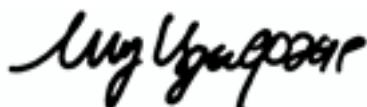


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»



На правах рукописи

ЛИУ Цзыфэнг

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАКИСИ НИКЕЛЯ В ТРУБЧАТЫХ
ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими про-
цессами и производствами (металлургия)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор
Шариков Юрий Васильевич

Санкт-Петербург – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЧАСТИЧНО ВОССТАНОВЛЕННОЙ ЗАКИСИ НИКЕЛЯ.....	10
1.1. Обжиговый цех.....	10
1.2 Технологическая схема получения ЧВЗН	10
1.3 Технология процесса	11
1.4 Теоретические основы восстановительного обжига	13
1.5 Теоретические основы окисленного обжига никелевого концентрата УРФ, процесса восстановления окислов металлов углем и продуктами его газификации	15
1.6 Технология получения концентрированного никелевого порошка из огарка в трубчатой вращающейся печи	40
1.7 Транспортировка материалов, подготовка и обслуживание технологической тары.....	43
1.8 Факторы, влияющие на восстановление закиси никеля	44
1.9 Закономерности движения газов	45
1.10 Закономерности движения материала	46
1.11 Тепловой и температурный режимы нагрева материала	47
ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ПЕЧИ	49
ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА С ПОЗИЦИИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ	51
3.1 Применение вычислительной техники в металлургическом производстве .	52
3.2 Основы проектирования умного металлургического производства	54
Выводы по Главе 3	60
ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ОБЖИГА ЗАКИСИ НИКЕЛЯ.....	62
4.1 Математическая модель объекта управления	62
4.2 Математическая модель стационарного режима работы трубчатой вращающейся печи в программном комплексе ReactOp	64

ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	70
5.1 Определение динамических характеристик объекта управления по его кривой разгона.....	70
5.2 Описание характеристик передаточной функции	72
5.3 Создание модели процесса в программе MATLAB на основе теплового режима трубчатой печи	73
5.4 Определение характеристик передаточных функций	75
5.5 Синтез систем управления для стабилизации температуры печи	75
Выводы по главе 5.....	87
ГЛАВА 6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА.....	88
6.1 Описание используемых в работе программных пакетов	88
6.1.1 Matlab.....	88
6.1.2 Mathcad.....	89
6.1.3 Reactop Cascade	90
6.2 Общие понятия АСУ ТП	91
6.3 Структура и состав системы управления.....	91
6.4 Режимы управления АСУ ТП	92
6.5 Верхний уровень – SCADA-система.....	92
6.6 Средний уровень – контроллеры (ПЛК).....	94
6.7 Технические средства автоматизации нижнего уровня	99
7. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА	101
7.1 Расчет затрат по участку восстановления закиси никеля	101
7.1.1 Сырье и топливно-энергетические затраты	101
7.1.2 Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования.....	101
7.1.3 Цеховые расходы.....	102
7.2 Калькуляция себестоимости продуктов.....	103
7.3 Расчет экономической эффективности	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	108

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ А Функциональная схема восстановительного обжига закиси никеля в трубчатой вращающейся печи	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Модель процесса восстановления закиси никеля в трубчатой вращающейся печи на основе теплового режима.....	121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Никель как химический элемент открыт в 1751 г., но широкое промышленное применение получил только в конце 19 века. Основным сырьем для получения никеля являются окисленные и сульфидные медно-никелевые руды. В небольших количествах за рубежом его получают из мышьяковистых руд. В России доля никеля, получаемого из сульфидных медно-никелевых руд, по сравнению с окисленными никелевыми рудами непрерывно возрастает [2].

Производство никеля из руд включает несколько стадий переработки сырья с получением на каждой из них соответствующего полупродукта. В результате окислительного обжига никелевого флотационного концентрата получают огарок, содержащий в основном оксид никеля, а также примеси соединений меди, кобальта, железа, серы, редких и драгоценных металлов. Следующая стадия переработки закиси никеля заключается в удалении из нее связанного кислорода и перевода соединений металлов в металлическое состояние. Это осуществляется в последующем процессе твердофазного восстановления закиси никеля в трубчатых вращающихся печах.

Цель восстановления в трубчатых печах (ТП) – получение укрупненного, максимально восстановленного продукта перед анодной электроплавкой. Такая частично восстановленная закись никеля (ЧВЗН) имеет низкое электрическое сопротивление, что позволяет снизить расход электроэнергии и восстановителя в процессе электроплавки. Использование данной технологии выгодно с экономической точки зрения.

Практическое осуществление процессов обжига сульфидов и восстановление закиси никеля определяется физико-химическими свойствами реагентов, термодинамическими и кинетическими характеристиками.

Теория работы ТП показывает, что производительность и основные размеры печей зависят от четырех важнейших процессов, протекающих в этих печах: химического процесса, движения материалов, движения газов, процесса

теплообмена.

Для оптимальной работы ТП необходима система автоматического управления, поддерживающая параметры процесса на заданном уровне. Главным управляющим параметром является температурный профиль в ТП, который должен быть определен и выдержан в течение всего процесса. Важным условием для определения и поддержания оптимального управления процессом является наличие математической модели, устанавливающей связь между параметрами технологического процесса и качеством получаемой продукции. Математическая модель является источником дополнительной информации о процессе и расширяет сведения о протекании процесса с позиций интернета вещей и позволяет определить структуру и параметры оптимального управления процессом в зависимости от его состояния и характера действующих возмущений.

Большой вклад в развитие и совершенствование алгоритмов управления процессами в ТП внесли специализированные научно-исследовательские и проектные организации, среди них «ВАМИ», «СибВАМИ», «Цветметавтоматика», «Союзцветметавтоматика» и др. Хорошо известны работы и достижения в этой области таких крупных специалистов как В. Я. Абрамов, А.И. Лайнер, Н.И. Еремин, А.Н. Наумчик и ряд других ученых.

Актуальным является изучение концентрационных и тепловых полей в процессе восстановительного обжига шихты в ТП при различных законах управления температурой в наиболее чувствительных точках по длине аппарата.

Цель работы – Разработка математической модели процесса восстановительного обжига закиси никеля и повышение качества функционирования ТП в этом процессе на основе изучения математической модели процесса при различных законах управления.

Основные задачи исследования:

– анализ состояния современных систем управления процессами обжига в трубчатых вращающихся печах (ТВП) и температурным профилем;

- разработка математической модели процесса в ТВП для статических и динамических условий функционирования ТВП;
- определение оптимального температурного профиля
- определение зависимости между степенью завершенностью процесса и температурным профилем восстановительного обжига в ТВП;
- исследование процессов регулирования температуры в ТВП при использовании динамической модели и различных законах регулирования
- выбор оптимального закона регулирования и разработка предложения по выбору технических средств САУ для ТВП.

Методология и методы исследований

В диссертационной работе использовались данные, полученные в ходе лабораторных и промышленных исследований процесса восстановительного обжига шихты в ТВП.

Обработка и анализ результатов, полученных в ходе лабораторных и промышленных испытаний, проводились с использованием программного комплекса ReactOp для определения параметров математической модели. Исследование динамической модели проводилось с использованием программного пакета Matlab R2014b.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

- определена роль математической модели в расширении базы данных о состоянии объекта управления с позиций Интернета вещей;
- создана детерминированные математические модели процесса для статического и динамического режима работы ТВП при проведении восстановительного обжига закиси никеля;
- найден оптимальный закон управления температурой в ТВП для процесса восстановительного обжига;
- определены функции АСУТП при проведении восстановительного обжига закиси никеля в ТВП.

Основные защищаемые положения:

1. Качество частично восстановленной закиси никеля регулируется температурой в зоне прокали. Оптимальный температурный профиль определяется путем анализа статической математической модели процесса восстановления закиси никеля в трубчатой вращающейся печи, созданной в программном комплексе ReactOp на основании кинетики процесса и закономерностей движения шихты в печи.

2. Для поддержания оптимального режима работы печи необходим анализ динамической модели процесса, который позволит выбрать рациональную систему управления. Динамическая модель процесса создается на основании уравнений теплового баланса с использованием ячеечной модели для ее решения. Анализ динамической модели позволит выбрать принципиальную схему АСУ.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– на основе практических данных современных агрегатов для восстановительного обжига закиси никеля разработан алгоритм управления тепловым состоянием ТВП, который контролировать температурный профиль и дает возможность прогноза и оценки степени восстановления закиси никеля на одном из заводов КНР;

– способ управления температурой в ТВП позволяет повысить степень восстановления закиси никеля и снизить расход электроэнергии в процессе;

– реализованы программы для определения параметров модели и определения оптимального управления.

Достоверность результатов

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается объемом экспериментальных исследований, применением современных методов анализа, сходимостью расчетных и экспериментальных результатов, тестированием системы управления на лабораторных и промышленных данных о протекании технологического процесса восстановительного обжига закиси никеля в ТВП.

Апробация работы

Результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались и обсуждались: на Международной научно-практической конференции «Технологии инноваций и предпринимательства» (май, 2017 год); XXIX Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения (Москва, ноябрь, 2019 год); International Research Conference on Technology, Science, Engineering & Economy (Seattle, USA, march, 2020).

Личный вклад автора состоит в формулировке целей, постановке задач и разработке методики исследований; в проведении анализа научно-технической литературы, выполнении лабораторных и промышленных исследований; разработке технических решений, адаптированных к условиям металлургического комбината в КНР; научном обобщении полученных результатов и подготовке публикаций.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 1 статье – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 7 глав и заключения, изложенных на 121 странице. Содержит 21 рисунок, 35 таблиц и список литературы из 108 наименований.

ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЧАСТИЧНО ВОССТАНОВЛЕННОЙ ЗАКИСИ НИКЕЛЯ

1.1. Обжиговый цех

Дата рождения обжигового цеха – 25 декабря 1942 года. Анодная плавка никелевого концентрата происходит в печах кипящего слоя (автогенный процесс – без привлечения дополнительной энергии). В результате обжига получают оксид металла (Ni, Co).

Цель процесса – удаление серы. Анодная плавка производится в трехфазных электропечах. В результате Fe и Co переходят в шлак и получают черновые никелевые аноды, которые поступают в электролизный цех.

Основное назначение плавильного цеха состоит в переработке по содержанию цветных металлов сульфидного сырья и металлосодержащих продуктов при максимально возможном извлечении цветных металлов в конечный продукт [30].

1.2 Технологическая схема получения ЧВЗН

Технологическая схема получения частично восстановленной закиси никеля в обжиговом отделении рафинировочного цеха предусматривает следующие основные операции: сгущение пульпы никелевого концентрата, фильтрацию никелевого концентрата, окислительный обжиг никелевого концентрата в печи КС с получением огарка, частичное восстановление огарка во вращающихся печах с охлаждением полученной частично восстановленной закиси никеля. Блок-схема рафинировочного цеха комбината «Североникель» представлена на рисунке 1.1:

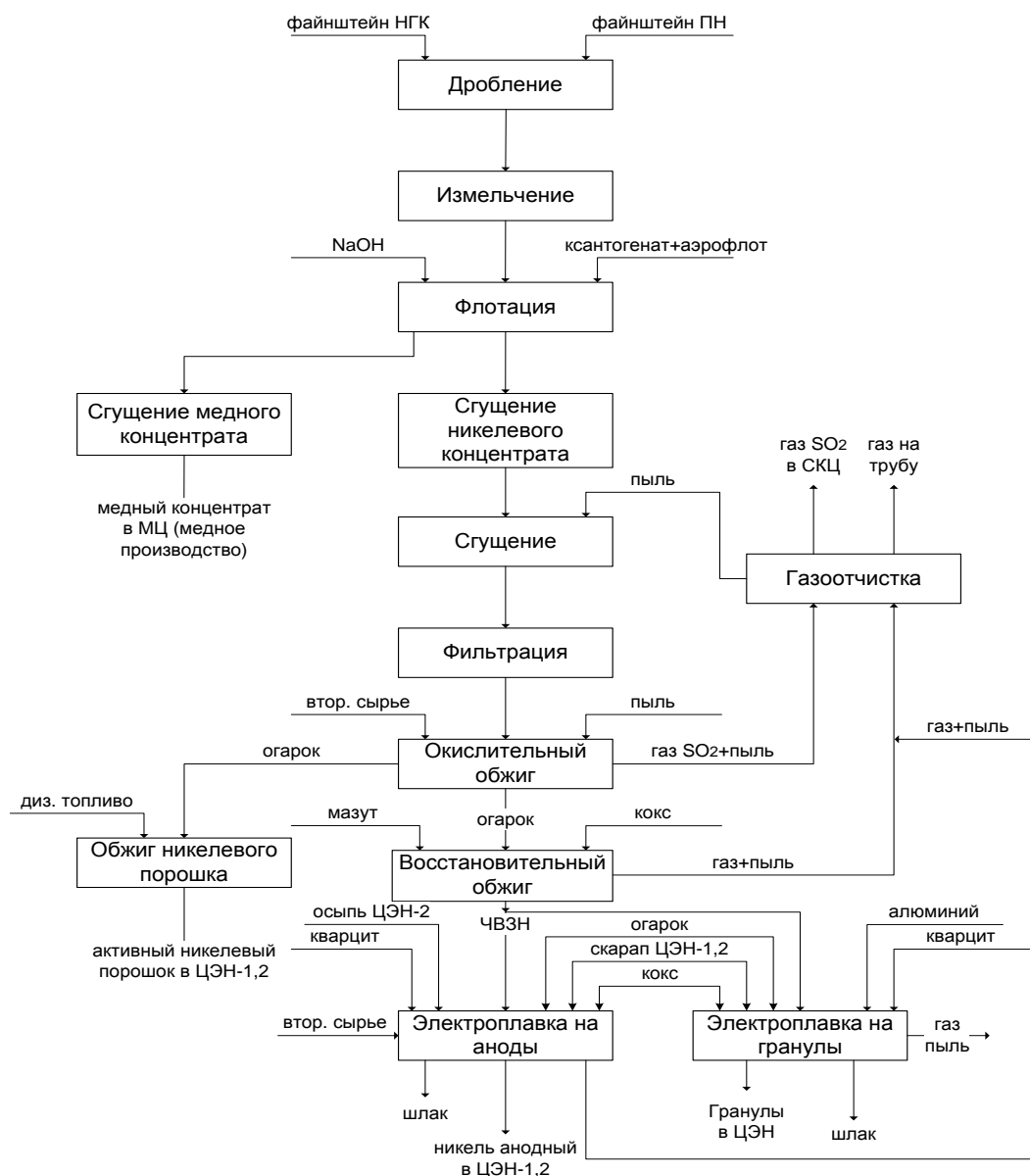


Рисунок 1.1 – Блок-схема рафинировочного цеха комбината «Североникель»

1.3 Технология процесса

Горячий огарок, выгружаемый из печи КС (через узел выгрузки) поступает самотеком по жаропрочной течке в ТП. Поступление огарка регулируют секторные затворы на выгрузке из печи КС по заданной упругости дутья.

Восстановитель также равномерно подается в течку из бункера по течке через питатель. Расход восстановителя (до 3 т/ч) регулируется оборотами дискового питателя и фиксируется приборами по месту, установленными на щите в центральном пульте управления [77].

Обжиг проводят при проточном движении газов и обжигаемого материала. Температуру в загрузочном конце печи поддерживают на уровне 900 -

1200 °С за счет сжигания углеродистого топлива (природного газа, мазута). В разгрузочном конце печи температура снижается до 700 - 800 °С. За время движения материала по печи содержание серы в закиси никеля снижается до 0,04% и ниже. Нагретая до высокой температуры закись никеля из загрузочного конца поступает в холодильник (в зону охлаждения), находящийся в разгрузочном конце и представляет с ним единое целое. Для частичного восстановления закиси никеля до металла в печь загружают восстановитель. Частичное восстановление (до 50-60%) снижает энергетические затраты при последующей электроплавке и благоприятно сказывается на производительности плавильной печи [85].

Общий вид трубчатой печи (ТП) показан на рисунке 1.2. Печь имеет длину 19 м. и внутренний диаметр 1,6 – 2,5 м. В горячей зоне ее футеруют высокоглиноземистым кирпичом, а в зоне низких температур - шамотом. Уклон барабана $\approx 2^\circ$, скорость вращения 0,8 - 1,2 об/мин. Для предотвращения сползания футеровки в разгрузочную часть и преждевременного пересыпания материала на обоих торцах кожуха печи имеются кольцевые борта. На рисунке 1.1 представлена функциональная схема процесса восстановления закиси никеля в трубчатой вращающейся печи (ТВП).

При осуществлении обжига приходится иметь дело с очень богатым и дорогим материалом, поэтому особое внимание должно обращать на устранение механических потерь огарка и потерь его с неуловленной пылью. В связи с этим перегрузку материалов осуществляют в закрытых камерах, а газы из печей направляют в электрофильтры [30].

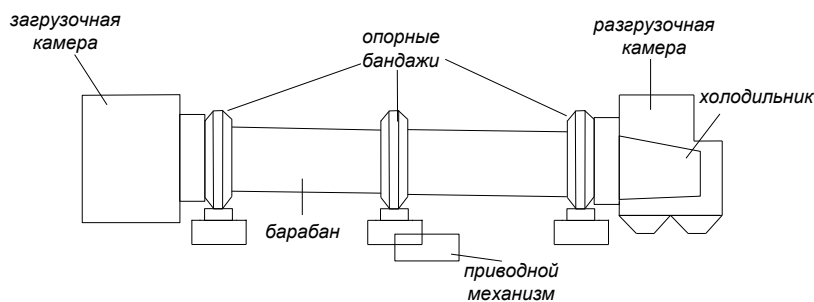


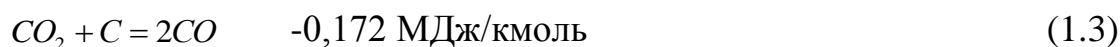
Рисунок 1.2 – Схема установки для обжига никелевого огарка

Главной особенностью механизма восстановления промышленной закиси никеля в трубчатой печи является эффективная работа твердого восстановителя и газообразных продуктов его разложения внутри слоя огарка. Поэтому определяющее влияние на степень восстановления материала в ТП оказывает качество восстановителя и строго поддерживаемый температурный режим, обеспечивающий его эффективную работу.

1.4 Теоретические основы восстановительного обжига

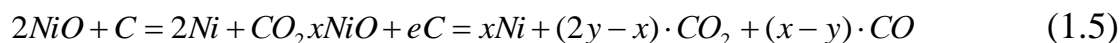
Основным назначением обжига закиси никеля в ТП является предварительное восстановление закиси никеля перед анодной электроплавкой с получением укрупнённого, максимально восстановленного продукта.

Восстановление закиси никеля ведут по следующим основным реакциям (1.1-1.4):



Определяющим показателем для оценки восстановительного потенциала газовой фазы в трубчатой вращающейся печи является, не наличие СО, а максимально возможное содержание СО₂ при минимальном содержании О₂.

Основными реакциями являются реакции газификации восстановителя до СО и взаимодействие СО с NiO. Реакция $NiO + C = Ni + CO$ получает заметное развитие лишь при температурах около 1200 °С. В общем виде реакции в ТП можно записать (1.5):



В целом процесс восстановления эндотермический, протекает только при подводе тепла извне. Наилучшие результаты получены при температуре 1050-1200 °С. При этом восстанавливается более половины оксидов никеля, меди, кобальта и железа, содержащихся в огарке. Основным восстановителем служит углерод. Процесс восстановления улучшают водород и углеводороды, образу-

ющиеся при сжигании природного газа с коэффициентом избытка кислорода $\alpha=0,95 - 0,98$.

Для достижения степени восстановления закиси никеля 90 % необходим расход восстановителя 12-15% от массы закиси никеля. Восстановителем в ТП служит угольная крошка. Следует учитывать, что при уменьшении температуры ниже 900 °С эффективность применения угольной крошки снижается. Недостаток крошки в шихте в некоторой степени можно компенсировать увеличением расхода пригодного газа и наоборот. Также следует не превышать температуру в печи (в середине на оси) свыше 1200 °С, так как при более высокой температуре увеличивается образование настыля [107].

В течение всего времени восстановления в ТП протекают и нежелательные реакции. Например, реакция горения оксида углерода и исходного восстановителя до двуокиси за счёт кислорода топочных газов и подсосываемого воздуха. Особенно это возможно при низкой производительности печи.

Для предотвращения окисления ЧВЗН в конце печи за счет подсосываемого воздуха необходимо как можно быстрее её охладить до температуры около 200 °С, при которой окисление уже не идёт.

Основным параметром, контролирующим работу ТП, является степень восстановления. Это доля исходного, связанного в оксиды, кислорода, которая при восстановлении перешла в газ. Наиболее точными данными для расчёта степени восстановления являются данные химического анализа огарка и продукта ТП. Но для оперативного контроля могут быть применены другие методы анализа. Например, магнитометрический анализ. Он основан на том, что исходная закись никеля является немагнитным материалом, а продукт ТП содержит сильномагнитные металлы (никель, кобальт). Поэтому измерение магнитной восприимчивости продукта ТП отражает степень перехода никеля и кобальта в форму металлов [77].

1.5 Теоретические основы окисленного обжига никелевого концентрата УРФ, процесса восстановления окислов металлов углем и продуктами его газификации

Обжиг является процессом подготовки никелевого концентрата от разделения фэйнштейна к последующим металлургическим операциям – частичному восстановлению закиси никеля в трубчатой вращающейся печи до никелевого порошка и плавкой его в электропечи с получением черного анодного никеля.

Сущность окислительного обжига заключается в нагреве обрабатываемого материала в окислительной атмосфере при определенном интервале температур, при котором еще не происходит плавление, с целью максимального удаления серы из никелевого концентрата и перевода никеля, меди, кобальта и железа из сульфидной формы в окисную [4].

Другими словами, при обжиге протекают процессы между твердыми и газообразными веществами без появления жидкой фазы.

Процесс обжига, при котором сера полностью удаляется из перерабатываемого материала, называют обжигом «намертво». $S=0,05\%$.

При обжиге никелевого концентрата УРФ степень десульфуризации, производительность обжиговой печи и другие показатели процесса зависят от минералогического состава и крупности обжигаемого материала, температуры обжига, количества поступающего в печь воздуха, продолжительности пребывания материала в обжиговой печи, интенсивности избыточного тепла из псевдоожигенного слоя.

Десульфуризация (обессеривание) – совокупность физико-химических процессов, способствующих удалению серы при проведении технологического процесса.

Степень десульфуризации – отношение разности между количеством серы в исходном сырье и полученном продукте к количеству серы в исходном сырье, выраженное в процентах.

В состав никелевого концентрата входят сульфиды никеля, меди кобальта, железа и меди, никель и железо находятся в металлическом состоянии.

Каждый сульфид имеет специфические физические и химические свойства, который определяет температуру процесса обжига, степень десульфурзации при обжиге и производительность обжигового агрегата. Начальная температура, или нижний температурный передел, обжига зависит от температуры воспламенения сульфидов концентрата. Температура воспламенения сульфидов, различных металлов различны, потому и воспламенение концентратов различного состава происходит при различных температурах [55].

Максимальная температура процесса обжига обрабатываемого материала зависит от температуры плавления, входящих в состав материалов сульфидов.

На результаты обжига оказывает большое влияние размер зерен или частиц обжигаемого материала. Тонкое измельчение увеличивает поверхность обрабатываемого материала и дает возможность интенсифицировать процесс обжига, так как химическое взаимодействие кислорода с сульфидами на границе соприкосновения печных газов с сульфидами, а величина этой поверхности зависит от степени измельчения и его особенностей (трещиноватость, степень шероховатости поверхности, пористость). Однако следует заметить, что при осуществлении некоторых конкретных технологических процессов не всегда является выгодным увеличивать удельную производительность обжигового агрегата за счет переизмельчения обрабатываемого материала, так как при этом сильно возрастает пылеунос [5].

С повышением температуры в обжиговом агрегате возрастает скорость реакции окисления сульфидов и увеличивается производительность агрегата. Однако при обжиге в псевдооживленном слое лимитирующим параметром является верхний предел температурного режима, который определяется, прежде всего, спеканием материала («горячая грануляция») и образованием нежелательных соединений.

Так при повышенном содержании в никелевом концентрате окиси кальция и кремния в присутствии окисленного железа как в двух, так и трехвалент-

ной форме образуются соединения, плавящиеся при температуре 1200 и 1100°C, что подтверждается диаграммами состояния системы:



Из диаграммы состояния системы $SiO_2 - FeO$ видно, что кремнезем может взаимодействовать с закисью железа, образуя фаялит ($2FeOSiO_2$), плавящийся при температуре 1205°C. Кремнезем и закись железа могут образовывать две эвтектические смеси, плавящиеся при температуре 1178 и 1177°C.

Эвтектической смесью (сплавом) называется равновесие двух компонентов между жидким расплавом и двумя кристаллическими фазами компонентов, из которых состоит данная двойная система.

Жидкий сплав называется жидкой эвтектикой, а твердый сплав – твердой эвтектикой.

Эти температуры вполне достижимы на поверхности частиц концентрата (температура микролокальных фаз) в процессе перехода сульфидного железа в окисленное. Спекание наиболее характерно для обжига сульфида никеля (обжига никелевого концентрата) при приближении к верхнему температурному диапазону [7].

Большим преимуществом обжига в псевдооживленном слое следует считать возможность вести процесс при расходе воздуха, близким к теоретическому. Эта возможность обуславливается подвижностью отдельных частиц сульфидов и большой степенью контакта с печными газами, то есть увеличенной поверхностью реакционной зоны. Скорость реакций окисления сульфидов зависит от температуры, крупности зерна, площади поверхности зерна, скорости оживающего газового потока, наличия катализаторов.

Катализаторы – вещества, изменяющие скорость химических реакций или возбуждающие их, участвующие в процессе, но сами к концу реакции остаются химически неизменными.

Реакции, которые каталитически ускоряются продуктами, получаемыми в этой же реакции, называются автокаталитическими. Скорость этих реакций

возрастает во времени.

При прочих равных условиях продолжительность оолита определяет полноту протекания реакций окисления сульфидов. С увеличением продолжительности процесса оолита, реакции окисления протекают полнее, но при этом пропорционально уменьшается производительность обжигового агрегата.

Реакция окисления сульфида протекает на свободной его поверхности, т.е. на границе соприкосновения с печным тазом, содержащим кислород, и сопровождается образованием окисла или сульфата (в зависимости от температуры обжига) и выделением сернистого ангидрида, образующим снаружи твердой частицы газовую пленку или оболочку [11, 12, 14].

Эта пленка задерживает процесс дальнейшего окисления частиц сульфида и может быть удалена при перемешивании зернистого материала.

При проведении окислительного обжига в псевдоожиженном слое зернистого материала происходит быстрое перемешивание слоя, частицы которого приходят в соприкосновение с кислородом воздуха и вскрываются все новые внутренние слои материала.

Окислительный обжиг представляет собой сложный гетерогенный процесс, связанный с явлением адсорбции, десорбции, реакционной диффузии и рядом сложных химических взаимодействий [44].

Протекание этих процессов и их результаты в основном зависят от свойства исходных материалов, подвергаемых обжигу, т.е. от свойства сульфидов, а также от свойства продуктов их окисления, т.е. окислов и сульфатов. Образование сульфатов происходит при $t \leq 500^\circ\text{C}$. Из основных свойств сульфидов, влияющих на ход и результаты процесса обжига, необходимо отметить температуры плавления, теплоты их образования, давления диссоциации или изменения величины изобарно-изотермического потенциала реакций их образования в зависимости от температуры.

Адсорбция – поглощение какого-либо вещества из газообразной среды или растворов поверхностным слоем жидкости или твердого тела. Вещество, на

поверхности которого происходит адсорбция, называется адсорбентом, а поглощаемое из объемной фазы – адсорбатом.

Хемосорбция – это способность молекул адсорбата и адсорбента образовывать химические соединения.

Десорбция – удаление адсорбированного вещества с поверхности адсорбента. Десорбция обратная адсорбции и происходит при уменьшении концентрации адсорбируемого вещества в среде, окружающей адсорбент, а также при повышении температуры. Скорость десорбции зависит от температуры, природы и скорости потока десорбирующего газа или растворителя, а также от особенностей структуры адсорбента [11].

Температуры плавления сульфидов и сульфидных эвтектик позволяют давать оценку возможного верхнего предела температур процесса обжига материалов, поскольку этот процесс должен протекать без их оплавления и спекания.

Данные о температурах плавления сульфидов и их главнейших эвтектических сплавов приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Температура плавления сульфидов и эвтектических сплавов

Сульфид	Температура	Система	Состав эвтектики	Температура плавления, °С
<i>FeS</i>	1171	<i>FeS – Fe</i>	85% – <i>FeS</i>	985
<i>Cu₂S</i>	1135	<i>FeS – Cu₂S</i>	53,4% – <i>Cu₂S</i>	995
<i>CoS</i>	1140	<i>Cu₂S – CoS</i>	23% – <i>Cu₂S</i>	728
<i>Ni₃S₂</i>	737	<i>Ni – Ni₃S₂</i>	21,5% – <i>S</i>	644
<i>Na₂S</i>	920	<i>Ni₃S₂ – Na₂S</i>	85% – <i>Ni₃S₂</i>	645

Результаты процесса обжига (полнота выгорания серы и т.д.) зависят от термической устойчивости сульфидов, т.е. от величины изменения стандартного изобарно – изотермического потенциала реакции их образования или величины давления диссоциации отдельных сульфидов.

Потенциал (сила) – энергия взаимодействия тел, определяемая их положением в пространстве.

Термодинамические потенциалы есть функции объема (V), давления (P), температуры (T), числа частиц системы (N) и других макроскопических параметров (X_i).

Изобарно-изотермический потенциал есть функция, определяющая направление и предел самопроизвольного протекания процессов, идущих при постоянных температурах и давлении, пределом протекания которых является достижение некоторого минимального для данных условий значения функции.

Диссоциация - разложение сложных веществ на простые. В реакциях, содержащих газообразную фазу, т.е. в реакциях, в которых одно из участвующих веществ находится в газообразном состоянии, давление которой остается в каждый данный момент постоянной величиной, зависящей от температуры и не зависящей от количества сконденсированных фаз.

Это давление называется давлением диссоциации (или упругостью диссоциации). Давление диссоциации зависит от концентрации вещества в газовой фазе и температуры, не зависит от количества той или иной из конденсированных фаз, но оно зависит от структуры материала - кристаллической модификации и степени развития поверхности.

Для подсчета тепловых балансов процесса обжига, и для тепловой работы обжигового агрегата большое значение имеют тепловые эффекты реакции образования сульфидов и окислов [30].

Данные о теплоте образования указанных соединений приведены в таблицах 1.2 и 1.3.

Таблица 1.2 – Стандартные теплоты образования сульфидов, кДж/моль (ккал/моль)

Сульфид	Теплота образования	Сульфид	Теплота образования
Ag_2S	31,4±0,2 (7,5±0,2)	FeS_2	174±8,4 (41,4±2,0)
CoS	93,5±6,3 (22,3±1,5)	PbS	96,6±2,1 (23,1±0,5)
Cu_2S	78,5±2,1 (19,0±0,5)	Sb_2S_3	160±3,3 (33,2±0,8)
CuS	48,5±2,1 (11,6±0,5)	SnS	76,1±3,3 (18,2±0,8)
FeS	96,0±1,8 (22,9±0,3)	ZnS	20,2±10,5 (48,2±2,5)
NiS	85,4±8,4 (20,4±2,0)	MgS	352±1,3 (84,2±0,3)

Таблица 1.3 – Стандартные теплоты образования окислов, кДж/моль (ккал/моль)

Сульфид	Теплота образования	Сульфид	Теплота образования
<i>CaO</i>	636±2,1 (151,9±0,5)	<i>FeO</i>	270±0,8 (64,5±0,2)
<i>CoO</i>	241±2,1 (57,5±0,5)	<i>Fe₃O₄</i>	1120±2,1 (266,8±0,5)
<i>Co₃O₄</i>	824±12,6 (196,5±3,0)	<i>Fe₃O₄</i>	817,5±1,6 (195,2±0,4)
<i>Cu₂O</i>	171,5±2,1 (41±0,5)	<i>MgO</i>	604±0,8 (144±0,2)
<i>CuO</i>	157±4,2 (37,5±1,0)	<i>NiO</i>	245±2,5 (58,4±0,6)

Диффузионные процессы, имеющие место при обжиге сульфидных материалов, зависят от плотности сульфидов и продуктов их окисления,

Диффузия – медленное проникновение молекул одного вещества (газа, жидкости, твердого тела) в другие при их непосредственном соприкосновении или через пористую перегородку, обусловленное тепловым движением молекул [14].

Плотности различных минералов и соединений приведены в таблице 1.4. Таблица 1.4 – Плотность сульфидов, сульфатов и окислов при комнатной температуре

Минерал	Формула	Плотность, г/см ³
Сульфиды		
Марказит	FeS ₂	4,7 - 4,9
Миллерит	NiS	5,26 - 5,9
Троилит	FeS	4,54 - 4,64
Пирротин	Fe ₁₁ S ₁₂	4,58 - 4,64
Халькопирит	CuFeS ₂	4,1 - 4,6
Халькозин	CuFeS ₂	5,5 - 5,8
Ковелин	CuS	4,59 - 4,64
Сульфат никеля	NiSO ₄	3,68
Сульфат кобальта	CoSO ₄	3,71
Сульфат меди	CuSO ₄	3,60
Оксиды		
Гематит	Fe ₂ O ₃	4,5 - 5,3
Магнетит	Fe ₃ O ₄	4,9 - 5,2
Куприт	CuO ₂	5,7 - 6,2
Мелоконнт	CuO	5, - 6,3
Закись кобальта	CoO	5,69
Бунзенин	NiO	7,45
Окись никеля	Ni ₂ O ₃	4,83

Процессы окисления при обжиге сульфидных материалов в основном протекают на поверхности соприкосновения твердых частиц с печными газами, содержащими свободный кислород, т.е. на границе раздела твердой и газообразной фаз. Величина этой поверхности оказывает решающее влияние на скорость процесса и полноту окисления серы.

Поэтому достаточно тонкое измельчение материалов, поступающих в обжиг, является необходимым условием для получения конечных результатов при осуществлении процессов окисления.

Первичным актом процесса обжига является адсорбция газообразного кислорода на поверхности отдельных зерен сульфидов обжигаемого материала. Твердые тела всегда обладают способностью в той или иной степени поглощать (адсорбировать) из окружающей среды на своей поверхности молекулы, атомы или ионы.

Адсорбция на твердых телах классифицируется по характеру сил, связывающих адсорбируемые атомы или молекулы с поверхностями атома твердого тела. Существует два резко различающихся вида адсорбции: молекулярная адсорбция, осуществляемая Вандер-Ваальсовыми силами, вызывающими конденсацию паров, и "хемосорбция" при которой адсорбированные атомы удерживаются ковалентными силами. Таким образом, при адсорбции на поверхностях твердых тел имеют место как физические, так и химические явления.

При одинаковых приведенных температурах и одинаковых приведенных давлениях все вещества должны обладать одинаковым приведенным объёмом. Это понятие называется Вандер-Вальсовыми силами или соответственных состоянии.

Ковалентные силы (связь) образуются путем передачи каждым из взаимодействующих атомов одного или нескольких электронов на образование электронной пары (пар), общей для обоих атомов, которой и осуществляется связь между ними [14, 15].

При поглощении первых порций газа поверхностью адсорбента обычно появляется действие химических сил, последующая адсорбция с повышением

давления постепенно переходит в чисто физический процесс. Физическая адсорбция связана с усилением конденсации молекул газа за счет силового поля, создаваемого поверхностными атомами адсорбента, валентные силы которых не полностью насыщены.

Неодинаковая способность к адсорбции разных газов определяется их неодинаковой способностью к конденсации. Физические взаимодействия газов с адсорбентом не сопровождается диссоциацией молекул газа на атоме.

Химическая активность газов в огромной степени изменяется при их хемосорбции. В большинстве случаев при этом происходит диссоциация газов на атомы или, по крайней мере, такое ослабление связи между атомами, которое равносильно диссоциации двух и много атомных молекул. Вследствие диссоциации, химическая активность газа может в значительной степени возрасти. На диссоциацию газов большое влияние оказывают каталитические свойства поверхности твердых тел.

Хемосорбция газа сопровождается выделением большого количества тепла, отвечающего тепловым эффектам химических процессов.

Тепловым эффектом химической реакции (процесса) называется количество тепла, которое необходимо затратить для образования данного вещества из простых веществ. Процессы, при которых теплота выделяется, называются экзотермическими, а процессы, идущие с поглощением тепла, называются эндотермическими. Это количество значительно превышает теплоту конденсации газа.

Адсорбция газов на поверхности твердых тел может происходить и под действием электростатических сил. Следует также иметь в виду, что при пористых твердых телах, испещренных мелкими каналами, на поверхности и внутри отдельных пор может происходить обыкновенная конденсация паров, которую обычно называют тоже адсорбцией [14].

Кинетика обжига складывается из скорости окисления на поверхности сульфидов и из скорости процесса диффузии, т.е. скорости подвода реагирующих веществ к границе раздела фаз и скорости отвода от нее продуктов взаимодействия [4].

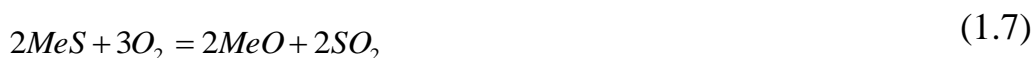
Реакции обжига, несомненно, связаны с катализом, причем катализатором является один из продуктов окисления, следовательно, реакции обжига должны быть отнесены к автокаталитическим реакциям. Самый распространенный тип гетерогенного катализа – это катализ взаимодействия газа с твердыми поверхностями, т.е. катализ, связанный с адсорбцией, при этом реакции в адсорбированном слое идут быстрее, чем в объеме газа.

Из продуктов окисления сульфидов каталитическое действие на окисление сернистого ангидрида в серный, оказывает окись железа, окись меди, закись никеля при низких температурах диффузионные процессы идут быстрее химических реакций. Но так как скорость химических реакций с повышением температуры нарастает быстрее скорости диффузионных процессов, то при достижении определенной температурного предела она превысит скорость диффузионных процессов и обжиг переходит из кинетической в диффузионную область.

Переход от кинетической в диффузионную область сопровождается воспламенением сульфидов.

Глубина кинетической области зависит от величины зерен обжигаемого материала, состава печных газов, от интенсивности перемешивания [4].

В общем виде основную реакцию обжига можно выразить уравнением (1.7):



Эта реакция экзотермична и ее тепловой эффект обеспечивает самопроизвольный ход процесса без затраты постороннего тепла. Термодинамикой называют раздел физики, в котором тепловая сторона явлений считается существенно важной и ею не пренебрегают.

В окислительной атмосфере обжигового агрегата протекают реакции окисления составляющих никелевого концентрата от разделения фанштейна.

В первую очередь происходит окисление никеля, находящегося в металлическом состоянии (1.8):



Затем идет окисление сульфида никеля (1.9):



Предпочтительное окисление металлического никеля по сравнению с сульфидным, подтверждается термодинамическими данными, которые приведены в таблице 1.5. Некоторое значение при обжиге имеет взаимодействие твердых частиц сульфида и закиси никеля по реакции (1.10):



Таблица 1.5 – Зависимость ΔZ° ккал/моль (Дж/моль), реакции окисления сульфида никеля и металлического никеля от температуры

Реакции	Значения ΔZ° при температуре, °C			
	675	775	875	973
$Ni_3S_2 + 3.5O_2 = 3NiO + 2SO_3$	-64100 (-268100)	-62400 (-260400)	-62200 (-260000)	-61800 (-258000)
$2Ni + O_2 = 2NiO$	-85300 (-397000)	-80500 (-337000)	-76800 (-321000)	-71300 (-298000)

Поскольку в никелевом концентрате участка разделения фэйнштейна (УРФ) содержатся сульфиды железа, меди и кобальта, то окисление этих сульфидов будет проходить в такой последовательности (1.11-1.13):



При интенсивном окислении сульфида никеля в условиях высоких температур маловероятно протекание реакции с образованием сульфата никеля или металлического никеля. При температурах ведения процесса (1100°-1150°C) обжига образование сульфатов никеля термодинамически невозможно. Возможность образования металлического никеля также маловероятна, так как он в момент образования будет окисляться кислородом до закиси никеля, что, в ко-

нечном счете, приведет к суммарной основной реакции обжига (1.28).

Реакции (1.9, 1.11, 1.12, 1.13) представляют окончательный результат окисления сульфидов никеля, железа, меди и кобальта, однако совершенно не дают никаких сведений о механизме процессов. Конечный результат окисления сульфида определяется величиной изменения стандартного изобарно-изотермического потенциала реакций. Сравнение этих величин для однотипных реакций, позволяет определить возможность предпочтительной реализации той или иной реакции. Из нескольких однотипных реакций предпочтительно реализуется та, для которой изменение стандартного изобарно-изотермического потенциала представляет наиболее отрицательную величину [4].

Приведенные в таблице 1.6 реакции окисления сульфидов до окислов характеризуются значительной убылью стандартного изобарно-изотермического потенциала и, следовательно, могут быть реализованы.

Таблица 1.6 – Зависимость Дж/моль (ккал/моль) реакций типа $MeS + 1,5O_2 = MeO + SO_2$ от температуры

Реакции	673°K	773°K	873°K	973°K
$FeS + 1.5O_2 = FeO + SO_2$	-412128 (-88360)	-365977 (-87260)	-356234 (-850201)	-349926 (-82560)
$FeS + 5/3O_2 = 1/3Fe_3O_4 + SO_2$	-453903 (-108500)	-439531 (-105000)	-428218 (-102500)	-412296 (-98800)
$NiS + 1.5O_2 = NiO + 2SO_2$	-362519 (-86520)	-338719 (-80840)	-315926 (-75400)	-291462 (-69800)
$Cu_2O + 1.5O_2 = Cu_2O + SO_2$	-324258 (-77360)	-312029 (-74470)	-300674 (-71760)	-288398 (-68830)
$CoS + 1.5O_2 = CoO + SO_2$	-392000 (-93760)	-386000 (-92200)	-376200 (-90630)	-371980 (-88790)

Однако полнота протекания различных реакций этого типа будет неодинаковой. При данных температуре и составе газовой фазы преимущественно будет идти тот процесс, который отвечает большим концентрациям сернистого ангидрида в равновесной газовой смеси ($SO_2 + O_2$), т.е. большей константе равновесия (1.14):

$$K_p = \frac{P_{SO_2}}{P_{O_2}},$$

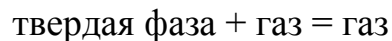
где P_{SO_2} – парциальное давление SO_2 , Па; P_{O_2} – парциальное давление O_2 , Па.

Из таблицы 1.6 видно, что окисление сернистого железа преимущественно должно идти до окиси-закиси, а затем до закиси.

Сульфиды тяжелых цветных металлов в зависимости от температуры процесса обжигания могут окисляться до сульфатов (600-700°C) и при температурах свыше 800-900 °C окисление сульфидов в основном идет до состояния окислов.

Процессы взаимодействия окислов металлов с углеродом играют важную роль в металлургии, химической технологии и других отраслях высокотемпературной техники. Восстановление окислов металлов углеродом является одним из основных методов, применяемых в металлургии для получения металлов и сплавов и различных соединений [4, 14].

Взаимодействия твердого углерода с газообразными окислителями - полное и неполное горение, реакции с углекислотой - являются гетерогенными и относятся к типу:



Все они ведут к уничтожению твердой фазы, к её газификации.

Схематически горение углерода может быть разбито на несколько последовательно протекающих этапов.

Первым из них является доставка окислителя из ядра газовой атмосферы к поверхности раздела фаз путем молекулярной и конвективной диффузии.

Второй этап развивается под влиянием силового поля, создаваемого атомами углерода на поверхности своих кристаллов и заключается в физической и химической адсорбции молекул окислителя, сопровождающейся в ряде случаев объемным растворением.

Третий этап сводится к взаимодействию адсорбированного окислителя с поверхностными атомами углерода и к образованию продуктов реакции, также адсорбированных на углероде [37].

Наконец, четвертый и пятый этапы представляют собой десорбцию продуктов реакции и удаление их в газовую фазу.

Таким образом, процесс горения углерода в целом включает в себя три категории стадий: диффузионную, адсорбционную и собственно химическую, из которых две последние весьма тесно переплетаются.

Диффузия и конвекция газов

В том случае, когда в системе отсутствуют конвективные потоки, т.е. направленное движение некоторого количества газов, необходимо считаться с чисто молекулярной диффузией. Последняя представляет собой процесс самопроизвольного выравнивания концентраций газа, являющийся результатом хаотического движения молекул и подчиняющийся определенным закономерностям.

Если в массе газа имеют место макропотоки, то условия доставки окислителя к поверхности раздела фаз и отвода продуктов реакции от нее существенно изменяются. Выравнивание концентраций газа у поверхности твердого тела с существующими во всей его массе при помощи макропотоков называется конвекцией. При этом следует различать два случая. Первый из них отвечает ламинарному течению макропотоков. Движение их происходит параллельно поверхности твердого тела [48].

Подобные потоки, у которых отсутствуют составляющие скорости, перпендикулярные границе раздела фаз, не могут способствовать ускорению диффузии, исключением является эффект смывания, реализующийся при достаточно мелких размерах твердого тела и относительно больших скоростях потока [50].

Во втором случае имеет место турбулентное течение конвекционных потоков, которое характеризуется сложной траекторией движения струек газа. Скорость потока в данной точке не остается постоянной во времени и меняется как по величине, так и по направлению. Составляющие её, направленные перпендикулярно к поверхности твердого тела, весьма способствуют диффузии.

Условие, при которых осуществляется ламинарное или турбулентное движение газов, определяется с помощью так называемого критерия Рейнольдса (1.15):

$$Re = (Wa)/\nu \quad (1.15)$$

где: W – линейная скорость в целом;

ν – кинематическая вязкость;

a – линейные размеры твердого тела.

Если $Re < 2320$, то поток – ламинарный, в противном случае – турбулентный. Однако даже в турбулентном потоке у поверхности твердого тела существует тонкий ламинарный слой, через который возможна лишь молекулярная диффузия. Как правило, преодоление именно этого слоя представляет наибольшие трудности. Для обоих видов конвекционных потоков толщина ламинарного слоя обратно пропорциональна критерию Рейнольдса в степени, представляющей собой правильную дробь. Другими словами, толщина слоя уменьшается с ростом скорости потока и линейных размеров твердого тела.

Следовательно, скорость диффузионной стадии процесса горения определяется скоростью газового потока, его характером, размерами кусков твердого углерода, температурой, общим давлением и природой веществ, составляющих газовую смесь [52].

Из двух последовательных стадий процесса – диффузионной и адсорбционно - химической - определяющей его скорость будет та, которая протекает более медленно при низких температурах процесса скорость химического взаимодействия в поверхностном слое мала и лишь незначительное количество молекул окислителя и из числа достигающих поверхности углерода вступают с ним в реакцию. В результате этого, выравнивание концентраций газов у поверхности угля с существующими в остальном объеме в значительной степени успевает завершиться, не задерживая процесса горения. Другими словами, константа скорости диффузии окажется большей по сравнению с константой для адсорбционно-химического взаимодействия, и эта последняя стадия будет лимитирующей для всего процесса в целом. Эта скорость меняется с температу-

рой. При таких условиях говорят, что процесс протекает в кинетической области [62].

Восстановителем окисла металла может быть любой элемент, обладающий большим сродством к кислороду, чем металл восстанавливаемого окисла.

Сродство элемента к кислороду - это прочность связей между металлом и кислородом.

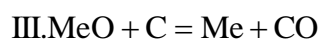
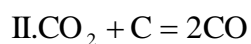
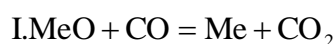
Окись металла может взаимодействовать с твердым углеродом только в местах контакта мелких частиц окиси металла с частицами углерода. Этот контакт точечный и он быстро нарушается. При отсутствии перемешивания реагирующих веществ восстановительная реакция может идти только за счет диффузии, скорость которой в данном случае ничтожно мала. Процесс восстановления продолжается за счет взаимодействия оставшегося окисла металла с образующейся окисью углерода по реакции (1.16) [62]:



Образующаяся по этой реакции двуокись углерода реагирует с твердым углеродом по реакции Будуара-Белля (1.17):



Таким образом, процесс восстановления окисла металла твердым углеродом проходит по трем реакциям:



Реакция III равна сумме I и II. Эти реакции могут идти до конца, т.е. до полного исчезновения окисла металла и углерода, если, конечно, газовая фаза выводится из зоны реакции.

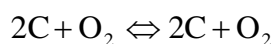
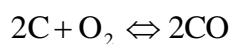
Начало восстановления окисла углерода по реакции (1.18):



определяется значением ΔZ° . По давлению диссоциации оксида металла и окиси углерода также можно определить начало восстановления.

Если давление диссоциации оксида металла больше давления диссоциации окиси углерода, то идет реакция восстановления, в противном же случае происходит окисление металла с помощью окиси углерода [63].

Рассмотрим константу равновесия реакции образования и диссоциации окиси углерода:



Константа равновесия запишется в виде (1.19):

$$K_p = \frac{P_{O_2}}{P_{CO}^2} \quad (1.19)$$

при $P_{O_2} = K_p \cdot P_{CO}^2$, т.е. чем больше P_{CO} , тем больше P_{O_2} и тем меньше сродство углерода к кислороду.

Для реакции $MeO + C = Me + CO$ Константа равновесия $K_p = P_{CO}$ поскольку при восстановительном процессе в трубчатой печи окисей металла, восстановитель и полученный металл находятся в твердой фазе (твердо фазное восстановление). Следовательно, при некотором P'_{CO} больше равновесного ($P'_{CO} > P_{CO}$) идет окисление металла, а если $P'_{CO} < P_{CO}$ идет восстановление металла.

Окислы металлов в огарке находятся в твердом состоянии. Следовательно, восстановление окислов никеля, меди, железа и кобальта в трубчатой вращающейся печи происходит в твердой фазе.

При газификации угля образуются окись углерода и водорода, которые являются хорошими восстановителями окислов металлов. Основным компонентом в огарке является закись никеля, поэтому в дальнейшем все рассуждения пойдут о восстановлении закиси никеля.

Восстановление закиси никеля окисью углерода идет по реакции (1.20):



обратная реакция (1.21):



Константа равновесия реакции (1.22):

$$K_p = \frac{P_{CO} \cdot P_{NiO}}{P_{CO_2} \cdot P_{Ni}} \quad (1.22)$$

Ввиду того, что никель металлический и его закись находятся в конденсированном (твердом) состоянии, то равновесные давления их паров - величины постоянные и тогда константу равновесия реакции можно записать в виде (1.23):

$$K_p = \frac{P_{CO}}{P_{CO_2}} \quad (1.23)$$

Тепловой эффект этой реакции по закону Гесса рассчитывают, как алгебраическую сумму тепловых эффектов образования окислов из элементов (1.24):

$$Q_{реакц} = Q_{CO_2} - Q_{NiO} - Q_{CO} \quad (1.24)$$

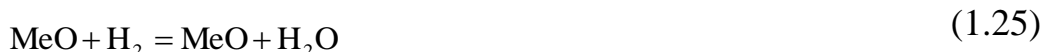
Высшие окислы металлов восстанавливаются ступенчато, т.е. сначала до низших окислов, а затем уже до металла.

Реакция восстановления окисла с помощью окиси углерода или окисления металла с помощью углекислоты будет идти в ту или иную сторону в зависимости от первоначального состояния системы и судят об этом по изменению изобарно - изотермического потенциала,

Если отношение первоначальных давлений CO и CO₂ в системе больше равновесного, ΔZ° реакции становится больше нуля и реакция протекает в сторону восстановления окисла. Если отношение начальных давлений CO и CO₂ равно равновесному - реакция не идет. Если же первоначальное отношение CO и CO₂ меньше равновесного, тогда окисляется металл. Металлы, имеющие большое сродство к кислороду, восстанавливаются при большом отношении P_{CO}/P_{CO₂}. Восстановление металлов, имеющих небольшое сродство к кислороду - наоборот. Для металлов же, обладающих сравнительно небольшим сродством к кислороду, реакции восстановления проходят экзотермично, и при повыше-

нии температуры равновесие сдвигается в сторону реакции окисления металла: углекислотой. Для таких окислов металлов, как NiO, Cu₂O, Fe₃O₄ и другие равновесный процент CO в смеси с CO₂ растет с увеличением температуры, а при 800°C- резко возрастает [64].

Восстановление окислов металлов водородом основано на взаимодействии металла и его окисла с парами воды и водородом (1.25-1.27):



Исходным материалом для получения огарка являются:

- никелевый концентрат от разделения фاینштейна, полученный методом флотации;
- магнитная фракция УРФ от разделения фاینштейна;
- обратная пыль печей кипящего слоя;
- обратная пыль, уловленная в системах сухого пылеулавливания трубчатых вращающихся печей;
- различные сыпучие металлосодержащие материалы, в которых никель находится в окисленном состоянии (просыпи из торцов трубчатых печей, просыпи пыли убираемые с пола, газоходная настыль и пр.);
- гранулы (пылевые окатыши) ЗАО «Полигон-Техноген», полученные из пылей электрофильтров печей КС.

Исходными материалами для получения огарка полувосстановленного являются:

- горячий огарок, выгружаемый из печей кипящего слоя при $t = 1000-1100^\circ\text{C}$;
- угольная крошка ГГС.

Для создания высокой температуры в восстановительной зоне трубчатой вращающейся печи используется природный газ Мессояхского и Солснинского месторождений.

В никелевом концентрате УРФ кроме сульфидов металлов, составляющих основную часть концентрата, содержатся в металлическом состоянии железо, никель, кобальт и медь, в виде сплавов. Плотность никелевого концентрата 5500-6000 кг/м³, насыпная масса 2000- 2100 кг/м³, температура плавления сульфидов никеля 778-815°С. Массовая доля влаги не более 9.0%.

За качество никелевого концентрата (как по содержанию влаги, так и по содержанию примесей в нем), поступающего на печи КС, несет ответственность сменный мастер участка разделения фاینштейна [65].

Химический и гранулометрический состав никелевого концентрата УРФ приведены в таблицах 1.7 и 1.8.

Таблица 1.7 – Химический состав никелевого концентрата УРФ

Наименование составляющей	Ni	Cu	Co	Fe	S	Оксиды			
						Si	Ca	Mg	Al
Массовая доля	63,49	4,20	1,56	2,42	24,0	0,33	0,37	0,21	0,17

Таблица 1.8 – Гранулометрический состав никелевого концентрата УРФ

Класс крупности, мм	+0,148	-0,148 +0,045	-0,045
Содержание, %	0,5 – 1,5	6,5 – 8,5	90,0 – 92,0

Наряду с никелевым концентратом из участка разделения фاینштейна поступает фракция металлизированная (магнитная фракция), образующаяся при флотационном разделении фاینштейна на никелевый и медный сульфидные концентраты.

Магнитная фракция перерабатывается на огарок полувосстановленный на комплексе металлургических агрегатов, включающем печи КС-1, 3 и трубчатые вращающиеся печи обжигово-плавильного участка № 2(см. ниже).

Химический состав магнитной фракции приведен в таблице 1.9, минералогический состав магнитной фракции приведен в таблице 1.10.

Таблица 1.9 – Химический состав магнитной фракции

Наименование составляющей	Ni	Cu	Co	Fe	S
Массовая доля, %	65,30	17,96	1,96	8,71	5,06

Гранулометрический состав магнитной фракции:

86,0 - 88,0% - класс + 0.053 мм

14,0-12,0% -класс -0,053

Таблица 1.10 – Минералогический состав магнитной фракции

Наименование фаз	Содержание, объемные %
Металлический сплав	81,4
Халькозин – борнитовый твердый раствор (сульфиды меди)	9,3
Хизлевудит	2,5
Металлическая медь	5,0
Силикаты	1,8

Насыпная масса магнитной фракции составляет 2600 кг/м.

В никелевый концентрат и магнитную фракцию платина извлекается на 95,0 - 95,6 %, палладий на 90,1 - 90,5 %, иридий на 89,7-90,1 %, золото на 88,5 - 90,0 %, серебро на 28,8 - 29,3 %, а остальная часть благородных металлов переходит в медный концентрат.

На никелевый завод уголь поступает с Кайерканского угольного разреза. После дробления на газогенераторном участке получают угольную крошку, которую применяют при запуске печей КС, а также для восстановления огарка до полувосстановленного огарка в трубчатых вращающихся печах. Требования к качеству угля класса ПКТ регламентированы в стандарте предприятия СТГ1.54.35-1-2001 «Уголь Кайерканского угольного разреза, поступающий на Никелевый завод. Методы отбора и подготовки проб», согласно которому: размер куска 0-300 мм. Угольная крошка для печей КС фракции 0 -30 мм. массовая доля, % (в партии): влага не более 7.0

зола (на сухую массу) не более 23,0

минеральных примесей не более 3.0

Теплотворная способность на рабочую массу при влажности 5,5% должна быть 6100 6200 ккал/кг [65].

Химический и гранулометрический составы угольной крошки приведены в таблицах 1.11 и 1.12. Химический состав золы приведен в таблице 1.13.

Таблица 1.11 – Химический состав угольной крошки

Составляющая на сухую массу	C	H ₂	N	O ₂	S	Зола
Содержание, %	66,9-69,8	3,0-3,12	1,35-1,41	3,75-3,90	0,25-0,45	21,4-22,0

Таблица 1.12 – Гранулометрический состав угольной крошки

Класс, мм	+15,0	-15,0+5,0	-5,0 +2,0	-2,0 +0,5	-0,5	Влажность, %
Содержание, %	5,5	27,4	32,6	19,2	15,3	5,1

Таблица 1.13 – Химический состав золы

Составляющие	Оксиды				
	Si	Al	Ca	Mg	Fe
Содержание, %	38,0-40,0	29,0-30,0	18,0-19,0	3,0-3,5	6,0-7,0

Гранулы (пылевые окатыши) ЗАО «Полигон-Техноген», полученные из пылей электрофильтров печей КС. Порядок учета пылей обжигового цеха, передаваемых для подготовки в ЗАО «Полигон - Техноген» и гранул, передаваемых в обжиговый цех, изложен во временном технологическом регламенте ВТР0401.54-12-99, который периодически пересматривается. Временный технологический регламент обязателен для изучения технологическим персоналом обжигового цеха [65].

Влажность гранул составляет 9,0-14 %, содержание цемента в гранулах составляет 15-20%. Насыпная масса пылевых окатышей (гранул) составляет 1700 кг/м³.

Гранулометрический и химический составы гранул представлены в таблицах 1.14 и 1.15.

Таблица 1.14 – Гранулометрический состав гранул

Класс, мм	+5,0	-5,0 +2,0	-2,0
Содержание, %	63,9	13,6	22,5

Таблица 1.15 – Химический состав золы

Ni	Cu	Co	Fe	S
50.9	4.90	1.31	5.00	2.70

Разогрев обжиговой печей КС после ремонтов и обеспечение необходимой температуры в трубчатой вращающейся печи идет за счет сжигания природного газа, химический состав которого представлен в таблице 1.16.

Таблица 1.16 – Химический состав природного газа

Составляющие	CH ₄	N	CO ₂	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
Содержание, %	96,751	0,212	0,189	2,777	0,052	0,009	0,015

Пределы взрываемости природного газа: верхний – 15.0%, нижний – 5.0%. Температура воспламенения 650-660°C, в токе чистого кислорода, теплотворная способность – 8250-8406 ккал/м³.

Конечными продуктами процесса обжига никелевого концентрата УРФ в печах кипящего слоя являются: огарок, пыль системы газоочистки и обжиговые газы.

Циклонная пыль, уловленная в системах газоочисток печей КС, является оборотным продуктом и возвращается на переработку в печах КС.

Пыль электрофильтров газоочисток в виде пульпы подается в сгуститель, находящийся в обжигово-плавильном участке [31, 48, 65].

Химический и гранулометрический составы огарка невосстановленного представлены в таблицах 1.17 и 1.18. Рациональный состав огарка невосстановленного представлен в таблице 1.21.

Таблица 1.17 – Химический состав огарка никелевого невосстановленного

Наименование составляющих	Содержание, %	Наименование составляющих	Содержание, %
Ni	67,0-68,5	SiO	0,36-0,40
Cu	4,0-5,5	Al ₂ O ₃	0,12-0,15
Co	1,6-1,7	CaO	0,14-0,18
Fe	2,50-3,00	MgO	0,15-0,20
S	0,16-0,30	Прочие	1,75-1,8

Огарок плавится при температуре 1660-1990°C (по данным разных авторов). Плотность огарка 6100-7230 кг/м³, теплота образования огарка находится в пределах 58400-60000 ккал/моль, насыпной вес - 2200 - 2400 кг/м³.

Таблица 1.18 – Гранулометрический состав огарка никелевого невосстановленного

Класс, мм	+0,4	-0,4 +0,315	-0,315 +0,2	-0,2 +0,16	-0,16 +0,1	-0,1 +0,063	+0,05
Содержание, %	24,53	15,06	28,60	14,33	11,64	4,53	1,21

Химический и гранулометрический составы оборотной пыли представлены в таблицах 1.19 и 1.20.

Таблица 1.19 – Гранулометрический состав оборотной пыли печи КС

Продукт обжига	Класс, мм				
	+0,16	-0,16 +0,1	-0,1 +0,063	-0,063 +0,05	-0,05
Пыль электрофильтров (катрельная)		4,5	21,5	4,0	70,0
Пыль циклонная	4,0	20,0	18,0	50,0	8,0

Таблица 1.20 – Химический состав оборотной циклонной пыли

Продукт обжига	Химический состав, %				
	Ni	Cu	Co	Fe	S
Пыль электрофильтров (катрельная)	56,8-60,4	3,9-6,7	1,45-1,50	4,80-5,50	2,60-3,00
Пыль циклонная	60,0-66,5	3,80-6,50	1,60-1,80	4,97-6,00	1,40-2,50

Теоретически возможная концентрация сернистого ангидрида в шахте печи при коэффициенте избытка воздуха $a = 1,03-1,05$ равна 12,8-13,2%. однако за счет большого избытка воздуха (1,2-1,4), обусловленного необходимостью отбора избытка тепла из кипящего слоя, и подсосов воздуха в зоне над кипящим слоем и в газоходном тракте, объемная доля SO₂ в отходящих газах составляет 4-8 %. Точка росы отходящих газов при концентрации в них сернисто-

го ангидрида 4.5-5.0% (начало конденсации сернистой кислоты) составляет 210-212 °С.

Таблица 1.21 – Рациональный состав огарка

Компоненты	Массовая доля, %						Оксиды					Всего
	Ni	Cu	Co	Fe	S	O ₂	Si	Ca	Mg	Al	Пр	
Ni ₂ S ₂	0,37					0,13						0,5
CoS			0,17			0,09						0,26
NiO	67,97					18,6						86,58
Cu ₂ O		4,49				0,51						5,0
CoO			0,9			0,27						1,17
FeO				0,7		0,2						0,9
Fe ₃ O ₄				2,2		0,85						3,05
SiO ₂							0,36					0,36
CaO								0,14				0,14
MgO									0,17			0,17
Al ₂ O ₃										0,12		0,12
Прочее												
Всего	68,34	4,49	1,07	2,9	0,22	20,44	0,36	0,14	0,17	0,12	1,75	100

Химический состав отходящих газов в шахте печей обжига никелевого приведен в таблице 1.22.

Химический - состав отходящих газов, поступающих на электрофильтры, приведен в таблице 1.23.

Таблица 1.22 – Химический состав отходящих газов печи КС

Наименование составляющих	Сернистый ангидрит	Кислород	Азот	Вода
Объемная доля, %	13,6	8,1	71,9	6,4

Таблица 1.23 – Химический состав отходящих газов печи КС

Наименование составляющих	Сернистый ангидрит	Диоксид углерода	Кислород	Азот	Вода
Объемная доля, %	4,5-5,0	2,5-2,8	4,0-16,0	76,4-72,8	2,8-3,4

Ориентировочный состав отходящих газов ТВП представлен в таблице 1.24.

Таблица 1.24 – Ориентировочный состав отходящих газов ТВП

Наименование составляющих	CO	H ₂	CO ₂	N	SO ₂	CH ₄
Объемная доля, %	1.09	0.05	8.31	70.19	3.45	-

Полученный в печи кипящего слоя огарок никелевый невосстановленный поступает в трубчатую вращающуюся печь, где в восстановительной зоне с помощью угольной крошки идет его частичное восстановление до полувосстановленного огарка никеля [64].

Насыпной вес полувосстановленного огарка никеля (в зависимости от степени восстановления) – 2200-3000 кг/м³.

Химический состав огарка никелевого полувосстановленного представлен в таблице 1.25.

Таблица 1.25 – Химический состав огарка никелевого полувосстановленного

Массовая доля, %				
Ni	Cu	Co	Fe	S
76,0-82,0	4,97-9,0	1,89-2,00	3,28-5,0	0,20-0,30

1.6 Технология получения концентрированного никелевого порошка из огарка в трубчатой вращающейся печи

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 76,0%) в трубчатую печь необходимо подать 16,0-18,0% угольной крошки от веса огарка. Увеличение объема угольной крошки, подаваемой в реакционную зону трубчатой печи свыше 18,0%, приводит к увеличению расхода твердого восстановителя.

Условно трубчатую печь можно разбить по длине на четыре зоны.

В первой зоне (8,0-10,0% от общей длины) происходит механическое смешение угольной крошки с горячим огарком, разогрев угля за счет физического тепла огарка и пламени газовой горелки. В этой же зоне начинается газификация угля и восстановление окислов металлов в основном летучими составляющими по реакциям (1.28-1.29) [64]:



Разогрев, газификация угля и восстановление окислов металлов идет с поглощением тепла (эндотермический процесс).

Во второй зоне (10,0-12,0% от общей длины) происходит интенсивное горение угольной крошки за счет избытка кислорода воздуха, поступающего в реакционную зону за счет подсосов через торец печи. Сжигание природного газа ведут при $\alpha = 1,03-1,05$ для того, чтобы получить максимально возможную температуру пламени горелки (1.30):



Непосредственное восстановление огарка до никелевого порошка происходит, в основном, за счет водорода и окиси углерода, а также твердым углеродом на поверхности контакта уголь-огарок по реакции (1.31):



Для протекания реакций восстановления (1.28), (1.29) и (1.31) необходима температура в восстановительной зоне печи не менее 800°C.

Восстановление окислов металлов твердым углеродом по реакции (1.30) эффективно лишь при температурах 1150-1200°C.

В третьей зоне (60,0-65,0% общей длины) происходит окончательное восстановление огарка до никелевого порошка по реакциям (1.30) и (1.31).

Качество никелевого порошка (содержание в нем никеля) зависит от степени (глубины) восстановления, а последняя, в свою очередь, от температуры в реакционной зоне: чем выше температура, тем больше степень восстановления

и, следовательно, тем лучше качество порошка. Степень восстановления в трубчатых печах обжигового передела составляет 55-65%. Визуально о качестве порошка судят по его насыпному весу (чем выше насыпной вес, тем лучше качество порошка). Насыпной вес порошка составляет 2,3-3,0 кг/см³ [62].

В четвертой зоне происходит охлаждение полученного никелевого порошка до 90- 120°С. При недостаточном охлаждении никелевый порошок в местах пересыпки из бункера в кубели и из кубелей в шихтарники анодного передела, окисляется кислородом воздуха (вторичное окисление), что снижает степень восстановления.

Для снижения температуры порошка, в холодильную камеру подается вода через водяную форсунку.

Подача угольной крошки в трубчатую печь производится по схеме: бункер- тарельчатый питатель - винтовой шнек диаметром 400 мм, либо конвейер L=400 мм, или пересыпную течку с помощью воздуха.

Качество никелевого порошка зависит от температуры внутripечного пространства, от времени пребывания огарка в восстановительной зоне, от качества и количества угольной крошки.

Скорость вращения винтовых шнеков угольного тракта постоянная, следовательно, их производительность зависит от степени их наполнения или от производительности тарельчатого питателя [71].

Производительность тарельчатого питателя зависит от скорости вращения тарели и положения шибера (сечения выходного отверстия).

Расход природного газа и воздуха, поступающего в газовую горелку трубчатой вращающейся печи, регистрируется вторичным ферродинамическим самопишущим расходомером ВФС-4, а тяговый режим регулируется по показаниям вторичного компенсационного самопишущего дифманометра КСДЗ-УЗ со шкалой измерения от минус 31,5 мм вод.ст. до плюс 31,5 мм вод.ст.

Поскольку в газоходном тракте после трубчатой вращающейся печи нет камеры дожигания, то сжигание природного газа нужно вести при $\alpha = 1,03 - 1,05$, что исключает возможность получения в продуктах сжигания окиси угле-

рода и водорода. Допускается производить сжигание при $\alpha \leq 0$ при периодическом контроле состояния газовой смеси в газоходе [100].

Степень восстановления (качество) никелевого порошка для оперативного управления процессом восстановления определяется визуально, по внешнему виду порошка. Порошок с высокой степенью восстановления (или содержанием никеля) более светлый с золотистым оттенком, поверхность частиц более гладкая, окатанная, с мягким металлическим блеском. По мере снижения степени восстановления, порошок приобретает все более темный цвет [101].

На основании рекомендации ГМОИЦ, в момент залпового поступления свинца и цинка на никелевый завод в исходном сырье, восстановительный обжиг огарка в ТВП вести при температурах 836-860°C, так как при этих температурах отмечается наименьшее извлечение свинца и цинка в восстановленный огарок (25-42%).

1.7 Транспортировка материалов, подготовка и обслуживание технологической тары

Оборотная пыль печей КС с циклонов-холодильников и вторичных циклонов выгружается в кубель емкостью 1,2-3,5 м³ и транспортируется мостовым электрическим краном на загрузку печей. Огарок и никелевый порошок с бункеров трубчатой печи загружается в саморазгружающийся кубель емкостью 1,6-2,0 м³. Огарок складировается в один из бункеров емкостью 50,0 м³, а никелевый порошок мостовым электрическим краном грузоподъемностью 5,0 или 50,0 т транспортируется в шихтовые бункера анодного передела. Излишки никелевого порошка складировуются в бункера емкостью по 50,0 м³ каждый.

Циклонная пыль аспирационных систем ТВП выгружается в кубель и транспортируется краном на загрузку печей КС [5].

Угольная крошка подается в контейнере (вмещающем до 3,0 т угля) на шихтарник печей КС-2, 4 и анодного передела РНБ 1-4, и поддонами (емкостью 10-15 т) на печи КС- 1,3 и шихтарник РНБ-5.

Категорически запрещается выгружать в шихтовые бункера анодного передела сырой никелевый порошок.

Технологической тары на переделе должно находиться одновременно не больше, чем предусмотрено планом расстановки.

Новая тара (кюбеля, совки, угольные контейнера) перед использованием проходят внешний осмотр, с присвоением номера, который наваривается на корпусе. Старший мастер обжигового передела ведет учет и осмотр тары с записью в специальном журнале и несет ответственность за их технически исправное состояние.

В зависимости от их технического состояния, старший мастер определяет необходимость ремонта тары или бракует ее [1].

Эксплуатация технологической тары ведется согласно «Правил устройств и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов».

Категорически запрещается работать с технически неисправной технологической тарой и перегружать её. Ответственность за соблюдение правил эксплуатации технологической тары несут сменные мастера и обжигальщики, осуществляющие транспортировку грузов кранами [5].

1.8 Факторы, влияющие на восстановление закиси никеля

Повышение концентрации серы в огарке (ПКСО) приводит к укреплению и увеличению степени восстановления ЧВЗН за счёт протекания реакции (1.32-1.34):



Реакции взаимодействия между оксидами и сульфидами никеля начинаются при температуре 900 °С и достигают максимума при температуре 1200 °С при условии недостатка свободного кислорода.

При окислении сульфидов в ПКСО в условиях недостатка свободного

кислорода могут развиваться реакции металлизации никеля при высоких температурах обжига. Это происходит за счёт высокой скорости окисления сульфидов, что приводит к подъёму температуры внутри зерна сульфида до высоких значений с одновременным образованием на зерне поверхностной плёнки окисла, затрудняющего диффузию кислорода внутрь зерна (так как его парциальное давление в зоне слоя невелико). При этих условиях внутри зерна также развиваются реакции металлизации [11, 12].

При увеличении давления в ТП степень восстановления повышается.

При увеличении скорости движения газов в ТП степень восстановителя снижается.

1.9 Закономерности движения газов

Характер движения газов в печах оказывает решающее влияние на развитие теплообменного процесса, на сопротивление движению газов и на физико-химические превращения материалов.

Турбулентное движение характеризуется весьма беспокойным перемещением газа по взаимно пересекающимся траекториям с большим числом мелких вихрей. Максимальная скорость турбулентного потока занимает значительную часть его центральной области, а у стенок канала скорость равна нулю.

В барабанных печах картина движения газов весьма проста и представляет собой турбулентный поток в прямом канале. Прямолинейный поток газов, выходящий из топочной части печи, движется по направлению к загрузочной головке, не встречая на своем пути препятствий. Максимальная скорость наблюдается на участках, прилежащих к оси барабана, а минимальная - у стенок и поверхности шихты [30].

Основной недостаток обжиговых печей для обжига в слое - недостаточный контакт материала с газовой фазой - только по открытой поверхности, в то время как главная масса обжигаемого материала скрыта в глубине толстого слоя, куда доступ газов весьма затруднен. Вследствие малой интенсивности газообменных и теплообменных процессов для завершения обжига материалов в

перегреваемом слое требуется время пребывания материала в печи – до 1,5 часов [30, 36].

1.10 Закономерности движения материала

В барабанных вращающихся печах шихта располагается в виде сегмента, прилежащего к стороне вращения барабана. Угол наклона хорды сегмента близок к углу естественного откоса перерабатываемых материалов и в среднем составляет 27 - 35°. Сечение барабана заполняется шихтой обычно на 10-20 %.

Активная поверхность материала, непосредственно соприкасающаяся с газовой фазой, для печей без перегревающих устройств приблизительно определяется наклонной плоскостью, образованной хордой сегмента и длиной барабана печи. Частицы шихты в барабанных печах движутся по сложной траектории, слагающейся из перемещений в плоскости вращения барабана и из перемещений вдоль оси барабана. Таким образом, движение шихты состоит из подъемов частичек внутри слоя и скатываний их по открытой поверхности вниз. Никакой строгой закономерности в движении отдельных частичек при этом не наблюдается из-за многообразия факторов, влияющих на движение, и в частности, зависимости движения от огромного числа возможных комбинаций взаимного расположения кусков шихты в слое. Частички скатываются по открытой поверхности с уклоном в сторону наклона барабана, вследствие чего обеспечивается поступательное движение шихты вдоль оси барабана. По открытой поверхности шихта движется в виде периодических лавинообразных скатываний порций и характеризуется ссыпаниями верхнего поверхностного слоя вниз, между которыми открытая поверхность шихты неподвижна. При каждом ссыпании шихты обновляется активная поверхность материала, и обнажаются новые слои [43].

Величина активной поверхности барабанной печи за один оборот определяется главным образом рабочими размерами печи и в меньшей степени - параметрами работы. Активная поверхность заметно возрастает при увеличении диаметра и длины барабана и возрастает сравнительно слабее при увеличении

питания печи и уменьшении числа оборотов и угла наклона барабана. Скорость поступательного движения вдоль оси печи повышается при увеличении диаметра печи, угла наклона и числа оборотов. Изменение питания печи шихтой не отражается на величине скорости из-за соответствующего изменения заполнения печи [48, 50].

Время пребывания шихты в барабанной печи не зависит от питания шихтой, но оно увеличивается при уменьшении числа оборотов и угла наклона. Время пребывания шихты на активной поверхности увеличивается с уменьшением питания, с уменьшением числа оборотов и угла наклона печи. Заполнение печи и толщина слоя шихты увеличиваются при увеличении питания и уменьшении числа оборотов и угла наклона. Неоднородная шихта, состоящая из смеси материалов различной плотности или разной крупности, в барабанной печи движется и обжигается неравномерно вследствие того, что более легкие куски материала концентрируются преимущественно на поверхности [52].

1.11 Тепловой и температурный режимы нагрева материала

По энергетическому признаку трубчатые вращающиеся печи относятся к печам-теплообменникам с переменным по длине режимом тепловой работы. На участке, где происходит горение топлива и температура продуктов сгорания 1200-1250 °С, осуществляется радиационный режим работы печи. По мере продвижения продуктов сгорания топлива по длине печи охлаждаются до нескольких сот градусов, и режим тепловой работы печи постепенно становится конвективным. Загружаемая в печь шихта может иметь различную степень влажности. Она подается в верхнюю часть печи и медленно движется вместе с газами, образующимися в результате сгорания топлива в головной части агрегата. Из барабана перерабатываемые продукты поступают в специальный холодильник, а газообразные продукты сжигания топлива вместе с технологическими газами направляются в систему пылегазоочистки [62].

Тепло, расходуемое во вращающихся печах на нагрев сыпучих материалов, подводится к ним в результате трех видов теплообмена: излучением от фа-

кела и раскаленной футеровки, конвекцией, а также излучением и теплопроводностью от закрытой материалом поверхности кладки. Математическое описание процессов внешнего (по отношению к нагреваемому материалу) теплообмена составляют, используя в качестве основного упрощающего допущения предложения о том, что печь может быть условно разделена на энергетически однородные участки (тепловые зоны). В пределах каждого из них температуру, радиационные характеристики и коэффициенты теплоотдачи от газа к нагреваемой поверхности можно считать постоянными величинами.

Поступившее в слой перемещающегося вдоль печи материала тепло распределяется в нем в основном в результате контактной теплопроводности. При вращении печи происходит энергичное перемешивание сыпучего материала, температура по высоте слоя практически выравнивается и его можно считать тонким в тепловом отношении телом, нагрев которого сопровождается многочисленными эндо- и экзотермическими реакциями [71].

Перенос тепла в кладке печи происходит вследствие теплопроводности. Наиболее распространено предложение, согласно которому кладка работает в условиях стационарного режима. При расчете потерь через футеровку дополнительно к основному упрощающему допущению полагают, что между сыпучим материалом и закрытой им поверхностью кладки существует только радиационный теплообмен [88].

Температурный режим работы вращающихся печей индивидуален для каждого вида технологического процесса и в значительной мере определяется химическим и фракционным составом перерабатываемого материала. В настоящее время существуют надежные методы расчета параметров теплового и температурного режимов работы вращающихся печей, основанные на использовании ЭВМ. Однако, из-за большой сложности и недостаточной изученности механизма теплопереноса в условиях многочисленных технологических процессов, анализ тепловой работы конкретных технологических агрегатов базируется в основном на изучении эмпирических данных и оценке тепловых балансов печей [50, 88].

ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ПЕЧИ

Заданная производительность отделения, которое включает 1 трубчатую вращающуюся печь, $\Pi=140000$ (т/год). С учетом плановых ремонтов среднее количество отработанных печью суток составляет 300 в год. Суточная производительность: $140000\text{т} / \text{год} \cdot 300\text{сут} = 467\text{т} / \text{сут}$. Печь отапливается мазутом, расход которого принимаем 600 кг/ч ($0,6$ м³/ч.) [81].

Время переработки 100 кг закиси (2.1):

$$T = \frac{24 \cdot m_{\text{зак}}}{\Pi}, \quad (2.1)$$

$$T = \frac{24 \cdot 100\text{кг}}{467\text{т} / \text{сут} \cdot 1000} = 0,005\text{ч} = 18,5\text{с}.$$

При плотности мазута $P_{\text{мазута}} = 950(\text{кг} / \text{м}^3)$ [9], расход мазута составит (2.2):

$$G = 0,6\text{м}^3 / \text{ч} \cdot P_{\text{мазута}}, \quad (2.2)$$

$$G = 0,6\text{м}^3 / \text{ч} \cdot 950\text{кг} / \text{м}^3 = 570\text{кг} / \text{ч}.$$

Для переработки 100 (кг) закиси никеля необходимо топлива (2.3):

$$m_{\text{топл}} = G \cdot T, \quad (2.3)$$

$$m_{\text{топл}} = 570\text{кг} / \text{ч} \cdot 0,005\text{ч} = 2,93\text{кг}.$$

Коэффициент пересчета количества отходящих газов, образованных от горения топлива (2.4) [81]:

$$K = \frac{m_{\text{зак}}}{m_{\text{топл}}}, \quad (2.4)$$

$$K = \frac{100\text{кг}}{2,93\text{кг}} = 34,11.$$

Объем отходящих газов $V_{\text{г}} = 59,648\text{м}^3$ на 100 кг закиси с учетом горения топлива по данным таблицы 2.1.

Таблица 2.1 – Количество и объем отходящих газов

Содержание	Всего	CO ₂	CO	H ₂ O	SO ₂	N ₂
Количество, кг	45,848	9,624	0,267	3,188	0,034	32,726
Объем, м ³	59,648	12,521	0,347	4,148	0,044	42,577
%, (масса)	100	21	0,6	7	0,1	71,4

Секундное количество отходящих газов (2.5):

$$V_1 = \frac{V_{\Gamma}}{T}, \quad (2.5)$$

$$V_1 = \frac{59,648 \text{ м}^3}{18,5 \text{ с}} = 3,22 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Средняя температура отходящих газов (2.6):

$$t_{cp} = \frac{T_{np} + t_1}{2}, \quad (2.6)$$

$$t_{cp} = \frac{1386^{\circ}\text{C} + 900^{\circ}\text{C}}{2} = 1143^{\circ}\text{C}.$$

При этой температуре средний объем газов в печи составит (2.7):

$$V_t = 3,22 \text{ м}^3 / \text{с} \cdot \left(1 + \frac{1143^{\circ}\text{C}}{273^{\circ}\text{C}}\right) = 16,71 \text{ м}^3 / \text{с}, \quad (2.7)$$

Действительная скорость движения газов в печи w_t лежит в пределах 1÷5 (м/с), принимаем равной 5 (м/с).

Диаметр печи (2.8) [71]:

$$D_{\text{вн}} = 1,33 \cdot \sqrt{\frac{V_t}{w_t}}, \quad (2.8)$$

$$D_{\text{вн}} = 1,33 \cdot \sqrt{\frac{16,71 \text{ м}^3 / \text{с}}{5 \text{ м} / \text{с}}} = 2,43 \text{ м}.$$

При толщине футеровки: шамот – 230 мм, кожух – 16 мм, асбест – 10 мм.

Наружный диаметр печи будет [50]:

$$D_{\text{нар}} = 2,43 \text{ м} + 0,23 \text{ м} \cdot 2 + 0,01 \text{ м} \cdot 2 + 0,016 \text{ м} \cdot 2 = 2,94 \text{ м}$$

ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА С ПОЗИЦИИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Современный этап индустриальной революции предполагает не только техническую реконструкцию и технологическое обновление существующих организационных структур и производственных систем, но и широкое использование всего спектра автоматизированных информационных систем управления предприятиями, их экономической, производственной энергетической и материальной инфраструктурой [108].

Исторически внедрение систем управления металлургическими предприятиями проходило в несколько этапов. На первом этапе автоматизировались процессы управления бизнесом и процессы снабжения. На втором автоматизации подвергается сам процесс производства, что, в определенной степени требует реинжиниринга производственных процессов [102].

Ярким примером таких инноваций является внедрение в практику предприятий технологий Интернета Вещей. В результате этой трансформации нас ждет появление умных предприятий, на которых объединенные в сеть датчики, оборудование и информационные системы, будут связываться друг с другом в режиме реального времени, управлять производством, самонастраиваться и учиться новым моделям поведения [97, 98].

В ряде стран уже существуют национальные программы интернетизации производства. В Германии это – «Промышленность 4.0», в Нидерландах – Smart Factory, во Франции – Usine du Futur, в Великобритании – High Value Manufacturing Catapult, в Италии – Fabbrica del Futuro, в Бельгии – Made Different, в США – Industrial Internet, в КНР – «Сделано в Китае 2025» [42].

По оценкам McKinsey [42] даже частичное внедрение элементов Индустрии 4.0 дает эффект по снижению издержек и росту продаж. По сделанным оценкам, при этом происходит увеличение производительности труда на 45-55%. Одновременно применение новых технологий сокращает расходы на обслуживание оборудования на 10-40%, время простоя техники на 30-50%, повы-

шает качественные показатели на 10-20% и уменьшает складские расходы на 20-50%.

Однако примеров полноценного воплощения завода формата 4.0 в металлургии пока нет. Некоторые причины возникновения такой ситуации будут рассмотрены ниже [93, 95, 96].

Пока же состояние автоматизации отдельных машин и процессов в металлургии можно определить, как Индустрию 3.0. Следующий этап информатизации подразумевает сквозную цифровизацию всех производственных активов и их интеграцию в единую цифровую экосистему, охватывающую всю цепочку создания стоимости товара [96, 104, 106].

Все же в России набирает скорость движения в направлении Больших Данных (Big Data), интернета вещей (IoT) и виртуальной реальности. В прессе в качестве примера использования облачных сервисов и больших данных в российской металлургии приводился проект «Снайпер», реализованный в 2016 году Магнитогорским МК совместно с компанией Yandex. По информации прессы только на этапе предварительного тестирования была достигнута экономия ферросплавов при использовании данного решения в среднем на 5% при сохранении показателей качества стали [93].

3.1 Применение вычислительной техники в металлургическом производстве

Задача применения вычислительной техники в металлургическом производстве возникла одновременно с развитием компьютерной техники. Подготовка современных металлургов немыслима без освоения информационных технологий и информационных систем.

Новые информационные технологии, в основе которых лежит теория искусственного интеллекта, позволяет специалисту – металлургу, – непрограммирующему конечному пользователю компьютера – непосредственно, без промежуточных помощников и без специальных знаний в области математики, про-

граммирования и вычислительной техники, обращаться с ЭВМ как при формулировке, так и при поиске решений неформализованных задач [86].

Интерес к активному использованию компьютеров в управлении металлургическими производствами возник в середине 90-х годов прошлого века и отразился в работе [88]. Основным ограничением на пути информатизации процесса управления была низкая производительность вычислительных устройств.

К рубежу веков эта проблема уже была частично снята. В это время при рассмотрении процесса автоматизации металлургического производства основной упор делался на выборе задачи для автоматизации.

В работе [99] автор приходит к выводу, что глобальный реинжиниринг производственных систем в металлургии экономически невыгоден для организации. Он требует постоянного, в течение длительного периода времени, вложения инвестиций, задолго опережающих момент начала получения прибыли.

Как решение автор предлагает создание гибких многовариантных производственных систем и организационных структур, осуществляющих управление подсистемами организации, органично связанными между собой. При этом должны быть учтены многовариантные технологии, многомаршрутные сырьевые и производственные потоки, графики поставок и подсистемы запасов материально-сырьевых ресурсов. Основной упор автор делает на внедрение информационных систем класса MES (Manufacturing Execution Systems) в качестве дополнения к ERP-системам.

Особое внимание автор обращает на гармоничное взаимодействие всех информационных систем металлургического предприятия. Для описания этого взаимодействия автор вводит понятие единого информационного пространства предприятия [97].

В качестве недостатка существующих систем управления предприятием автор приводит большое время обновления данных. Если в традиционных системах управления частота и дискретность обновления данных не очень критична – в некоторых системах это обновление происходит один раз в сутки и

это, как правило, не сказывается на работе непроизводственных отделов. В случае управления производством период обновления должен быть существенно меньше. Это связано и с режимами производства, и с выполнением требований техники безопасности.

В обзоре компании Nexcom подробно рассмотрен весь ассортиментный ряд продукции, которая может быть использована при построении промышленного Интернета вещей в горнодобывающей и металлургической промышленности [95].

Попытка создания умного металлургического производства описана в работе [106]. В ней подчеркивается, что успех в этом направлении может быть достигнут лишь при сочетании технологий искусственного интеллекта, сетей вещей (обобщенное понятие, объединяющее интернет вещей и интеранет процессов) и методов обработки больших данных.

Проблемам использования и обработке больших данных в металлургии посвящены работы [101, 103].

Одной из ключевых задач при работе с большими данными является снижение размерности массивов информации [104]. В качестве примера приводится Большой адронный коллайдер – эффективной обработке подвергается лишь 1% собранной информации. В работе делается предположение, что решение этой проблемы связано с использованием технологий искусственного интеллекта.

В работе [100] приведены примеры использования методов работы с большими данными, наработанные учеными из области физики, наук о Земле, биологии в приложении к процессам металлургического производства.

3.2 Основы проектирования умного металлургического производства

Далее приводятся принципы, на которых базируется проектирование умного металлургического производства.

Архитектура такой информационной системы должна состоять из трех слоев. На первом слое находятся датчики – «вещи», по определению Нацио-

нального института стандартов и технологий (США), на втором – агрегаторы или накопители информации, а на третьем – интеллектуальные устройства, производящие анализ и принимающие решения [42].

Связующим звеном между всеми тремя уровнями выступают каналы связи.

Ниже приводятся требования, предъявляемые к датчикам и каналам связи умного металлургического производства.

Датчик – это электронное устройство, измеряющее физические характеристики, такие как температура, ускорение, вес, звук, местоположение, идентичность и т. д. Датчики используют механические, электрические, химические, оптические и другие явления при взаимодействии с контролируемым процессом или средой. Датчики характеризуются следующими свойствами и возможностями [29]:

1. Датчики – физические объекты, которые могут иметь доступ в Интернет.
2. На выходе датчика мы получаем данные. Датчики могут быть цифровыми и аналоговыми.
3. Датчик может передавать информацию, идентифицирующую объект, с которым он связан, например, с помощью методов радиочастотной идентификации (RFID).
4. Датчик может быть идентифицирован.
5. Датчик может не иметь или иметь минимальные вычислительные возможности и встроенное программное обеспечение. Более сложные датчики могут иметь функции вычислительного устройства и встроенное ПО.
6. Датчики могут быть разнородными, разных производителей и собирать данные различной степени сложности.
7. Датчик может быть стационарным и мобильным.
8. Датчики могут обеспечивать наблюдение. Видеокамеры и микрофоны – датчики.

9. У датчика может быть владелец, контролирующий данные, собираемые датчиком. Владелец сам распоряжается данными датчика в любое удобное для него время.

10. У датчика есть происхождение – производитель и место выпуска. Происхождение датчика может быть неизвестным или неподтвержденным.

11. Датчик может быть многоразовым, одноразовым или иметь ограниченное время работы.

12. Датчики могут иметь различные уровни защиты, безопасности и надежности.

13. Датчик на выходе может не выдавать никаких данных, может выдавать полностью некорректные данные, может выдавать частично некорректные данные, может выдавать корректные и приемлемые данные. Датчики могут выходить из строя время от времени или полностью и навсегда. Они могут терять чувствительность, их калибровка может сбиваться.

14. Датчики могут выдавать дискретные ранжируемые данные, например, [1,100]. Если данные выходят за пределы обозначенного диапазона, необходимы правила для того, чтобы определить – передавать контроль оператору или машине для того, чтобы принять решение, стоит ли учитывать такие данные или пренебрегать ими.

15. С точки зрения поддержания чувствительности датчика, его калибровки и других параметров, датчики могут быть одноразовыми или подлежащими сервисному обслуживанию.

16. Питание датчика может осуществляться постоянным током, с помощью батареи питания или путем пассивного приема радиоволн.

17. Датчики могут приобретаться готовыми или собираться в соответствии с техническими требованиями заказчика.

18. Основанием для начала сбора датчиком данных может быть событие, команда оператора, команда машины, либо сбор данных может быть запланирован заранее в определенное время.

19. В целях обеспечения безопасности данные датчиков могут шифроваться.

20. Датчики должны иметь возможность проходить проверку подлинности.

21. Выходные данные с датчиков могут отправляться в различные Сети вещей. У одного датчика может быть несколько адресатов данных. Данные с датчика могут быть использованы одной или несколькими Сетями вещей.

22. Частота, с которой датчики передают выходные данные, определяет их пригодность и актуальность. Датчики могут передавать действительные, но устаревшие данные. Датчик может находиться в бездействии длительные периоды времени.

23. Класс точности датчика определяет объем передаваемой информации. Необходимо всегда учитывать статистический разброс (неопределенность) выходных данных датчика.

24. Датчики могут передавать сведения о состоянии системы, аналогично тому, как происходит в здравоохранении.

25. Оператор может оказывать влияние (положительное и отрицательное) на функционирование датчика, меняя его настройки, положение, либо не выполняя требования правил обращения с датчиком. Человеческий фактор – основная причина неисправности датчика.

26. Безопасность и защита существенны для датчиков, поскольку сами датчики и выходные данные могут быть подделаны, украдены, уничтожены, потеряны или попасть в руки тех, кому они не предназначались. Защита отдельных датчиков не обязательно должна быть составной частью защиты системы в целом и следовать из её конфигурации.

27. Надежность является важной характеристикой датчиков [31].

Канал связи – это среда, в которой происходит передача данных (например, с помощью интерфейса USB (универсальная последовательная шина), по проводам, по радиоканалу, по оптическому каналу, устно и т. д.). Канал связи характеризуется следующими характеристиками, свойствами и допущениями:

1. С помощью каналов связи происходит перемещение данных от датчика к агрегатору (накопителю) и затем к интеллектуальному устройству.

2. Каналы связи имеют физический или виртуальный характер, либо сочетают оба аспекта. Протоколы и связанные с их реализацией процедуры относятся к виртуальной составляющей, провода или пространство, в котором распространяются радиоволны), определяют физическую составляющую.

3. Поток данных в канале связи может быть однонаправленным или двунаправленным. В отдельных случаях накопитель может запросить данные с дополнительных датчиков, либо изменить порядок работы датчиков (изменить частоту опроса).

4. Предполагается, что отсутствует единый протокол, определяющий порядок передачи данных по каналу связи. Различные составные части Сети вещей могут общаться между собой с помощью различных протоколов.

5. Каналы связи могут быть беспроводными.

6. Каналы связи могут предоставляться (как продукт или услуга) сторонними поставщиками и производителями.

7. Надежность канала связи влияет на надежное функционирование датчика в составе Сети вещей.

8. В каналах связи могут происходить прерывания, задержки передачи данных и другие неисправности.

9. Избыточность (дублирование каналов связи) повышает их надежность. Между датчиками и накопителем (вычислительным устройством) может существовать несколько каналов связи.

10. Бесперебойность и доступность каналов связи влияет на нормальное функционирование Сети вещей, особенно в случае жесткой временной привязки отдельных операций и решений.

11. Надежность и безопасность передачи данных является существенной характеристикой каналов связи [76].

Одним из условий реализации умного производства – учет, обработка и анализ всего массива информации, поступающей от датчиков. При традицион-

ном подходе к информатизации металлургического производства обрабатывается не более 6% собранной микро-информации [7].

Для того, чтобы достичь этого предприятие должно решить следующие проблемы:

1. Обеспечить доступность к собранным массивам данных.
2. Автоматизировать процесс валидации данных.
3. Централизовать процесс хранения информации.
4. При анализе данных и отбраковке информационного шума базироваться на интеллектуальных информационных системах.

Проблемой является также выстраивание стратегии работы с базами больших данных. Для ускорения работы системы можно прибегнуть к сегментации этой базы (шардирование и партиционирование). Причем сегментация эта должна быть и вертикальной (по временным меткам) и горизонтальной (по типу устройства или аппарата, на котором установлен датчик). Ключевым является шардирование по временному признаку. Шаг временных отметок определяется особенностью контролируемого производственного процесса [77].

Особенностью работы с базами данных, полученных с датчиков о состоянии процесса, является тот факт, что датчиков, способных представить полную информацию о протекании процесса путем замера химического состава реакционной смеси практически или нет, или очень мало. В этом случае может оказать существенную помощь, так называемая детерминированная модель процесса, которая позволяет точно рассчитать состав реакционной смеси на основании измеряемых переменных процесса, таких как температура, давление, расход и фазовые равновесия. В этом случае математическую модель можно рассматривать как сложный датчик, позволяющий по массиву измеряемых переменных рассчитывать не измеряемые переменные, необходимые для расчета критерия качества функционирования объекта. Это позволяет определить оптимальные условия работы и создать систему оптимального управления технологическим процессом. Таким образом, точную математическую модель про-

цесса можно рассматривать как дополнительный виртуальный датчик, существенно расширяющий возможности измерительной системы.

Выводы по Главе 3

Умное производство – это завод, который без участия человека может снимать информацию с датчиков, анализировать ее и строить свою производственную траекторию в соответствии с результатами этого анализа. Все это возможно осуществить лишь на основе глубокого знания свойств материалов, процессов производства и синтеза компьютерной модели этого производства, которая может служить в качестве опорной при выработке умным производством сценария реагирования на ту или иную производственную ситуацию.

Умное производство подразумевает умные датчики (smart sensing), умную аналитику (smart analytics) и умное управление (smart control).

Умные датчики обеспечивают бесперебойный сбор, первичный анализ и передачу информации о состоянии данной конкретной установки и производственного процесса.

Умный анализ предполагает выстраивание сценария дальнейшего хода производственного процесса на основании опыта металлургов, научного описания протекающих процессов и методов анализа больших данных.

Умное производство, дополненное математической моделью, позволяет существенно расширить базу данных о текущем состоянии процесса.

Умное управление подразумевает то, что в результате произведенного анализа и действий происходит оптимизация процесса производства.

Все исходные данные для умного анализа находятся в базах знаний, построенных в соответствии с принципами онтологического инжиниринга экспертами-металлургами.

Умное производство находится в состоянии непрерывного изменения, что исключает резкие скачки во внедрении технологий или перестройке процессов. Для эффективного взаимодействия между собой отдельных частей производ-

ственной сети вещей на предприятии должны быть приняты и внедрены стандарты и форматы данных, а также телекоммуникационных процессов.

В основу построения сети вещей металлургического предприятия могут быть положены принципы, определенные в настоящей работе. Организованное таким образом умное производство будет обладать устойчивостью к воздействию внешних и внутренних факторов, способностью гибко перестраивать производственный цикл, обеспечивать высокое качество продукции, безопасный режим производства и экономию энергетических ресурсов.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ОБЖИГА ЗАКИСИ НИКЕЛЯ

4.1 Математическая модель объекта управления

Целью управления трубчатой вращающейся печи является стабилизация температурного режима работы печи, с целью улучшения качества получаемого частично восстановленного никеля на выходе из печи путём строгого контроля температуры в зонах восстановления и охлаждения. В связи с широким распространением вычислительной техники, основным методом исследования динамических свойств автоматических систем управления стал метод математического моделирования [2].

В основу метода математического моделирования положено понятие о математической модели исследуемого процесса (системы).

Под математической моделью понимают совокупность сведений, используемых в качестве математического описания процесса, которые заданы в виде уравнений [3, 57, 59].

На рисунке 4.1 изображена структура потоков в печи, из которой возможно выделить основные каналы управляющих и возмущающих воздействий объекта управления.

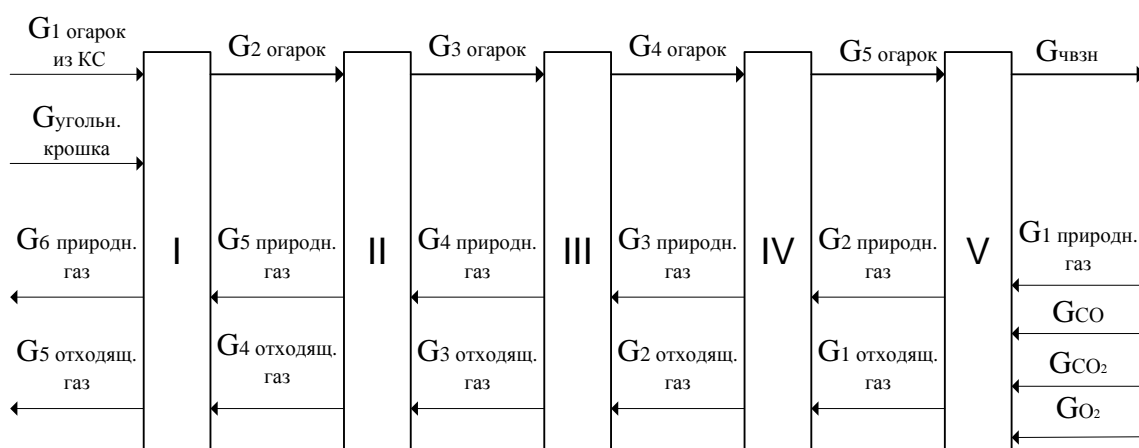


Рисунок 4.1 – Структура потоков в печи

Печь восстановительного обжига можно рассматривать как объект с определенными параметрами, но такое представление объекта усложняет его ма-

тематическое описание. В данной работе представлена ячеечная модель, как совокупность моделей идеального перемешивания и идеального вытеснения, для каждой зоны соответственно.

Цель моделирования заключается в получении статических и динамических характеристик объекта управления по различным каналам для расчета систем регулирования технологических параметров. Модель объекта управления представляет собой замкнутую систему дифференциальных уравнений при известных начальных условиях [2, 53].

Каждая из пяти зон печи представлены в виде аппарата идеального перемешивания. Математически данный объект описывается системой из пяти дифференциальных уравнений, которые представляют собой выражения динамического теплового баланса [54] (4.1).

$$\left\{ \begin{array}{l} m_I c_I \frac{dT_I}{dt} = Q_{1O_{2ар.изКС}} + Q_{Угольн.Крош.} + Q_{5Природн.Газ} + Q_{4Отх.Газ} - \\ - Q_{2O_{2ар}} - Q_{6Природн.Газ} - Q_{5Отх.Газ} \\ m_{II} c_{II} \frac{dT_{II}}{dt} = Q_{2O_{2ар}} + Q_{4Природн.Газ} + Q_{3Отх.Газ} - \\ - Q_{5Природн.Газ} - Q_{4Отх.Газ} - Q_{3O_{2ар}} \\ m_{III} c_{III} \frac{dT_{III}}{dt} = Q_{3O_{2ар}} + Q_{3Природн.Газ} + Q_{2Отх.Газ} - \\ - Q_{4O_{2ар}} - Q_{4Природн.Газ} - Q_{3Отх.Газ} \\ m_{IV} c_{IV} \frac{dT_{IV}}{dt} = Q_{4O_{2ар}} + Q_{2Природн.Газ} + Q_{1Отх.Газ} - \\ - Q_{5O_{2ар}} - Q_{3Природн.Газ} - Q_{2Отх.Газ} \\ m_V c_V \frac{dT_V}{dt} = Q_{5O_{2ар}} + Q_{1Природн.Газ} + Q_{CO_2} + Q_{CO} + Q_{O_2} - \\ - Q_{ЧВЗН} - Q_{2Природн.Газ} - Q_{1Отх.Газ} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Преобразовав, получим (4.2):

$$\left\{ \begin{aligned}
m_I c_I \frac{dT_I}{dt} &= G_{1\text{Огар.узКС}} c_{1\text{Огар.узКС}} T_{1\text{Огар.узКС}} + G_{\text{Угольн.Крош.}} c_{\text{Угольн.Крош.}} T_{\text{Угольн.Крош.}} + \\
&+ G_{5\text{Природн.Газ}} c_{5\text{Природн.Газ}} T_{5\text{Природн.Газ}} + G_{4\text{Отх.Газ}} c_{4\text{Отх.Газ}} T_{4\text{Отх.Газ}} - G_{2\text{Огар}} c_{2\text{Огар}} T_{2\text{Огар}} - \\
&- G_{6\text{Природн.Газ}} c_{6\text{Природн.Газ}} T_{6\text{Природн.Газ}} - G_{5\text{Отх.Газ}} c_{5\text{Отх.Газ}} T_{5\text{Отх.Газ}} \\
m_{II} c_{II} \frac{dT_{II}}{dt} &= G_{2\text{Огар}} c_{2\text{Огар}} T_{2\text{Огар}} + G_{4\text{Природн.Газ}} c_{4\text{Природн.Газ}} T_{4\text{Природн.Газ}} + \\
&+ G_{3\text{Отх.Газ}} c_{3\text{Отх.Газ}} T_{3\text{Отх.Газ}} - G_{5\text{Природн.Газ}} c_{5\text{Природн.Газ}} T_{5\text{Природн.Газ}} - \\
&- G_{4\text{Отх.Газ}} c_{4\text{Отх.Газ}} T_{4\text{Отх.Газ}} - G_{3\text{Огар}} c_{3\text{Огар}} T_{3\text{Огар}} \\
m_{III} c_{III} \frac{dT_{III}}{dt} &= G_{3\text{Огар}} c_{3\text{Огар}} T_{3\text{Огар}} + G_{3\text{Природн.Газ}} c_{3\text{Природн.Газ}} T_{3\text{Природн.Газ}} + \\
&+ G_{2\text{Отх.Газ}} c_{2\text{Отх.Газ}} T_{2\text{Отх.Газ}} - G_{4\text{Огар}} c_{4\text{Огар}} T_{4\text{Огар}} - G_{4\text{Природн.Газ}} c_{4\text{Природн.Газ}} T_{4\text{Природн.Газ}} - \\
&- G_{3\text{Отх.Газ}} c_{3\text{Отх.Газ}} T_{3\text{Отх.Газ}} \\
m_{IV} c_{IV} \frac{dT_{IV}}{dt} &= G_{4\text{Огар}} c_{4\text{Огар}} T_{4\text{Огар}} + G_{2\text{Природн.Газ}} c_{2\text{Природн.Газ}} T_{2\text{Природн.Газ}} + \\
&+ G_{1\text{Отх.Газ}} c_{1\text{Отх.Газ}} T_{1\text{Отх.Газ}} - G_{5\text{Огар}} c_{5\text{Огар}} T_{5\text{Огар}} - G_{3\text{Природн.Газ}} c_{3\text{Природн.Газ}} T_{3\text{Природн.Газ}} - \\
&- G_{2\text{Отх.Газ}} c_{2\text{Отх.Газ}} T_{2\text{Отх.Газ}} \\
m_V c_V \frac{dT_V}{dt} &= G_{5\text{Огар}} c_{5\text{Огар}} T_{5\text{Огар}} + G_{1\text{Природн.Газ}} c_{1\text{Природн.Газ}} T_{1\text{Природн.Газ}} + G_{\text{CO}_2} c_{\text{CO}_2} T_{\text{CO}_2} + \\
&+ G_{\text{CO}} c_{\text{CO}} T_{\text{CO}} + G_{\text{O}_2} c_{\text{O}_2} T_{\text{O}_2} - G_{\text{ЧВЗН}} c_{\text{ЧВЗН}} T_{\text{ЧВЗН}} - G_{2\text{Природн.Газ}} c_{2\text{Природн.Газ}} T_{2\text{Природн.Газ}} - \\
&- G_{1\text{Отх.Газ}} c_{1\text{Отх.Газ}} T_{1\text{Отх.Газ}}
\end{aligned} \right. \quad (4.2)$$

Q_i – поток тепла;

G_i – массовый расход;

c_i – теплоемкость;

T_i – температура в определенной зоне печи.

Данная система решена в программе Mathcad.

4.2 Математическая модель стационарного режима работы трубчатой вращающейся печи в программном комплексе ReactOp

Система ReactOp Cascade позволяет составить уравнения материального и теплового баланса для вращающейся печи на основе модели противоточного движения фаз с учетом энергий активации и тепловых эффектов реакций. В качестве исходных данных для моделирования приняты промышленные данные по получению никелевого порошка в ТВП на ГМК ОАО «Норильский Никель».

Структура потока материала соответствует модели идеального вытеснения, так как в радиальном направлении происходит интенсивное перемешивание материала, обусловленное вращением печи, а продольное перемешивание целесообразно не учитывать [88, 89, 90].

При принятой структуре потока процесс распределен в пространстве по одной координате – по длине печи. В каждом поперечном сечении печи поток материала характеризуется тремя параметрами: расходом через сечение, концентрацией компонентов, температурой.

Для разработки математической модели использованы программный комплекс ReactOp и система реакций (4.3), происходящих при получении частично восстановленной закиси никеля. В программном комплексе ReactOp имеется банк моделей [89, 90] реакторов с различной гидродинамикой и условиями теплообмена, которые можно дополнить схемой химических превращений, и автоматизированная система обеспечит синтез математической модели реактора с введенной схемой химических превращений. Стандартные модели обеспечивают синтез математических моделей для однофазных потоков при прямоточном движении реакционных фаз и теплоносителя. Однако, в составе комплекса предусмотрена модификация стандартных моделей с использованием алгоритмического языка Фортран, что позволяет создать нестандартную модель многофазного противоточного реактора, адаптированную к условиям функционирования конкретного реактора [90].

На рисунке 4.2 представлено окно синтезированной программы решения на языке Фортран. В этот текст рабочей программы вносятся изменения, которые отражают реальную картину процессов в реакторе.

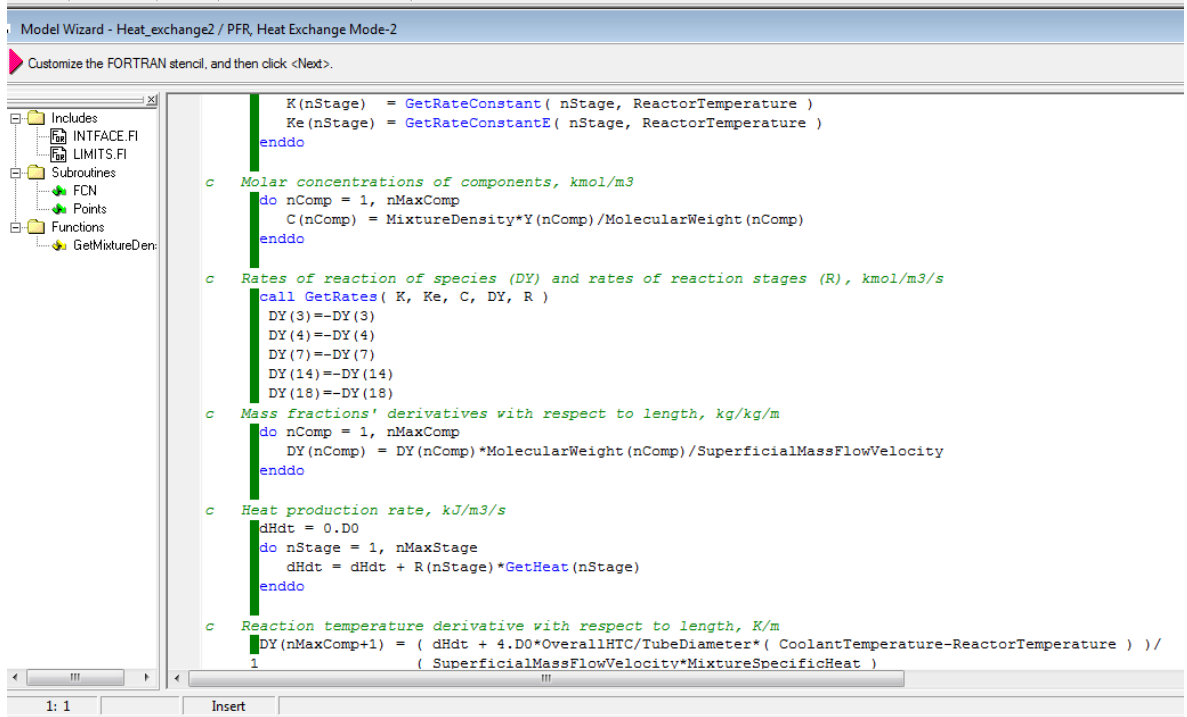
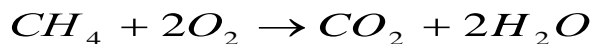
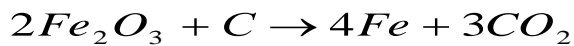
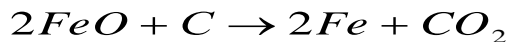
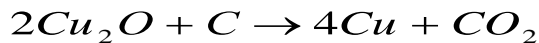
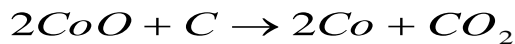
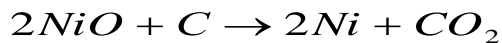
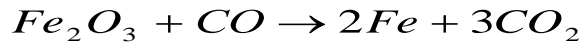
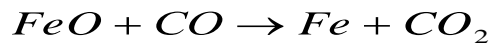
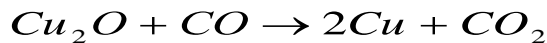
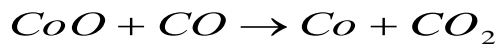
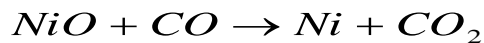
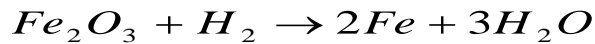
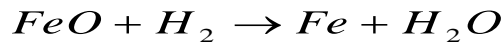
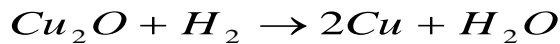
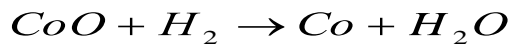
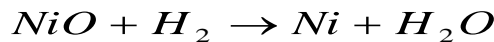
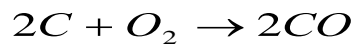


Рисунок 4.2 – Окно редактирования модели



(4.3)

Моделирование рассматриваемого процесса выполнено в PFR (Plug flow reactor) в режиме Heat Exchange Model (модель с тепловыделением).

Plug flow reactor model— модель проточного реактора идеального вытеснения, которая используется для описания химических реакций в непрерывных, проточных системах с цилиндрической формой. PFR модель используется для прогнозирования поведения химических реакторов, так чтобы могли быть оценены ключевые переменные реактора [33].

PRF регулируется дифференциальными уравнениями, решение которых рассматривается при известных граничных условиях.

Модель PFR может быть использована для моделирования нескольких реакций, а также реакций с изменением температуры, давления и плоскости потока [8].

Реактор идеального вытеснения имеет фиксированное время пребывания материала.

Типичный PFR может быть трубой, заполненной твердым материалом. Обычно эти типы реакторов называют реакторами с уплотненным слоем или PBR's (packed bed reactors). Иногда труба может быть в оболочке и с теплообменом [8].

В нашей модели были введены схемы химических реакций (4.3), протекающих в процессе восстановительного обжига закиси никеля. А также введены кинетические параметры этих реакций.

Получена математическая модель стационарного режима работы трубчатой вращающейся печи в виде графиков изменения концентраций компонентов огарка, поступающих в трубчатую вращающуюся печь из печи кипящего слоя (рисунок 4.3) и модель изменения температурного режима печи по ее длине (рисунок 4.4).

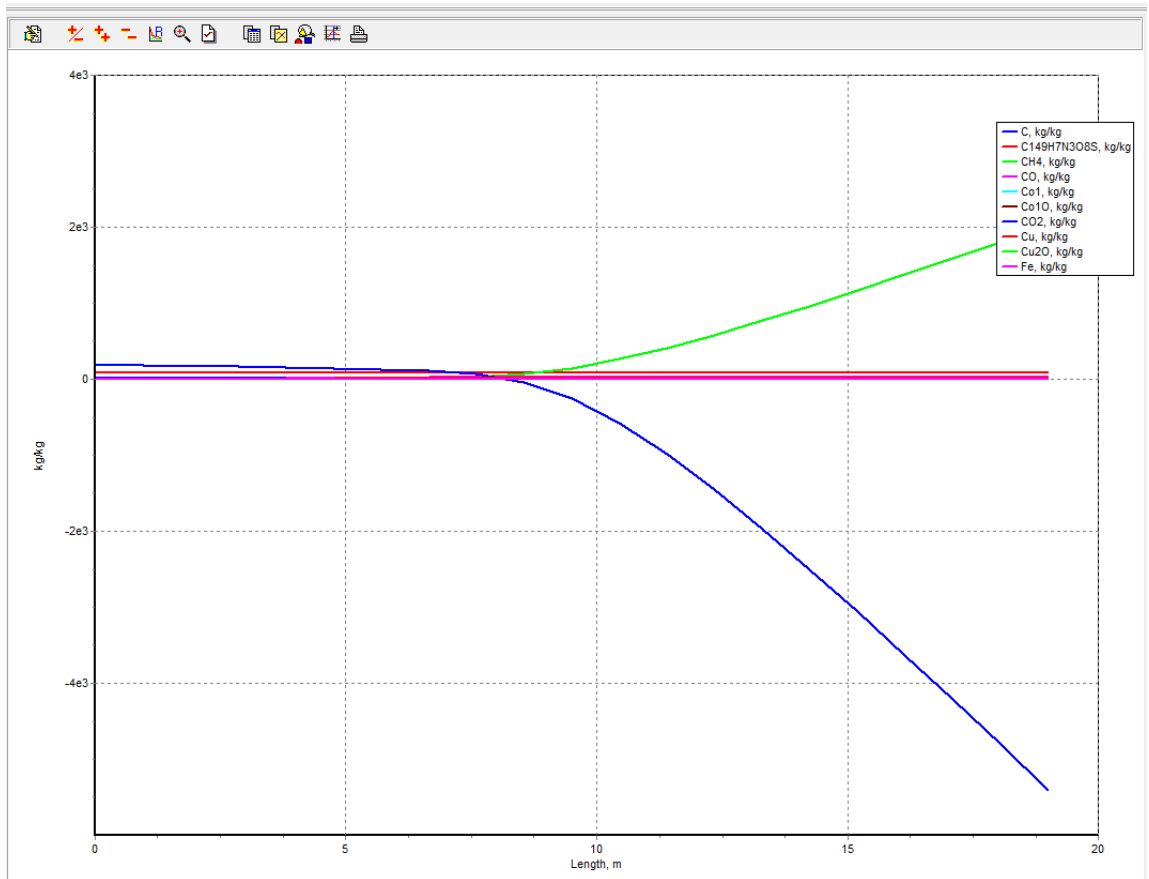


Рисунок 4.3 – Общий вид результатов математического моделирования

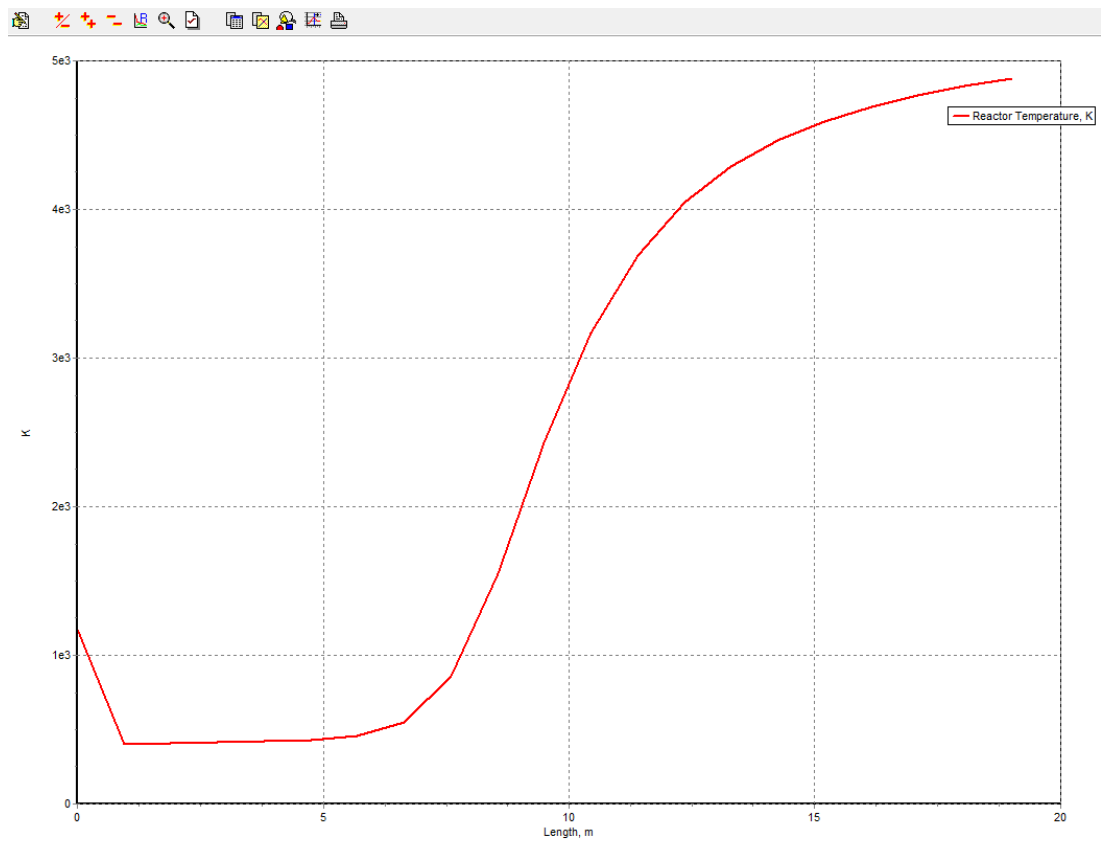


Рисунок 4.4 – Изменение температурного режима ТВП

На рисунке 4.5 показаны изменения состава основных компонентов процесса восстановительного обжига закиси никеля углеродом: изменение состава никеля и состава закиси никеля. Из графиков видно, что закись никеля стремительно уменьшается, а количество никеля, в свою очередь, увеличивается.

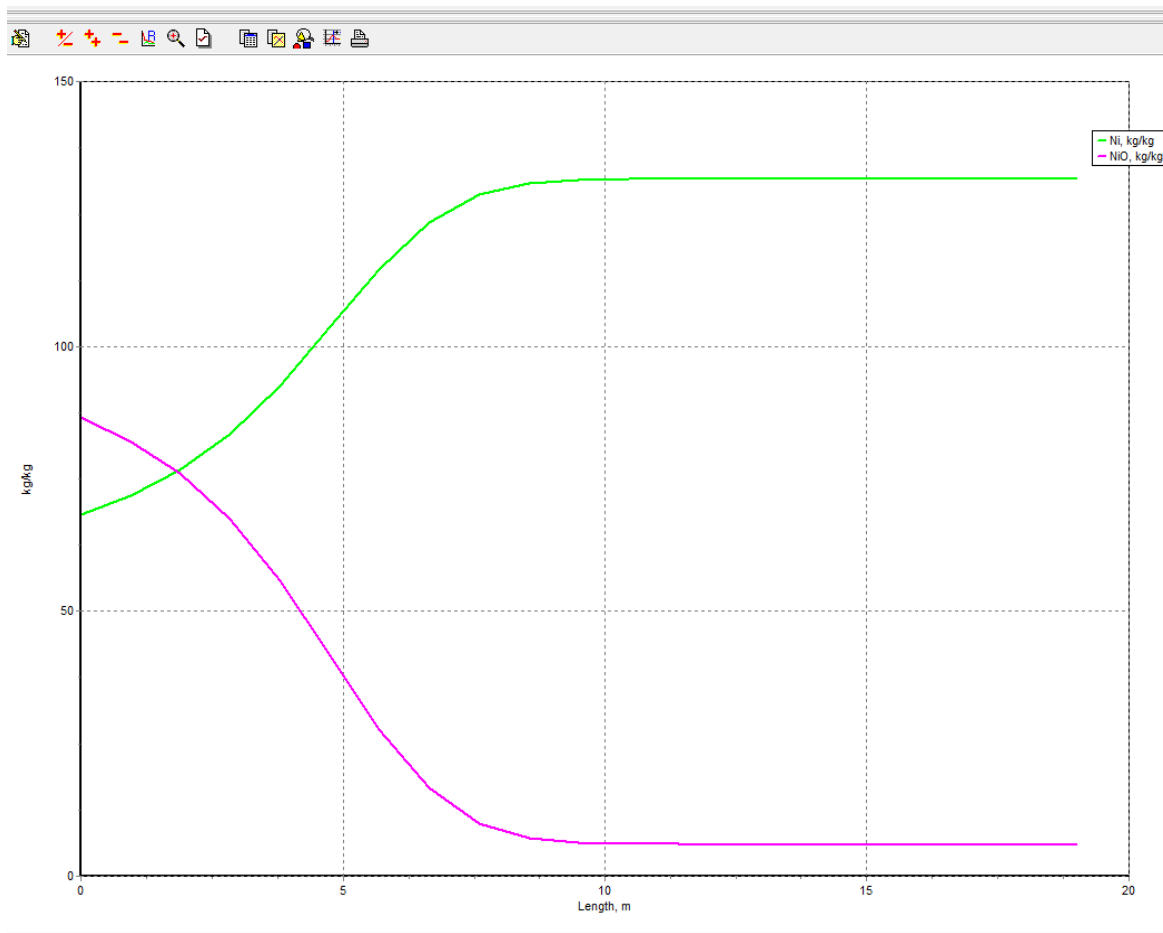


Рисунок 4.5 – Изменение состава никеля (зеленая линия) и состава закиси никеля (розовая линия)

Как показал анализ кинетических кривых, при увеличении температуры обжига степень металлизации ЧВЗН увеличивается на 3-5 %. Поэтому дальнейшей задачей становится усовершенствование системы регулирования и создание такой системы управления, которая обеспечит максимальную стабильность температурного режима.

ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

5.1 Определение динамических характеристик объекта управления по его кривой разгона

При определении динамических характеристик объекта по его кривой разгона на вход подается или ступенчатый пробный сигнал или прямоугольный импульс. Во втором случае кривая отклика должна быть достроена до соответствующей кривой разгона [6, 9].

При снятии кривой разгона необходимо выполнить ряд условий:

1. Если проектируется система стабилизации, то кривая разгона должна сниматься в окрестности рабочей точки процесса.

2. Кривые разгона необходимо снимать как при положительных, так и отрицательных скачках управляющего сигнала. По виду кривых можно судить о степени асимметрии объекта. При небольшой асимметрии расчет настроек регулятора рекомендуется вести по усредненным значениям параметров передаточных функций. Линейная асимметрия наиболее часто проявляется в тепловых объектах управления.

3. При наличии зашумленного выхода желательно снимать несколько кривых разгона с их последующим наложением друг на друга и получением усредненной кривой.

4. При снятии кривой разгона необходимо выбирать наиболее стабильные режимы процесса, например, ночные смены, когда действие внешних случайных возмущений маловероятно.

5. При снятии кривой разгона амплитуда пробного входного сигнала должна быть, с одной стороны, достаточно большой, чтобы четко выделялась кривая разгона на фоне шумов, а, с другой стороны, она должна быть достаточно малой, чтобы не нарушать нормального хода технологического процесса [18, 60, 86].

Сняв кривую разгона, и оценив характер объекта управления (с самовыравниванием или без) можно определить параметры соответствующей передаточной функции. Передаточную функцию вида (1.5) рекомендуется применять для объектов управления с явно выраженной доминирующей постоянной времени (однородный объект). Перед началом обработки кривую разгона рекомендуется пронормировать (диапазон изменения нормированной кривой 0 - 1) и выделить из ее начального участка величину чистого временного запаздывания [9].

Пример. Дана нормированная кривая разгона объекта, у которой заранее выделена величина чистого запаздывания $\tau_z = 3 \text{ мин}$. График кривой разгона представлен на рисунке. 5.1.

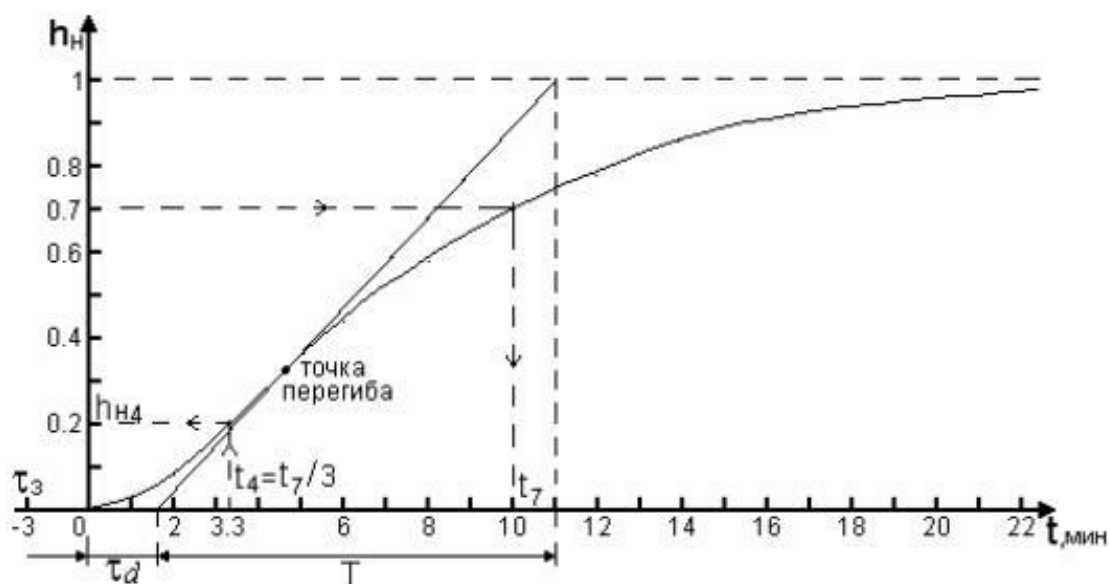


Рисунок 5.1 – График кривой разгона

Динамический коэффициент усиления K объекта определяется как отношение приращения выходного сигнала к приращению входного в окрестности рабочей точки.

Определение динамических характеристик объектов по кривой разгона можно производить двумя методами [51].

1) Метод касательной к точке перегиба кривой разгона. В данном случае точка перегиба соответствует переходу кривой от режима ускорения к режиму замедления темпа нарастания выходного сигнала.

Постоянная времени T и динамическое запаздывание τ_δ определяются в соответствии с графиком рисунка.3.1, т.е. $\tau = \tau_s - \tau_\delta$.

2) Формульный метод позволяет аналитически вычислить величину динамического запаздывания и постоянной времени по формулам (5.1) [9].

$$\tau_\delta = \frac{t_B \ln(1 - h_A) - t_A \ln(1 - h_B)}{\ln(1 - h_A) - \ln(1 - h_B)} \quad (5.1)$$

$$T = \frac{t_A - \tau_\delta}{n(1 - h_A)}$$

где значение h_A , берется в окрестности точки перегиба кривой, а значение h_B принимается равным 0,8 - 0,85. По этим значениям определяются и моменты времени t_A и t_B [9].

В данной работе для определения динамических характеристик был использован первый метод: метод касательной в точке перегиба кривой разгона.

5.2 Описание характеристик передаточной функции

Так как передаточная функция системы определяет ее динамические свойства, то первоначальная задача расчета САР сводится к определению ее передаточной функции (5.2) [51, 78, 82].

По графикам переходных функций определяются коэффициенты усиления и передаточные функции по каналам возмущения (5.3). На рисунке 5.2 представлен пример переходного процесса.

$$K = \frac{\Delta T}{\Delta X}, \quad (5.2)$$

где K - коэффициент усиления, °С/кг;

ΔT - разность конечного и начального значений температур, °С;

ΔX - разность конечного и начального значений расхода, кг.

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1} e^{-\tau p} \quad (5.3)$$

где K - коэффициент усиления, °С/кг;

T - постоянная времени, с.;

τ - время запаздывания.

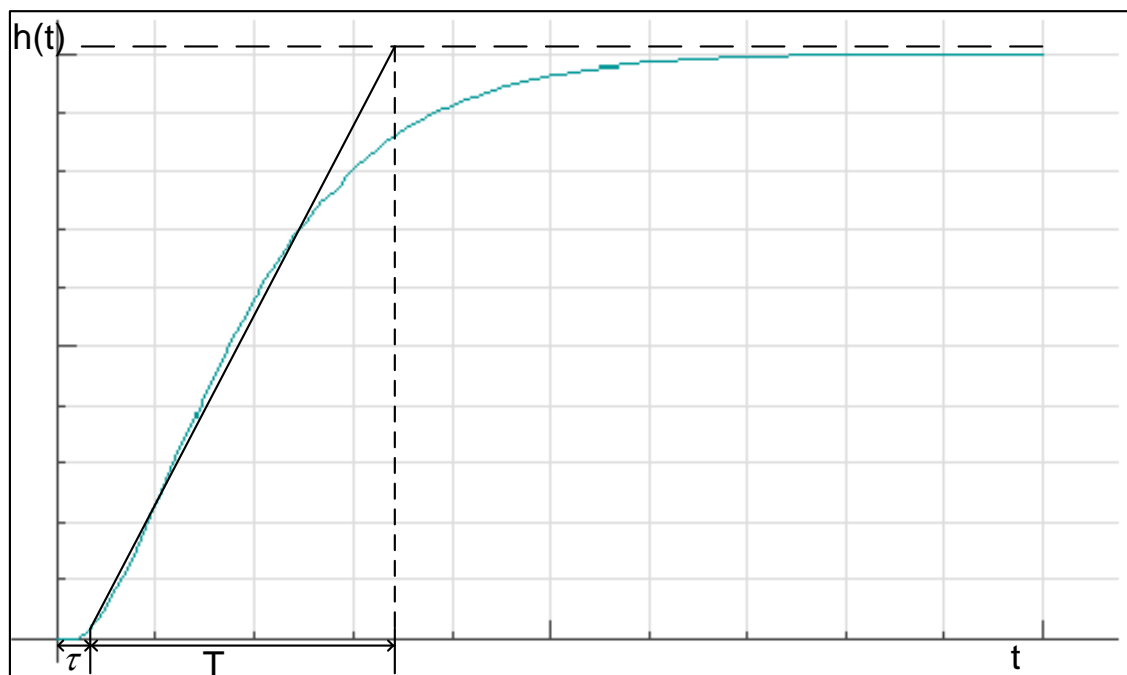


Рисунок 5.2 – Пример переходного процесса

5.3 Создание модели процесса в программе MATLAB на основе теплового режима трубчатой печи

Модель процесса восстановления закиси никеля в трубчатой вращающейся печи на основе теплового режима представлена на рисунке 5.2. Путём задания внутренних и внешних возмущений получаем переходные характеристики, по которым строятся передаточные функции (рисунки 5.3 - 5.6) [21, 25, 46, 87].

Каналы возмущений:

1. расход закиси никеля (внешнее возмущение);
2. расход угольной крошки (внешнее возмущение);
3. температура в наиболее горячей зоне печи (внутреннее возмущение).

Канал управления:

1. расход природного газа

Увеличены расходы закиси никеля, угольной крошки и природного газа на 50%, 20% и 10%, соответственно. Температура в самой горячей зоне печи увеличена на 100°C.

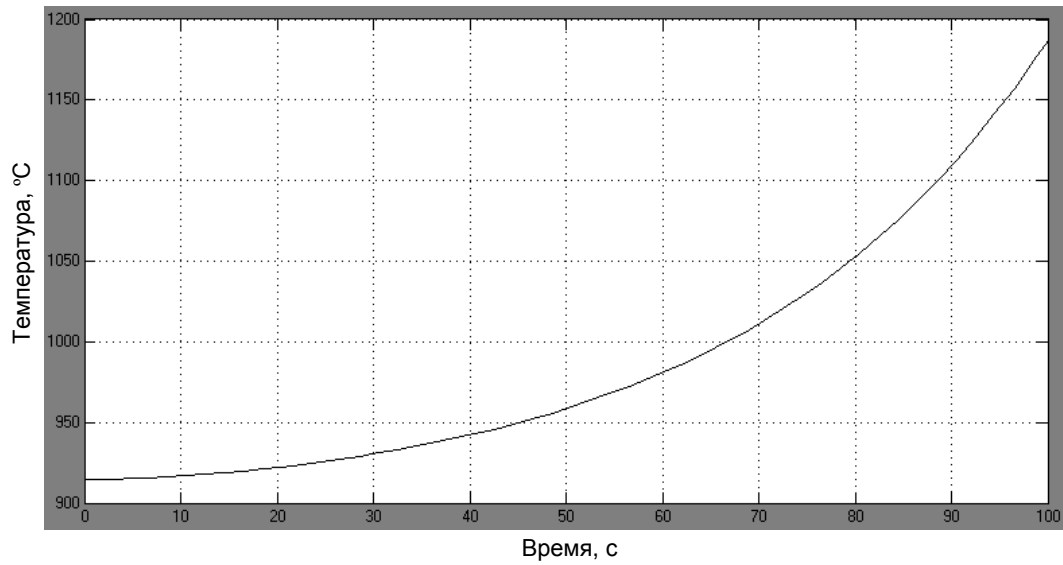


Рисунок 5.3 – Увеличение расхода закиси никеля на 50%

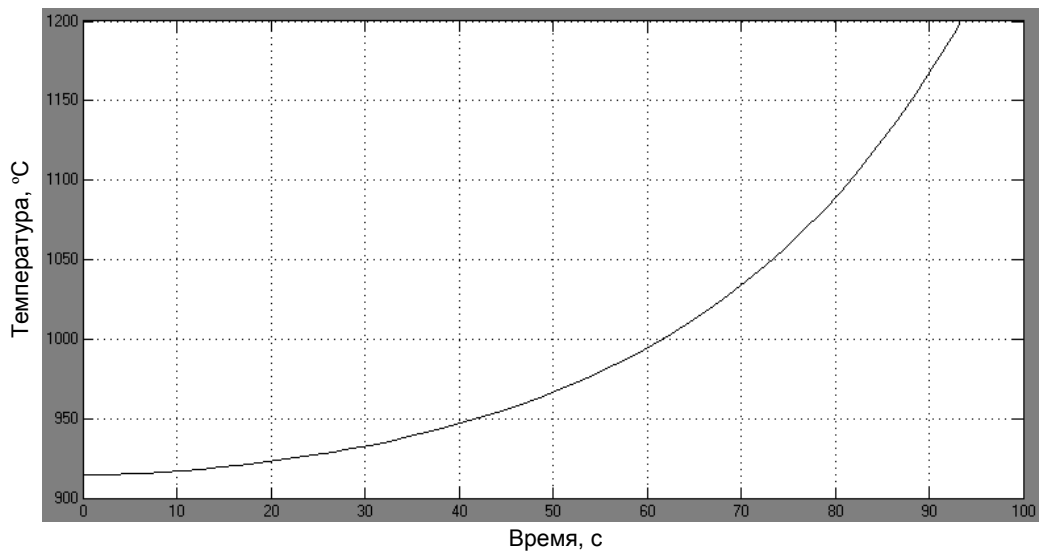


Рисунок 5.4 – Увеличение расхода угольной крошки на 20%

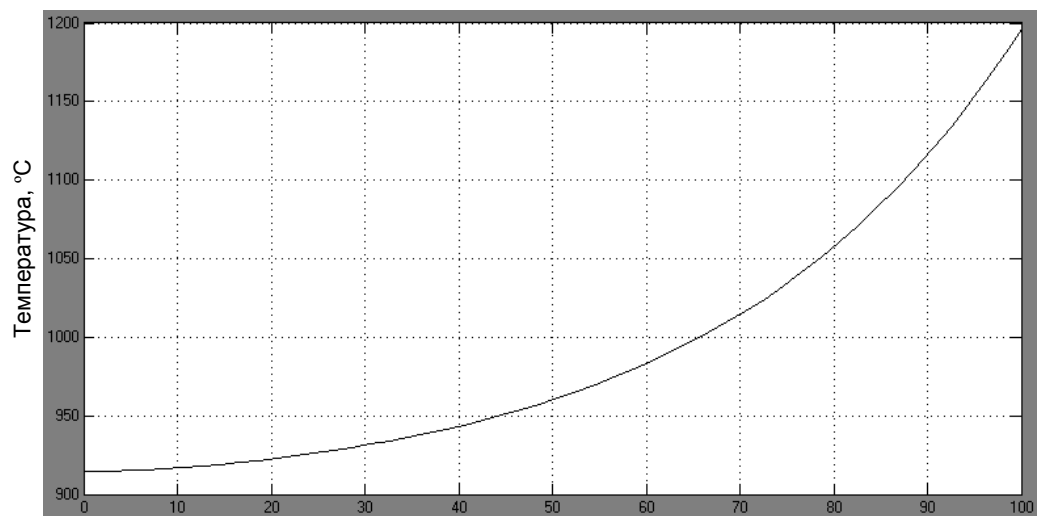


Рисунок 5.5 – Увеличение расхода природного газа на 10%

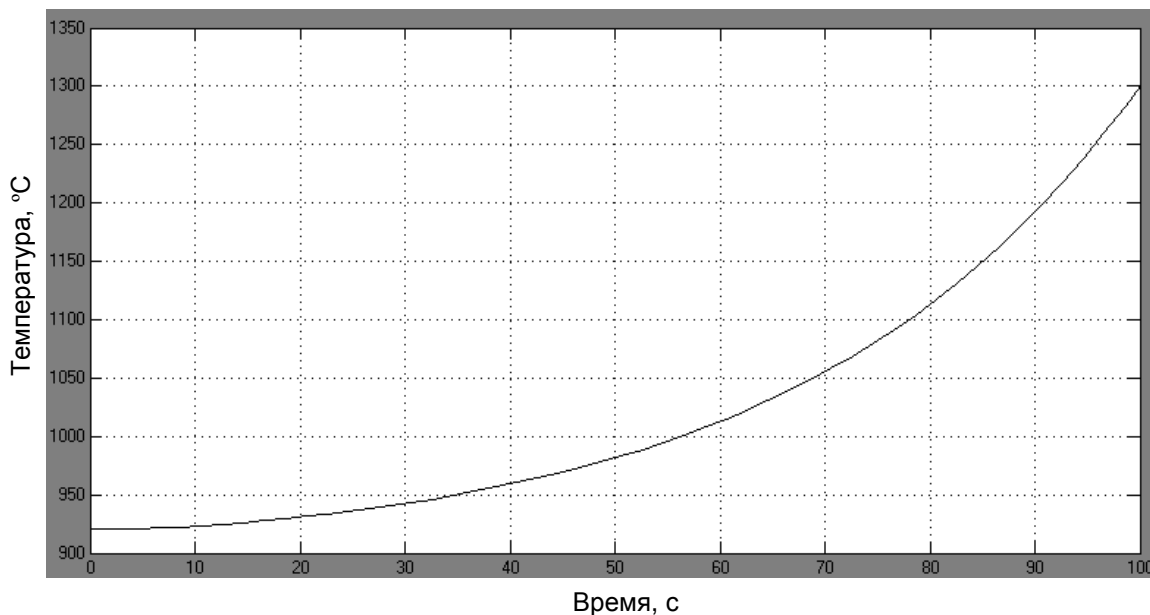


Рисунок 5.6 – Увеличение температуры в самой горячей зоне печи на 100°C

5.4 Определение характеристик передаточных функций

Передаточная функция при увеличении расхода закиси никеля на 50%:

$$K = \frac{300}{80,68} = 3,718, \quad W(p) = \frac{3,718}{10p + 1}.$$

Передаточная функция при увеличении расхода угольной крошки на 20%:

$$K = \frac{300}{74,81} = 4, \quad W(p) = \frac{4}{11p + 1}.$$

Передаточная функция при увеличении расхода природного газа на 10%:

$$K = \frac{300}{77,73} = 3,859, \quad W(p) = \frac{3,859}{3p + 1}.$$

Передаточная функция при увеличении температуры в наиболее горячей зоне печи на 100°C:

$$K = \frac{300}{108} = 2,77, \quad W(p) = \frac{2,77}{9p + 1}.$$

5.5 Синтез систем управления для стабилизации температуры печи

Для стабилизации температуры в печи принимаем систему, действующую по отклонению стабилизируемой величины от заданного значения (рисунок 5.7).

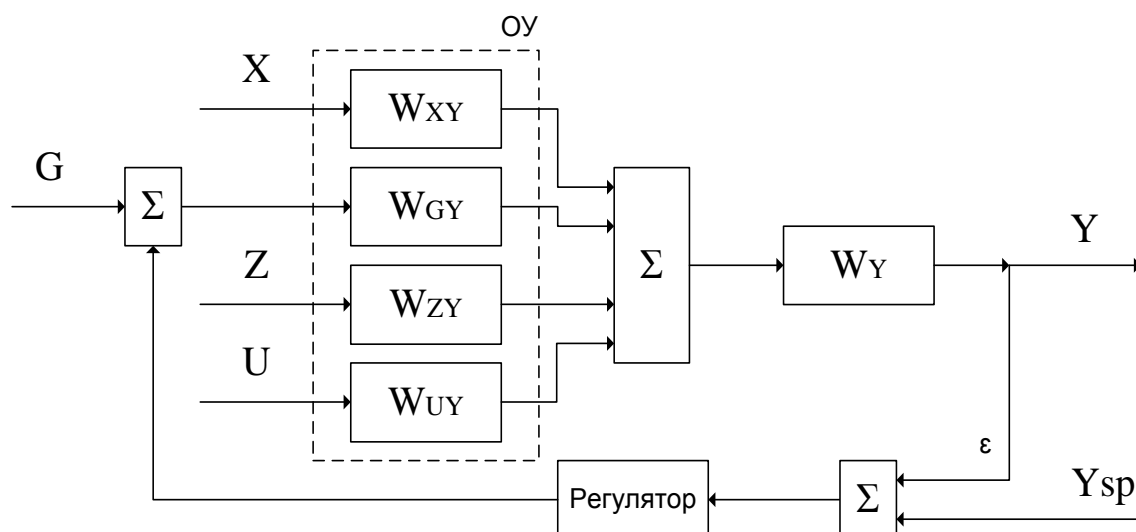


Рисунок 5.7 – Структурная схема системы автоматического регулирования температуры

OY – объект управления;

X – возмущение (расход огарка);

Z – возмущение (расход угольной крошки);

U – возмущение (температура в наиболее горячей зоне печи);

G – управляющий сигнал (расход природного газа);

Y – выходной параметр объекта (температура на выходе из печи);

$Y_{зад}$ – заданное значение выходного параметра;

W_{XY} – передаточная функция OY по каналу возмущения;

W_{ZY} – передаточная функция OY по каналу возмущения;

W_{UY} – передаточная функция OY по каналу возмущения;

W_{GY} – передаточная функция OY по каналу управления;

ε – ошибка на входе регулятора.

Проведено исследование динамических характеристик объекта управления по каналам возможных управлений и возмущений [22, 27, 28, 84].

Для выявления оптимальной системы управления процессом сравнивались системы, основанные на:

1. ПИД – регуляторе;
2. регуляторе Смита;
3. модель с fuzzy регулированием.

Для данной модели в качестве регулятора был выбран линейный регулятор с пропорционально – интегрально - дифференциальным (ПИД) законом регулирования, так как он наиболее универсален и учитывает малейшие колебания в системе. На рисунке 5.8 представлена схема системы управления процессом восстановительного обжига закиси никеля с ПИД - регулятором, где управляющим параметром является расход природного газа. На рисунке 5.9 представлен график переходного процесса по температуре на выходе из печи с ПИД-регулированием [19, 20, 23, 38, 41, 66, 67, 91, 92, 94, 105].

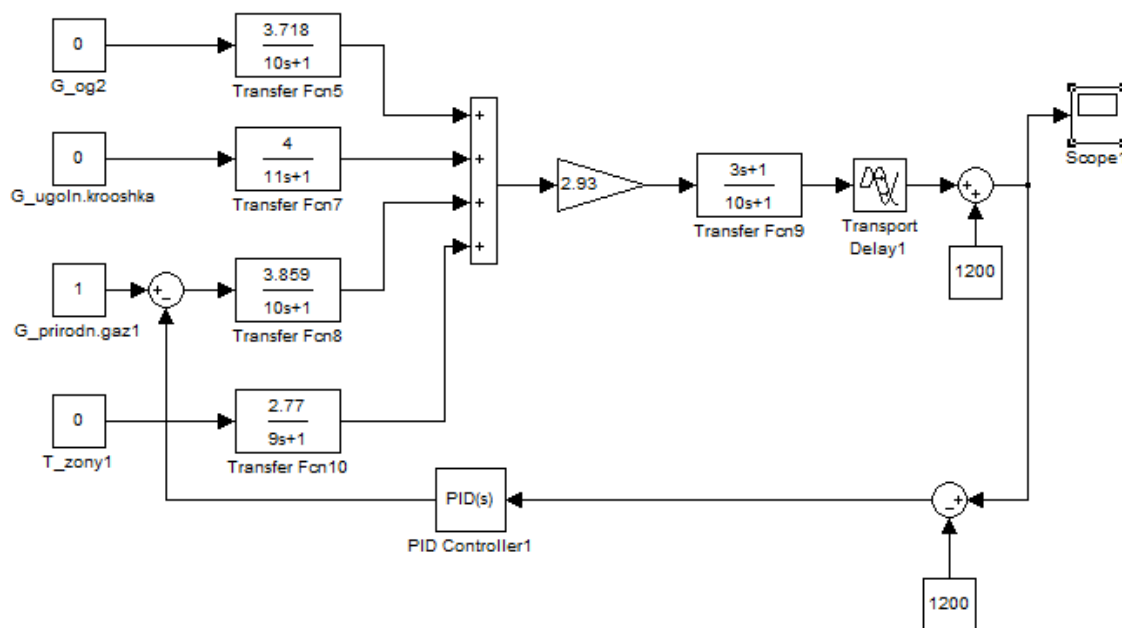


Рисунок 5.8 – Схема системы управления процессом восстановительного обжига закиси никеля с ПИД – регулятором

Характеристики ПИД – регулятора:

$$K_p = 0,35;$$

$$K_i = 0,05;$$

$$K_d = 0,083.$$

Для наиболее ответственных контуров можно рекомендовать использование ПИД-регулятора, обеспечивающего наиболее высокое быстродействие в системе. Однако следует учитывать, что это условие выполняется только при его оптимальных настройках (настраиваются три параметра) [32, 68, 69]. С увеличением запаздывания в системе резко возрастают отрицательные фазовые

сдвиги, что снижает эффект действия дифференциальной составляющей регулятора. Поэтому качество работы ПИД-регулятора для систем с большим запаздыванием становится сравнимо с качеством работы ПИ-регулятора. Кроме этого, наличие шумов в канале измерения в системе с ПИД-регулятором приводит к значительным случайным колебаниям управляющего сигнала регулятора, что увеличивает дисперсию ошибки регулирования и износ исполнительного механизма. Таким образом, ПИД-регулятор следует выбирать для систем регулирования, с относительно малым уровнем шумов и величиной запаздывания в объекте управления. Примерами таких систем является системы регулирования температуры [47, 51, 70, 75].

При выборе типа регулятора рекомендуется ориентироваться на величину отношения запаздывания к постоянной времени в объекте τ/T . Если $\tau/T < 0,2$ то можно выбрать релейный, непрерывный или цифровой регуляторы. Если $0,2 < \tau/T < 1$, то должен быть выбран непрерывный или цифровой, ПИ- или ПИД-регулятор. Если $\tau/T < 1$, то выбирают специальный цифровой регулятор с упредителем, который компенсирует запаздывание в контуре управления. Однако этот же регулятор рекомендуется применять и при меньших отношениях τ/T [9, 34, 39].

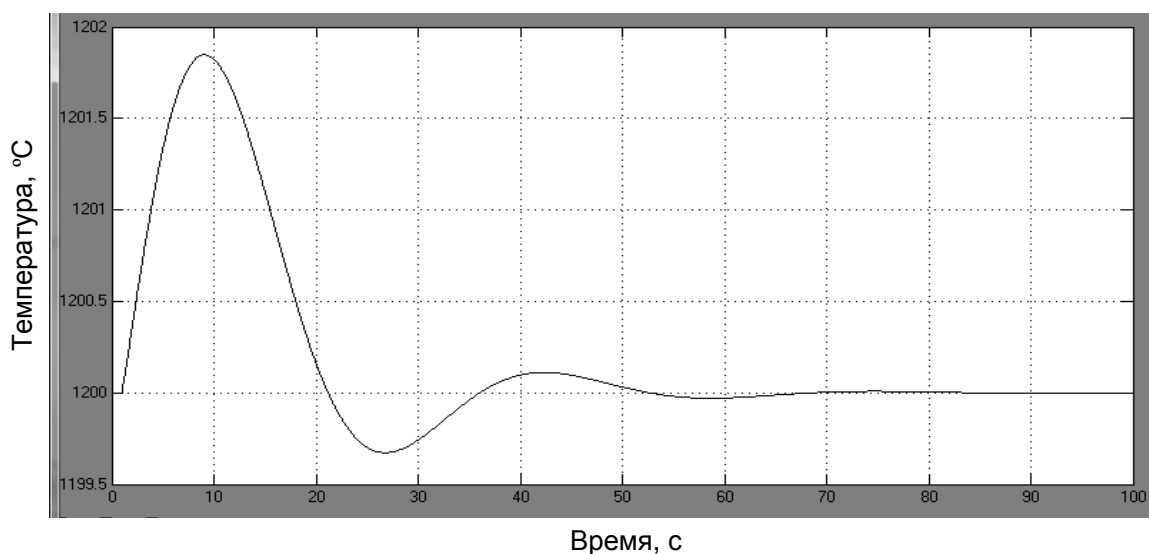


Рисунок 5.9 – График переходного процесса по температуре на выходе из печи для ПИД регулирования

Настройка ПИД – регулятора осуществлена вручную. Расчет параметров по формулам не может дать оптимальной настройки регулятора, поскольку аналитически полученные результаты основываются на сильно упрощенных моделях объекта. Кроме того, модели используют параметры, идентифицированные с некоторой погрешностью [10, 73, 74].

Настройка выполнена на основе правил, которые используются для ручной настройки. Эти правила получены из опыта, теоретического анализа и численных экспериментов. Они сводятся к следующему:

- увеличение пропорционального коэффициента увеличивает быстродействие и снижает запас устойчивости;
- уменьшением интегральной составляющей ошибка регулирования с течением времени уменьшается быстрее;
- уменьшение постоянной интегрирования уменьшает запас устойчивости;
- увеличение дифференциальной составляющей увеличивает запас устойчивости и быстродействие [10].

Основные показатели качества регулирования системы с ПИД - регулятором (таблица 5.1).

К автоматическим системам регулирования предъявляются требования не только устойчивости процессов регулирования во всем диапазоне нагрузок на объект. Для работоспособности системы не менее необходимо, чтобы процесс автоматического регулирования осуществлялся при обеспечении определенных качественных показателей. Такими показателями являются: [9].

1. Время регулирования.
2. Перерегулирование.
3. Показатель колебательности.
4. Степень затухания.

Время регулирования – это время, за которое регулируемая величина в переходном процессе начинает отличаться от установившегося значения менее,

чем на заранее заданное значение δ , где δ - точность регулирования. Обычно принимается, что $\delta = 3\% - 5\%$ от величины скачка по сигналу задания [9].

При обработке возмущающего воздействия, величина перерегулирования определяется из соотношения (5.4)

$$\delta = \frac{X_2}{X_1} \cdot 100\%, \quad (5.4)$$

где X_2 – второй амплитудный пик переходной кривой;

X_1 – первый амплитудный пик переходной кривой.

Показатель колебательности характеризует величину максимума модуля частотной передаточной функции замкнутой системы (на частоте резонанса) и, тем самым, характеризует колебательные свойства системы [9].

Степень затухания - показывает, насколько сильно затухают колебания, и определяется по формуле 5.5

$$\psi = \frac{X_1 - X_3}{X_3}, \quad (5.5)$$

где X_1 – первый амплитудный пик переходной кривой;

X_3 – третий амплитудный пик переходной кривой;

Таблица 5.1 – Показатели качества регулирования при использовании ПИД - регулятора

Время регулирования, с	Перерегулирование, %	Показатель колебательности	Степень затухания, %
65	18,9	1,85	0,113

Предиктор Смита или компенсатор временных запаздываний – это один из видов управления по возмущению, у которого запаздывания учитываются напрямую для стабилизации контура управления [9].

Целью введения компенсатора является исключение блока запаздывания из контура с прямой связью, который является причиной неустойчивости, и вынос его за пределы контура, где он не оказывает влияния на стабильность системы.

Главным недостатком способов управления с одним контуром управления является невозможность учитывать влияние всех переменных процесса на выход системы. Одной из главных проблем, требуемых решения, является описание взаимосвязей сразу между несколькими переменными процесса [9].

Для обеспечения компенсации чистого запаздывания был использован регулятор Смита. Схема управления восстановлением закиси никеля представлена на рисунке 5.10. Регулятор Смита используют в тех случаях, когда к качеству переходных процессов в системе регулирования предъявляют высокие требования. На рисунке 5.11 представлен график переходного процесса по температуре на выходе из печи для регулирования системы с использованием компенсатора временных запаздываний.

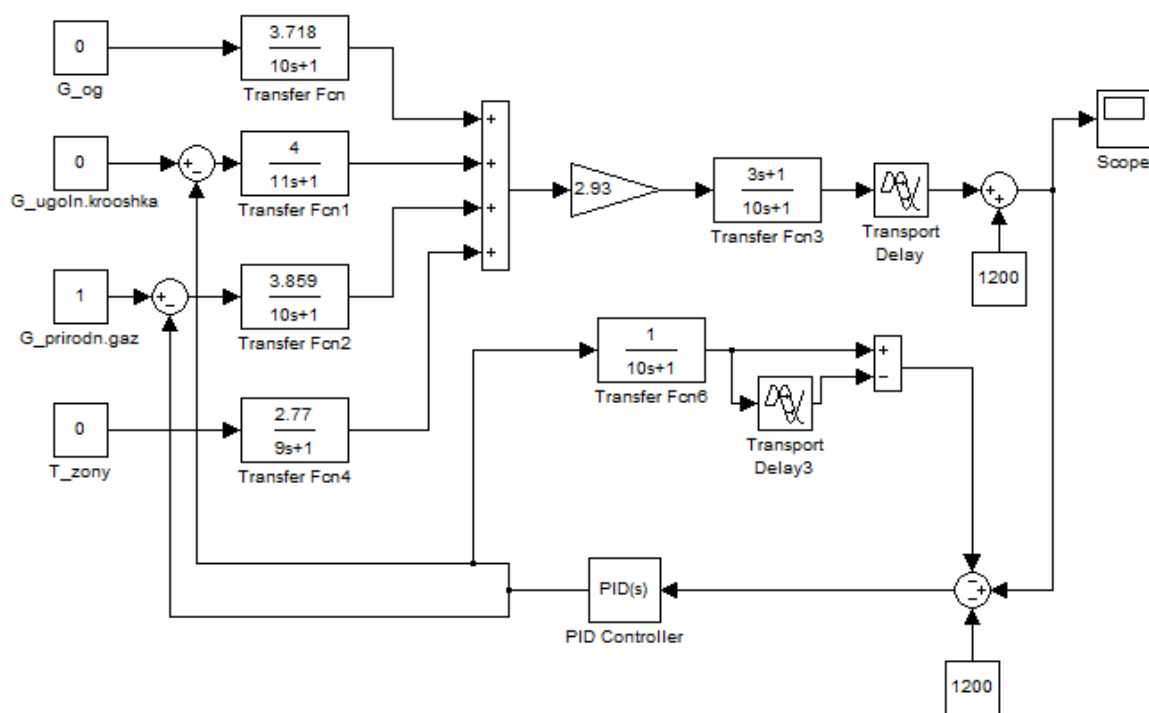


Рисунок 5.10 – Схема системы управления процессом восстановительного обжига закиси никеля с регулятором Смита

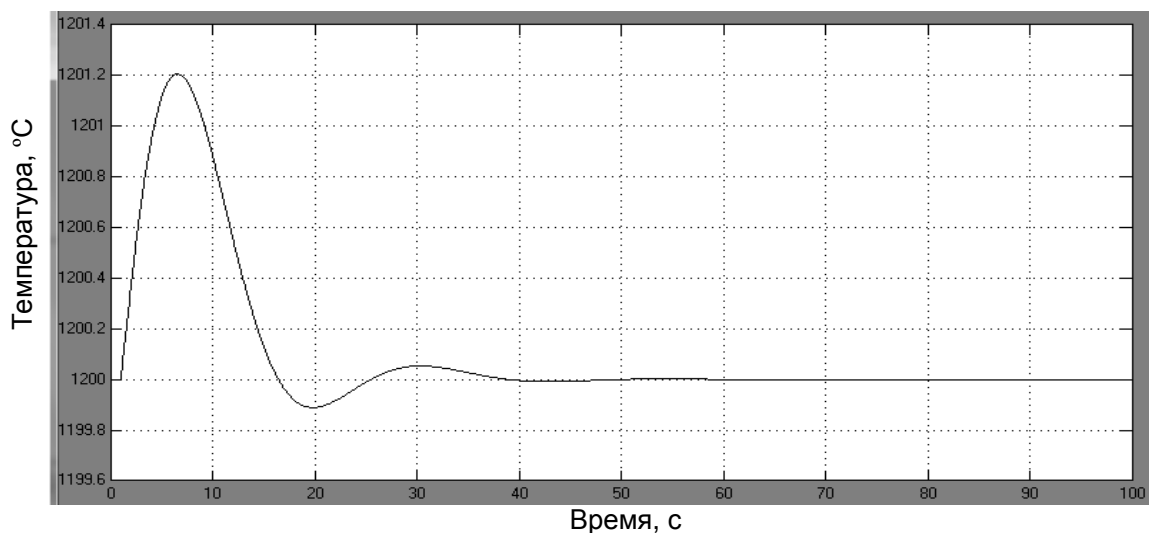


Рисунок 5.11 – График переходного процесса по температуре на выходе из печи регулирования системы с регулятором Смита

Расчет основных показателей качества регулирования системы с использованием регулятора Смита проведен аналогично расчетам показателей системы с использованием ПИД – регулятора (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Показатели качества регулирования при использовании регулятора Смита

Время регулирования, с	Перерегулирование, %	Показатель колебательности	Степень затухания, %
40	8,33	1,2	0,23

Также была рассмотрена модель с FUZZY – регулятором.

Fuzzy Logic Toolbox позволяет создавать и редактировать fuzzy -системы управления с нечеткой логикой, называемые в терминах программной системы MATLAB - Fuzzy Inference System или FIS. Эти системы можно создавать, используя как графические инструменты, так и команды рабочего окна MATLAB [24].

Нечеткая логика – это обобщение традиционной аристотелевой логики на случай, когда истинность рассматривается как лингвистическая переменная, принимающая значения типа: «очень истинно», «более-менее истинно», «не очень ложно» и т.п. Указанные лингвистические значения представляются нечеткими множествами.

Лингвистической называется переменная, принимающая значения из множества слов или словосочетаний некоторого естественного или искусственного языка. Множество допустимых значений лингвистической переменной называется терм-множеством. Задание значения переменной словами, без использования чисел, для человека более естественно. Ежедневно мы принимаем решения на основе лингвистической информации типа: «очень высокая температура»; «длительная поездка»; «быстрый ответ»; «красивый букет»; «гармоничный вкус» и т.п. Психологи установили, что в человеческом мозге почти вся числовая информация вербально перекодируется и хранится в виде лингвистических термов. Понятие лингвистической переменной играет важную роль в нечетком логическом выводе и в принятии решений на основе приближенных рассуждений [41].

FIS-редактор предназначен для создания, сохранения, загрузки и вывода на печать систем нечеткого логического вывода, а также для редактирования следующих свойств:

- тип системы;
- наименование системы;
- количество входных и выходных переменных;
- наименование входных и выходных переменных;
- параметры нечеткого логического вывода [13]

реализован ПИД – подобный fuzzy – регулятор (рисунок 5.12).

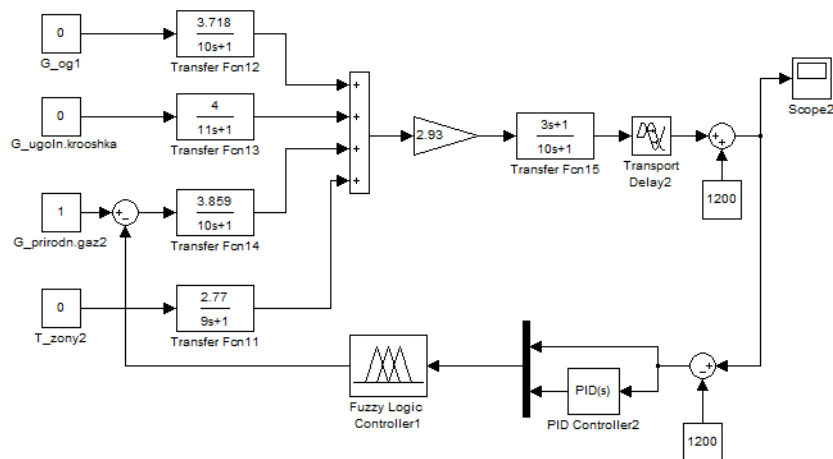


Рисунок 5.12 – Схема системы управления процессом восстановительного обжига закиси никеля с fuzzy - регулятором

Характеристики ПИД – регулятора:

$$K_p = 1,093;$$

$$K_i = 0,86;$$

$$K_d = 0,206.$$

При помощи инструментов графического интерфейса пользователя (GUI) пакета «Fuzzy Logic Toolbox» создана нечёткая система, реализующая ПИД-регулятор. С помощью пакета «Fuzzy Logic Toolbox» можно строить нечеткие системы двух типов – Мамдани и Сугэно. Остановимся на системе типа Мамдани. Командой `fuzzy` в окне MATLAB вызываем окно Редактора фазинференционной системы (Fuzzy Inference System Editor), выбираем тип системы - Мамдани, задаётся три входа – для пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих (x_1 , x_2 и x_3) и один выход – y .

Сформирована база правил fuzzy-регулятора. Правила формируются по типу: ЕСЛИ ... И ..., ТО.... Полученный файл сохранен под именем `fuzzy1.fis`.

В окне параметров блока Fuzzy Logic Controller указано имя файла `fuzzy1`. В окне модели в меню File выбран пункт Model Properties. В открывшемся окне выбрана вкладка CallBacks и в поле Model preload function написано: `fuzzy1=readfis('fuzzy1') [41]`.

Данная команда будет каждый раз при открытии файла модели помещать файл `fuzzy1.fis` в Workspace (рабочее пространство системы Matlab). Это необходимо для нормального функционирования модели. Стоит заметить, что при внесении изменений в `fis`-файл, нужно помещать его исправленную версию в Workspace либо при помощи пункта Export/To Workspace меню File, либо комбинацией клавиш `Ctrl+T`, либо каждый раз закрытием и открытием файла модели (однако последний вариант весьма утомителен).

В диалоговом окне Simulation Parameters меню Simulation во вкладке Advanced для опции Boolean logic signals необходимо установить значение off. При этом блоки логики будут допускать переменные в форме с плавающей точкой.

Графики переходных процессов для модели с fuzzy-регулятором представлены на рисунке 5.13. в таблице 5.3 приведены основные показатели качества регулирования системы с fuzzy – регулятором.

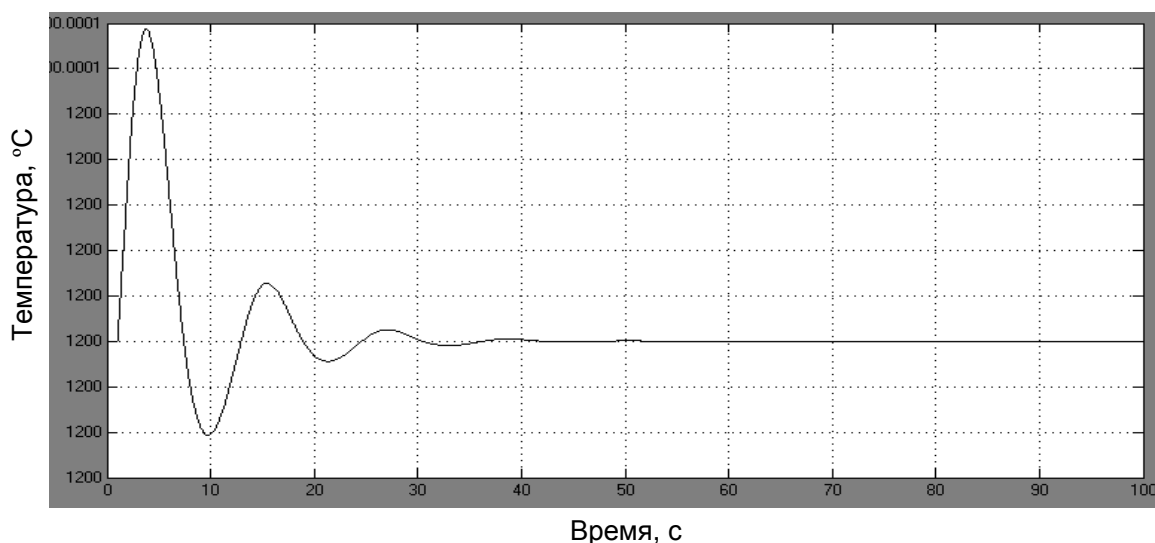


Рисунок 5.13 – График переходного процесса по температуре на выходе из печи регулирования системы с fuzzy - регулятором

Чтобы оценить работу моделей процесса восстановительного обжига закиси никеля в системах управления, представленных на рисунках 5.8, 5.10, 5.12, были установлены блоки осциллографов (Scope), которые показывают реакции объектов по каналам управления (рисунки 5.9, 5.11, 5.13).

Для удобства сравнения регуляторов графики передаточных процессов с использованием всех рассматриваемых систем регулирования представлены на одном графике (рисунок 5.14).

Таблица 5.3 – Показатели качества регулирования при использовании fuzzy - регулятора

Время регулирования, с	Перерегулирование, %	Показатель колебательности	Степень затухания, %
35	0,571	0,000175	1,74

Так же, для удобства сравнения систем регулирования, в одну таблицу сведены показатели качества регулирования (таблица 5.4).

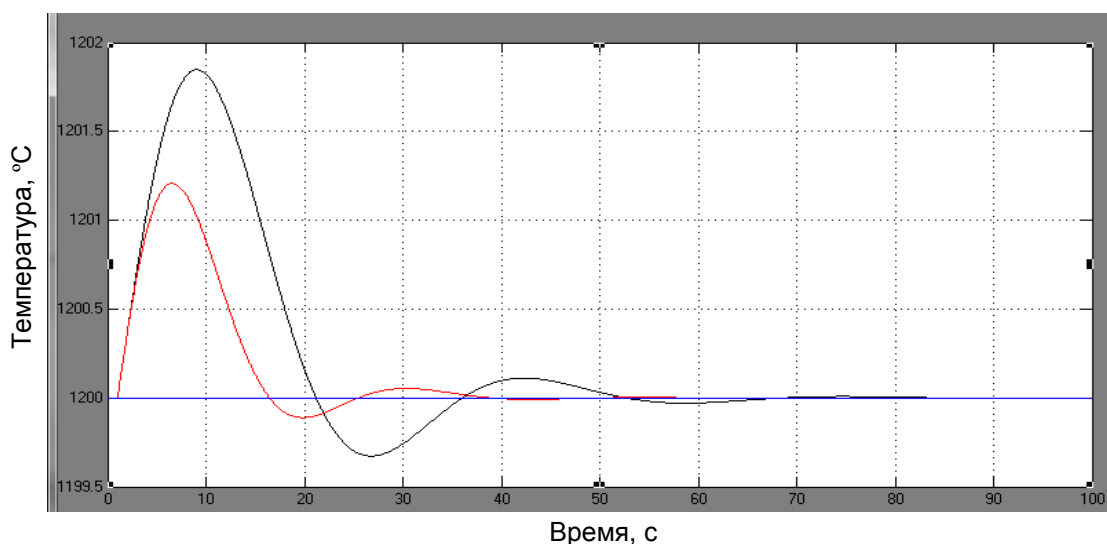


Рисунок 5.14 – Графики переходных процессов по температуре на выходе из печи регулирования систем с ПИД – регулятором (черная линия), регулятором Смита (красная линия) и fuzzy – регулятором (синяя линия)

Таблица 5.4 – Показатели качества регулирования

Показатели качества регулирования / Системы регулирования	Время регулирования, с	Перерегулирование, %	Показатель колебательности	Степень затухания, %
ПИД – регулятор	65	18,9	1,85	0,113
Регулятор Смита	40	8,33	1,2	0,23
Fuzzy - регулятор	35	0,571	0,000175	0.174

На рисунке 5.14 видно, что только ПИД – регулятор дает несравненно большую амплитуду колебаний температуры и большее время выхода системы на заданную температуру (65 секунд). Следовательно, для дальнейшего сравнения достаточно только двух систем управления: регулятором Смита и fuzzy – регулированием.

Время выхода систем на заданное значение с регулятором Смита и fuzzy - регулированием практически одинаково, отличается в 5 секунд (40 секунд и 35 секунд, соответственно). По показателю колебательности лучше себя ведет система с fuzzy – регулированием. Так же она имеет меньшую степень затухания процесса (0,174%).

Если сравнить рисунки 5.13 и 5.14, можно заметить, что на рисунке 5.14 график переходного процесса системы с fuzzy – регулятором изображен прямой линией, но на рисунке 5.13 видны незначительные амплитуды колебаний. Можно сказать, что процесс проходит гладко без перерегулирования. Система практически мгновенно выходит на заданный режим в 1200°C.

На рисунке 5.13 видно, что при системе регулирования процесса восстановительного обжига закиси никеля, с использованием fuzzy – регулятора число колебаний передаточной функции больше, чем при регулировании с ПИД – регулятором и с регулятором Смита. Но, следует заметить, что амплитуда этих колебаний ничтожно мала.

Таким образом, получаем, что система управления процессом восстановительного обжига закиси никеля в ТВП с fuzzy – регулятором является наиболее оптимальной по сравнению с остальными рассматриваемыми системами. Однако, система с fuzzy – регулированием сложна в реализации. Для проведения операции fuzzy – регулятору необходимо больше времени, чем ПИД – регулятору или регулятору Смита. Но это не значительный минус данного устройства управления, который не рассматривается как показатель качества регулирования системой.

Выводы по главе 5

Использование регуляторов в модели промышленных объектов управления обеспечивает качественную работу реальной системы управления. При выборе регулятора делался акцент на его точность регулирования параметров в системе. Внедрение системы автоматизации, основанной на работе модели с использованием fuzzy-регулятора, для вращающейся печи при восстановительном обжиге закиси никеля обеспечивает оперативное формирование требуемых значений температуры материала в печи. Это позволяет уменьшить колебания температуры, и, тем самым, минимизировать затраты топлива, что существенно сказывается на поддержании качества частично восстановленной закиси никеля на заданном уровне.

ГЛАВА 6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА

6.1 Описание используемых в работе программных пакетов

6.1.1 Matlab

MATLAB – это высокоуровневый язык и интерактивная среда для программирования, численных расчетов и визуализации результатов. С помощью MATLAB можно анализировать данные, разрабатывать алгоритмы, создавать модели и приложения.

Язык, инструментарий и встроенные математические функции позволяют вам исследовать различные подходы и получать решение быстрее, чем с использованием электронных таблиц или традиционных языков программирования, таких как C/C++ или Java.

MATLAB широко используется в таких областях, как:

- обработка сигналов и связь,
- обработка изображений и видео,
- системы управления,
- автоматизация тестирования и измерений,
- финансовый инжиниринг,
- вычислительная биология и т.п.

Более миллиона инженеров и ученых по всем миру используют MATLAB в качестве языка технических вычислений.

MATLAB по сравнению с традиционными языками программирования (C/C++, Java, Pascal, FORTRAN) позволяет на порядок сократить время решения типовых задач и значительно упрощает разработку новых алгоритмов.

MATLAB представляет собой основу всего семейства продуктов MathWorks и является главным инструментом для решения широкого спектра научных и прикладных задач, в таких областях как: моделирование объектов и разработка систем управления, проектирование коммуникационных систем, обработка сигналов и изображений, измерение сигналов и тестирование, финансовое моделирование, вычислительная биология и др. [40, 49, 72].

Ядро MATLAB позволяет максимально просто работать с матрицами реальных, комплексных и аналитических типов данных и со структурами данных и таблицами поиска.

MATLAB содержит встроенные функции линейной алгебры (LAPACK, BLAS), быстрого преобразования Фурье (FFTW), функции для работы с полиномами, функции базовой статистики и численного решения дифференциальных уравнений; расширенные математические библиотеки для Intel MKL.

Все встроенные функции ядра MATLAB разработаны и оптимизированы специалистами и работают быстрее или так же, как их эквивалент на C/C++ [17].

6.1.2 Mathcad

Mathcad – это приложение для математических и инженерных вычислений, промышленный стандарт проведения, распространения и хранения расчетов. Mathcad – продукт компании PTC – мирового лидера разработки систем САПР, PDM и PLM. Mathcad является универсальной системой, т.е. может использоваться в любой области науки и техники – везде, где применяются математические методы.

Документы Mathcad представляют расчеты в виде, очень близком к стандартному математическому языку, что упрощает постановку и решение задач. Mathcad содержит текстовый и формульный редактор, вычислитель, средства научной и деловой графики, а также огромную базу справочной информации, как математической, так и инженерной. Редактор формул обеспечивает естественный «многоэтажный» набор формул в привычной математической нотации (деление, умножение, квадратный корень, интеграл, сумма и т.д.). Мощные средства построения графиков и диаграмм сочетают простоту использования и эффективные способы визуализации данных и подготовки отчетов.

Вычислительные средства Mathcad обеспечивают расчеты по сложным математическим формулам, включая численные методы и аналитические преобразования. Mathcad имеет большой набор встроенных математических функций, позволяет вычислять ряды, суммы, произведения, интегралы, производ-

ные, работать с комплексными числами, решать линейные и нелинейные уравнения, а также дифференциальные уравнения и системы, проводить минимизацию и максимизацию функций, выполнять векторные и матричные операции, статистический анализ и т.д. Автоматически ведётся контроль размерностей и пересчёт в разных системах измерения (СИ, СГС и др.) [16, 26, 35, 45, 56, 58, 61].

6.1.3 Reactop Cascade

ReactOp проводит кинетическую оценку комплексных параметров скорости реакции, на основе имеющихся наборов экспериментальных данных.

В программном комплексе ReactOp Cascade можно провести моделирование химических реакторов и каскадов химических реакторов на основе соответствующих математических моделей, механизмов реактора и рабочих условий. А также оптимизацию химических реакторов.

ReactOp позволяет обработать концентрации, преобразования, температуры, давление, скорость производства тепла, скорость генерации газа, и т.д. ReactOp обеспечивает внутреннюю базу данных для хранения. База данных состоит из наборов данных, содержащих исходные данные проекта и результирующую информацию о конкретных задачах.

ReactOp поддерживает три различных типа кинетики реакции моделей:

- Модели, которые подчиняются закону действия масс (скорость реакции пропорциональна концентрации реагентов);
- Модели, которые подчиняются обобщенному закону действия масс (не целые значения эффективных заказов и стехиометрических коэффициентов);
- Система запрограммированной модели.

Первые два типа моделей не требуют программирования. Клиенты имеют возможность программировать свои собственные модели на Фортране [89, 90].

6.2 Общие понятия АСУ ТП

Современная АСУ ТП (автоматизированная система управления технологическим процессом) представляет собой многоуровневую человеко-машинную систему управления с иерархической структурой. Создание АСУ сложными технологическими процессами осуществляется с использованием автоматических информационных систем сбора данных и вычислительных комплексов, которые постоянно совершенствуются по мере эволюции технических средств и программного обеспечения [76].

Диспетчер в многоуровневой автоматизированной системе управления технологическими процессами получает информацию с монитора ЭВМ или с электронной системы отображения информации и воздействует на объекты, находящиеся от него на значительном расстоянии с помощью телекоммуникационных систем, контроллеров, интеллектуальных исполнительных механизмов [29].

6.3 Структура и состав системы управления

Система имеет трехуровневую структуру. Нижний уровень - датчики и исполнительные механизмы. Средний уровень - микропроцессорные контроллеры. Верхний уровень - рабочая станция на базе ПЭВМ и по SCADA системе с иерархической структурой.

Функция контроллеров – сбор информации от датчиков и формирование управляющих сигналов, передаваемых к исполнительным механизмам.

Функция рабочей станции – отображение информации об управлении процессом и о состоянии оборудования на мнемосхемах и графиках.

Рабочая станция включает ПЭВМ и инструментальные средства, позволяющие оператору воздействовать на процесс: выбирать режимы управления, изменять установки регуляторам, отключать звуковую и световую сигнализацию.

В режиме местного управления оператор использует технологический пульт, оснащенный для каждого управляемого параметра ключом перевода в

режим местного управления, кнопками прямого воздействия на исполнительный механизм и индикатором положения регулирующего органа.

На технологический пульт выведены сигнальные лампы и звонок автоматики безопасности.

Вся информация о процессе отображается на экранах ПЭВМ в виде мнемосхем, графиков и таблиц. Оператор использует экраны мнемосхем для непосредственного воздействия на технологические процессы [76].

6.4 Режимы управления АСУ ТП

Функционирование АСУТП может осуществляться в трех режимах - автоматическом, полуавтоматическом и ручном.

Автоматический режим поддерживается до тех пор, пока система работает безотказно. Микропроцессорные установки системы управления обрабатывают информацию, приходящую с объекта, вырабатывают управляющие сигналы исполнительным механизмам заслонок, изменяющим данные параметра процесса.

В случае неполадок в цепи вывода управляющих сигналов с контроллеров возможен полуавтоматический режим работы АСУТП. Контроллеры осуществляют лишь опрос информации и выдают результаты расчетов. Оператор в этом случае вручную осуществляет переключение соответствующих заслонок на линии [76].

При возникновении таких ситуаций, как исчезновение электропитания, отказ микропроцессорной системы, отказ какого-либо узла АСУТП (датчика, нормирующего преобразователя, и др.), возникновение аварий, ликвидация которых не предусмотрена алгоритмом управления, осуществляется переключение на ручной режим управления [29].

6.5 Верхний уровень – SCADA-система

По результатам сравнения характеристик ПТК для автоматизированной системы управления температурой в зоне восстановления наиболее подходит система SCADA пакет Simplicity (GE Fanuc) – (США).

Концепция SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition - диспетчерское управление и сбор данных) predeterminedена всем ходом развития систем управления и результатами научно-технического прогресса. Применение SCADA-технологий позволяет достичь высокого уровня автоматизации в решении задач разработки систем управления, сбора, обработки, передачи, хранения и отображения информации. В настоящее время SCADA является основным и наиболее перспективным методом автоматизированного управления сложными динамическими системами (процессами).

Многие проекты автоматизированных систем контроля и управления (СКУ) для большого спектра областей применения позволяют выделить обобщенную схему их реализации.

SCADA Cimplicity (GE Fanuc) – это многоуровневая система, которая реализует непосредственное управление технологическими процессами. Специфика каждой конкретной системы управления определяется используемой на каждом уровне программно – аппаратной платформой.

Информация с локальных контроллеров может направляться в сеть диспетчерского пункта непосредственно, а также через контроллеры верхнего уровня. В зависимости от поставленной задачи контроллеры верхнего уровня (концентраторы, интеллектуальные или коммуникационные контроллеры) реализуют различные функции:

- сбор данных с локальных контроллеров;
- обработка данных, включая масштабирование;
- поддержание единого времени в системе;
- синхронизация работы подсистем;
- организация архивов по выбранным параметрам;
- обмен информацией между локальными контроллерами и верхним уровнем;
- работа в автономном режиме при нарушениях связи с верхним уровнем;

- резервирование каналов передачи данных и др.

Верхний уровень - диспетчерский пункт (ДП) - включает, прежде всего, одну или несколько станций управления, представляющих собой автоматизированное рабочее место (АРМ) диспетчера оператора. Здесь же может быть размещен сервер базы данных рабочие места (компьютеры) для специалистов и т. д. Часто в качестве рабочих станций используются ПЭВМ типа IBM PC различных конфигураций.

Станции управления предназначены для отображения хода технологического процесса и оперативного управления.

Эти задачи и призваны решать SCADA система. SCADA - это специализированное программное обеспечение, ориентированное на обеспечение интерфейса между диспетчером и системой управления, а также коммуникацию с внешним миром [76].

Спектр функциональных возможностей определен самой ролью SCADA в системах управления:

- автоматизированная разработка, дающая возможность создания ПО системы автоматизации без реального программирования;
- средства исполнения прикладных программ;
- сбор первичной информации от устройств нижнего уровня;
- обработка первичной информации;
- регистрация аварийных сигналов и исторических данных;
- хранение информации с возможностью ее пост-обработки;
- визуализация информации в виде мнемосхем, графиков и т.п.;
- возможность работы прикладной системы с наборами параметров, рассматриваемых как единое целое установки.

SCADA-система реализована на платформах MS Windows [29].

6.6 Средний уровень – контроллеры (ПЛК)

Автоматизированная система управления температурой в зоне восстановления построена применительно для центрального устройства сбора, обработки

и передачи информации являются программируемые логические контроллеры (ПЛК) серии 90 - 30 производства GE Fanuc (США).

Контроллер GE Fanuc Series 90 - 30 представляет собой вычислительное устройство, спроектированное для применения в промышленности с учетом требований надежности, безотказности в работе, простоты в обслуживании. Контроллер осуществляет сбор данных с технологического объекта управления, выполнение алгоритмов блокировок, противоаварийной защиты и регулирования, выдачу управляющих сигналов на исполнительные элементы. Семейство Series 90-30 составляют контроллеры, используемые для большинства промышленных приложений, как в централизованных, так и в распределенных системах. Контроллеры GE Fanuc имеют модульную структуру, позволяющую гибко подбирать конфигурацию, исходя из потребностей заказчика. Вся информация о конфигурации модуля, адресах каналов ввода-вывода, диапазонах аналоговых сигналов хранится в памяти контроллера, модуль перед его установкой не требует конфигурирования. В состав контроллера GE Fanuc Series 90-30 может входить свыше 100 модулей центрального процессора, ввода-вывода и коммуникаций [76, 77, 79, 80].

Контроллеры характеризуются высокой надежностью и устойчивостью к воздействию окружающей среды. Вероятность отказа контроллера несравнимо меньше вероятности отказа компьютера, поэтому на современном производстве контроллеры и технологический объект составляют замкнутый контур, а компьютеры используются в режиме супервизора для визуализации хода процесса, отображения и протоколирования технологических параметров, ввода в систему команд оператора. Отказ компьютера не приводит к прекращению управления процессом. Благодаря хорошо продуманной конструкции установки модуля в контроллер время замены отказавшего модуля составляет несколько минут.

Аналоговые модули ввода-вывода поддерживают автоматическое масштабирование отсчетов АЦП в заданные пользователем физические единицы и обратное преобразование. На уровне модуля осуществляется контроль нарушений параметров технологического процесса, а также за выходом показаний за

пределы возможных значений измерения, свидетельствующим о неисправности входных цепей. Большинство дискретных модулей является универсальными, они могут быть отконфигурированы как модули ввода, вывода и комбинированные. Все модули ввода-вывода имеют изоляцию входных-выходных цепей от системной шины ПЛК, прочность изоляции составляет от 1500 до 2000 В.

Система ввода/вывода ПЛК обеспечивает интерфейс между ПЛК 90-30 и поддерживаемыми пользователем устройствами и оборудованием. Модули ввода/вывода вставляются прямо в слот базовой платы ПЛК или в слоты платы расширения [83].

Контроллер GE Fanuc 90-30 относится к классу программируемых логических контроллеров (ПЛК). С помощью данного контроллера можно решить большинство задач по автоматизации производства, при этом быть уверенным в надежности техники и эффективности результатов. Контроллеры GE Fanuc, благодаря высокой надежности, простоте в эксплуатации и обширной номенклатуре модулей, приобрели большую популярность в мире и успешно применяются в автоматизации технологических процессов. Семейство Series 90-30 составляет контроллеры, используемые для большинства промышленных приложений в сосредоточенных и распределенных системах.

Обработка информации внутри контроллера производится в цифровой форме. GE Fanuc 90-30 обрабатывает и формирует как аналоговые, так и дискретные сигналы:

- количество входных аналоговых сигналов - 128;
- количество выходных аналоговых сигналов - 64;
- количество входных дискретных сигналов - 1024;
- количество выходных дискретных сигналов - 1024.

Базовая плата контроллера состоит из 10 слотов, то есть на монтажную рейку контроллера можно установить кроме блока питания и центрального процессорного устройства 8 модулей ввода-вывода. Организация контроллера позволяет формировать корзину контроллера по заказу потребителя.

Для конфигурирования и программирования контроллера GE Fanuc 90-30

используется язык технологического программирования Ladder Logic Diagrams - язык релейной логики лестничных диаграмм. Рабочую программу создают с помощью программного средства (SIMPLICITY Machine Edition). В настоящее время для контроллеров GE Fanuc 90-30 выпускаются коммуникационные модули Ethernet, позволяющие организовать связь контроллера с АРМ оператора [76].

Достоинства:

- большое количество входных и выходных дискретных и аналоговых сигналов;
- модульная структура;
- простота программирования и обслуживания;
- возможность изменять программу в режимах on-line, off-line с отображением текущих значений;
- возможность работы с Ethernet;
- легкость монтажа;
- высокая точность и быстродействие;
- возможность работы во влажных и опасных помещениях.

Недостатки:

- отсутствие специализированных модулей ввода - вывода аналоговых сигналов в диапазоне 0-5 мА;
- отсутствие встроенного цифро-импульсного преобразователя;
- высокая стоимость.

Эти SCADA - системы объединяет наличие следующих характеристик:

- реализация мониторинга, диспетчерского управления, формирования отчетов любой сложности, тревог, трендов (в том числе исторических);
- наличие планировщика событий;
- объектно-ориентированная графика;
- встроенный язык программирования;
- конфигурирование в режиме on-line;

- распределенная архитектура базы данных в сети автоматизированных рабочих мест;
- поддержка современных интерфейсов обмена OPC, DDE, OLE;
- размер базы данных узла ограничивается лицензией на количество приобретаемых вводов-выводов;
- интерфейс среды разработки представлен проводником.

По результатам сравнения характеристик ПТК выбираем ПЛК GE Fanuc 90 - 30 и SCADA - пакет Simplicity.

На центральном пункте системы постоянно работает дежурный оператор, который наблюдает за функционированием системы, а также организует работу системы в дистанционном режиме в случае неисправности микропроцессорного устройства или другого оборудования АСУ ТП.

Целью управления технологическим процессом является улучшение технико-экономических показателей: снижение эксплуатационных затрат, снижение удельных расходов энергии и материалов, поддержание заданных параметров в ходе технологического процесса, а также заданного качества получаемого продукта, повышение надежности технических средств.

Комплекс технических средств должен выполнять следующие функции:

- сбор информации и первичная обработка сигналов (динамический анализ дискретных сигналов, определение действующих значений технологических параметров);
- обслуживание систем автоматического контроля и регулирования (выявление сбоев в работе аппаратуры контроля и управления, проверка достоверности информации, формирование сообщений об отказах, формирование управляющих воздействий);
- обслуживание оператора-технолога - представление сообщений о работе основного оборудования аппаратуры АСУ ТП, работа с базой данных [29].

6.7 Технические средства автоматизации нижнего уровня

Нижний уровень объекта - включает различные датчики для сбора информации о ходе технологического процесса, электроприводы и исполнительные механизмы для реализации регулирующих и управляющих воздействий. Датчики поставляют информацию локальным программируемым логическим контроллерам (PLC Programming Logical Controller).

Для управления процессом восстановительного обжига закиси никеля в трубчатой вращающейся печи важно выявить условия, обеспечивающие получение высококачественного продукта. При этом с целью объективной оценки хода процесса и оперативного вмешательства для устранения возникающих отклонений необходимо обеспечить непрерывный автоматический контроль основных параметров процесса и, как минимум, дистанционное управление всеми регулирующими органами печи.

На печи обжига работают следующие системы контроля:

Расходы воздуха, мазута и воды на охлаждение грохота контролируют дифференциальными манометрами с соответствующими вторичными приборами;

Температура:

- частично восстановленной закиси никеля и отходящих газов на выходе из печи контролируется хромель-алюмелевыми термопарами (ТХА);
- зоны восстановления контролируются с помощью пирометра;
- воздуха и мазута на общей линии измеряется медными термометрами сопротивления (ТСМ);
- содержание кислорода и окиси углерода в отходящих газах контролируется с помощью газоанализатора ГИАМ-14;

Давление:

- газа и воздуха на общей линии измеряется с помощью МПЭ-МИ;
- разряжение в холодной головке печи контролирует отечественный преобразователь Сапфир-22ДА.

Предусмотрен контроль и регистрация всех необходимых параметров на станции оператора (ПЭВМ).

Приводами регулирующих органов служат исполнительные электрические механизмы типа МЭО. Управление МЭО производится автоматически с контроллера по соответствующему технологическому параметру или в ручном режиме. Для управления расходом воды дополнительно предусмотрено управление через блоки ручного управления БРУ-42, которые установлены в помещении оператора [76].

Управление электродвигателями главного привода печи производится из помещения оператора кнопками и ключом ускорения со щита контроля и управления печами или со станции оператора с применением предупусковой сигнализации.

Электродвигатели дымососов управляются по месту и дистанционно со станции оператора. Запуск возможен только при закрытом шибере.

Электроприводы пылеуборки электрофильтра управляются по месту, с применением в схемах управления блокировочных зависимостей, обеспечивающих их совместную работу.

7. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

7.1 Расчет затрат по участку восстановления закиси никеля

7.1.1 Сырье и топливно-энергетические затраты

Таблица 7.1 рассчитывается по данным предприятия.

Сырьевые и топливно-энергетические затраты приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Сырьевые и топливно-энергетические затраты

Наименование матери- алов	Ед. изм-я	Цена за ед. тыс. руб.	Расход на 1 тонну ЧВЗН		Годовой расход	
			Кол-во	Сумма, тыс. руб.	Кол-во	Сумма, тыс. руб.
Сырье, основные материалы и полуфабрикаты						
Закись никеля	Т	50,00	1,12	55,90	50093	2499983
Вспомогательные материалы						
Кокс	Т	1,20	0,16	0,19	7201	8642
Энергозатраты						
Электроэнергия	Мвт* час	0,4200	0,160	0,0672	7156	3006
Пар	Тыс. ГДж.	0,0205	0,001	0,0000205	44,73	0,929
Мазут	Т	1,5000	9,178	13,7672	410500	615750
Кислород технический	Тыс. м ³	0,3000	0,005	0,0015	224	67
Воздух компрессор- ный	Тыс. м ³	0,0226	8,900	0,2011	398061	8996
Вода оборотная	Тыс. м ³	0,1875	0,006	0,001088	259	49
Итого				14,0381		627868
Всего				70,13		3136493

7.1.2 Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования

Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования включают:

- амортизацию оборудования и транспортных средств;
- затраты на их эксплуатацию;
- затраты на текущий ремонт оборудования и транспортных средств;
- затраты на внутризаводское перемещение грузов;
- затраты на износ малоценных и быстроизнашивающихся инструментов и приспособлений [31, 65].

Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Затраты на содержание и эксплуатацию оборудования

Статьи затрат	Годовой расход, тыс.руб.		Расход на 1 тонну, руб.	
	По проекту	Фактически на предприятии	По проекту	Фактически на предприятии
Содержание оборудования				
Основная и дополнительная заработная плата дежурного персонала	8225,6	8225,6	183,91	183,91
Взносы на обязательное социальное страхование	3043,5	3043,5	68,05	68,05
Материалы	352,0	352,0	7,87	7,87
Вспомогательные материалы	320,0	320,0	7,15	7,15
Текущий ремонт оборудования				
Основная и дополнительная заработная плата дежурного персонала	3809,3	3809,3	85,2	85,2
Взносы на обязательное социальное страхование	1466,6	1466,6	32,8	32,8
Материалы	5400,0	5400,0	53,27	53,27
Амортизация машин и оборудования	2476	2284,8	55,36	51,08
Износ малоценных и быстроизнашивающихся инструментов и приспособлений	187,3	173	4,19	3,87
Прочие затраты	2428,7	2412,2	54,3	53,93
Всего	32786,8	32564,9	733,06	728,10

7.1.3 Цеховые расходы

Цеховые расходы включают расходы на содержание аппарата управления цеха и цехового персонала, амортизацию зданий и сооружений, расходы на содержание и текущий ремонт зданий и сооружений, расходы на испытания, опыты и исследования, рационализацию и изобретательство, затраты на мероприятия по охране труда и технике безопасности и прочее [65].

Цеховые расходы приведены в таблице 7.3.

Таблица 7.3 – Затраты по статье Цеховые расходы

Статьи затрат	Годовой расход, тыс. руб.		Расход на 1 тонну, Руб.	
	По проекту	Фактически на предприятии	По проекту	Фактически на предприятии
Содержание аппарата управления:				
Заработная плата ИТР и служащих	3125	3125	69,87	69,87
Взносы на обязательное социальное страхование	1156	1156	25,85	25,85
Содержание зданий и сооружений				
Отопление	120,0	120,0	2,68	2,68
Освещение	450,0	450,0	10,06	10,06
Канализация	68,0	638,0	1,52	1,52
Водоснабжение	210,0	210,0	4,70	4,70
Амортизация зданий и сооружений	1215	1215	27,17	27,17
Текущий ремонт зданий и сооружений	121,5	121,5	2,72	2,72
Охрана труда	2650	2650	59,25	59,25
Прочие расходы	1094	1094	24,46	24,46
Непроизводительные затраты	150	150	3,35	3,35
Всего	10360	10360	231,63	231,63

7.2 Калькуляция себестоимости продуктов

Себестоимость выпускаемой продукции определяется на основании проведенных расчетов сырьевых и топливно-энергетических затрат, расходов на содержание и эксплуатацию оборудования и цеховых расходов. Для определения себестоимости продукции составляется калькуляция (таблица 7.4).

Таблица 7.4 – Калькуляция себестоимости продуктов

Статьи расхода	Ед. изм-я	Цена за ед., тыс. руб.	По проекту		Фактически	
			Кол-во	Сумма, тыс. руб.	Кол-во	Сумма, тыс. руб..
Сырье						
Закись никеля	Т	50,00	1,12	55,90	1,12	55,90
Вспомогательные материалы						
Кокс	Т	1,20	0,16	0,19	0,16	0,19
Энергозатраты						
Электроэнергия	МВт* час	0,4200	0,1600	0,0672	0,1840	0,0773
Пар	Тыс. ГДж	0,0205	0,0010	0,0000	0,0012	0,000021
Мазут	Т	1,5000	9,1781	13,7672	10,5548	13,767160

Продолжение таблицы 7.4

Статьи расхода	Ед. изм-я	Цена за ед., тыс. руб.	По проекту		Фактически	
			Кол-во	Сумма, тыс. руб.	Кол-во	Сумма, тыс. руб..
Кислород техно- логический	Т. М ³	0,3000	0,0050	0,0015	0,0058	0,00173
Воздух компрес- сорный	Т. М ³	0,0226	8,9000	0,2011	10,2350	0,2011
Вода оборотная	Т. М ³	0,1875	0,0058	0,0011	0,0067	0,0011
Итого				14,038		14,048
Основная зарплата производственных рабочих				0,193		0,193
Дополнительная зарплата производственных рабочих				0,282		0,282
Взносы на обязательное социальное страхование				0,175		0,175
Затраты на содержание оборудования				0,731		0,728
Цеховые расходы				0,232		0,232
Цеховая себестоимость				71,737		71,745

7.3 Расчет экономической эффективности

Экономический эффект определяется по формуле (7.1):

$$\mathcal{E}_н = (C_1 - C_2) \cdot V, \quad (7.1)$$

где C_1, C_2 – себестоимость расхода энергозатрат до и после внедрения данного мероприятия, руб.,

V – годовой объем выпуска продукции, т.

$$\mathcal{E}_н = (71,745 - 71,735) \cdot 100000 = 1 \text{ млн. руб. / год.}$$

Чистый экономический эффект определяется по формуле (7.2):

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_н \cdot (1 - 0,2), \quad (7.2)$$

где 20%- налог на прибыль.

$$\mathcal{E} = 1000000 \cdot (1 - 0,2) = 800 \text{ тыс. руб.}$$

Срок окупаемости определяется по формуле (7.3):

$$T = \frac{\Delta K}{\mathcal{E}_н}, \quad (7.3)$$

где ΔK – капитальные вложения, руб.

$$T = \frac{(65,58 - 63,43) \cdot 1000}{(71,745 - 71,737) \cdot 100000} = 2,3 \text{ года.}$$

Экономическая эффективность определяется как разница между фактической и проектируемой себестоимостью [62]:

$$\mathcal{E} = (71,745 - 71,735) \cdot 100000 = 1000 \text{ тыс. руб./год}$$

Рассчитанные в предыдущих разделах технико-экономические показатели сведены в таблицу 7.5.

Таблица 7.5 – Сводные технико-экономические показатели проекта

Наименование	Единица измерения	Значения показателей	
		По проекту	Фактически
Годовой выпуск продукции	Тыс. т	100	100
Капитальные вложения в основные фонды, всего	Млн. руб.	65,43	63,58
В том числе в оборудование:	Млн. руб.	9,37	7,87
Расход электроэнергии	МВт * ч/т	7156	8230
Расход мазута	т/т	9,178	10,555
Расход кислорода	Тыс. м ³ / т	0,0050	0,0058
Расход оборотной воды	Тыс. м ³ / т	0,0058	0,0067
Расход компрессорного воздуха	Тыс. м ³ / т	8,900	10,235
Численность трудящихся	Чел.	190	190
В том числе рабочих:	Чел.	175	175
Себестоимость продукции:	Тыс. руб. / т	71,745	71,737
Экономический эффект	Млн. руб.	1,0	-
Срок окупаемости	год	2,3	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненного исследования о работе обжигового отделения трубчатых вращающихся печей, можно сделать следующие выводы:

- Проведен анализ автоматизации технологических процессов с позиций Интернета вещей и показана роль создания общей базы данных о процессе для оптимального управления производством.
- Создана математическая модель трубчатой вращающейся печи в стационарном режиме работы с использованием программного комплекса ReastOp Cascade.
- Построена модель управления обжигом закиси никеля в трубчатой вращающейся печи в программном пакете Matlab.
- Исследована динамика процесса восстановительного обжига закиси никеля.
- Проведено сравнение систем управления по параметрам качества переходного процесса восстановления закиси никеля в трубчатой печи с разными схемами управления
 - Для разработанного отделения предложен аппаратурно-технический синтез АСУ ТП.
 - Целью управления процессом восстановительного обжига закиси никеля в трубчатой вращающейся печи является получение измельченного концентрированного никелевого порошка для дальнейшей его переработки в электропечах. Чтобы получить никелевый порошок определенной крупности необходимо поддержание температуры печи на заданном уровне, для этого был проведен анализ разных систем управления и выбрана модель управления процессом с настройками регулятора, обеспечивающими заданные статические и динамические характеристики объекта при воздействии реальных производственных возмущений.

В качестве дальнейших направлений исследований можно определить следующие:

- Провести исследования кинетики химических превращений и разработать кинетическую модель процесса с учетом реакций восстановления окислов других металлов – меди, кобальта и железа и построить более детальную кинетическую модель процесса.
- Исследовать влияние крупности частиц огарка на скорость тепло-массообмена между фазами и установить связь кинетических и массообменных параметров математической модели с крупностью.
- Определить зависимость оптимальной температуры обжига от крупности частиц и определить оптимальное значение крупности частиц для получения максимальной степени металлизации.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

КС – кипящий слой;

ОЦ – обжиговый цех;

ПКС – печь кипящего слоя;

ПКСО – повышение концентрации серы в огарке;

САР – система автоматизированного регулирования;

ТВП – трубчатая вращающаяся печь;

ТП – трубчатая печь;

УРФ – участок разделения фэйнштейна;

ЧВЗН – частично восстановленная закись никеля;

ЦЭН – цех электролиза никеля;

PBR – packed bed reactors – реактор с уплотненным слоем;

PFR – plug flow reactor – реактор идеального вытеснения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация технологических процессов в металлургии. А.Ю. Фирсов [и др.] / Учебник. – СПб. – 2014. – 349 с.
2. Арутюнов, В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: Учебник для вузов / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Металлургия. – 1990. – 239 с.
3. Афанасьев, В.Н. Математическая теория конструирования систем управления / В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Р. Носов. – М.: Высшая школа. – 2003. – 614с.
4. Белоглазов, И.И. Кинетика процесса обжига сульфидного никелевого концентрата / И.И. Белоглазов, Ю.В. Шариков // Труды Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Электротермия-2008». – 2008. – с.77-79.
5. Береговский, В.И. Металлургия меди и никеля. / В.И. Береговский, Б.Б. Кистяковский / М.: Металлургия, 1971. – 456 с.
6. Бесекерский, В.А. Динамический синтез систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский. – М.: Наука. – 1970. – 576 с.
7. Бледнов, Б.П. Расчеты по металлургии меди и никеля: Учеб. пособие по дисциплине «Металлургия тяжелых цветных металлов» / Б.П. Бледнов, В.Е. Дульнева. – Красноярск: ГУЦМиЗ. – 2004. – 120 с.
8. Боровин, Г.К. Математическое моделирование гидравлической системы управления шагающей машины / Г.К. Боровин, А.В. Костюк, А.К. Платонов // Математичні машини і системи. – 2009. – № 4. – С. 127 – 138.
9. Борцов, Ю.А. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением / Ю.А. Борцов, Н.Д. Поляхов, В.В. Путов. – Л.: Энергоатомиздат. – 1984. – 216 с.
10. Брайсон, А. Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Хо Ю-Ши. – М: Мир. – 1971. – 544 с.

11. Быстров, С.В. Восстановление оксидов никеля и железа из оксидно-шлакового расплава: монография / С.В. Быстров, Д.Я. Кошель. – М.: Альтекс. – 2005. – 40 с.
12. Ванюков, А.В. Комплексная переработка медного и никелевого сырья: учебник для вузов / А.В. Ванюков, Н.И. Уткин. Челябинск: Metallurgia. – 1988. – 432с.
13. Виленский, П.Л. Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика: учебное пособие / П.Л. Виленский, В.Н. Лившиц, С.А. Смоляк / М.: Дело. – 2004. – 888 с.
14. Волков, А.И. Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. – Мн.: Современная школа. – 2005. – 608 с.
15. Воробьев, В.П. Электротермия восстановительных процессов / В.П. Воробьев. Екатеринбург: УРО РАН. – 2009. – 268с.
16. Воскобойников, Ю.Е. Основы работы в пакете MathCAD: учеб. пособие / Ю.Е. Воскобойников, А.Ф. Задорожный. Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин). – 2006. – 116 с.
17. Воскобойников, Ю.Е. Программирование и решение задач в пакете MathCAD: учеб. пособие / Ю.Е. Воскобойников, В.Ф. Очков // Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин). – 2002. – 136 с.
18. Гайдук, А.Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход) / А.Р. Гайдук. – М.: Физматлит. – 2012. – 360 с.
19. Гончаров, В.И. Синтез электромеханических систем промышленных роботов / В.И. Гончаров. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2002. – 100 с.
20. Гультаев, А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: Учебный курс / А. Гультаев. – СПб.: Питер, 2000. – 234 с.
21. Гурский, Д. Вычисления в MathCAD 12 / Д. Гурский. – СПб.: Питер. – 2006. – 544 с.

22. Данилов, А.И. Компьютерный практикум по курсу «Теория управления». Simulink-моделирование в среде MATLAB: Учебное пособие / А.И. Данилов // Под ред. А.Э. Софиева. – М.: МГУИЭ. – 2002. – 128 с.
23. Докукин, В.П. Основы математического моделирования. Конспект лекций / В.П. Докукин. – СПб.: СПГГИ. – 2000. – 70 с.
24. Дьяконов, В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем: Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб.: Питер. – 2002. – 448 с.
25. Дьяконов, В. Simulink 4: спец. справ. / В. Дьяконов. – СПб: Питер. – 2002. – 528 с.
26. Дьяконов, В.П. MathCAD 8 Professional в математике, физике и Internet / В.П. Дьяконов, И.В. Абраменконова. – М.: Нолидж. – 1999. – 512 с.
27. Дьяконов, В.П. Компьютерная математика: Теория и практика / В.П. Дьяконов. – М.: Нолидж. – 2001. – 1296 с.
28. Ершова, Е.Е. Лабораторный практикум по современным компьютерным технологиям. Ч. 3. MathCAD: учеб. пособие / Е.Е. Ершова, И.В. Ершов // Новосиб. гос. архитектур.-тур.-строит. ун-т (Сибстрин). – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин). – 2007. – 52 с.
29. Жилов, Г.М. Автоматизация управления электротехнологическими режимами работы печей химической электротермии / Г.М. Жилов. М.: НИИТЭхим. – 1985. – 37 с.
30. Жунусов, М.Т. Metallургия никеля на комбинате «Североникель». / М.Т. Жунусов, А.В. Синько, Н.А. Мальцев / Избранные лекции. – 1994. – 153 с.
31. Журавлев, В.И. Автоматизация на комбинате «Североникель» / В.И. Журавлев – Мурманск: Кн. изд-во. – 1963. – 40 с.
32. Зайцев, С.А. Обобщенная модель искусственной иммунной системы / С.А. Зайцев, С.А. Субботин // Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции «нейроинформатика-2010». – 2010. – С. 98-107.

33. 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.
34. Иванушкин, В.А. Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов / В.А.Иванушкин, Ф.Н.Сарапулов, П. Шымчак. – Щецин. – 2000. – 310 с.
35. Кирьянов, Д. В. Самоучитель MathCAD 12 / Д.В. Кирьянов. – СПб.: БХВ-Петербург. – 2004. – 576 с.
36. Кляйн, С.Э. Цветная металлургия. Окружающая среда. Экономика / С.Э. Кляйн, С.В. Карелов, В.И. Деев. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2000. – 372 с.
37. Кожухметов, С.М. Новые эффективные процессы в пирометаллургии меди, никеля и золота: Избранные труды / С.М. Кожухметов. – Алматы: ЦНЗМО. – 2015. – 406 с.
38. Коновалов, Ю.В. Статистическое моделирование с использованием регрессионного анализа: методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Компьютерное и статистическое моделирование». – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – 73 с.
39. Кривелёв, А.В. Основы компьютерной математики с использованием системы MatLab / А.В. Кривелёв. – М.: Лекс-Книга. – 2005. – 496 с.
40. Лазарев, Ю. MATLAB 5.0. Библиотека студента / Ю. Лазарев. – Киев: Ирина, ВНУ. – 2000. – 383 с.
41. Леоненков, А. Нечёткое моделирование в среде MatLab и fuzzyTECH / А. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург. – 2003. – 736 с.
42. Лиу, Ц. Автоматизация металлургического производства с позиции индустриального интернета вещей. Естественные и технические науки. –2017. – № 7-8. – С. 57-61.
43. Лиу, Ц. Технологические основы получения никеля из окисленных медно-никелевых руд / Ц. Лиу, Ю.В. Шариков // Технологии, инновации и предпринимательство: сборник научных трудов по материалам I Международ-

ной научно-практической междисциплинарной конференции, 31 мая 2017 г. Санкт-Петербург: НОО «Профессиональная наука». – 2017. – С. 78-88.

44. Лыкасов, А. А. Металлургия никеля: учебное пособие / А.А. Лыкасов, Г.М. Рысс, Н.М. Танклевская. – Челябинск: Изд-во ЮурГУ. – 2005. – 78 с.

45. Макаров, Е.Г. Инженерные расчёты в MathCad: учеб. курс / Е.Г. Макаров. – СПб: Питер. – 2005. – 448 с.

46. Макаров, И.М. Линейные автоматические системы: элементы теории, методы расчета и справочный материал / И.М. Макаров, Б.М. Менский. – М.: Машиностроение. – 1982. – 504 с.

47. Мартынов, Н.Н. MATLAB 5.x: Вычисления, визуализация, программирование / Н.Н. Мартынов, А.П. Иванов. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ. – 2000. – 332 с.

48. Марченко, Н.В. Металлургия тяжелых цветных металлов: учеб. пособие / Н.В. Марченко, Е.П. Вершинина, Э.М. Гильдебрандт. – Красноярск: ИПК СФУ. – 2009. – 354с.

49. Медведев, В.С. Control System Toolbox. MATLAB 5 для студентов / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. – М.: Диалог-МИФИ. – 1999. – 287 с.

50. Металлургия меди, никеля и кобальта. Т.2. / И.Ф. Худяков, А.И. Тихонов, В.И. Деев, С.С. Набойченко. – М.: Металлургия. – 1977. – 263 с.

51. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учеб. В 3т. Т.2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2000. – 456 с.

52. Морачевский, А.Г. Термодинамика системы никель-кислород / А. Г. Морачевский, Л. Ш. Цемехман, Л. Б. Цымбулов. – СПб: Изд-во Политехнического университета. – 2008. – 147с.

53. Мэтьюз, Дж. Г. Численные методы. Использование MatLab: пер. с англ. / Дж. Г. Мэтьюз, К. Д. Финк. – 3-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс». – 2001. – 720 с.

54. Ордынцев, В.М. Математическое описание объектов автоматизации / В.М. Ордынцев. – М: Машиностроение. – 1965. – 360 с.
55. Освоение процесса Ванюкова для переработки окисленных никелевых руд на Южно-Уральском никелевом комбинате / А.Н. Фёдоров, А.А. Комков, В.Н. Бруэк [и др.]. // Цветные металлы. – 2007. – № 12. – С. 33-37.
56. Основы вычислений и программирования в пакете MathCAD: учеб. пособие / Ю.Е. Воскобойников [и др.]; под ред. Ю.Е. Воскобойникова // Новосибир. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин). – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин). – 2012. – 212 с.
57. Очков, В.Ф. MathCAD 14 для студентов и инженеров / В.Ф. Очков. – СПб.: БХВ-Петербург. – 2009. – 512 с.
58. Очков, В.Ф. Советы пользователям MathCAD / В.Ф. Очков. – М.: Изд-во МЭИ. – 2006. – 196 с.
59. Очков, В.Ф. Физические и экономические величины в MathCad и Maple / В.Ф. Очков. – М.: Финансы и статистика. – 2002. – 192 с.
60. Перельман, И.И. Оперативная идентификация объектов управления / И.И. Перельман. – М.: Энергоиздат. – 1982. – 48 с.
61. Пивень, В.В. Вычисления в системе MATHCAD: метод. указ. для практических и лабораторных занятий для студентов / сост. В.В. Пивень. – ТюмГНГУ. – 2014. – 20 с.
62. Пименов, Л.И. Переработка окисленных никелевых руд / Л.И. Пименов, В.И. Михайлов. – М.: Metallurgia. – 1972. – 336с.
63. Плавка медных и медно-никелевых концентратов в электрических печах: Материалы школы. – Москва: ГОСИНТИ. – 1962. – 56 с.
64. Подготовка окисленных никелевых руд к плавке / В.Н. Мащенко, В.А. Кобелев, С.А. Книсс [и др.]. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2005. – 321 с.
65. Позняков, В.Я. Интенсификация процессов и усовершенствование технологии производства никеля и кобальта на комбинате «Североникель» / В.Я. Позняков. – Москва: Б. и. – 1968. – 105 с.

66. Потемкин, В.Г. MATLAB 5 для студентов / В.Г. Потемкин. – М.: Диалог-МИФИ. – 1998. – 314 с.
67. Потемкин, В.Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x / В.Г. Потемкин. – М.: Диалог-МИФИ. – 2000. – 256 с.
68. Пупков, К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления/ К.А. Пупков, Н.Д. Егупов // под. ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2004. – 210 с.
69. Райбман, Н.С. Построение моделей процессов производства / Н.С. Райбман, В.М. Чадеев. – М.: Энергия. – 1975. – 246 с.
70. Ракитин, В.И. Руководство по методам вычислений и приложения MathCad / В.И. Ракитин. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2005. – 264 с.
71. Рогов, А.М. Бригада плавильщиков, возглавляемая А.В. Матковским (комбинат «Североникель») / А.М. Рогов. – Москва: Б. и. – 1975. – 5 с.
72. Рудаков, П.И. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x. / П.И. Рудаков, В.И. Сафонов; под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: Диалог-МИФИ. – 2000. – 413 с.
73. Сидоров, Д.В. Анализ методологических аспектов математического моделирования динамики сложных технологических объектов / Д.В. Сидоров, О.А. Гаврина // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы двенадцатой Всерос. науч.-практ. конф. Т. II. Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС. – 2015. – 400 с.
74. Современная прикладная теория управления: Оптимизационный подход в теории управления. Ч. 1 / под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ. – 2000. – 400 с.
75. Солодовников, В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение. – 1985. – 535 с.
76. Сольницев, Р.И. Автоматизация проектирования систем автоматического управления / Р.И. Сольницев. – М.: Высшая школа. – 1991. – 335с.

77. Спесивцев, А.В. Разработка методов исследования и управления пирометаллургическими процессами цветной металлургии (на примере ОАО «Норильская Горная Компания»): автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н.: 05.16.03 / Спесивцев Александр Васильевич. – М., 2000. – 53 с.

78. Стегаличев, Ю.Г. Исследование статических и динамических характеристик объекта методом структурного моделирования с использованием ЭВМ: Метод. указания по выполнению лабораторных работ для студентов всех специальностей / Ю.Г. Стегаличев, В.Н. Замарашкина. – СПб.: СПбГУНиПТ. – 2003. – 48 с.

79. Тарарыкин, С.В. Системное проектирование линейных регуляторов состояния: учебное пособие / С.В. Тарарыкин, В.В. Тютиков. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т. – 1997. – 92 с.

80. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. – М.: Изд. центр «Академия». – 2005. – 304 с.

81. Технологические расчеты в металлургии цветных металлов: учебное пособие / Н.В. Гудима, Ю.А. Карасёв, Б.Б. Кистяковский [и др.]. – М.: Металлургия, 1977. – 255 с.

82. Толокнов, Д.А. Термодинамическое моделирование металлотермического восстановления сульфидов. Ч. 1. Алюмотермия / Д.А. Толокнов, Е.Н. Селиванов, Р.И. Гуляева // Бутлеровские сообщения. – 2012. – Т.29. – № 1. – С. 84–88.

83. Усынин, Ю.С. Теория автоматического управления: учебное пособие для вузов / Ю.С. Усынин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2010. – 176 с.

84. Центр компетенций MathWorks: [сайт]. Москва. – 2014. – URL: <http://matlab.ru/products/matlab> (дата обращения 30.06.2017). – Текст: электронный.

85. Часть IV. Metallургическое производство. Никелевый завод. / Изд. Норильский никель, Никелевый завод, г. Норильск. – 346 с.
86. Чепуштанова, Т.А. Математическое моделирование процесса термического разложения пирита / Т.А. Чепуштанова // Вестник КазНТУ. – 2012. – № 5. – С. 157-160.
87. Черняк, А.А. Высшая математика на базе MathCad. Общий курс / А.А. Черняк, Ж. А. Черняк, Ю. А. Доманова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 608 с.
88. Шариков, Ю.В. Кинетика химических превращений при спекании шихты в трубчатых вращающихся печах при производстве глинозема / Ю.В. Шариков, О.В. Титов // Записки Горного института. – 2011 – т. 189. – С. 324-327.
89. Шариков, Ю.В. Моделирование процессов в металлургии. / Ю.В. Шариков, Н.В. Данилова, В.С. Зуев. – СПб СПГГИ. – 2007. – 81с.
90. Шариков, Ю.В. Моделирование процессов и объектов в металлургии. Учебное пособие / Ю.В. Шариков, И.Н. Белоглазов, А.Ю. Фирсов. – СПб.: СПГГИ. – 2006. – 83с.
91. Шмонин, Ю.Б. Моделирование объектов и систем управления металлургического производства: Учеб. пособие / Ю.Б. Шмонин, Т.Ф. Вырубова. – СПб.: ЛГИ. – 1991. – 159 с.
92. Щербаков, В.С. Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде Matlab и Simulink: Учебное пособие / В.С. Щербаков, А.А. Руппель В.А. Глушец. – Омск: Изд-во СибАДИ. – 2003. – 160 с.
93. Энциклопедия АСУ ТП: [сайт]. –Новосибирск. – 2017. – URL: www.bookasupt.ru/Chapter5_5.aspx (дата обращения 06.06.2017). – Текст: электронный.
94. Юревич, Е.И. Теория автоматического управления / Е.И. Юревич. – 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург. – 2007. – 560 с.

95. Advances in Research on Nickel Production through the Caron Process / M.A. Rhamdhani, J. Chen, T. Hidaia, P.C. Hayes // Proc. of EMC. – 2009. – P. 899-913.
96. Chen, J. The Recovery of Ferro-Nickel from Saprolite Ores Using Reduction Roasting / J. Chen, E. Jak, P.C. Hayes // The 13th International Ferroalloys Congress. Efficient Technologies in Ferroalloy Industry. – 2013. – Almaty, Kazakhstan. – P. 713-721.
97. CISP. Cheminform St.PetersburgLtd [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://www.cisp.spb.ru/reactorcascade> (Дата обращения 30.06.2015).
98. Crundwell, F.K. Davenport W.G. Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals / F.K.Crundwell, M.S.Moats, V.Ramachandran, T.G. Robinson. Oxford: Elsevier. – 2011. – 610 p.
99. Developments of Furnace Technology for Ferronickel Production / N. Voermann [et al.]. // Proceedings of the 10th Int. Ferroalloys Congress. – Cape Town. – 2004. – P. 455-465.
100. Dumont, G.A., Huzmezan M. Concepts, methods and techniques in adaptive control / G.A. Dumont, Huzmezan M. // Proc. of the American Control Conference. Anchorage, AK. – 2002. – P. 1137–1150.
101. Giri, F. Block-oriented Nonlinear System Identification / F. Giri, E.Bai // Springer. – 2010. – 426с.
102. Liu, Z. Mathematical Simulation of the Process of Nickel Oxide Recovery in a Tube-Type Rotary Kiln / Z. Liu, Yu.V. Sharikov // Metallurgist. – 2018. – V. 62. – I. 7-8. – P. 27-32.
103. Liu, Z. The Development of a Process Control System for the Production of Partially Reducing Nickel Oxide in a Tubular Rotary Kiln // Z. Liu, Yu.V. Sharikov // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – V.7. – P. 97-105.
104. Mallat, S. A Wavelet Tour of Signal Processing / S. Mallat. – Academic Press. – 2009. – P. 832.

105. Matlab. Exponenta. Центр компетенций MathWorks: [сайт]. – Москва, 2015. – URL: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book3/6.php> (дата обращения 24.06.2018). – Текст: электронный.

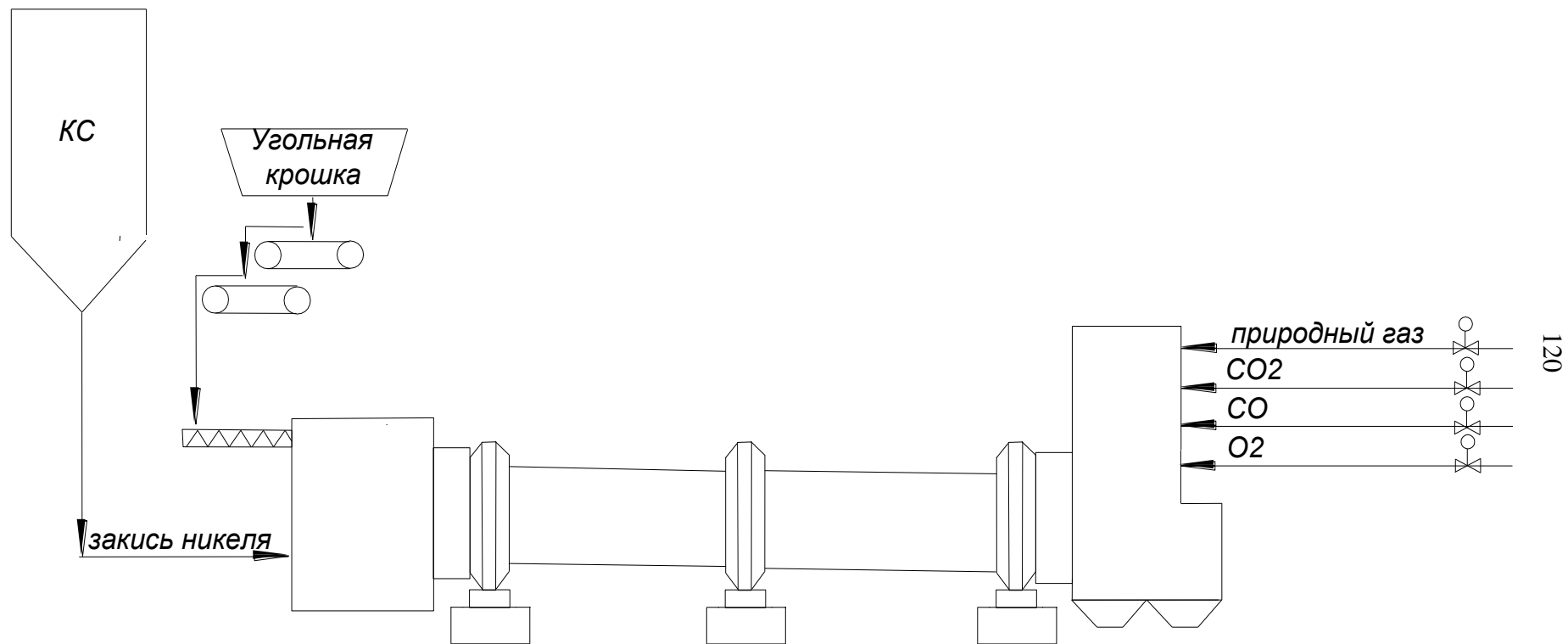
106. Nickel and Copper Smelting at Incos Copper Cliff Smelter / C. Landolt [et al.]. // Proc. of the Paul E. Queneau International Symposium. Extractive Metallurgy of Copper, Nickel and Cobalt. – 1993. – V. II. – P. 1497-1527.

107. Paulson, D. L. Smelting prerduced nickel concentrate in an electric-arc furnace / D. L. Paulson, W. E. Anable // US Dep. of the interior. Bureau of mines. – 1977. – №4. – P. 20.

108. Tsymbulov, L.B. Oxide Nickel Ores Smelting of Ferronickel in Two-zone Vaniukov Furnace / L.B. Tsymbulov, M.V. Knyazev, L.Sh. Tsemekhman // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2011. – Vol. 50. – № 2. – P. 135-144.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Функциональная схема восстановительного обжига закиси никеля в трубчатой вращающейся печи



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Модель процесса восстановления закиси никеля в трубчатой вращающейся печи на основе теплового режима

