	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	84,90	82,90	6,73	1,70	1,70	4,29	4,05	н/а	1,04	0,28	н/а	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	86,10	85,40	6,94	1,68	1,68	3,63	3,55	н/а	0,62	0,19	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	86,20	85,50	6,61	1,67	1,67	3,50	3,49	н/а	0,51	0,14	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	87,10	82,90	6,49	1,69	1,62	3,57	3,35	н/а	0,55	0,14	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,2	85,50	80,90	6,34	1,67	1,57	3,87	3,48	н/а	1,14	0,31	н/а	н/а	н/а	н/а

Продолжение таблицы В.3

Дата	Время	Класс крупности	Содержание, %													
			Ni	Nimet.	Cu	Co	Сомет.	Fe	Фемет.	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	C	Zn	Pb	P
20.07.21	0:00	+5,0	84,90	83,00	6,20	1,73	1,73	4,17	4,05	н/а	1,30	0,30	н/а	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	84,60	84,40	6,46	1,77	1,77	4,85	4,64	н/а	0,95	0,23	н/а	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	85,70	84,40	6,77	1,72	1,72	4,23	4,11	н/а	0,88	0,26	н/а	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	85,50	75,80	6,86	1,69	1,51	3,63	3,17	н/а	0,59	0,18	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	87,20	86,20	6,60	1,69	1,69	3,55	3,53	н/а	0,46	0,14	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	87,10	85,20	6,44	1,69	1,69	3,62	3,50	н/а	0,58	0,15	н/а	н/а	н/а	н/а
		-0,2	85,60	80,10	6,30	1,66	1,59	3,86	3,49	н/а	1,35	0,40	н/а	н/а	н/а	н/а
20.07.21	18:05	+5,0	84,90	83,20	5,47	1,84	1,78	4,18	4,07	0,02	0,88	0,27	0,23	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	82,90	82,80	5,35	1,86	1,85	4,66	4,64	0,02	0,97	0,27	0,13	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	82,80	80,90	5,67	1,79	1,73	4,28	4,11	0,02	0,87	0,25	0,09	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	83,00	83,00	5,62	1,74	1,74	3,53	3,52	0,02	0,60	0,17	0,09	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	84,90	83,90	5,63	1,76	1,73	3,36	3,29	0,03	0,48	0,14	0,01	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	84,60	84,30	5,34	1,72	1,70	3,32	3,29	0,03	0,51	0,14	0,01	н/а	н/а	н/а
		-0,2	79,70	79,70	5,55	1,67	1,64	3,76	3,45	0,04	1,50	0,48	0,68	н/а	н/а	н/а
20.07.21	18:25	+5,0	79,20	78,20	5,58	1,78	1,60	4,09	3,15	0,03	0,98	0,28	0,14	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	81,10	80,60	6,04	1,83	1,74	4,68	4,09	0,02	0,88	0,22	0,19	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	79,50	78,30	6,10	1,74	1,65	4,20	3,66	0,03	1,11	0,32	0,08	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	81,50	80,90	6,39	1,74	1,66	3,42	2,97	0,03	0,67	0,17	0,10	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	83,10	80,30	6,13	1,71	1,57	3,28	2,83	0,03	0,45	0,13	0,01	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	84,00	81,90	6,03	1,75	1,62	3,45	2,95	0,03	0,55	0,14	0,04	н/а	н/а	н/а
		-0,2	82,60	79,80	6,20	1,72	1,63	3,63	3,06	0,03	0,91	0,24	0,17	н/а	н/а	н/а
20.07.21	18:40	+5,0	85,67	85,71	5,78	1,91	1,80	5,05	4,02	0,01	0,74	0,20	0,15	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	85,05	84,34	5,81	1,85	1,90	4,86	4,59	0,02	0,98	0,27	0,13	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	85,23	86,61	6,05	1,88	1,91	4,60	4,34	0,05	0,94	0,29	0,14	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	87,05	87,05	6,74	1,92	1,85	3,81	3,51	0,04	0,56	0,17	0,06	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	88,05	86,51	6,52	1,87	1,83	3,63	3,30	0,02	0,45	0,14	0,05	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	87,70	88,31	6,58	1,92	1,87	3,81	3,41	0,02	0,53	0,17	0,07	н/а	н/а	н/а
		-0,2	87,89	83,92	6,10	1,83	1,76	4,00	3,44	0,03	1,18	0,39	0,50	н/а	н/а	н/а

Продолжение таблицы В.3

Дата	Время	Класс крупности	Содержание, %													
			Ni	Nimet.	Cu	Co	Сомет.	Fe	Фемет.	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	C	Zn	Pb	P
21.07.21	12:00	+5,0	80,85	73,60	5,16	1,84	1,66	4,24	3,86	0,10	0,86	0,22	2,97	0,00	0,01	0,04
		-5,0+2,5	82,60	79,20	5,52	1,85	1,78	4,53	4,35	0,02	0,77	0,22	0,53	0,00	0,01	0,04
		-2,5+1,2	83,60	73,00	5,89	1,82	1,62	4,58	4,03	0,02	0,86	0,27	0,40	0,00	0,01	0,04
		-1,2+0,8	84,80	79,20	5,96	1,79	1,64	3,49	3,25	0,02	0,60	0,18	0,02	0,00	0,01	0,04
		-0,8+0,45	85,40	79,00	5,88	1,78	1,63	3,26	3,02	0,02	0,43	0,13	0,02	0,00	0,01	0,04
		-0,45+0,2	86,50	80,40	5,75	1,79	1,66	3,32	3,09	0,02	0,48	0,14	0,16	0,00	0,01	0,04
		-0,2	85,60	80,00	5,74	1,81	1,67	3,67	3,33	0,03	0,80	0,24	0,50	0,00	0,01	0,04
21.07.21	14:00	+5,0	84,45	73,80	5,70	1,91	1,61	4,11	3,52	0,02	0,77	0,19	0,07	0,00	0,01	0,04
		-5,0+2,5	81,70	71,20	5,49	1,83	1,59	4,35	3,88	0,01	0,76	0,20	0,01	0,00	0,01	0,04
		-2,5+1,2	84,00	67,10	5,99	1,89	1,50	4,66	3,72	0,03	0,84	0,24	0,03	0,00	0,01	0,04
		-1,2+0,8	85,30	74,30	6,19	1,85	1,55	3,62	3,12	0,05	0,57	0,17	0,17	0,00	0,01	0,04
		-0,8+0,45	86,60	71,30	6,01	1,83	1,50	3,37	2,74	0,03	0,42	0,13	0,44	0,00	0,01	0,04
		-0,45+0,2	83,90	75,80	5,69	1,77	1,60	3,27	2,91	0,03	0,46	0,14	0,02	0,00	0,01	0,04
		-0,2	85,30	75,40	5,85	1,85	1,58	3,61	3,15	0,04	0,63	0,19	0,11	0,00	0,01	0,04
21.07.21	16:00	+5,0	72,80	67,80	4,86	1,67	1,51	4,37	3,83	0,05	0,92	0,32	11,30	0,00	0,01	0,04
		-5,0+2,5	81,80	72,80	5,59	1,85	1,63	4,37	3,89	0,02	0,81	0,26	3,17	0,00	0,01	0,04
		-2,5+1,2	80,30	70,50	5,12	1,75	1,53	4,34	3,77	0,02	0,89	0,25	0,96	0,00	0,01	0,04
		-1,2+0,8	84,60	75,00	6,01	1,78	1,55	3,51	3,09	0,01	0,54	0,16	0,18	0,00	0,01	0,04
		-0,8+0,45	83,80	73,70	5,83	1,74	1,50	3,30	2,89	0,03	0,45	0,14	0,07	0,00	0,01	0,04
		-0,45+0,2	85,10	69,90	5,82	1,78	1,43	3,40	2,79	0,04	0,48	0,14	0,07	0,00	0,01	0,04
		-0,2	84,70	74,40	5,78	1,78	1,55	3,64	3,15	0,02	0,64	0,18	0,20	0,00	0,01	0,04
21.07.21	16:25	+5,0	80,34	76,15	5,84	1,84	1,68	4,19	3,32	0,06	0,93	0,29	1,16	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	81,29	73,38	5,94	1,89	1,64	4,98	3,49	0,06	0,92	0,31	0,33	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	81,50	75,20	6,26	1,87	1,65	4,94	3,32	0,06	1,05	0,34	0,14	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	84,36	60,95	6,17	1,76	1,27	3,57	2,13	0,03	0,54	0,17	0,01	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	87,50	79,83	6,09	1,79	1,66	3,48	2,80	0,01	0,44	0,13	0,01	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	84,02	82,23	5,83	1,77	1,72	3,49	3,03	0,02	0,46	0,14	0,02	н/а	н/а	н/а
		-0,2	82,58	82,25	5,65	1,76	1,76	3,82	3,31	0,03	0,76	0,22	0,29	н/а	н/а	н/а

Продолжение таблицы В.3

Дата	Время	Класс крупности	Содержание, %													
			Ni	Nimet.	Cu	Co	Сомет.	Fe	Фемет.	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	C	Zn	Pb	P
21.07.21	18:00	+5,0	84,95	72,80	5,88	1,79	1,53	3,59	3,04	0,02	0,82	0,24	0,08	0,00	0,01	0,04
		-5,0+2,5	83,10	74,60	5,88	1,81	1,58	4,56	3,92	0,03	1,05	0,22	0,30	0,00	0,01	0,04
		-2,5+1,2	83,20	72,60	6,04	1,80	1,55	4,21	3,57	0,03	1,11	0,29	0,02	0,00	0,01	0,04
		-1,2+0,8	85,40	76,00	6,23	1,80	1,58	3,57	3,20	0,03	0,66	0,18	0,13	0,00	0,01	0,04
		-0,8+0,45	86,00	76,00	6,06	1,81	1,58	3,40	3,05	0,03	0,49	0,15	0,01	0,00	0,01	0,04
		-0,45+0,2	86,80	72,60	5,97	1,82	1,49	3,51	2,91	0,02	0,48	0,14	0,01	0,00	0,01	0,04
		-0,2	84,40	76,70	5,71	1,77	1,61	3,65	3,35	0,03	0,72	0,21	0,29	0,00	0,01	0,04
22.07.21	12:00	+5,0	81,60	73,40	6,05	1,90	1,69	4,53	4,11	0,04	1,41	0,40	1,58	0,00	0,02	0,04
		-5,0+2,5	83,80	77,50	6,72	2,03	1,88	5,27	4,81	0,07	1,00	0,38	0,71	0,00	0,01	0,04
		-2,5+1,2	84,35	75,10	6,86	1,98	1,76	5,03	4,50	0,02	0,96	0,39	0,48	0,00	0,01	0,04
		-1,2+0,8	86,90	79,60	6,84	1,90	1,73	3,75	3,43	0,04	0,59	0,25	0,16	0,00	0,01	0,04
		-0,8+0,45	87,85	72,70	6,72	1,90	1,56	3,54	2,93	0,07	0,48	0,22	0,03	0,00	0,01	0,04
		-0,45+0,2	87,80	85,20	6,69	1,90	1,84	3,64	3,54	0,03	0,58	0,26	0,02	0,00	0,01	0,00
		-0,2	86,55	83,60	6,62	1,89	1,81	3,89	3,72	0,04	1,01	0,40	0,37	0,00	0,01	0,05
22.07.21	14:00	+5,0	81,69	81,14	6,40	1,91	1,84	4,21	3,91	0,05	1,56	0,54	0,35	0,00	0,03	0,01
		-5,0+2,5	83,77	82,56	6,59	2,10	ë	5,33	5,03	0,01	1,19	0,45	0,24	0,00	0,02	0,01
		-2,5+1,2	84,09	83,58	6,76	1,97	1,93	4,84	4,61	0,01	1,15	0,41	0,28	0,00	0,02	0,01
		-1,2+0,8	84,94	83,77	6,53	1,89	1,81	3,68	3,56	0,01	0,77	0,28	0,06	0,00	0,01	0,01
		-0,8+0,45	86,78	85,84	6,58	1,94	1,84	3,49	3,39	0,01	0,57	0,21	0,10	0,00	0,01	0,01
		-0,45+0,2	87,94	86,80	6,63	1,98	1,86	3,63	3,51	0,01	0,62	0,24	0,03	0,00	0,01	0,01
		-0,2	84,39	83,15	6,47	1,94	1,82	3,95	3,74	0,02	1,14	0,42	0,51	0,00	0,01	0,01
22.07.21	14:20	+5,0	81,05	72,40	5,67	1,94	1,73	4,58	4,05	0,03	1,22	0,33	2,16	н/а	н/а	н/а
		-5,0+2,5	81,75	76,30	6,33	1,99	1,80	5,08	4,77	0,02	1,31	0,45	1,37	н/а	н/а	н/а
		-2,5+1,2	82,35	77,80	6,76	1,95	1,77	5,09	4,70	0,01	1,43	0,49	0,69	н/а	н/а	н/а
		-1,2+0,8	84,50	78,00	6,68	1,86	1,65	3,83	3,48	0,02	0,81	0,28	0,15	н/а	н/а	н/а
		-0,8+0,45	84,15	78,40	6,64	1,86	1,65	3,56	3,20	0,02	0,55	0,24	0,04	н/а	н/а	н/а
		-0,45+0,2	82,85	79,60	6,55	1,86	1,68	3,59	3,32	0,02	0,58	0,25	0,15	н/а	н/а	н/а
		-0,2	83,90	79,60	6,47	1,85	1,80	4,25	4,08	0,03	1,15	0,39	0,34	н/а	н/а	н/а

Таблица В4 - Результаты аналитической химии средних проб МФ 12-го передела

Дата	Время	Класс крупности, мм	Содержание, %								
			Ni	Nimet.	Cu	Co	Fe	S	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃
14.07.21	12:00	Общая проба	16,21	11,75	1,07	0,38	1,18	0,31	66,60	9,30	4,64
14.07.21	14:00	Общая проба	6,99	6,08	0,45	0,14	0,56	0,27	81,50	5,68	3,06
14.07.21	16:00	Общая проба	6,53	5,27	0,40	0,13	0,62	0,28	84,70	5,63	3,07
14.07.21	18:00	Общая проба	16,76	14,31	1,03	0,37	1,13	0,38	70,50	6,35	3,19
14.07.21	20:00	Общая проба	44,66	43,94	2,82	0,94	2,03	0,11	41,60	4,62	2,35
15.07.21	13:00	Общая проба	43,87	40,83	2,98	0,94	2,21	0,15	38,80	6,58	2,77
15.07.21	15:00	Общая проба	31,40	29,65	2,19	0,73	1,72	0,21	51,40	5,67	2,85
15.07.21	16:00	Общая проба	21,98	21,91	1,65	0,46	1,54	0,23	62,30	8,28	3,75
15.07.21	18:00	Общая проба	21,96	18,65	1,60	0,47	1,43	0,24	61,80	7,43	3,32
15.07.21	20:00	Общая проба	14,22	9,76	1,09	0,32	1,09	0,32	68,80	8,93	4,04
16.07.21	12:00	Общая проба	19,00	15,47	1,32	0,39	1,91	0,28	58,53	7,56	3,66
		+5,0	37,20	37,10	2,43	0,75	1,74	0,20	48,10	3,43	1,64
		-5,0+2,5	2,55	2,52	0,20	0,06	0,62	0,32	80,90	4,37	2,72
		-2,5+1,2	3,97	3,96	0,34	0,09	1,06	0,31	73,70	8,30	4,42
		-1,2+0,8	15,80	14,90	1,14	0,33	2,43	0,29	61,20	7,84	4,09
		-0,8+0,45	23,80	22,30	1,70	0,50	1,80	0,29	55,20	7,56	3,91
		-0,45+0,2	27,70	22,80	1,94	0,56	2,16	0,27	47,80	8,64	3,81
		-0,2	22,00	4,68	1,51	0,46	3,53	0,26	42,80	12,80	5,03
16.07.21	16:00	Общая проба	14,65	10,55	0,99	0,32	1,28	0,37	56,36	9,56	4,54
		+5,0	5,31	4,59	0,41	0,12	0,85	0,39	77,70	5,24	2,70
		-5,0+2,5	7,04	5,59	0,47	0,17	0,81	0,33	66,50	8,14	4,31
		-2,5+1,2	7,68	5,90	0,58	0,18	0,94	0,40	61,90	9,89	5,13
		-1,2+0,8	14,00	11,40	1,03	0,30	1,42	0,44	54,20	11,20	5,57
		-0,8+0,45	22,40	19,80	1,53	0,47	1,41	0,38	38,30	9,17	4,48
		-0,45+0,2	21,80	17,90	1,43	0,46	1,54	0,36	52,60	11,00	4,69
		-0,2	24,30	8,66	1,48	0,52	1,99	0,30	43,30	12,30	4,93

Продолжение таблицы В.4

Дата	Время	Класс крупности, мм	Содержание, %								
			Ni	Nimet.	Cu	Co	Fe	S	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃
16.07.21	20:00	Общая проба	20,93	18,92	1,41	0,44	1,51	0,28	60,66	6,89	3,23
		+5,0	32,30	32,30	2,14	0,66	1,57	0,16	54,80	2,51	1,54
		-5,0+2,5	9,34	9,34	0,64	0,23	0,72	0,30	77,20	4,66	2,76
		-2,5+1,2	7,27	7,08	0,58	0,17	0,65	0,31	76,40	7,19	3,92
		-1,2+0,8	13,40	13,00	0,97	0,28	1,44	0,31	66,30	7,24	4,03
		-0,8+0,45	27,40	27,00	1,87	0,57	1,55	0,30	54,50	6,89	2,42
		-0,45+0,2	32,00	31,40	2,08	0,66	2,00	0,23	49,60	7,43	3,25
		-0,2	24,80	12,30	1,60	0,52	2,63	0,37	45,80	12,30	4,67
17.07.21	12:00	Общая проба	17,56	14,91	1,31	0,37	2,16	0,27	62,70	8,51	4,02
		+5,0	18,20	16,80	1,30	0,38	0,95	0,24	75,30	3,11	1,91
		-5,0+2,5	5,43	4,67	0,44	0,13	0,72	0,29	83,10	5,07	3,05
		-2,5+1,2	6,08	5,58	0,53	0,14	0,92	0,29	77,60	8,39	4,31
		-1,2+0,8	16,20	14,30	1,19	0,34	2,23	0,27	63,20	9,18	4,51
		-0,8+0,45	31,20	28,30	2,30	0,64	1,96	0,27	45,90	8,19	3,81
		-0,45+0,2	30,00	27,00	2,22	0,63	2,93	0,23	45,40	9,94	4,15
		-0,2	15,80	7,73	1,16	0,34	5,40	0,28	48,40	15,70	6,37
17.07.21	16:00	Общая проба	13,14	9,55	1,06	0,28	1,73	0,30	65,06	9,28	4,32
		+5,0	3,59	3,56	0,29	0,09	0,44	0,28	79,80	7,83	3,99
		-5,0+2,5	2,00	1,74	0,18	0,05	0,47	0,31	84,10	5,37	3,01
		-2,5+1,2	3,62	3,17	0,31	0,09	0,70	0,40	80,20	8,47	4,33
		-1,2+0,8	18,60	18,50	1,45	0,39	2,81	0,25	56,70	9,67	4,46
		-0,8+0,45	26,00	24,40	2,03	0,54	1,93	0,26	52,40	8,70	4,08
		-0,45+0,2	14,10	9,76	1,10	0,29	2,21	0,33	59,90	11,80	5,19
		-0,2	24,10	5,71	2,09	0,50	3,54	0,28	42,30	13,10	5,16

Продолжение таблицы В.4

Дата	Время	Класс крупности, мм	Содержание, %								
			Ni	Nimet.	Cu	Co	Fe	S	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃
17.07.21	20:00	Общая проба	25,02	20,33	2,07	0,50	1,85	0,39	54,11	9,00	3,96
		+5,0	10,90	10,90	0,82	0,22	0,78	0,49	80,40	4,27	2,33
		-5,0+2,5	4,69	4,66	0,41	0,11	0,68	0,40	82,80	6,53	3,72
		-2,5+1,2	9,57	9,33	0,83	0,21	1,49	0,48	72,30	9,80	4,90
		-1,2+0,8	29,30	28,80	2,46	0,60	2,07	0,39	47,80	9,94	4,44
		-0,8+0,45	41,60	37,60	3,43	0,81	2,38	0,21	35,80	9,93	4,03
		-0,45+0,2	38,10	37,80	3,11	0,77	2,52	0,29	32,50	11,80	4,38
		-0,2	41,00	13,20	3,41	0,79	3,03	0,45	27,20	10,70	3,93
18.07.21	12:00	Общая проба	12,33	12,27	1,04	0,26	1,02	0,23	70,90	10,10	4,24
18.07.21	14:00	Общая проба	30,88	24,72	2,64	0,62	2,24	0,18	47,20	10,60	4,22
18.07.21	16:00	Общая проба	10,89	7,97	1,00	0,21	1,92	0,26	74,50	7,60	3,53
18.07.21	18:00	Общая проба	23,70	23,47	2,23	0,48	1,58	0,18	62,60	6,34	3,05
18.07.21	20:00	Общая проба	14,70	12,24	1,26	0,31	1,05	0,27	74,30	6,37	3,13
19.07.21	12:00	Общая проба	17,50	13,55	1,49	0,39	1,18	0,22	65,50	8,43	3,74
19.07.21	14:00	Общая проба	13,12	9,99	1,04	0,28	0,94	0,29	72,70	8,11	3,50
19.07.21	16:00	Общая проба	30,25	17,36	2,44	0,64	1,69	0,27	52,10	7,01	3,18
19.07.21	18:00	Общая проба	34,40	22,36	2,74	0,73	1,85	0,18	46,90	7,61	3,10
19.07.21	20:00	Общая проба	22,20	15,07	1,76	0,48	1,62	0,21	54,30	11,50	4,56
19.07.21	22:00	Общая проба	28,73	23,15	2,29	0,61	1,89	0,10	47,70	11,73	4,32
20.07.21	0:00	Общая проба	17,29	15,82	1,33	0,37	1,22	0,21	64,20	10,68	4,39
20.07.21	18:05	Общая проба	28,49	26,48	1,86	0,58	2,49	1,46	50,22	7,87	3,21
		+5,0	1,04	1,03	0,08	0,03	1,60	0,29	75,20	10,80	4,32
		-5,0+2,5	9,45	8,82	0,60	0,20	1,03	0,24	75,60	5,36	2,75
		-2,5+1,2	10,90	11,20	0,73	0,24	1,63	0,24	67,20	9,42	4,04
		-1,2+0,8	30,95	28,75	2,16	0,66	4,06	0,16	42,20	9,39	3,57
		-0,8+0,45	63,49	62,59	4,10	1,27	3,52	0,09	17,90	4,53	1,61
		-0,45+0,2	55,14	46,47	3,47	1,09	3,14	7,73	23,20	7,73	2,99
		-0,2									

Продолжение таблицы В.4

Дата	Время	Класс крупности, мм	Содержание, %								
			Ni	Nimet.	Cu	Co	Fe	S	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃
20.07.21	18:25	Общая проба	24,33	20,21	1,77	0,52	1,81	0,29	51,81	7,93	3,80
		+5,0	19,20	19,45	1,36	0,41	1,15	0,30	65,40	3,35	2,13
		-5,0+2,5	8,77	7,63	0,65	0,20	0,80	0,32	73,70	5,68	3,10
		-2,5+1,2	11,33	8,22	0,95	0,26	1,06	0,37	64,50	8,17	3,89
		-1,2+0,8	27,54	23,20	2,14	0,59	2,33	0,27	45,20	8,93	3,90
		-0,8+0,45	42,50	38,30	3,10	0,89	2,28	0,18	30,90	6,40	2,84
		-0,45+0,2	44,06	34,50	3,04	0,91	2,53	0,21	31,80	10,00	4,18
		-0,2	16,89	10,20	1,16	0,39	2,54	0,38	51,20	13,00	6,53
20.07.21	18:40	Общая проба	15,39	12,16	1,08	0,39	1,14	0,25	63,09	8,12	3,83
		+5,0	4,65	4,55	0,37	0,56	0,35	0,22	82,90	3,63	2,10
		-5,0+2,5	3,03	2,93	0,23	0,07	0,47	0,26	81,60	5,29	3,33
		-2,5+1,2	3,91	2,97	0,32	0,08	0,52	0,27	76,80	7,45	3,78
		-1,2+0,8	13,50	10,10	1,05	0,29	1,40	0,27	62,30	9,08	4,12
		-0,8+0,45	30,70	24,40	2,14	0,65	1,79	0,25	47,20	7,81	3,42
		-0,45+0,2	34,55	26,90	2,29	0,72	1,92	0,21	38,90	9,95	4,14
		-0,2	17,40	13,30	1,16	0,37	1,53	0,24	51,90	13,60	5,91
21.07.21	12:00	Общая проба	30,45	24,80	2,04	0,63	1,74	0,14	49,20	8,18	3,57
21.07.21	14:00	Общая проба	21,10	13,70	1,41	0,46	1,50	0,20	60,00	7,44	3,63
21.07.21	16:00	Общая проба	7,36	6,87	0,52	0,16	0,71	0,29	84,30	4,61	2,45
21.07.21	16:25	Общая проба	19,32	6,93	1,52	0,41	1,93	0,25	52,47	9,28	3,86
		+5,0	5,44	2,01	0,52	0,14	1,07	0,29	78,50	4,03	2,18
		-5,0+2,5	18,40	4,26	1,50	0,37	1,42	0,21	57,50	5,62	2,66
		-2,5+1,2	30,20	6,40	2,49	0,59	2,25	0,18	36,90	8,78	3,57
		-1,2+0,8	17,50	6,02	1,41	0,38	2,13	0,29	52,80	9,83	4,17
		-0,8+0,45	19,50	11,70	1,55	0,44	2,04	0,19	52,60	10,70	4,51
		-0,45+0,2	22,00	11,60	1,57	0,47	2,19	0,25	47,60	11,90	4,55
		-0,2	22,20	6,52	1,62	0,51	2,41	0,33	41,40	14,10	5,35

Продолжение таблицы В.4

Дата	Время	Класс крупности, мм	Содержание, %								
			Ni	Nimet.	Cu	Co	Fe	S	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃
22.07.21	12:00	Общая проба	39,22	36,79	3,09	0,85	2,55	0,27	42,26	7,10	3,03
		+5,0	9,01	7,47	0,73	0,20	0,64	0,23	82,10	5,03	2,67
		-5,0+2,5	13,51	13,59	1,10	0,31	1,13	0,29	74,50	5,09	2,85
		-2,5+1,2	24,40	24,00	1,95	0,55	2,14	0,26	57,70	7,89	3,53
		-1,2+0,8	48,20	47,50	3,79	1,04	3,45	0,23	27,50	8,90	3,17
		-0,8+0,45	73,05	68,90	5,49	1,59	3,31	0,17	9,97	4,15	1,32
		-0,45+0,2	76,05	73,00	5,71	1,66	3,34	0,07	8,73	3,67	1,26
		-0,2	30,35	23,10	2,85	0,63	3,82	0,64	35,30	15,02	6,40
22.07.21	14:00	Общая проба	14,12	12,04	1,12	0,31	1,21	0,32	68,83	7,94	4,00
		+5,0	1,22	1,10	0,13	0,03	0,39	0,29	94,20	3,37	2,15
		-5,0+2,5	9,05	8,63	0,78	0,21	0,99	0,32	78,00	6,20	3,17
		-2,5+1,2	12,80	12,00	1,06	0,29	1,24	0,41	67,50	8,95	4,47
		-1,2+0,8	10,71	10,40	0,92	0,23	1,32	0,37	69,30	9,04	4,59
		-0,8+0,45	25,50	24,70	1,93	0,53	1,65	0,29	58,20	7,24	3,72
		-0,45+0,2	22,20	20,40	1,69	0,47	1,30	0,31	61,20	7,75	4,00
		-0,2	17,40	7,07	1,30	0,37	1,58	0,28	53,40	13,00	5,91
22.07.21	14:20	Общая проба	16,73	14,51	1,30	0,36	1,52	0,28	64,80	9,36	4,35
		+5,0	13,70	12,60	1,13	0,31	1,34	0,25	71,20	9,42	3,50
		-5,0+2,5	5,63	5,30	0,49	0,14	0,64	0,31	84,50	5,74	3,32
		-2,5+1,2	5,86	5,05	0,56	0,14	0,98	0,32	77,10	9,26	4,70
		-1,2+0,8	13,49	12,16	1,04	0,29	2,14	0,36	65,30	10,60	4,99
		-0,8+0,45	30,10	26,70	2,28	0,62	1,95	0,23	50,80	8,94	4,07
		-0,45+0,2	33,95	31,50	2,53	0,71	1,99	0,18	46,50	8,59	3,88
		-0,2	14,41	8,25	1,10	0,32	1,64	0,35	58,20	13,00	6,04