

На правах рукописи

ЛИУ Цзыфэнг



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

*Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (металлургия)*

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Шариков Юрий Васильевич

Официальные оппоненты:

Холоднов Владислав Алексеевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра системного анализа и информационных технологий, профессор

Косой Аркадий Анцельевич

кандидат технических наук, федеральное государственное унитарное предприятие «Российский научный центр «Прикладная химия», лаборатория математического моделирования и оптимизации химико-технологических, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: ООО «Институт Гипроникель»

Защита диссертации состоится 24 сентября 2020 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.03 Горного университета по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 июля 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета

Бодуэн

Анна Ярославовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. 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 крупнозернистого, 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 параметра-

ми 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.

Научная новизна работы:

– 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 прокалики. 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.

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.

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.

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.

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.

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). Тема доклада: «Simulation of the process of reduction firing nickel oxide».

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.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи исследовательской работы, научная новизна и практическая ценность работы.

В главе 1 представлена технология производства частично восстановленной закиси никеля.

В главе 2 проведен расчет печи.

В главе 3 проанализирована автоматизация металлургического производства с позиции интернета вещей.

В главе 4 представлены результаты моделирования процесса восстановительного обжига закиси никеля.

В главе 5 приведены результаты исследования статических и динамических характеристик печи.

В главе 6 предложена автоматизация процесса восстановительного обжига закиси никеля.

В главе 7 описана предлагаемая организация производства.

В заключении сформулированы основные выводы, результаты проведенных экспериментальных и теоретических исследований и рекомендации.

Основные результаты исследования отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Качество частично восстановленной закиси никеля регулируется температурой в зоне прокали. Оптимальный тем-

пературный 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.

Целью управления трубчатой вращающейся печи является стабилизация температурного режима работы печи для 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.

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.

На рисунке 1 изображена структура потоков в печи, из которой возможно выделить основные каналы управляющих и возмущающих воздействий объекта управления.

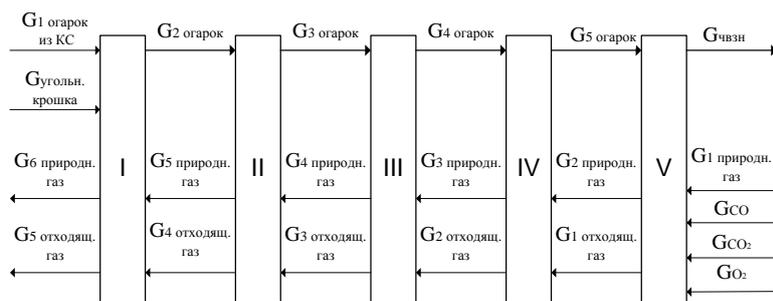


Рисунок 1 – Структура потоков в печи

Печь восстановительного обжига можно рассматривать как объект с распределенными параметрами, но такое представление

объекта усложняет его математическое описание. В данной работе представлена ячеечная модель, как совокупность моделей идеально-го 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.

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 (1).

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

Преобразовав, получим (2):

$$\left\{ \begin{aligned}
\frac{dT_I}{dt} &= (G_{1\text{Огар.мзКС}} c_{1\text{Огар.мзКС}} T_{1\text{Огар.мзКС}} + 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{Омх.Газ}} c_{4\text{Омх.Газ}} T_{4\text{Омх.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{Омх.Газ}} c_{5\text{Омх.Газ}} T_{5\text{Омх.Газ}}) / (m_I c_I) \\
\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{Омх.Газ}} c_{3\text{Омх.Газ}} T_{3\text{Омх.Газ}} - G_{5\text{Природн.Газ}} c_{5\text{Природн.Газ}} T_{5\text{Природн.Газ}} - \\
&- G_{4\text{Омх.Газ}} c_{4\text{Омх.Газ}} T_{4\text{Омх.Газ}} - G_{3\text{Огар}} c_{3\text{Огар}} T_{3\text{Огар}}) / (m_{II} c_{II}) \\
\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{Омх.Газ}} c_{2\text{Омх.Газ}} T_{2\text{Омх.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{Омх.Газ}} c_{3\text{Омх.Газ}} T_{3\text{Омх.Газ}}) / (m_{III} c_{III}) \\
\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{Омх.Газ}} c_{1\text{Омх.Газ}} T_{1\text{Омх.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{Омх.Газ}} c_{2\text{Омх.Газ}} T_{2\text{Омх.Газ}}) / (m_{IV} c_{IV}) \\
\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{Омх.Газ}} c_{1\text{Омх.Газ}} T_{1\text{Омх.Газ}}) / (m_V c_V)
\end{aligned} \right. \quad (2)$$

Q_i – поток тепла;

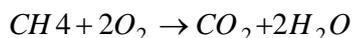
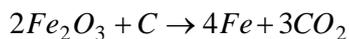
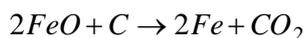
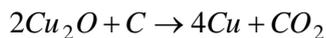
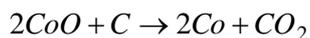
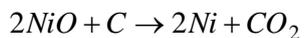
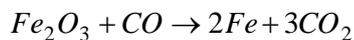
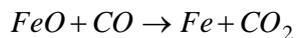
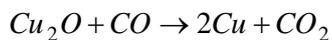
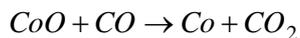
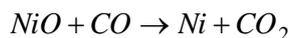
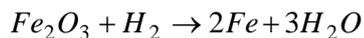
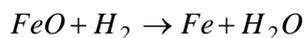
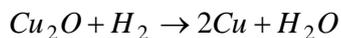
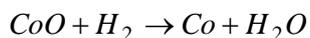
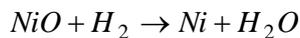
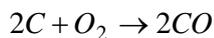
G_i – массовый расход;

c_i – теплоемкость;

T_i – температура в определенной зоне печи.

Данная система решена в программе Mathcad.

Для разработки математической модели использованы программный комплекс ReactOp и система реакций (3), происходящих при получении частично восстановленной закиси никеля.



(3)

В программном комплексе ReactOp имеется банк моделей 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.

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 2) и модель изменения температурного режима печи по ее длине (рисунок 3).

На рисунке 4 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.

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.

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.

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. Ли-

нейная 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.

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.

Дана нормированная кривая разгона объекта, у которой заранее выделена величина чистого запаздывания $\tau_z = 3 \text{ мин}$. График кривой разгона представлен на рисунке 5.

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.

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_d определяются в соответствии с графиком рисунка 5, т.е. $\tau = \tau_s - \tau_d$.

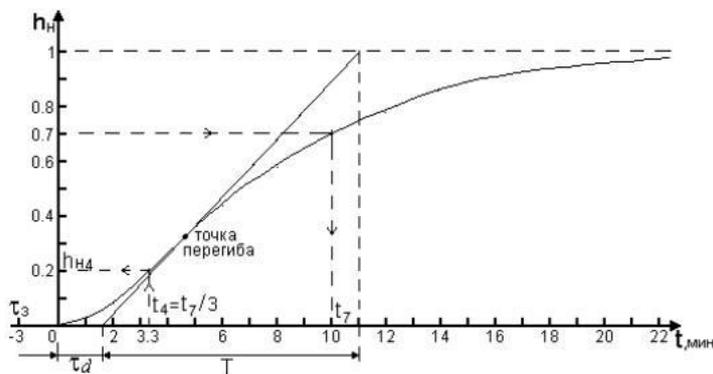
2) Формульный метод позволяет аналитически вычислить величину динамического запаздывания и постоянной времени по формулам (4) и (5).

$$\tau_d = \frac{t_B \ln(1 - h_A) - t_A \ln(1 - h_B)}{\ln(1 - h_A) - \ln(1 - h_B)} \quad (4)$$

$$T = \frac{t_A - \tau_d}{n(1 - h_A)} \quad (5)$$

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 .

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



Так как передаточная функция системы определяет ее динамические свойства, то первоначальная задача расчета САР сводится к определению ее передаточной функции.

По графикам переходных функций определяются коэффициенты усиления (5) и передаточные функции по каналам возмущения (6). На рисунке 6 представлен пример переходного процесса.

$$K = \frac{\Delta T}{\Delta X}, \quad (5)$$

где K - коэффициент усиления, °С/кг;
 ΔT - разность конечного и начального значений температур, °С;
 ΔX - разность конечного и начального значений расхода, кг.

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1} e^{-\tau p} \quad (6)$$

где K - коэффициент усиления, °С/кг;
 T - постоянная времени, с.;
 τ - время запаздывания.

Пример переходного процесса представлен на рисунке 6.

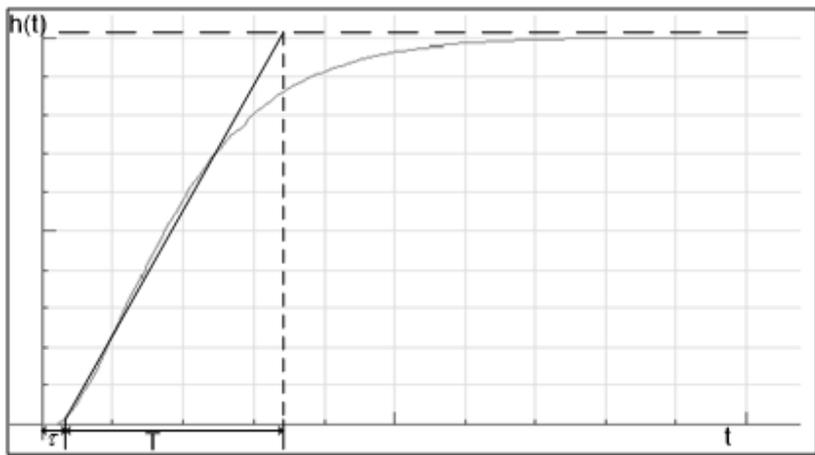


Рисунок 6 – Пример переходного процесса

Для стабилизации температуры в печи принимаем систему, действующую по отклонению стабилизируемой величины от заданного значения (рисунок 7).

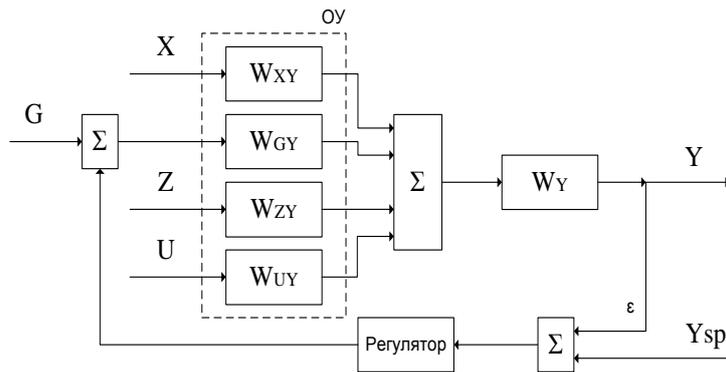


Рисунок 7 – Структурная схема системы автоматического регулирования температуры

- OV – 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 OV по каналу возмущения;
 W_{ZY} – передаточная функция OV по каналу возмущения;
 W_{UY} – передаточная функция OV по каналу возмущения;
 W_{GY} – передаточная функция OV по каналу управления;
 ε – ошибка на входе регулятора.

Проведено исследование динамических характеристик объекта управления по каналам возможных управлений и возмущений.

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 ПИД-законом регулирования, так как он наиболее универсален и учитывает малейшие колебания в системе.

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). 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 являются системы регулирования температуры.

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

Для обеспечения компенсации чистого запаздывания был использован регулятор Смита. Регулятор Смита используют в тех случаях, когда к качеству переходных процессов в системе регулирования предъявляют высокие требования. Расчет основных показателей качества регулирования системы с использованием регулятора Смита проведен аналогично расчетам показателей системы с использованием ПИД-регулятора.

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.

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) представлены на рисунке 8.

В таблице 1 представлены показатели качества регулирования.

Таблица 1 – 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

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.

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 ReactOp 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 теплообмена 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.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из Перечня ВАК

1. **Лиу Ц.** Автоматизация металлургического производства с позиций индустриального интернета вещей / **Ц. Лиу** // Современная наука: Актуальные проблемы теорий и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2017. – № 7-8. – С. 57-61.

2. **Лиу Ц.** Математическое моделирование процесса восстановления закиси никеля в трубчатой вращающейся печи / Шариков Ю.В., Лиу Цзыфэнг // Металлург. – 2018. – №7. – С. 27-31.

В издании, индексируемом в международной базе Scopus:

3. **Liu, Z.** Mathematical Simulation of the Process of Nickel Oxide Re-recovery in a Tube-Type Rotary Kiln / **Z. Liu, Yu.V. Sharikov** // Metallurgist. – 2018. – V. 62. – I. 7-8. – P. 27-32.

В прочих изданиях:

4. **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 Международной научно-практической междисциплинарной конференции. – Санкт-Петербург: НОО «Профессиональная наука». – 2017. – С. 57-61.

5. **Liu Z.** The development of a Process Control System for the Production of Partially Reducing Nickel Oxide in a Tubular Rotary Kiln / I.V. Sharikov, **Z. Liu** // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – V. 7. – P. 97-104.

6. **Лиу Ц.** Управление процессом получения частично восстановленной закиси никеля в трубчатой вращающейся печи / Ю.В. Шариков, Ц. Лиу // Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по материалам XXIX Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения». – Москва: Изд. «Интернаука». – 2019. – № 11(27). – С.83-94.

7. **Liu, Z.** Simulation of the process of reduction firing nickel oxide / **Z. Liu** // International Research Conference on Technology, Science, Engineering & Economy. – 2020. – № 7. – PP. 45-51.

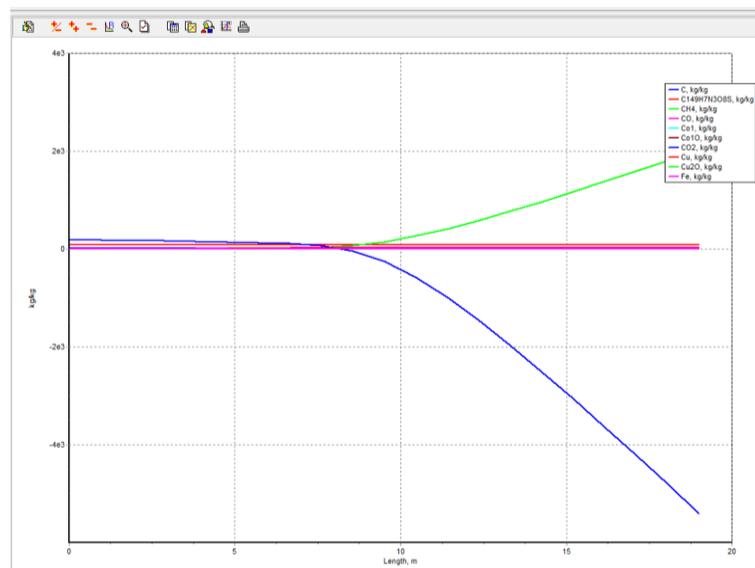


Рисунок 2 – Общий вид результатов математического моделирования

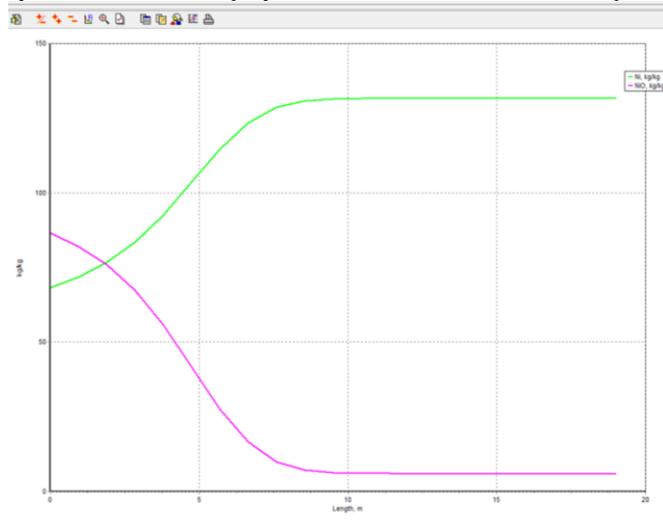


Рисунок 4 – Изменение состава никеля (зеленая линия) и состава окиси никеля (розовая линия)

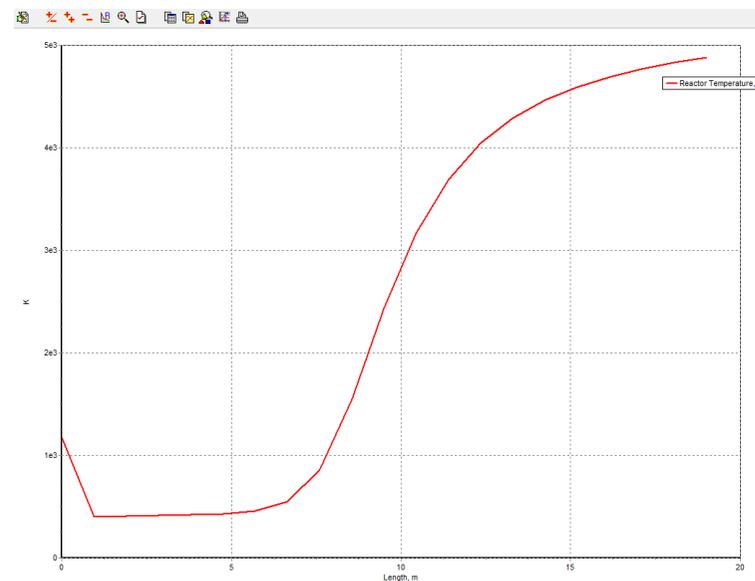


Рисунок 3 – Изменение температурного режима трубчатой вращающейся печи

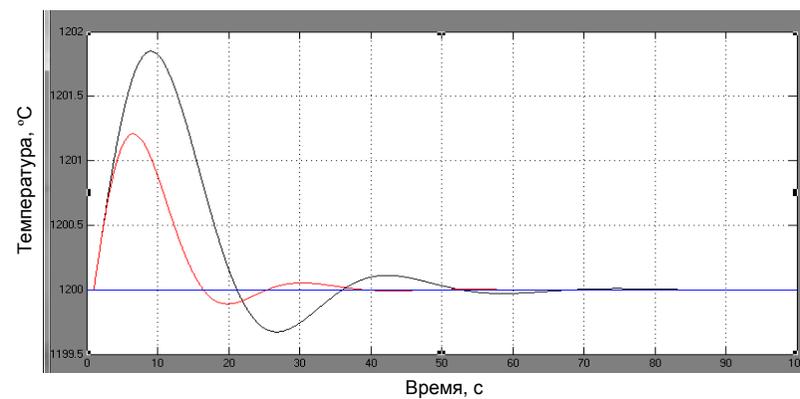


Рисунок 8 – Графики переходных процессов по температуре на выходе из печи регулирования систем с ПИД – регулятором (черная линия), регулятором Смита (красная линия) и fuzzy – регулятором (синяя линия)