

На правах рукописи

МАРТЫНОВ Сергей Александрович

Handwritten signature of Martynov in black ink, consisting of stylized cursive letters.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ
ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ В
РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ 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, доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств
Бажин Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты:

Першин Иван Митрофанович
доктор технических наук, профессор, институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет», кафедра систем управления и информационных технологий, заведующий кафедрой

Васильев Валерий Викторович

кандидат технических наук, акционерное общество «ТОМС инжиниринг», начальник отдела автоматизации

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»

Защита диссертации состоится 24 сентября 2020 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224. 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. Мировые тенденции развития кремниевого производства в условиях высокой конкуренции связаны с максимальной эффективностью технологических процессов при снижении себестоимости и повышении качества продукции. Стабильное функционирование основных промышленных агрегатов – руднотермических печей (РТП) невозможно осуществить без автоматизации производственного процесса и применения современных методов управления и контроля.

В настоящее время карботермический способ является единственным промышленным способом получения металлургического кремния чистотой 98,5-99,5%. Мировое производство кремния металлургических сортов превышает 2,3 млн. тонн при ежегодном увеличении спроса на 8-10%. В России технический рафинированный кремний производят на единственном заводе – ЗАО «Кремний», объём выпуска готовой продукции составляет 42 тыс. тонн, что составляет примерно 1 % мирового производства. Предприятие ООО «РУСАЛ Кремний Урал», на котором получали только металлургический кремний карботермическим способом в однофазных руднотермических печах, остановлено в конце 2019 года ввиду высокой себестоимости продукции по сравнению с передовыми зарубежными предприятиями и экологических проблем.

Анализ причин неудовлетворительного состояния производства отечественного кремния показывает, что степень автоматизации процесса и контроль технологических параметров находятся на низком уровне, это напрямую влияет на показатели максимального выхода годной продукции, качество и себестоимость продукции. Отсутствие оперативной информации о текущих значениях основных технологических параметров, таких как состав кварцсодержащего сырья, условия эксплуатации и состояние электродов, форма рабочего пространства печи, расход углерода может привести к аварийной остановке РТП, наряду с резким увеличением расхода сырья и электроэнергии. Рост выбросов монооксида кремния при нарушениях технологического режима и баланса углерода в шихте, неиз-

бежно ухудшает экологическую обстановку и снижает степень извлечения кремния.

Отсутствие данных, которые характеризуют текущее состояние технологического процесса в руднотермических печах, не позволяет в полной мере использовать традиционные схемы автоматизированного его управления.

Повышение точности и качества регулирования режима плавки может быть достигнуто при совершенствовании используемых регуляторов мощности и ввода дополнительных контролируемых параметров в автоматизированную систему управления, созданной на базе современных средств вычислительной техники, с применением инновационных адаптивных алгоритмов настройки регуляторов. Разработка и внедрение новых многоуровневых систем автоматизированного управления позволяет увеличить производительность печей и качество получаемого продукта.

Вопросами связанными с автоматизацией и повышением эффективности процесса получения металлургического кремния, занимались отечественные НИИ и зарубежные компании: АО «РУСАЛ ВАМИ», ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», ФГБОУ ВО «СПБГТИ(ТУ)», FerroAtlantica (Испания), Dow Corning (США), Elkem (Норвегия), Rima Industrial (Бразилия), Timminco (Канада), Fesil (Норвегия), Simcoa (Австралия), Australian Silicon Ltd (Австралия), Polokwane (ЮАР), Thamshavn (Норвегия), ССМС (Бразилия), Sabon (Франция), Angelfort (Франция), Ningxia Dongyao Coal & Chemical Industrial Co., Ltd. (Китай) и другие. Значительный вклад в исследование процесса получения отечественного металлургического кремния в РТП, повышение информативности, способов управления внесли такие учёные как М.С. Максименко и его последователи: Б.М. Струнский, С.И. Хитрик, С.И. Тельный, А.С. Микулинский, И.Ю. Кожевников, А.А. Педро, С.В. Арменский, В.А. Ершов, а также В.А. Елизаров, И.В. Лапшин, Б.М. Горенский, Н.В. Немчинова, А.Г. Лыков, В.Л. Розенберг, А.Г. Лунин, К.С. Ёлкин, В.П. Воробьёв, А.В. Сивцов, А.Н. Глинков, Я.Б. Данцис, И.А. Кляшторный, М.Я. Фитерман и другие. Широкую известность получили работы зарубежных авторов: Р. Перручоуда и Ж.-К. Фишера. Эти авторы в

своих трудах подводят итог долгих исследований учёных из разных стран в области электротермии, управление процессом получения металлургического кремния, моделирования тепловых полей.

Представляет научно-технический интерес создание многоуровневой SCADA-системы с расширенной параметризацией, получаемой за счет снижения доли неконтролируемых параметров руднотермической печи. Удельный расход углеродных восстановителей, расход графитированных электродов и изменение геометрии их торцов, форма рабочего пространства могут стать дополнительными параметрами для АСУ ТП в производстве кремния.

Актуальной является разработка новых научно-технических решений, которые обеспечат повышение уровня контроля и автоматизации процесса и стабилизацию технологических параметров руднотермической печи с учётом изменяющихся параметров: влажность восстановителей и состояние электродов.

Цель работы

Повышение эффективности и расширение функциональных возможностей автоматизированного управления руднотермической печью при вводе дополнительных контролируемых параметров для стабилизации технологического процесса получения металлургического кремния.

Основные задачи исследования:

- Анализ технических решений, элементов систем контроля, применяемых на существующих АСУ ТП металлургической промышленности;
- Разработка математической модели распределения теплового поля руднотермической печи с учётом влажности шихтовых угольных материалов;
- Разработка алгоритма управления перемещением электрода, позволяющая снизить вероятность их поломки и дефектности во время перепуска;
- Создание системы управления руднотермической печью при изменяющихся технологических параметрах, таких как длина электрода, качество сырья, стадия плавки и т.д.;

- Научное обоснование создания адаптивной системы управления производством кремния с дополнительными контролируемыми параметрами, позволяющей эффективно управлять процессом при изменении формы рабочего пространства, длины электрода, качества сырья и при переходе на различные стадии плавки.

Научная новизна работы:

- Обоснованы дополнительные функции системы контроля АСУ ТП с учетом показателей электрического режима печи с применением алгоритмов адаптации параметров регулятора для стабилизации технологического процесса восстановления с целью получения кремния высших марок;

- Разработана математическая модель, определяющая распределение температурного поля печи в зависимости от электрического режима с учетом текущего баланса углерода, качества кварца, положения электродов для стабилизации мощности с целью повышения производительности печи;

- Построена математическая 3D-модель теплового поля рабочего пространства РТП с учетом положения электродов, влажности древесного угля и установлено изменение теплового баланса в зависимости от различных технологических условий;

- Разработан и обоснован алгоритм системы контроля положения электродов руднотермической печи, снижающий вероятность сколов и трещин на их поверхности.

Основные защищаемые положения:

1. Система контроля позволяет определить отклонение электрода в руднотермической печи от заданного осевого направления лазерного измерителя с точностью 1 мм, тем самым снижая вероятность поломки электрода.

2. Адаптивный алгоритм управления дозировкой шихты с учётом влажности восстановителя позволяет повысить производительность на 5-10% и снизить удельный расход электроэнергии на 3-5 %.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- На основе практических данных современных отечественных агрегатов разработан адаптивный алгоритм управления, позволяю-

щий эффективно управлять руднотермической печью при изменяющихся технологических параметрах, таких как длина электрода, качество кварцосодержащего сырья и т.д. (патент РФ №2612340);

- Реализован программный продукт алгоритма управления положением электродов, позволяющий снизить вероятность их поломки вовремя опускания (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2017611642), и апробирован в условиях действующего производства.

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

Методология и методы исследований

В работе использовались статистически обработанные данные, которые были получены в ходе промышленных и лабораторных исследований процесса карботермического восстановления металлургического кремния в руднотермических печах и статистически. Обработка результатов проводилась стандартными методами математического анализа, с учетом теории автоматического управления с использованием физических и математических моделей. Разработка комплексной математической модели с помощью специализированных прикладных пакетов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается большим объемом экспериментальных исследований, применением современных методов статистического анализа, сходимостью теоретических и экспериментальных результатов, тестированием системы управления на лабораторных и промышленных архивных данных о протекании технологического процесса восстановления в РТП для получения кремния высших марок.

Апробация работы

Результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались и обсуждались на: I Международной научно-практической интердисциплинарной конференции «Фундаментальные и академические прикладные исследования» (Москва, 15 мая 2017 год); I Международной научно-практической конференции «Творческие и инновационные подходы в образовании, науке и искусстве» (Санкт-Петербург, 13 ноября 2017 год); Международной научно-технической конференции «Автоматизация» (Сочи, 9-16 сентября 2018 год), XVI Международном междисциплинарном форуме молодых учёных «Наука, технологии и инновации: тенденции и направления развития» (Москва, 25 марта 2019 год); Международной научно-практической конференции «International Conference on Advancing Knowledge from Multidisciplinary Perspectives in Science, Engineering & Technology» (Красноярск, 4-6 апреля 2019 год), Международной конференции «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering» (APITECH-2019) (Красноярск, 25-27 сентября 2019 года).

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 8 печатных трудах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus; получено 1 свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ и 1 патент на изобретение.

Объем и структура работы:

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 115 страницах. Содержит 21 рисунок, 14 таблиц и список литературы из 129 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В главе 1 произведён анализ существующего состояния мирового и отечественного производства металлургического кремния и современных систем автоматического управления и руднотермическими печами, выявлены основные проблемы и недостатки существующих АСУ ТП РТП, рассмотрены инновационные технические решения с вводом дополнительных контролируемых параметров, сформулированы цель и основные задачи исследования.

В главе 2 рассмотрены основные методы неразрушающего контроля и с учётом особенностей технологического процесса, разработан комплекс лабораторно-практических исследований, который позволит повысить технико-экономические показатели за счёт снижения вероятности поломки и дефектности электрода в РТП, с передачей сигнала о состоянии электрода в систему управления.

В главе 3 обработаны результаты экспериментов по определению критического изгиба электрода, при превышении которого произойдёт поломка электрода. Представлена математическая модель процесса плавки в рудотермической печи, разработан программный комплекс для контроля отклонения электрода от своего осевого положения.

В главе 4 Разработан алгоритм адаптивного регулятора, который позволяет реагировать системе управления на изменение основных технологических параметров. Для повышения эффективности контроля и управления предложен ввод дополнительных контролируемых параметров в существующую SCADA-систему. Рассчитан экономический эффект от внедрения предлагаемого решения.

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

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Система контроля позволяет регулировать положение

электродов в руднотермической печи и определяет степень отклонения с точностью 1 мм от заданного осевого направления лазерного измерителя, снижая вероятность поломки электродов.

Графитированные электроды печи РТП являются ее основным рабочим элементом, которые эксплуатируются в условиях высоких температур и больших механических нагрузках. Их эксплуатационные характеристики и качество в итоге определяют устойчивость теплового режима и эффективность работы печи в целом. Остановка РТП из-за поломки или дефектности электрода протекает длительный период времени, за который температура реакционной зоны снижается значительно ниже необходимого минимального значения. После вынужденной остановки РТП время её вывода в регламентный режим работы требуется значительно больше, чем длительность простоя. После возобновления технологического процесса у РТП значительно снижается производительность, качество сырья и повышается расход электроэнергии, поэтому контроль состояния электродов является важными параметрами для АСУ ТП производства кремния.

Для решения задач экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, представленной на рисунке 1.

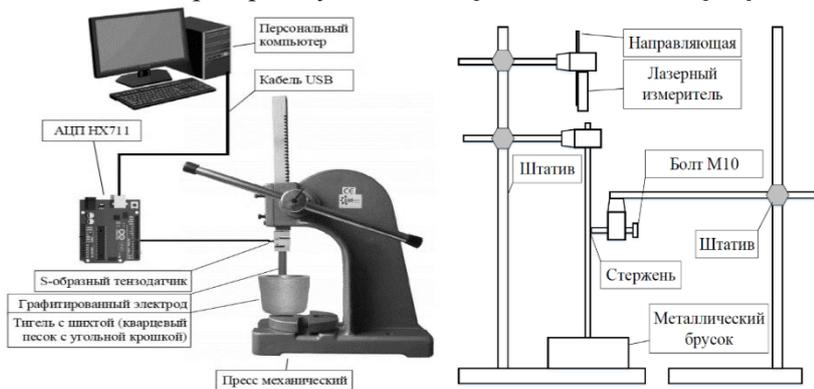


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки для изучения влияние степени отклонения электрода

В ходе проведения лабораторных экспериментов были получены данные, представленные на рисунке 2 и 3.

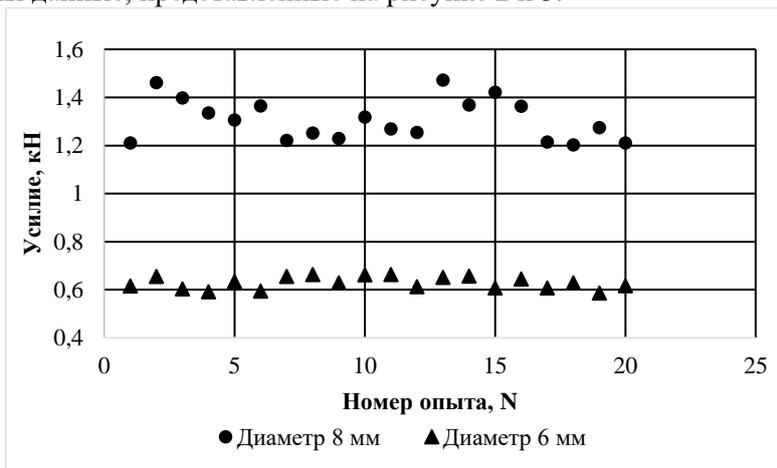


Рисунок 2 – Критическое значение нагрузки прикладываемой на электрод при его поломке

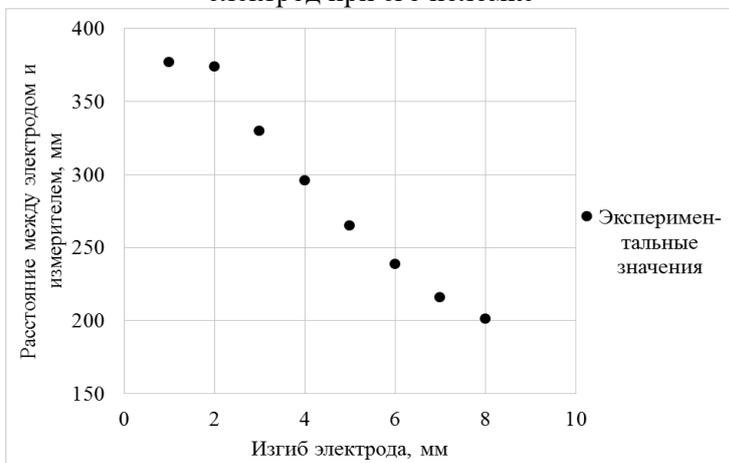


Рисунок 3 - Зависимость расстояния между электродом и измерителем от величины изгиба электрода

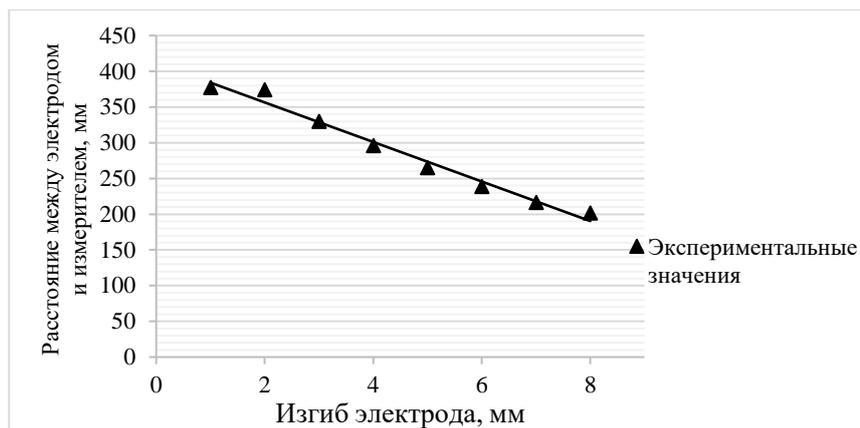


Рисунок 4 – Зависимость расстояния между электродом и лазерным измерителем от величины изгиба электрода

Используя метод наименьших квадратов, была выполнена аппроксимация экспериментальных данных и получена функциональная зависимость расстояния между электродом и лазерным измерителем от величины изгиба электрода $y = -27.669x + 411.75$ (рисунок 4).

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о возможности применении лазерного измерителя для сигнализации отклонения электрода от своего осевого положения с точностью 1 мм. Для этого нужно добавить данный параметр с SCADA-систему. Тем самым оператор может получить сигнал задолго до наступления критического изгиба электрода.

Данная система контроля была реализована в программном пакете Matlab 2014b Simulink. Для реализации алгоритма использовались результаты, полученные в ходе лабораторных исследований и математического моделирования. Разработанный алгоритм был апробирован в условиях действующего производства.

Результаты моделирования работы данной системы контроля изображены на рисунке 5. На первом графике показана величина заглублиения электрода в шихту, на втором степень отклонения электрода от своего осевого положения, на третьем срабатывание сигнализации на АРМе оператора.

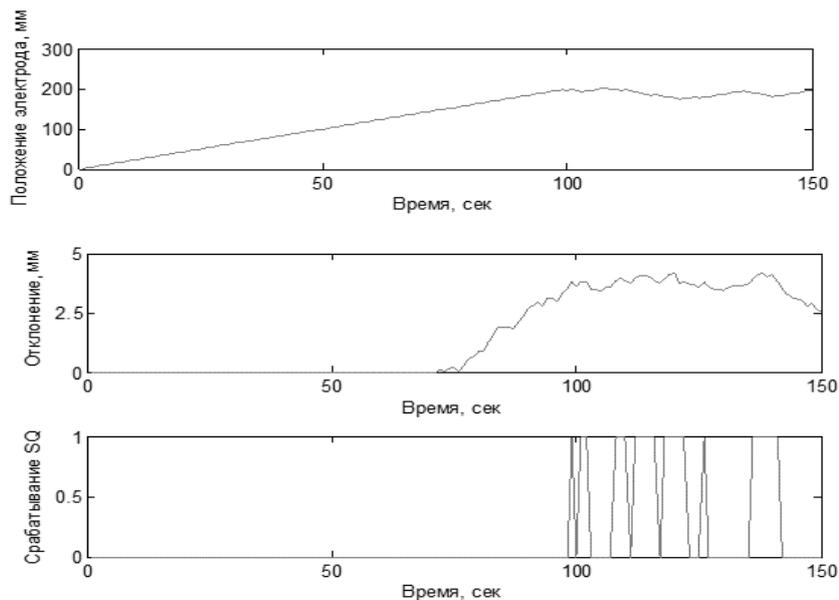


Рисунок 5 – Работа системы контроля положения электрода в РТП

2. Адаптивный алгоритм управления дозировкой шихты с учётом влажности восстановителя позволяет повысить производительность РТП на 5-10% и снизить удельный расход электроэнергии на 3-5 %.

При карботермическом восстановлении кремния в РТП выделение тепловой энергии происходит как в электрической дуге, так и в шихтовых материалах, и в расплаве. Поэтому изменение баланса углерода на 5-10% способно изменить распределение тепловой энергии во внутривспечном пространстве и тем самым вызвать снижение производительности печи, повышение удельного расхода электроэнергии, снижения температуры выходящего кремния.

Для нахождения распределения тепловых полей в зависимости от баланса углерода (тепловой и материальный балансы) применялся сеточный метод. При моделировании был рассмотрен прогрев цилиндра без внутренних тепловыделений (тепловые эффекты химических реакций) и без изменения концентраций. Эти преобразо-

вания не оказывают существенного отрицательного эффекта на конечный результат решения задач такого типа. Принцип расчёта конечных разностей лежит в основе современных программных пакетов для решения систем дифференциальных уравнений.

Изменение температуры гарнисажа и футеровки стен РТП следующими дифференциальными уравнениями, формула (1):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

Граничные и начальные условия, формулы (2) и (3):

$$T(0, r) = T_n(r); \quad \frac{\partial T(t, 0)}{\partial r} = 0; \quad -\lambda \cdot \frac{\partial T(t, R)}{\partial r} = \alpha(T(t, R) - T_{oc}) \quad (2)$$

$$\frac{T_i^{(j)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta t} = \frac{a}{R^2} \cdot \left(\frac{T_{i+1}^{(j-1)} - 2 \cdot T_i^{(j-1)} + T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho^2} + \frac{1}{i \cdot \Delta \rho} \cdot \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta \rho} \right);$$

$$T_i^{(j)} = T_i^{(j-1)} + B \cdot (T_{i+1}^{(j-1)} - 2 \cdot T_i^{(j-1)} + T_{i-1}^{(j-1)}) + \frac{B}{i} (T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}) \quad (3)$$

$$B = \frac{a \cdot \Delta t}{R^2 \cdot \Delta \rho^2}$$

Данная система уравнений (4) и (5) позволяет определить значения температуры для всех точек пространства во всех временных слоях изменения теплового состояния печи, при этом значение в начальной точке рассчитывается исходя из начальных условий, по формуле (4).

$$T_0^{(j)} = T_1^{(j)} \quad (4)$$

$$-\lambda \cdot \frac{T_N^{(j)} - T_{N-1}^{(j)}}{R \cdot \Delta \rho} = \alpha(T_N^{(j)} - T_{oc});$$

$$T_N^{(j)} \left(1 + \frac{\alpha \cdot R \cdot \Delta \rho}{\lambda} \right) = T_{N-1}^{(j)} + \frac{\alpha \cdot R \cdot \Delta \rho}{\lambda} \cdot T_{oc} \quad (5)$$

$$T_N^{(j)} = \frac{T_{N-1}^{(j)} + \frac{\alpha \cdot R \cdot \Delta \rho}{\lambda} \cdot T_{oc}}{\left(1 + \frac{\alpha \cdot R \cdot \Delta \rho}{\lambda} \right)}$$

На основе этого метода было проведено моделирование распределения тепловой энергии во внутривспечном пространстве РТП при раз-

личных отклонениях от номинального количества восстановителя. Распределение тепловых полей в РТП изображено на рисунке 6.

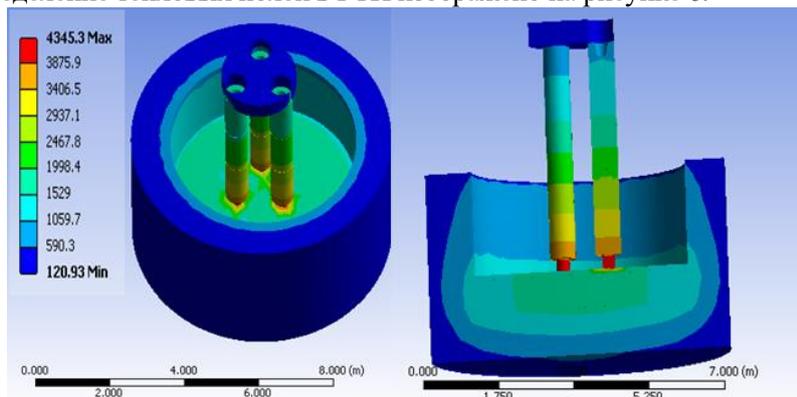


Рисунок 6 – Распределение тепловых полей в РТП

Система адаптивного управления состоит из объекта управления, регулятора, дигратора (блок расчёта коэффициентов регулятора) и идентификатора. Структурная схема системы регулирования изображена на рисунке 7.

Приняты следующие обозначения:

x – вектор состояния объекта: совокупность выходных переменных, исчерпывающе определяющих его состояние;

u – вектор управления: совокупность управляющих воздействий на объект;

v – вектор возмущения: совокупность всех возмущений, приведенных ко входу объекта;

A, B - постоянные $m \times m$ и $m \times 1$ матрицы коэффициентов.

В этих обозначениях уравнение объекта в дискретном времени имеет вид (6):

$$x(t+1) - x(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) + v(t), \quad (6)$$

где u_t закон управления определяется формулами (7) и (8)

$$u_t = -K \cdot x_t, \quad (7)$$

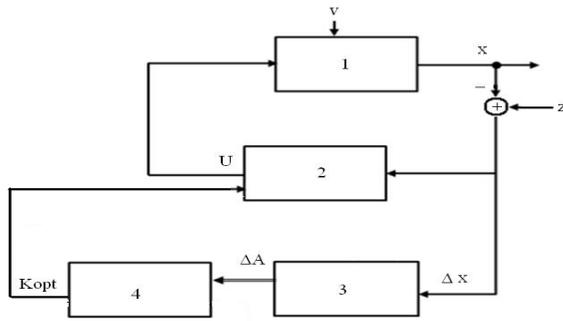


Рисунок 7 – Структурная схема системы регулирования с адаптивной настройкой регулятора. 1 – расширенный объект управления, 2 – регулятор, 3 – идентификатор, 4 – дигратор (блок расчёта коэффициентов регулятора)

$$K = 1 / (1 + \gamma) \cdot (B^T \cdot B)^{-1} B^T \cdot A. \quad (8)$$

Для оптимального регулятора, из условия $J = x^T \cdot x + 1 / \gamma (u^T \cdot u) \rightarrow \min$,

где, γ – относительный показатель ограничения управляющих воздействий, тогда оптимальный закон П-регулятор определяется формулой (9):

$$u_t = -(B^T \cdot B)^{-1} B^T \cdot A \cdot x_t, \quad (9)$$

где u_t определяется формулой (7)

Примем обозначение контура, как единого целого: объект плюс регулятор. Из полученных соотношений (1) и (2) исключим управление и получим уравнение замкнутого контура регулирования (10):

$$x(t+1) = (A - B \cdot K)x(t) + v(t) \quad (10)$$

$$\Delta A = A - B \cdot K, \quad (11)$$

ΔA обозначена результирующая матричная константа замкнутого контура, которая находится по формуле (11).

Идентифицируем уравнение контура с коэффициентом регулятора равным $K_{нач}$.

Простейший способ идентификации линейной модели вида (13) по матрице ΔA – это метод наименьших квадратов (МНК).

$$\Sigma[x_{t+1} \cdot x_t^T] = \Delta A \cdot \Sigma[x_t \cdot x_t^T] \quad (12)$$

Выразим ΔA (12), получим уравнение (13):

$$\Delta A = \sum [x_{t+1} \cdot x_t^T] \cdot [x_t \cdot x_t^T]^{-1} \quad (13)$$

Первый цикл с $K_{нач}$, находим ΔA по формуле (11), затем считаем, что B нам известно, и итерационным методом находим A по формуле (14), а на следующем цикле, находим B по формуле (15), используя A с прошлого цикла, так через несколько циклов найденные нами коэффициенты приблизятся к коэффициентам модели и соответственно приблизятся настройки регулятора к оптимальным.

$$A = \Delta A_1 + B \cdot K_{нач} \quad (14)$$

Далее рассчитываем K_{opt1} через A по формуле (8)

Второй цикл:

ΔA_2 рассчитываем по формуле (13)

$$B = (A + \Delta A_2) \cdot K_{opt1} \quad (15)$$

$$K_{opt2} = 1 / (1 + \gamma) \cdot A \cdot B^{-1} \quad (16)$$

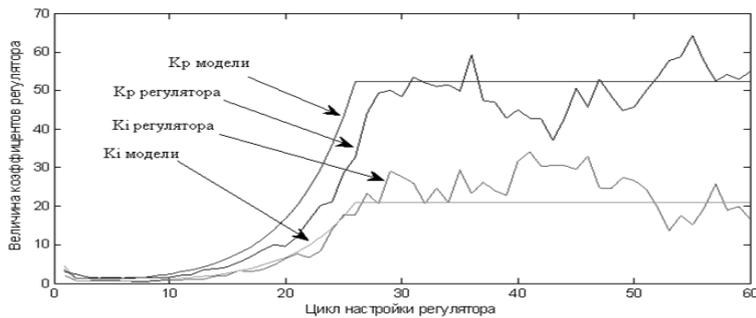


Рисунок 8 – Результаты математического моделирования, K_p , K_i , — коэффициенты усиления пропорциональной и интегральной составляющих регулятора

Разработан алгоритм работы блока идентификатора:

вход X_{t+1} и X_t , а выход - ΔA , рассчитывается по формуле (13).

Блок работает 30 циклов и в конце вычисляет ΔA , и передаёт в следующий блок.

Разработан алгоритм работы блока дигратора:

вход ΔA , а выход K_{opt} , рассчитывается по формулам (14) и (16), на первом цикле берётся коэффициент B и находим через него A

(14), а затем и K_{opt1} (8), на втором цикле рассчитываем, по вычисленному на прошлом цикле коэффициенту A , B и K_{opt2} (16). Результаты работы алгоритма по настройке регулятора представлены на рисунке 8.

На основе разработанного алгоритма, реализованного в программном комплексе Matlab 2014b, получен патент РФ №2612340, Адаптивная система управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационной работы проведено изучение процесса карботермического восстановления кремния в руднотермических печах, на основании которого были получены и научно обоснованы следующие научно-технические результаты:

1. Выполнен анализ состояния современных систем управления руднотермическими печами и патентный поиск. Сделан вывод о необходимости повышения информативности технологического процесса и диагностики оборудования РТП.

2. Рассмотрены основные методы неразрушающего контроля с учётом особенностей технологического процесса, выбран – ОНК. Разработана программа экспериментальных исследований и методика проведения эксперимента.

3. Для решения задачи контроля положения электрода во время перепуска и при упоре электрода в шихту был разработан программный комплекс (№ 2017611642), позволяющий снизить вероятность поломки электрода.

4. Проведено моделирование процесса карботермического восстановления кремния в РТП с учётом теплового баланса, который позволяет определить влияние температуры на изменение протекания химических реакций в печи.

5. Разработан алгоритм адаптивной настройки регулятора, который позволяет реагировать системе управления на изменяющиеся технологические параметры – влажность и зольность восстановителей. Подобный алгоритм корректирует настройки регулятора без специальных управляющих воздействий на контур управления.

6. Для реализации способа повышения эффективности контроля и управления предложено внедрение в существующую

SCADA-систему дополнительных параметров – это адаптивный регулятор и система контроля положения электрода в РТП.

7. Рассчитан экономический эффект от внедрения программно-технического комплекса для одной печи. Который составит 4.978 млн. рублей, срок окупаемости – менее одного года.

В дальнейшем планируется продолжение работы в рамках НИР, связанных с модернизацией кремниевого производства, внедрением MES-систем для повышения информативности, контроля основных и вспомогательных производственных параметров, которые используются для управления предприятием.

Содержание работы отражено в следующих основных публикациях:

В изданиях из Перечня ВАК

Мартынов, С.А. Постоянная составляющая фазного напряжения в электродной печи и её использование для характеристики плавки / А.А. Педро, В.Ю. Бажин, А.П. Суслов, С.А. Мартынов // Сталь. – 2017. – №6. – С. 21- 24.

Мартынов, С.А. Состояние и перспективы контроля и управления руднотермическими печами в производстве металлургического кремния / С.А. Мартынов, В.Ю. Бажин // Электromеталлургия. – 2019. – №5. – С. 11-16.

В издании, индексированном в международной базе Scopus:

Martynov, S. Application of Production Processes Control Algorithm Using Adaptive Control System / I. Beloglazov, P. Petrov, S. Martynov// International Russian Automation Conference (RusAuto-Con). – 2018.

Martynov, S. A. Improving the management process of the carbothermic reduction of metallurgical silicon / S. A. Martynov, V. Yu. Bazhin // IOP Conference Series: MSE, Krasnoyarsk V. 537. – 2019. –P. 1-4.

Martynov, S. A. Improving the control efficiency of metallurgical silicon production technology / S. A. Martynov, V. Yu. Bazhin // Journal of Physics: Conference Series – V. 1399. – 2019. –P. 1-5.

В прочих изданиях:

Мартынов, С.А. Адаптивная система управления производства металлургического кремния в руднотермической печи / С.А. Мартынов, В.Ю. Бажин // Сборник научных трудов по материалам I Международной научно-практической интердисциплинарной конференции, г. Москва: НОО «Профессиональная наука». – 2017. – С. 172 – 180.

Мартынов, С.А. Контроль положения электрода в руднотермической печи / С.А. Мартынов, В.Ю. Бажин // Сборник научных трудов по материалам I Международной научно-практической конференции // Санкт-Петербург: НОО «Профессиональная наука». – 2017. – С. 388 – 394.

Мартынов, С.А. Новый принцип управления процесса карботермического восстановления кремния в руднотермических печах / С.А. Мартынов, В.Ю. Бажин // XVI Международный междисциплинарный форум молодых ученых «Наука, технологии и инновации: тенденции и направления развития» г Москва: НОО «Профессиональная наука», – 2019. – С. 32 – 36.

Патенты на изобретения, свидетельства на программы для ЭВМ:

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017611642 Российская Федерация. Система контроля электрода руднотермической печи в процессе получения металлургического кремния карботермическим способом: №2016663921: заявл. 19.12.2016: опубл. 07.02.2017 / В.Ю. Бажин, А.В. Бойков, **С.А. Мартынов**, Л.Н. Никитина // Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 8 февраля 2017 г.

Патент №2612340 Российская Федерация, МПК G05B 13/04 (2006.01) Адаптивная система управления: № 2015148330: заявл. 10.11.2015: опубл. 07.03.2017 / Белоглазов И.И., **Мартынов С.А.**, Фитерман М.Я., Мартынова Е.С.; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 8 с.: ил. – Текст: непосредственный.