

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



На правах рукописи

МАРТЫНОВ Сергей Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ В РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ
ПЕЧАХ**

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

Диссертация
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

доктор технических наук, доцент

Бажин Владимир Юрьевич

Санкт-Петербург – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ.....	11
1.1 Анализ мирового и российского рынка кремния.....	11
1.2 Современное состояние и тенденции развития РТП.....	16
1.2 Типы печей.....	17
1.2.1 Система загрузки шихтовых материалов печи	21
1.2.2 Электрооборудование руднотермических печей.....	22
1.2.3 Распределение токовой нагрузки и тепловой энергии в ванне печи	24
1.3 Современные системы управления технологическим процессом	25
1.3.1 Печной контроллер и его функции	25
1.3.2 Интерфейс системы АСУТП.....	27
1.3.3 Структура системы управления производством.....	29
1.3.3 Анализ существующих систем автоматического управления процессом получения металлургического кремния.....	31
1.4. Выводы по Главе 1	37
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	39
2.1 Выбор и обоснование метода исследования	39
2.1.1 Автоматическая система ОНК.....	41
2.2 Программа экспериментальных исследований.....	42
2.2.2 Методика для определения зависимости степени отклонения электрода от осевого значения от его механической прочности	47
2.3 Обработка экспериментальных данных.....	49
2.4. Выводы по главе 2.....	54

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАФИТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ...	55
3.1. План проведения эксперимента.....	55
3.2. Статистическая обработка результатов эксперимента, построение математической модели поведения исследуемых характеристик	56
3.3 Определение степени отклонения электрода от своего осевого положения	62
3.4 Программный комплекс для определения положения электрода.....	63
3.5 Преобразование электрической энергии в тепловую в РТП	65
3.6 Выводы по Главе 3	71
ГЛАВА 4 РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧЬЮ	73
4.1 Моделирование процесса восстановления кремния карботермическим способом.....	73
4.1.1 Процесс механизма восстановления кремния.....	73
4.1.2 Дозирование шихтовых материалов	78
4.2 Разработка адаптивной системы управления	81
4.2.1 Разработка способа управления с учётом баланса углерода	81
4.2.2 Разработка адаптивного регулятора.....	86
4.3 Расширение возможностей автоматизированного контроля и управления существующей SCADA-системы	89
4.4 Экономическая эффективность от внедрения АСУТП с расширенными возможностями	92
4.5 Выводы по Главе 4	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	100
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	101

ВВЕДЕНИЕ

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 кварцосодержащего 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, неизбежно 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, позволяющий 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 опуска (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 исследования

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.

Достоверность результатов

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 ре-

зультаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, 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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

1.1 Анализ мирового и российского рынка кремния

Кремний является основным сырьем для целого ряда отраслей промышленности – металлургии, химии, электроники и т.д. Он используется для алюминиевых сплавов – силуминов в цветной металлургии, а в чёрной – как легирующая добавка при производстве различных сортов сталей. Поликристаллический кремний применяют для производства солнечных батарей и различных видов электроники.

Мировое производство по подсчётам специалистов составляет примерно 2,3 млн тонн, более половины объёма приходится на КНР, около 40% — на Европу и США [125]. В РФ металлургический и рафинированный кремний производится на заводе ЗАО «Кремний». Такой кремний имеет большой объем примесей и не применим без дополнительной очистки для производства микросхем или солнечных батарей, его необходимо переработать в поликремний (мировое производство составляет 220 тыс. тонн). Динамика цена на поликристаллический кремний приведена на рисунке 1.1.

За последние десять лет мировое потребление и производство кремния имело значительный рост [127]. С другой стороны, цена за последние 10 лет снизилась в несколько раз с 62 до 19 тысяч долларов за тонну, причина такого положения – это политика Китая, связанная с наращиванием собственных мощностей по производству поликремния.

В настоящий момент Южная Корея, ФРГ, Япония, США и Тайвань являются основными экспортёрами кремния. Большой объём производства солнечных панелей и инвестиции в этот сектор промышленности повышают спрос на продукцию, что в итоге привело локализации на китайских предприя-

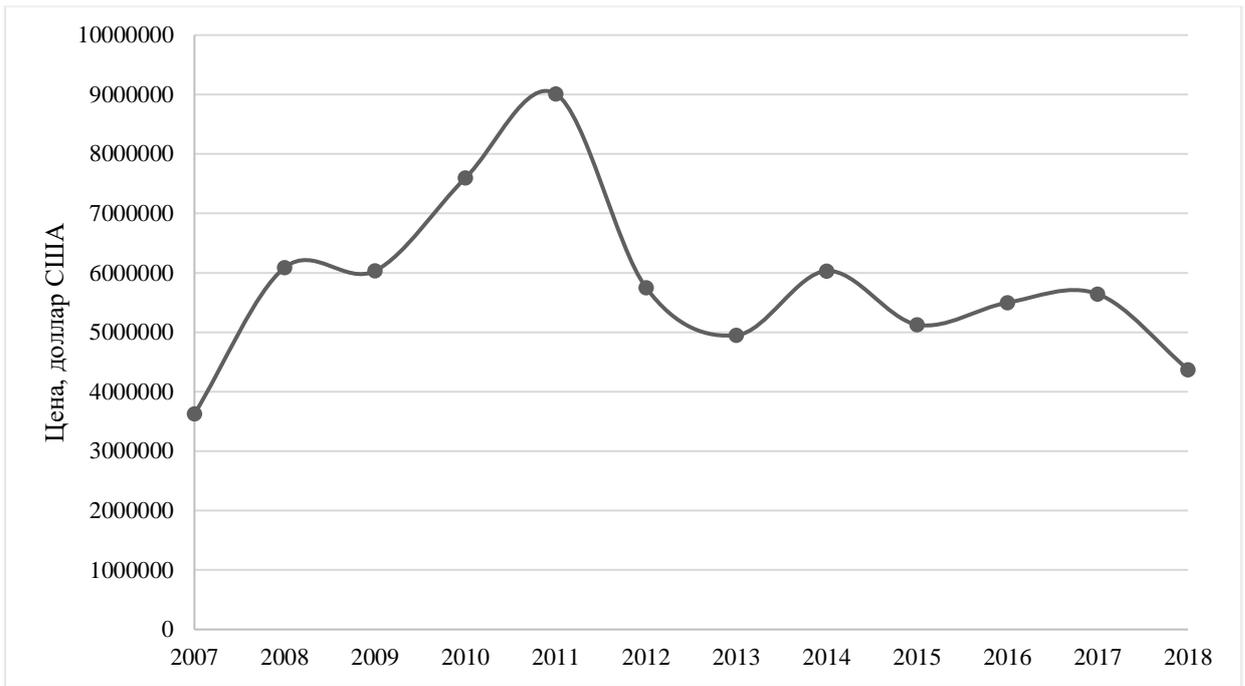


Рисунок 1.1 – Динамика цен на поликристаллический кремний
 тиях полного цикла производства солнечных панелей с монополией производ-
 ства электроники при сокращении мирового экспорта кремния. Необходимо
 отметить, что за 2018 год китайский импорт составил порядка 2,5 млрд долла-
 ров [121]. Динамика объёма производства поликристаллического кремния
 приведена на рисунке 1.2.

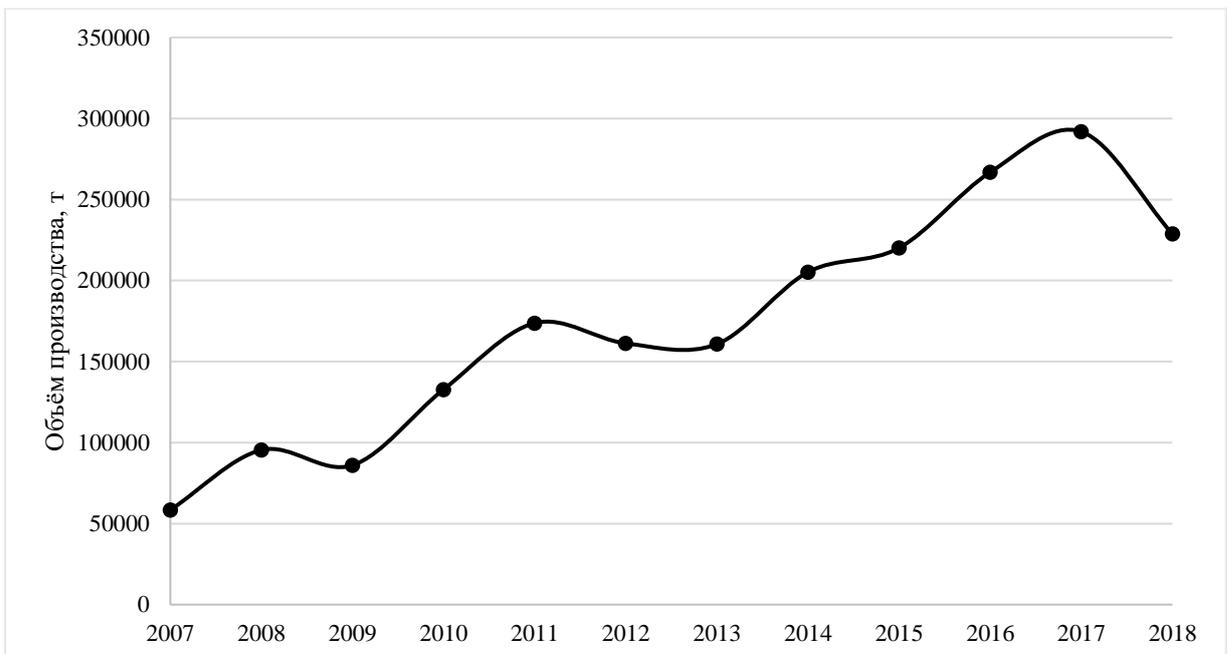


Рисунок 1.2 – Динамика объёмов производства поликристаллического
 кремния

В России не производится кремний высокой чистоты для производства электроники и солнечных панелей, он импортируется, и объём этого рынка по сравнению с мировым менее 0,5%. По состоянию на 2018 год было закуплено кремния «солнечной» чистоты более чем на 61 млн. долларов, максимальное значение за последнее десятилетие. Эти цифры говорят сами за себя – в России появилась и стабильно растёт высокотехнологичная отрасль промышленности.

ГК «Титан» определила место строительства нового завода по производству металлургического кремния, его планируется построить в Челябинской области. Ранее ими был построен и запущен в 2010 году завод мощностью 25 тысяч тонн в Казахстане, но вскоре в результате политической и экономической ситуации компания лишилась прав собственности на него.

В начале декабря 2019 года был остановлен завод РУСАЛа по производству технического кремния ООО «РУСАЛ Кремний Урал». Производство металлургического кремния низкого качества при существенной доле экологически опасных выбросов микрокремнезема и углерода в современных экономических условиях является убыточным. Падение цен на кремний на мировом рынке продолжается, в связи с такой неблагоприятной тенденцией было принято решение об остановке производства уральского кремния до стабилизации цен на рынке.

РОСНАНО несколько лет назад разрабатывало проект строительства завода «Нитол» в городе Усолье-Сибирское по производству поликристаллического кремния и изделий из него мощностью 5 тысяч тонн в год. Но в 2013 году было принято решение о прекращении стройки в связи с резким снижением цен на его продукцию, несмотря на то, что первая очередь была построена. Кроме этого, применение хлора для получения «солнечного» кремния является чрезвычайно опасным с точки зрения возможных утечек и его воздействия на окружающую среду.

Анализ состояния технологии и технический аудит производства металлургического кремния, выполненный в 2018 году в г. Каменск-Уральске, показал причинно-следственную связь остановки нерентабельного предприятия ООО «РУСАЛ Кремний Урал»:

– одной из причин остановки завода являлось нестабильное качество исходного сырья, так как, основная доля кварцита поставлялась с Украины, а отечественная сырьё использовалось как замена, когда импорт заканчивался. За последние 3 года предприятие имело 6-7 поставщиков кремнезёма, у всех различные примеси и доля SiO_2 . Это, естественно, приводило к изменениям качества и марок самого металлургического кремния;

– второй причиной было отсутствие современной системы газоочистки необходимого типа (ГОУ были демонтированы с электролизных серий Богословского алюминиевого завода);

– третья причина — это отсутствие технологии переработки кремниевой пыли (микросилики), которая может использоваться в качестве сырья в строительной отрасли или в нефтяной промышленности как тампонажный раствор;

– четвертая причина – морально устаревшее технологическое оборудование, отсутствие современных систем контроля и управления технологическим процессом, модернизация не проводилась с момента пуска завода;

– последней причиной является низкий уровень квалификации технического персонала и отсутствие достаточного опыта работы на подобном оборудовании.

Строительство заводов по производству металлургического кремния на территории РФ с учётом существующей конъюнктурой рынка и экономической ситуации – крайне сложная комплексная задача, но она может быть решена комплексно [54, 56].

Для решения проблемы необходима концепция «Строительство и организация кремниевого производства замкнутого цикла», и для этого необходимо:

- сделать переход от существующей технологии получения технического кремния на получение кремния высокой чистоты 99,9-99,99% через этапы рафинирования или высокотемпературной обработке (в потоке плазмы) кремниевого расплава с избирательным удалением;
- ориентировать завод под определённый тип сырья (кварц и древесный уголь) с логистикой расположения рудников и заводов не более 500 км, исключая изменение его качества;
- оснастить современными системами аспирации отходящих газов (ГОУ) со степенью газоочистки 98,5-99,0%;
- внедрить современные АСУ ТП со SCADA-системами и минимизировать неконтролируемые параметры, исключив операции визуальной оценки и ручного измерения;
- использовать современные разработки и технологии рафинирования кремния, вместо его продувки смесью сжатого воздуха и технического кислорода, ориентированные на снижение углеродного следа [1];
- разработка технологии замкнутого цикла твердых отходов с использованием микросилики как в смежных отраслях, так и в качестве возвратного материала в виде брикетов [1].

В КНР на предприятиях по производству кремния высокой чистоты большинство этих мероприятий решены на государственном уровне компенсацией части рисков, что обеспечивает устойчивый рынок сбыта готовой продукции, например, для развития химической и металлургической промышленности, производства солнечных батарей.

Особенность производства металлургического кремния заключается в том, что поскольку кремний является самым распространённым элементом в земной коре, то главным фактором эффективного получения кремния является технологии восстановления и очистки кремния наряду с наличием рынков сбыта продукции и ценой на электроэнергию.

1.2 Современное состояние и тенденции развития РТП

Металлургический кремний в промышленности получают карботермическим восстановлением, данный процесс проводят в руднотермических печах [12, 17, 47, 120].

РТП имеют следующие технологические и технические особенности:

- высокие значения удельного сопротивления нагретых шихтовых материалов;
- большое количество технологических операций и их цикличность, которые в свою очередь оказывают существенное влияние на конструктивные элементы и электрические параметры печи;
- высокая энергоёмкость технологических процессов, когда удельный расход электроэнергии может достигать 12000–16500 кВт·ч/т;
- использование агрегатов большой единичной мощности для промышленного производства, в частности кремния;
- руднотермические печи, как правило, работают в непрерывном режиме, и планово-предупредительный ремонт возможен один раз в 1,5-2 года, вследствие этого, необходима высокая надёжность работы самой печи в период эксплуатации и её вспомогательных систем;
- в отличие от дуговых сталеплавильных печей (ДСП) характерен более устойчивый электрический тепловой режим [13, 14, 18].

В таблице 1.1. представлены технические характеристики типовых РТП для производства технического кремния.

Таблица 1.1 – Сравнение технических характеристик РТП для производства технического кремния

Наименование параметра	РКО - 11,0	РТП 16,5	РТП 25
Диаметр электродов	710	1205	1205
Загрузка шихты на 1 МВт/ч, кг	200-220	185-200	200-220
Напряжение холостого хода, В	142 - 224	130-224	142 - 224
Мощность, МВт	11	16,5	25

Продолжение таблицы 1.1

Наименование параметра	РКО - 11,0	РТП 16,5	РТП 25
Ток, кА	40-50	21 - 34	21 - 34
Ступеней напряжения	19	17/19	23
Коэффициент мощности (cos φ)	0,84 - 0,88	0,78-0,81	0,81-0,85
Трансформатор	ЭОЦНК- 12500/10УХЛ4	ЭОЦН – 12500/10У3	ЭОЦ НК- 21000/10
Количество электродов	2	3	3

1.2 Типы печей

Обозначение РТП указывает на конструктивные особенности, мощность, а также материал, который в них получают [10].

$\frac{P}{1} \frac{K}{2} \frac{O}{3} - \frac{25}{4} \frac{Kp}{5} - \frac{3}{6} \frac{y}{7}$

– в первой позиции указывается обозначение вида печи, например, Р – руднотермическая печь;

– во второй – указывается геометрическая форма ванны печи, например, П - прямоугольная или К – круглая форма;

– в третьей – указывается тип печи: З – закрытая, О – открытая;

– четвёртая позиция указывает номинальную мощность печи в МВ·А обозначают цифры;

– пятая позиция указывает на продукт, который получают в печи, например, К – карбид кальция; Кр – кремний; Ф – фосфор; КТ – титановый шлак; Ш – штейн; Ц – печи цветной металлургии;

– шестая позиция обозначает количество электродов;

– седьмая позиция — это буква у, если имеется установка компенсации реактивной мощности.

Обозначение печи, РКО-25Кр-3у – это руднотермическая круглая открытая трёхэлектродная печь мощностью 25 МВ·А для производства технического кремния с установкой продольной компенсации мощности, или РПО-12,5 - руднотермическая прямоугольная открытая печь мощностью 12,5 МВ·А.

Иногда к печному оборудованию для производства восстановительных плавок предъявляются взаимоисключающие требования. В итоге в химической и металлургической промышленности используются печи, которые конструктивно приспособлены под конкретный технологический процесс, но существенно различаются между собой [10].

По причине различного химического состава перерабатываемого кварцевого сырья вызвано разнообразие конструкций РТП, и также большим ассортиментом продукции. Логично выделить пять основных типов процессов и схем печей [10, 44]:

- малошлаковые или бесшлаковые печи предназначены для получения карбида кальция, ферросплавов;
- многошлаковые процессы предназначены – это процессы получения фосфора и других материалов;
- печи для рафинирования металла отличаются от многошлаковых периодичностью работы: загрузкой и сливом, производящимся при наклоне печи.
- блок-процессы – это процессы для выплавки ферровольфрама и электрокорунда;
- печи для получения огнеупоров, в них проводя нагрев открытой дугой и постепенной посыпкой шихтовых материалов.

В РТП используют следующие виды электродов:

- угольные, диаметром до 1200–1400 мм;
- графитированные, диаметром до 800 мм;
- самоспекающиеся электроды, диаметром до 2000 мм или прямоугольные размером 3200x850 мм.

В отличие от ДСП значение сопротивления на РТП ниже, поэтому вторичное напряжение печного трансформатора ниже, а значение тока выше при одинаковых мощностях примерно в полтора-два раза. Этот фактор приводит к

усложнению конструкции короткой сети и проблемам регулирования и управления токовой нагрузкой, для обеспечения симметричности распределения мощностей по фазам, также для снижения сопротивления активного и индуктивного [25, 26, 96]. Аудит показал, что именно на этапе управления нагрузкой происходят отклонения, связанные с непостоянством контроля и оперативным вмешательством лишь при отклонениях технологического процесса. Иначе говоря, регламентные операции по ручному выбору ступени трансформатора зачастую не согласуются с тепловым режимом и текущей технологической ситуацией.

Система охлаждения пакета трубчатых шин работает за счет водооборота: когда вода проходит внутри токоведущих труб и возвращается на градирни. Одновременно с этим конфигурация выполнена таким образом, чтобы шины с током противоположного направления располагались как можно ближе с целью снижения реактивного сопротивления.

В РТП высокой мощности ванна имеет прямоугольную форму и снабжена шестью электродами, которые расположены в линию. Электроды подключены к двум трёхфазным или трём однофазным трансформаторам. В последнем случае к трансформатору подключены два соседних электрода.

Чаще всего первичное напряжение печного трансформатора составляет 10 и 35 кВ, реже 6 кВ. В таблице 1.2 приведены основные электрические параметры РТП [10].

Таблица 1.2 – Характеристики РТП

Тип печи	Номинальная мощность трансформатора, кВА	Максимальный ток электрода, кА	Вторичное напряжение, В
1	2	3	4
РКО-2.5Н2	2,5		178—89
РКО-3,5 НОЗ	3,5	7,1	371—260
6РКЗ-2,5Фс	2,5	8,1	308—154
РКЗ-16, 4Н08	16,5 (3x5,5)		204—130
СКБ-6002А	3,6		421—193
РПЗ-482	63 (3x21)		238—137

Продолжение таблицы 1.2

Тип печи	Номинальная мощность трансформатора, кВА	Максимальный ток электрода, кА	Вторичное напряжение, В
РПЗ-33Ш-Н02	33 (3x11)	25,8	800—475
РКЗ-72Ф-М1	72 (3x24)	92,5	649—149

Для повышения коэффициента мощности печи снабжают автоматическими УКРМ. Печи отечественного производства комплектуются продольными УРКМ, а зарубежные – поперечные [10].

При подборке УРКМ учитывается возможность их использования как автоматических регуляторов нагрузки, для уменьшения активной и реактивной нагрузки на сеть в часы «пик».

Как было отмечено выше, РТП имеют высокий удельный расход электроэнергии, и для некоторых процессов он составляет [10, 19]:

- 15000÷17000 кВт·ч/т – при производстве металлургического кремния;
- 10000÷16000 кВт·ч/т – при производстве фосфора;
- 8800÷9700 кВт·ч/т – при производстве 75% ферросилиция;
- 4700÷4800 кВт·ч/т – при производстве 45% ферросилиция;
- 4100÷4700 кВт·ч/т – при производстве силикомарганца;
- 3000÷3500 кВт·ч/т – при плавке огнеупоров «на блок»;
- 2800 кВт·ч/т – при плавке нормального электрокорунда;
- 720 кВт·ч/т – при производстве медно-никелевого штейна.

В РТП электрическая энергия дуги переходит в тепловую за счёт прохождения тока через электропроводную шихту или электропроводный расплав с выделением джоулева тепла. Несмотря на такие различия между физическими процессами в ДСП и РТП, конструктивно они похожи, и их можно рассматривать как дуговые установки [29, 32].

Представляет научно-практический интерес, учитывая особенности управления токовой нагрузкой печей для производства кремния, внесение корректировки в выбор ступени трансформатора в соответствии с температурным

режимом работы печи. Эту задачу можно решить путем построения математической модели при согласовании ее с электрическими параметрами печи.

1.2.1 Система загрузки шихтовых материалов печи

Одним из самых сложных этапов технологического процесса является загрузка шихты в ванну открытой РТП. Сложность операции заключается в том, что нужно загрузить более 50 т шихтовых материалов в смену в места, строго определённые технологическим регламентом на площади 70-80 м² расклённого колошника. Аудит показал, что именно в этот период появляются отклонения в материальном балансе.

Обеспечение герметичности – одна из главных задач при эксплуатации закрытых печей. Процесс подачи шихты в печь такого типа требует не только полной механизации, но и применение средств автоматизации. Особенностью таких печей является ограниченный период времени для возможности оперативной корректировки и подачи шихты, поскольку необходимо время для того, чтобы новая порция расчетного материала была загружена в печь в определенный момент. Полная автоматизация и механизация данной операции практически полностью снизит влияние человеческого фактора.

Проблемы нормального схода шихтовых материалов с загрузочных устройств – наиболее частая проблема печей закрытого типа, она затрудняет стабильность процесса эксплуатации РТП. Для предотвращения утечек печных газов через труботочки необходимо точно поддерживать разрежение под печным сводом и контролировать степень засорённости пылью газоходов и подсводного пространства [87, 95]. Реле перепада давления и контроль уровня запылённости в газоходах (в зависимости от уменьшения размера сечения) могут снять данную проблему и обеспечить устойчивый режим загрузки печи.

Из вышеперечисленного можно сделать вывод, что для руднотермических печей подобного типа необходима более точная работа системы дозирования и подачи шихтовых материалов в отличие от печей открытого типа, что может стать дополнительным контролируемым параметром для АСУ ТП.

Известно, что [19] большая часть РТП работает в полунепрерывном режиме работы, то есть загрузка осуществляется постоянно, а слив шлака и продукта происходит периодически, по мере их наработки. Например, так работают печи для производства кремния на ЗАО «Кремний», когда слив расплава происходит через равные промежутки времени.

В состав современных систем загрузки закрытых печей входят бункеры для хранения сырья, установленные над печью и изготовленные из стали с износостойкой нижней секцией. В бункерах содержится смесь сырьевых материалов, поступающая из дозирочной системы. Каждый бункер загрузки печи снабжен приборами для определения уровня материала в бункере.

Загрузочные бункеры соединены с печью течками, которые идут от днищ бункеров и заканчиваются под вытяжным зондом в водоохлаждаемой секции. На загрузочных течках установлены вибропитатели, позволяющие отсекают систему загрузки печи и загружать сырье в печь. Автоматическая система управления сопоставляет уровни бункеров хранения и определяет, в какой бункер прежде всего нужно подать сырье. Однако существуют сбои системы контроля и подачи, и в первую очередь, это связано со отслеживанием древесного угля в бункерах. Как показал аудит, это происходит из-за повышенной влажности древесного угля, по сравнению с регламентными значениями, в следствие адсорбционных свойств угля – поглощение воды из окружающей среды.

1.2.2 Электрооборудование руднотермических печей

Как было отмечено выше, у РТП электрический режим работы более устойчивый чем у ДСП. Тем не менее, в смену РТП может срабатывать защита

до двух или трёх раз и отключать печь. Как правило используют высоковольтные выключатели, ресурс работы которых рассчитан на большее количество срабатываний. Но в целом электрооборудование РТП и схемы его подключения немногим отличается от общепринятых схем питания мощных энергопотребителей [22, 52].

РТП чаще всего имеет несколько трансформаторов, все они имеют систему переключения ступеней напряжения под нагрузкой и без неё аналогично трансформаторам ДСП. Особо мощные РТП имеют более двух десятков ступеней напряжения [23, 85].

Несмотря на большое разнообразие технологических процессов, осуществляемых в РТП, и другие особенности печей, количество типов подключения короткой сети достаточно мало.

Одна из самых распространённых – схема подключения питания у печей с одним трансформатором. Короткую сеть делают с минимальным сопротивлением. Круглые 3-х электродные РТП изначально оснащались короткими сетями, подключенными к печному трансформатору по схеме «звезда».

Нередко используют три однофазных трансформатора взамен одного трёхфазного. Но всё же большинство современных круглых РТП оснащены одним трёхфазным трансформатором, электроды на которых подключены по схеме «звезда» на электродах [9].

Есть опыт эксплуатации РТП работающих на постоянном токе, они аналогичны по конструкции ДСП, которые также работают на постоянном токе.

От перехода по постоянный ток положительный эффект будет также и для техпроцессов, работающих в режиме сопротивления, а не только для печей, которые работают в смешанном режиме.

Необходимо отметить, что от мощности установки зависит обоснование перехода с переменного на постоянный ток. Так, например, для получения сплавов на основе кремния, установка выпрямителей выгодна только при мощности РТП выше 25-30 МВ·А.

1.2.3 Распределение токовой нагрузки и тепловой энергии в ванне печи

Как указывалось выше, РТП можно разделить на печи сопротивления, на печи с открытой дугой и с закрытой дугой.

Максименко М.С. предложил обозначать долю электрической энергии, поглощаемую контактным промежутком между шихтой и электродом (расплавом) – p , то есть доля энергии, которая выделяется в электрической дуге или степень развития дугового режима [10, 50, 97]. При этом, долю энергии, которую поглощает шлак (расплав) или шихта – q . Таким образом работа в чисто дуговом режиме может быть описана как $q \approx 0, p \approx 1$. Нагрев сопротивлением – $q \approx 1, p \approx 0$. Смешанный тип нагрева $q \neq 0, p \neq 0$.

Процессы с открытой дугой – $q \approx 0, p \approx 1$, характеризуются развитым дуговым разрядом, горящим между расплавом металла и электродом [15]. Доля энергии, которая выделяется на сопротивление расплавленного металла ничтожно мала, но стоит отметить, что по конструкции эти агрегаты могут значительно отличаться от ДСП, но все же по рабочему режиму и эксплуатационным особенностям они больше похожи на них. Пример таких технологических процессов: производство марганца, безуглеродистого ферромарганца, никеля, чугуна, безуглеродистого феррохрома.

Несмотря на это, большинство РТП всё же работает в смешанном режиме, хотя и соотношение q и p может изменяться в разные стадии плавки при одном технологическом процессе. При получении высокоуглеродистого ферромарганца нормальная работа печи в режиме сопротивления – $q \approx 1, p \approx 0$ характеризуется практически полным отсутствием электрических дуг и большим количеством шлака. Почти вся энергия выделяется на сопротивлении. Лишь к концу плавления между расплавом и электродом загорается электрическая дуга [65].

Нагрев через сопротивление характерен для процессов, при которых электроды глубоко посажены в слой расплавленного шлака (плавка штейна) или электропроводной шихты (производство фосфора). В этом случае $q \gg p$, а

сильное развитие дугового разряда является нарушением технологического процесса [98, 106].

В нашем случае актуальным является получить косвенную зависимость выделяемой мощности от величины сопротивления шихты и расплава при согласовании распределения температур в рабочем пространстве печи РТП. Это поможет более полно контролировать процесс нагрева и расплавления кварца.

1.3 Современные системы управления технологическим процессом получения кремния

1.3.1 Печной контроллер и его функции

Компания "Tenova Pyromet" разработала печной контроллер, который не только реагирует на рабочие условия печи, но также прогнозирует результат изменений управляющих воздействий. После проведения сбора информации автоматически выбирается управляющее действие, которое обеспечивает наиболее близкие показатели печи к требуемому уровню уставок тока и достижение заданных показателей за возможное минимальное время [118].

Необходимо отметить, что контроллер учитывает не только электрические параметры, но также рассматривает и соблюдает другие эксплуатационные требования печи, например, положение торца электрода [119].

В итоге система перемещения рамы с электродами может контролировать положения всех трех электродов в составе одной системы с множеством переменных, а не трех независимых систем управления, которые могут создавать помехи друг другу, в особенности в случае движения электрода.

Ввиду известного эффекта [22, 23], взаимных помех независимых систем управления электродами, а также дополнительных сложностей с несбалансированным током и напряжениями, подаваемыми на электроды, для устойчивого токораспределения в ванне печи рекомендуется применить систему с множеством переменных для управления положениями электродов.

Интерфейс АСУ ТП был разработан для удобства пользователя и включает следующие составляющие:

- обзорная страница;
- страница аварийных сообщений;
- страница трендов;
- раданные тренды;
- страница отчетов.

Печной контроллер выполнен на базе ПК и предназначен для управления работой руднотермической печи с погруженной дугой [1].

Ввиду специфики работы печей различного типа с погруженной дугой в течении разных промежутков времени оператору необходимо вмешиваться в работу печи и управлять процессом вручную. Контроллер не заменяет полностью действия оператора, а расширяет его возможности. В этом случае стоит вести речь о возможности использования цифрового двойника, подключенного параллельно в автоматизированную систему для адекватной оценки действий оператора и устранения ошибок управления на основе созданной базы данных.

Контроль сопротивления осуществляется за счет перемещения электродов. Электроды перемещают для поддержания полного сопротивления короткой сети в пределах диапазона нечувствительности вблизи уставки тока. Регулирование по току не рекомендуется для печей с низким значениям сопротивления [14,19, 27]. Все сигналы от датчиков печных электродов передаются непосредственно на платы вводов/выводов системы управления, а система управления передает данные, собранные с датчиков, в печной контроллер через OPC-интерфейс [7].

Подводимая мощность регулируется путем изменения положения переключателя ответвлений трансформатора [21]. В этом случае, как показал технический аудит, важно обеспечить корректную конфигурацию контроллера. В создаваемом в рамках исследования программном обеспечении (программа ЭВМ) необходимо настроить регулятор и датчики контроля изгиба электрода.

Для подобных печей рекомендуется использовать один печной контроллер во избежание дисбалансов между электродами.

1.3.2 Интерфейс системы АСУ ТП

Печной контроллер должен непрерывно взаимодействовать с программным логистическим контроллером ПЛК для управления и мониторинга технологического процесса. Все входные данные, используемые печным контроллером, поступают через OPC-сервер, который соединен с ПЛК. Все управляющие выходные сигналы для печи поступают с ПЛК, программное обеспечение печного контроллера устанавливает все выходные сигналы в ПЛК через OPC-сервер, на котором можно создавать базу данных для цифрового двойника (ЦД). Поскольку программное обеспечение печного контроллера работает через OPC-сервер, контроллер может подключаться к любому другому ПЛК при условии, что ПЛК имеет OPC-сервер.

В программном обеспечении печного контроллера имеется встроенный OPC-клиент, подключающийся к OPC-серверу. OPC-клиент разработан таким образом, что его можно использовать для любого типа конфигурации печи. Каждый вход и выход приписываются к ПЛК посредством OPC-переменной в сервере. Таким образом, OPC-клиент в печном контроллере привязывает все входы и выходы в программном обеспечении к соответствующему тэгу с возможностью параллельного включения цифровым двойником, который делает прогноз и дает рекомендации оператору на выполнение ручных операций.

Пример современной SCADA-системы отечественного производства компании TRACE MODE, используемой на ООО «Братский завод ферросплавов», изображен на рисунке 1.3.

Таким образом, современная система автоматизированного управления РТП должна обладать следующими функциональными особенностями:

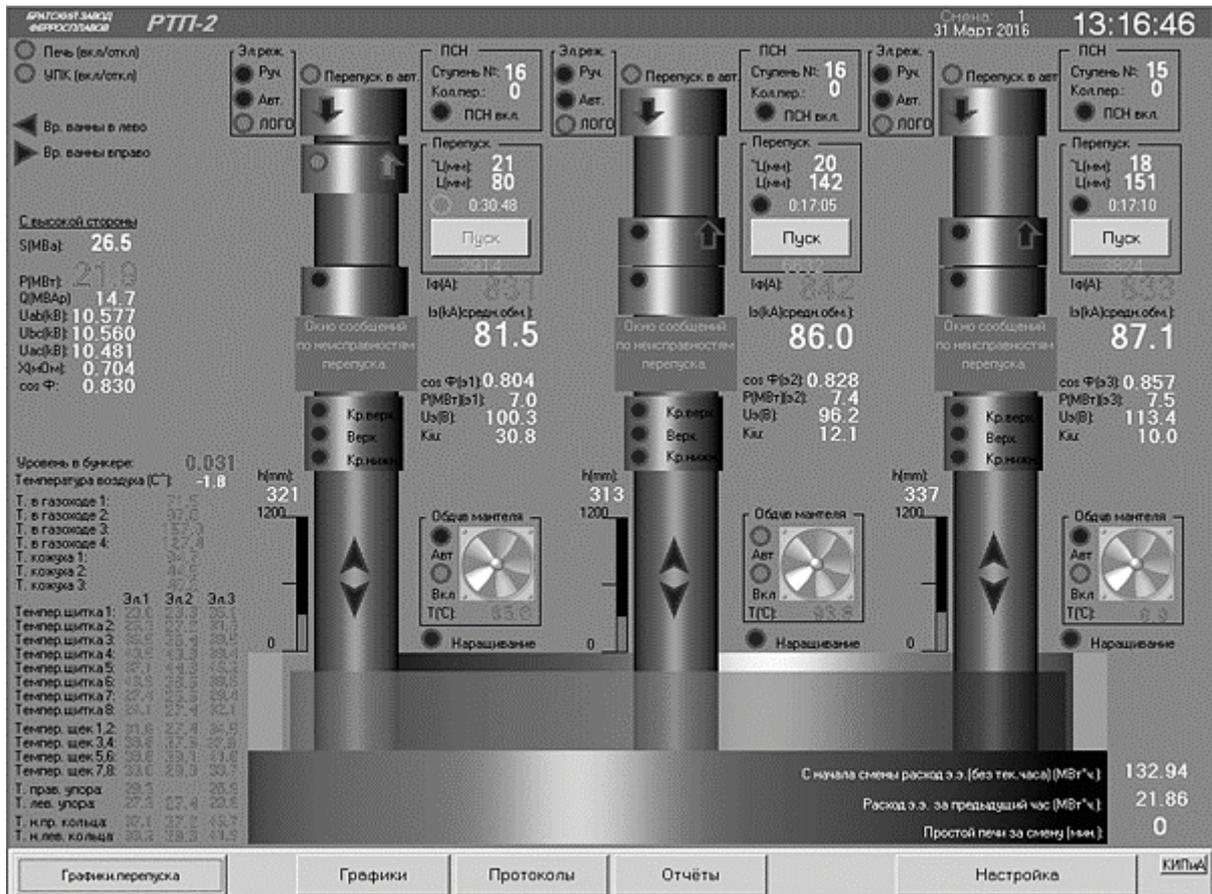


Рисунок 1.3 – Отечественная SCADA-система TRACE MODE на
ООО «Братский завод ферросплавов»

- Предоставлять операторам АРМа, находящегося в диспетчерской, возможность осуществлять мониторинг и управление всем оборудованием, параметрами параллельно с ходом процесса и прогнозом ЦД.
- Предоставлять возможность дистанционного включения всего технологического оборудования с АРМа.
- Обеспечивать полностью автоматизированные алгоритмы пуска, останова и перехода на другой режим.
- Обеспечивать полный алгоритм пуска транспортного оборудования с АРМа.
- Предоставлять операторам АРМа, имеющим необходимые права пользователей-администраторов, возможность изменять настройки, ПИД-регулятора [94, 128].

1.3.3 Структура системы управления производством металлургического кремния

Система управления предусматривает автоматизированное управление, защиту, мониторинг и отображение мнемосхемы на SCADA-системе информации для основного и вспомогательного оборудования печи [31, 39].

Система управления включает следующие позиции:

– Станции удаленных вводов/выводов, связанные с оборудованием комплекса и прочим оборудованием системы автоматизации, системами мониторинга и управления. По созданному в работе алгоритму станции удаленных вводов/выводов могут осуществлять сбор данных с датчиков, установленных на оборудовании комплекса и подавать управляющие сигналы с контроллера на исполнительные механизмы параллельно с ЦД.

– Система периферийных шин, соединяющая ПЛК со станциями удаленных вводов/выводов, интеллектуальными датчиками и системами управления вспомогательным оборудованием для расширения базы за счет ввода дополнительных параметров контроля.

– Программное обеспечение и графические средства, посредством которых можно разработать SCADA-систему, которая используется операторами АРМа и техническими специалистами для мониторинга управления и поиска неисправностей оборудования комплекса, через систему цифрового двойника.

– Созданный программный пакет, установленный на АРМе, обеспечит связь с ПЛК и с ЦД, а также обеспечит устойчивую работу с периферийными устройствами, синхронизацию, диагностику и сбор данных (Big Data).

– Все традиционные измерительные приборы КИП, работающие посредством импульсных линий, осуществляющие измерения и мониторинг технологических параметров оборудования и исполнительных механизмов управления, контролирующих ход процесса.

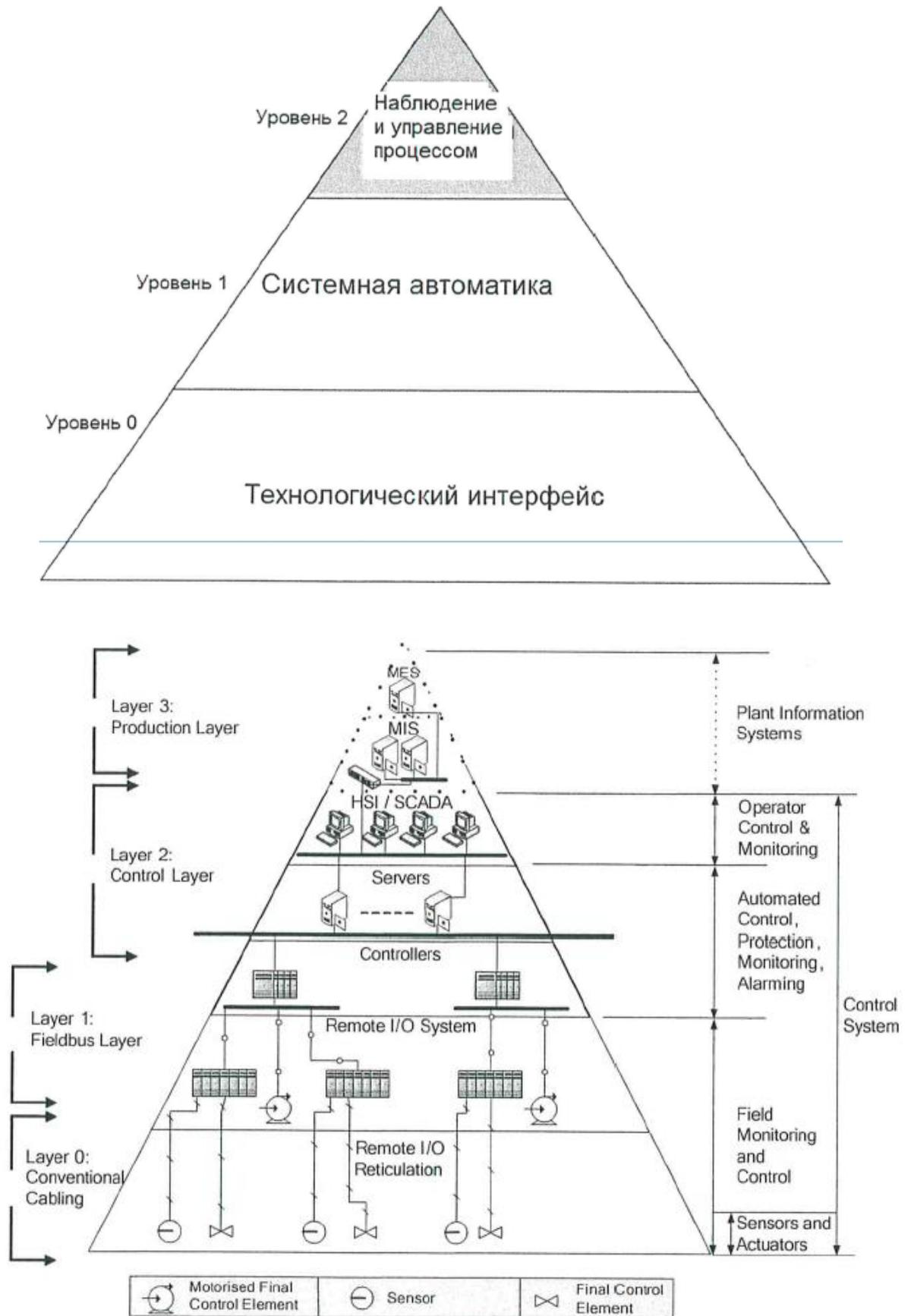


Рисунок 1.4 – Архитектурная схема современной системы автоматизации

Как показано в правой части вышеприведенного рисунка 1.4, система управления (включая уровни 0, 1, и 2) взаимодействует с заводской информационной системой [41, 104, 129].

Уровень управления производством, например, все аппаратные средства Управленческих Информационных Систем (MIS), Систем Управления Производством (MES).

Уровень 2. Уровень управления процессом, включая системы управления процессом типа SCADA и EXPERT.

Уровень 1. Включая ПЛК, платы вводов/выводов и все необходимое оборудование для связи и интерфейса, периферийные сети.

Уровень 0. Уровень датчиков и исполнительных механизмов.

1.3.3 Анализ существующих систем автоматического управления процессом получения металлургического кремния

К современным системам автоматического управления предъявляют следующие требования [10, 46]:

- высокое быстродействие для устранения обрывов дуги и коротких замыканий;
- независимость регулирования по каждой из фаз в случаях возмущения на соседних фазах;
- снижение вероятности поломок электродов при перепуске и зажигании дуги;
- минимальная зона нечувствительности, без превышения порогового значения, при котором может возникать процесс «макания» электрода в расплаве, что вызывает науглероживание расплава и повышенный расход электродов;
- устранение зависимости мощности дуги от напряжения питания печи, изменение электрических характеристик токоподвода;
- изменение задания мощности без резких скачков;

- снижение износа механизма перемещения электрода за счёт рационального режима выключения электроприводов;
- обнаружение системой управления токонепроводящей шихты, изгиба электрода;
- изменение коэффициентов регулятора (адаптация) на разных стадиях процесса плавки.

В современных системах управления применяют в качестве параметров регулирования значение тока или импеданс. Это приводит, прежде всего, к взаимному влиянию контура управления одним электродом на другие, иными словами, при обрыве или коротком замыкании в контуре управления создаются помехи, и регулятор даёт команду на перемещения электродов. Это сказывается на точности регулирования, и система перемещения находится постоянно в движении, что приводит к быстрому износу.

Как утверждал в своей работе И.В. Лапшин, поскольку напряжение практически не зависит от значения силы тока, то для автоматического регулирования можно использовать как параметр регулирования напряжение дуги. Этот параметр вычисляется с помощью математической модели из-за отсутствия физической возможности непосредственного измерения. Широкое применение ПЛК в АСУ ТП позволяет вычислять не только напряжение дуги, но и её сопротивление, а также мощность, выделяемую в дуге [46].

Большинство современных систем управления работает по аналогичному алгоритму, это часто ведёт к поломкам электрода при касании шихты с высоким сопротивлением (токонепроводящей) или при перепуске электрода, поскольку в контуре управления оценивается только электрические параметры плавки, без учёта состояния электрода, в частности изгиба во время опуска электрода.

В работе С.В. Арменского разработана обобщённая математическая модель подэлектродного пространства РТП, на которой возможно исследовать

влияние химического состава исходного сырья, электрический режим, различные виды конструкций печей на распределении тепловой энергии в пространстве под электродом. Также он подтвердил, что мощность, выделяемая в дуге, увеличивается с возрастанием размера части восстановителя и сопротивления короткой сети [6].

Стоит отметить ряд недостатков данной разработке. Это прежде всего отсутствие возможности внедрить данную математическую модель в АСУ ТП, также на ней нельзя исследовать влияние изменений параметров плавки, таких как свойства исходного сырья, все величины являются константами.

Б.М. Горенский внёс несомненно большой вклад в развитие АСУ процессами получения цветных металлов (непрерывными многостадийными) на основе имитационного моделирования, создания на их основе системы помощи принятия решений (СППР), также автоматизированных обучающих систем для обучения технического персонала и операторов АСУ ТП для приобретения навыков рационального управления [24].

Подобные системы достаточно точно с погрешностью около 5% могут описать технологический процесс не только в рамках одного агрегата, а также в цепочке, то есть сразу целого технологического процесса. Такие системы не могут быть применимы непосредственно в самой АСУ ТП. Они являются надстройкой над ней – отдельной подсистемой, выдающей подсказки оператору о состоянии тех параметров процесса, которые не измеряются или которые непосредственно невозможно измерять, например, температура реакционной зоны в РТП. Подобные системы запоминают наилучшие решения, заносят их в специальный реестр, а потом их используют для подсказок оператору. Таким образом решение о конкретном действии или их последовательности остаются за оператором, частично человеческий фактор компенсируется за счёт обучения на компьютерных тренажёрах, но тем не менее он не исключён полностью.

В.А. Елизаров занимался разработкой систем управления РТП с закрытой дугой с возможностью контроля теплового состояния по нечётным гармоническим составляющим кривой фазного тока. Разработанная система способна работать в режиме реального времени и применяться непосредственно в контуре управления в АСУ ТП. Суть метода заключается в выделении мощности, образующейся в дуге от мощности, получаемой через сопротивление шихтовых материалов при прохождении тока [28].

Оценка степени развития дугового режима актуальна для технологических процессов, которые работают в смешанных режимах, и где критично сильное развитие дугового режима, например, из-за сильного пылевывоса для процесса карботермического получения кремния. Но для таких систем управления остаётся нерешёнными задачи безаварийного управления электродом или баланс восстановителя, его гранулометрический состав, влажность, зольность.

По мнению В.А. Ершова, важной задачей математического моделирования РТП является разработка методов расчёта активного и реактивного сопротивлений гетерогенных систем. Он предложил свой подход, основанный на исследованиях моделей с электролитом различных концентраций. В ходе экспериментов были установлены зависимости проводимости систем Т – Ж – Г от проводимости фаз, гранулометрического состава, степени газонаполнения. Также был установлен ёмкостной характер сопротивления систем Т – Ж, состоящей из раствора электролита и твёрдого проводящего дисперсного материала. Таким образом, была составлена математическая модель подэлектродного пространства [30].

Полученная математическая модель имеет ряд допущений:

– углеродистая зона состоит из плотного слоя кокса, находящаяся в токопроводящей шлаковой среде;

– в углеродистой зоне отсутствует интенсивное перемешивание газовой фазы с жидкой и вызванные конвекцией интенсивные пульсации жидкой фазы;

– частицы твёрдой фазы имеют постоянный плотный электрический контакт и постоянно имеет непрерывные токопроводящие цепочки.

Учитывая их, данную математическую модель возможно применять к многошлаковым процессам, а процесс карботермического восстановления кремния является малошлаковым.

Известна система, снижающая вероятность поломки электрода в момент зажигания дуги. Решение поставленной им задачи заключалось прежде всего в модернизации существующего механизма перемещения электрода с учётом насыпной плотности, коэффициентов упругости, геометрические размеры частиц шихтовых материалов. Модель учитывала такие механические параметры усилие и момент сопротивления от удара в режиме зажигания дуги и скорость перемещения электрода [57].

Данная система разработана для использования на системах управления, модернизируемых ДСП или РТП, работающих в дуговом режиме, где часто происходит обрыв дуги на начальной стадии плавки, когда нет устойчивого горения дуги. В процессе производства металлургического кремния процесс зажигания дуги происходит только в момент запуска печи после ремонта, который производится не чаще нескольких раз в год, поэтому подобная система снижающая вероятность поломки электрода не подходит для данного технологического процесса.

Н.В. Немчинова в своих работах предложила использовать восьмirezервуарную математическую физико-химическую модель, которая способна прогнозировать степень извлечения кремния при установленной комбинации шихтовых материалов, пылевывнос, химический состав шлака и полученного кремния [65, 66].

Данная модель работает достаточно эффективно, но в статическом режиме, на этапе, когда производится предварительный расчёт баланса восстановителя и кремнезёма. Математическая модель не предусмотрена для работы в динамическом режиме, в условиях изменяющегося состава шихтовых материалов и электрического и технологического режимов, что делает её невозможным для управления процессом получения металлургического кремния.

В своих известных работах [74-79], А.А. Педро создал систему контроля уровня расплава в ванне РТП, управление электротехнологическим режимом работы РТП, управление степени развития электрической дуги в РТП, контроль состояния расплава по величине постоянной составляющей фазного напряжения. Проведя теоретические исследования и обработав данные, полученные на промышленных установках, были получены выводы [74-79]:

- природы постоянной составляющей фазного напряжения, которое объясняется вентильным эффектом, он же в свою очередь возникает при прохождении переменного тока через разнородные материалы и разными температурами контактов;

- наиболее перспективным параметром оценки состояния режима работы РТП для систем управления может быть постоянная составляющая фазного напряжения;

- получено уравнение, которое связывает характер изменения постоянной составляющей с электрическими и технологическими параметрами РТП.

В результате данная система управления не способна адаптироваться к изменяющемуся качеству шихтовых материалов, оценивать механическое состояние электрода, при этом сохранять высокие показатели эффективности управления РТП.

Коллектив авторов Всесоюзного научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института электротермического оборудования ныне «Элтертехикс» [2, 3] в своих работах описывали систему управ-

ления, повышающую производительность путём повышения точности регулирования мощности на электродах и степень их заглубления. При уменьшении коэффициента заглубления электродов относительно коэффициента несимметрии напряжений перемещают электроды, если больше – изменяют напряжение на фазах. Была отмечена важность поддержания не только мощности каждого электрода, но и минимальной асимметрии заглубления электродов [2, 3].

Подобная система управления несомненно повысит производительность печи и снизит удельный расход электроэнергии, но его можно организовать только на печах, имеющих три однофазных трансформатора, а не один трёхфазный или два однофазных включенных параллельно.

М.С. Максименко – основатель отечественной электрометаллургической промышленности, первый исследовал взаимосвязь энергетических и технологических параметров. Позже данное направление исследований было продолжено и расширено в трудах Б.М. Струнского, С.И. Хитрика, С.И. Тельного, А.С. Микулинского, И.Ю. Кожевникова [59, 60, 101, 103].

1.4. Выводы по Главе 1

В данной главе рассмотрены:

1. Анализ мирового и отечественного рынка кремния показывает нестабильность цен, это связано прежде всего с политикой Китая по локализации производства кремния на своей территории. В России по этим причинам закрылся один из двух заводов, который производил металлургический кремний ООО «РУСАЛ Кремний Урал». Произведён комплексный анализ причин низких конкурентных качеств отечественного кремния и даны рекомендации, выполнение которых гарантированно повысит качество получаемого металлургического кремния и снизит его себестоимость.

2. Произведена оценка состояния современного состояния РТП и сравнительная характеристика различных моделей печных агрегатов. Рассмотрены особенности эксплуатации основных узлов РТП: системы загрузки шихтовых

материалов и электрооборудование, в том числе короткая сеть и основные схемы подключения нагрузки к РТП. Рассмотрены различные виды конструкций руднотермических печей. Отмечены особенности выделения тепловой энергии в РТП в зависимости от режима работы печи и от технологического процесса.

3. Выполнен анализ современных систем управления процессом получения металлургического кремния. Приведено детальное описание частей интерфейса SCADA-системы, основного контура управления. Рассмотрен контур управления мощностью, работающий по импедансу. Выполнено описание взаимодействия ПЛК со SCADA-системой. Сделано детальное описание структуры современной системы управления предприятием.

4. Производство металлургического кремния находится на том этапе развития, где необходимо внедрение многофункциональных систем автоматического управления, которые позволят получать целостное представление о ходе технологического процесса и проводить обучение оператора при помощи цифровых двойников.

5. Анализ систем управления процессом восстановления кремния в РТП, процессов протекающих при этом, взаимных связей технологических и электрических параметров, показал, что для эффективного управления технологическим процессом необходимо повышать уровень информативности и диагностику состояния процесса за счет создания базы данных.

В связи с вышеизложенным, цель диссертационной работы – повышение эффективности и расширение функций автоматизированного управления руднотермической печи при вводе дополнительных контролируемых параметров для стабилизации технологического процесса получения кремния.

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач разработан комплекс мер, который предусматривает проведение теоретических и лабораторных испытаний, полупромышленные испытания, создание новых научно-технических решений для повышения эффективности контроля и управления, стабилизации технологических параметров карботермического восстановления кремния. С целью повышения технико-экономических показателей производства кремния предлагается использование неразрушающего метода контроля и методов математического моделирования.

2.1 Выбор и обоснование метода исследования

Согласно ГОСТ 18353-79 вид и методы неразрушающего контроля классифицируются по физическому процессу, на основе которого получается первичная информация с контролируемого объекта. Виды неразрушающего контроля:

- магнитный метод, который основан на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом;
- электрический метод, который основан на регистрации параметров электрического поля, которое взаимодействует с контролируемым объектом или возникающего в контролируемом объекте в результате внешнего взаимодействия;
- вихретоковый метод, который основан на анализе электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте;
- радиоволновой метод, который основан на регистрации измерений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируемым объектом;
- тепловой метод, который основан на регистрации изменений тепловых или температурных полей контролируемых объектов, вызванных дефектами;

- оптический метод, который основан на регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего с контролируемым объектом;
- радиационный метод, который основан на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом;
- акустический метод, который основан на регистрации параметров упругих волн, возбуждаемых и (или) возникающих в контролируемом объекте;
- проникающими веществами, основан на проникновении вещества в полости дефектов контролируемого объекта.

Методы каждого вида НК классифицируются по следующим признакам:

- первичным информативным параметрам;
- характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом;
- способам получения первичной информации.

Учитывая жёсткие условия эксплуатации электродов в РТП: высокая температура, наличие мощных электромагнитных полей, сильная запылённость рабочей зоны, высокий уровень шума делают невозможным применение большинства методов НК. Оптический метод получает большое распространение на современных предприятиях металлургической промышленности, тем самым заменяя визуальный контроль. Основные преимущества оптического метода: отсутствие прямой связи контролируемого объекта и прибора; прибор не оказывает никаких воздействий на контролируемый объект; высокое быстродействие; высокая точность измерений; возможность варьирования разрешающей способности и диапазона измерений.

Визуальным контролем определяется множество параметров работы РТП, например, состояние электрода, величина конуса, который делают в процессе опиловки, количество кремния, выходящего из печи, поэтому в нашем

случае применение оптического метода при помощи лазерного дальномера наиболее приемлемый метод оценки состояния процесса и сбора данных.

Одной из целей работы является обеспечение безаварийной работы печи и сокращение удельного расхода электродов и электроэнергии. Цель возможно достичь оценкой степени отклонения электрода от своего осевого положения с применением лазерных измерительных приборов, исходя из этого стоит рассмотреть особенности данного метода применительно к РТП как к сложному технологическому объекту.

2.1.1 Автоматическая система ОНК

В технической литературе описаны системы, которые обеспечивают автоматизацию процесса оптического контроля. Функциональная схема автоматической системы показана на рисунке 2.1.

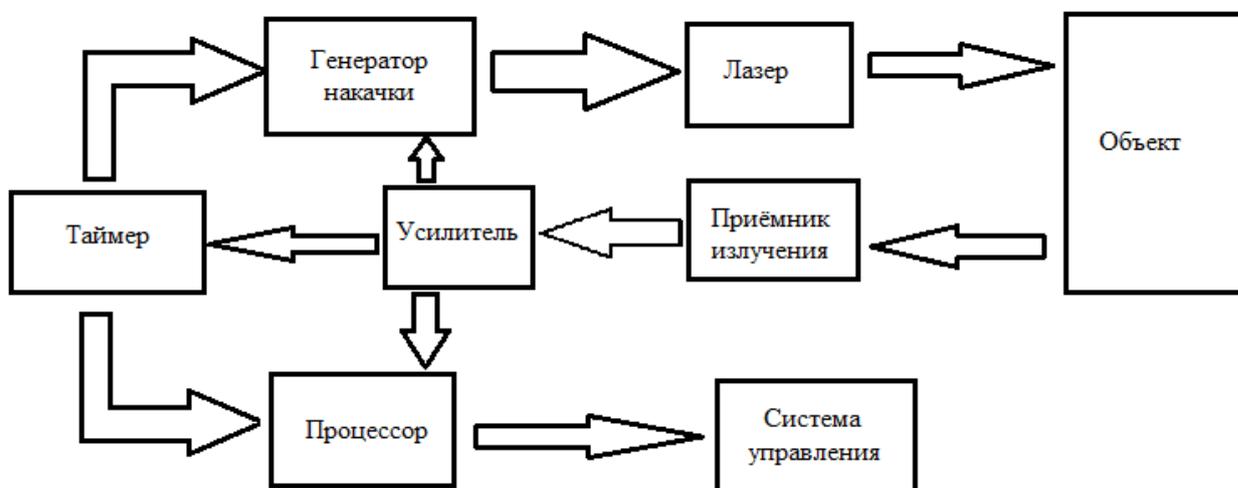


Рисунок 2.1 – Функциональная схема автоматической системы

В рассматриваемом случае объектом контроля является электрод. Измерительный сигнал с лазерного дальномера поступает на контроллер, установленный в шкафу управления, который обрабатывает поступающий сигнал и осуществляет выработку управляющих воздействий. Все данные технологического процесса отображаются на мнемосхеме АРМа, также в системе управле-

ния есть сервер, который позволяет накапливать и хранить все данные системы управления. Специальное программное обеспечения для обработки сигналов с лазерного дальномера не требуются, так как прибор промышленного исполнения и имеет стандартные интерфейсы для передачи данных [107,114].

2.2 Программа экспериментальных исследований

Программа комплексных исследований состоит из решения нескольких задач:

- создание лабораторной установки для изучения механических свойств графитированных электродов с функцией сбора данных;
- выявление влияния отклонения электрода от своего осевого положения (изгиб электрода) под действием силы тяжести;
- определение предельных значений электрода от осевого положения и нагрузки, передаваемой на электрод;
- определение влияния длин электрода на степень отклонения от осевого положения;
- разработка алгоритмов для безаварийной работы печи, который снизит вероятность поломки электрода;
- адаптация разработанных решений к условиям действующего производства металлургического кремния.

2.2.1 Лабораторная установка для изучения степени отклонения электрода от заданного значения

Лабораторные исследования проводились на экспериментальных установках, изображённых на рисунках 2.2 - 2.4, первая состоит из механического пресса с прикреплённым к нему тензодатчиком, вторая из двух штативов, лазерный дальномер и стержня.



Рисунок 2.2 – Схема лабораторной установки для изучения влияние степени отклонения электрода

Углеродистый электрод верхним концом закрепляется в зажим механического пресса, в котором установлен тензодатчик, а снизу он касается кварцевой шихты, которая находится в тигле. С каждым поворотом винта на прессе изменяется значение силовой нагрузки на подошву, которая воздействует на электрод, подобно реальному процессу погружения электродов в печи РТП в слой загруженной шихты. Данные с тензодатчика через АЦП передаются на ПК и записываются с периодичностью 2 секунды.

АЦП состоит из модуля НХ711 с усилителем и платы Arduino принимает данные с S-образного тензодатчика с наибольшим пределом измерения 300 кг.

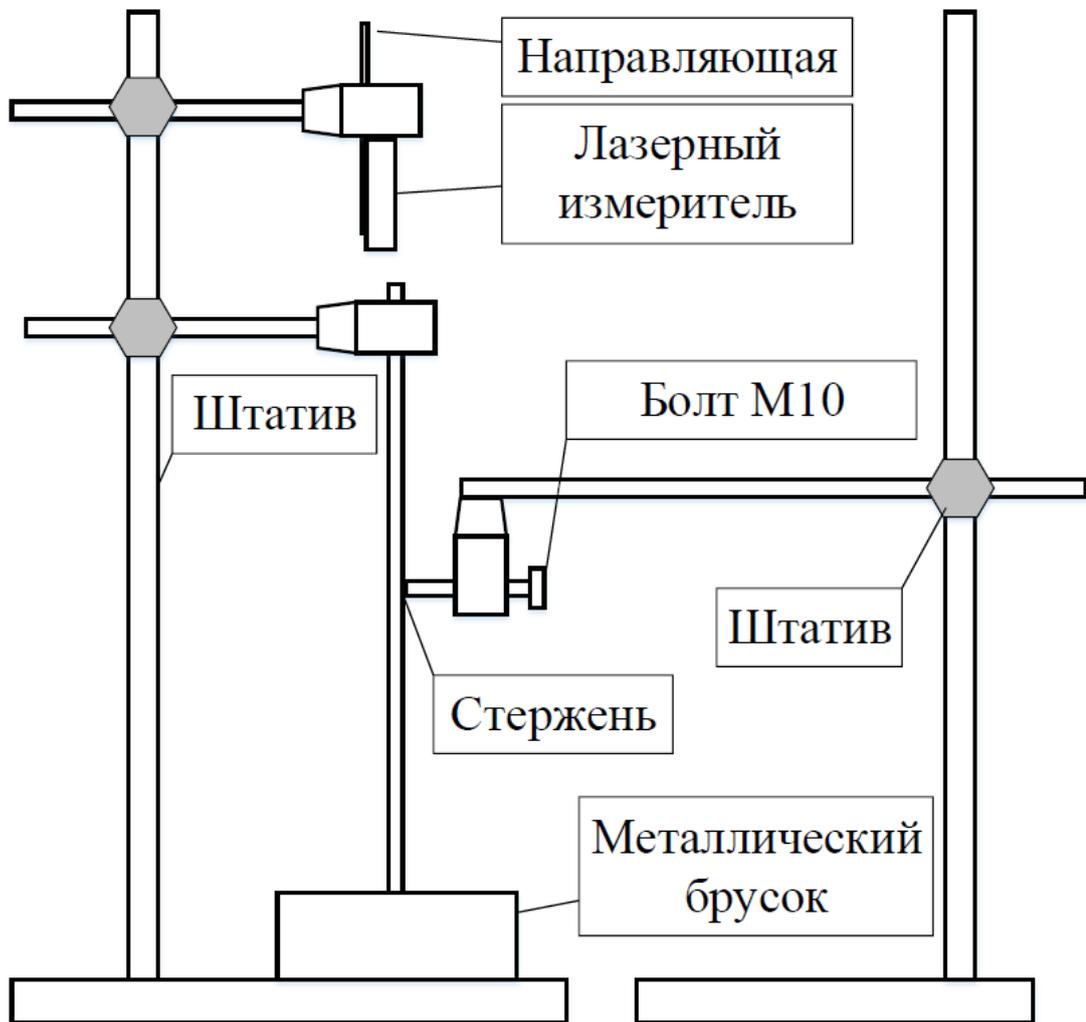


Рисунок 2.3 – Схема лабораторной установки для нахождения зависимости показаний лазерного измерителя от степени отклонения электрода

На второй лабораторной установке верхний торец стержня закрепляется зажимом, эмитируя тем самым реальное крепление электрода электрододержателем. Нижний торец вставляется в отверстие в металлическом бруске, таким образом эмитируется положение торца электрода, находящегося в шихте. Суть второго эксперимента – определение зависимости показаний лазерного дальномера, установленного параллельно электроду, от степени изгиба электрода.



Рисунок 2.4 – Лабораторная установка для нахождения зависимости показаний лазерного измерителя от степени отклонения электрода

Характеристики используемого оборудования приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики лабораторного оборудования

№ п/п	Наименование оборудования	Характеристики оборудования
1	Графитовый электрод	Марка СК, диаметр 6 и 8 мм, длина 300 мм. Изготовлены по ТУ 16-757.034-86. Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м, не более 8. Механическая прочность при изгибе, МПа, не менее 18,0. Содержание золы. %, не более 0,5
2	S-образный тензодатчик	Чувствительность $2,0 \pm 0,003 \text{ mV/V(ДЕЕ)}$, НПИ – 300 кг Класс точности С3, Ползучесть (30 мин), % от РПК 0.03%, Температурное отклонение чувствительности $0.02\% \text{ F.S/}10^\circ\text{C}$. Входное сопротивление $400 \pm 20 \Omega$ (1,5t-5t). Выходное сопротивление $352 \pm 3 \Omega$. Номинальный диапазон температур $-10^\circ\text{C} \dots +40^\circ\text{C}$. Предельно допустимая нагрузка 150%. Напряжение 2,5-5V DC. Класс защиты IP66.
3	АЦП	АЦП собран на микросхеме: НХ711, разрядность АЦП: 24-бит; коэффициент усиления канала А: 64; коэффициент усиления канала В: 32; частота измерений: 10 Гц; напряжение питания: 2,6 – 5,5 В; потребляемый ток: <10 мА; дифференциальное входное напряжение: $\pm 40 \text{ мВ}$
4	ПК	Intel Core 2 Duo, ОС Windows 7 32-бит, ОЗУ - 3Гб, физическая память - 250 Гб + специальное программное обеспечение Arduino
5	Тигель	Материал – графит, объем – 150 мл, диаметр внутреннего сечения – 35 мм
6	Пресс механический	пресс с упорным винтом; размер подвижной площадки 220x75 мм; размер опорной площадки 22x150 мм; высота между площадками 170 мм; толщина площадки 20 мм
7	Кабель USB	Разъем 1 USB А, Разъем 2 USB В, длина 1,8 м
8	Лазерный дальномер	Lotvum LV60, Дальность измерения: 60 м Точность измерения: $\pm 1,0 \text{ мм}$, Длина волны 630-670 нм

Выбор входных и выходных параметров: на основе сбора и анализа предварительной (априорной) информации по входному сигналу был детерминирован, то есть регистрируемый и управляемый (был зависим от наблюдателя оператора) параметром – степень сжатия электрода в прессе, усилие, прилагаемое на электрод, отображается на ПК и регулируется оператором, степень изгиба стержня. Наряду с ним на состояние исследуемого объекта могут

оказывать влияние нерегистрируемые и неуправляемые параметры, которые вносят систематическую или случайную погрешность в результаты измерений, например – ошибки измерительного оборудования, изменение свойств и размеров исследуемого объекта (электрода) в период эксперимента.

Таким образом, управление положением электрода и контроль его геометрии может стать дополнительным параметром для ввода в систему АСУ ТП для руднотермической печи.

2.2.2 Методика проведения экспериментов

Для проведения эксперимента в качестве эталона был выбран сварочный графитированный электрод, поскольку изготовление графитовых электродов, предназначенных для дуговой сварки или резки, стандартом не предусмотрено. Их можно изготовить из остатков или отходов электродов плавильных печей разрезкой с последующей механической обработкой.

Необходимо отметить, что регламентом допускается использование графитированных электродов для электрических сталеплавильных печей по ГОСТ 4426-80. *(Сварочные работы. Практический справочник Кашин Сергей Павлович). Основные свойства электродов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Основные свойства графитированных электродов

№ п/п	Свойство	Значение
1	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	25
2	Предел механической прочности при изгибе при разрыве	18 9
3	Плотность тока, А/см ²	150
4	Зольность, %	0,5
5	Теплопроводность, (20-40°С) W/mK	20
6	Модуль Юнга, кН/мм ²	7
7	Кажущаяся плотность, г/см ³	1,63

Сварочные электроды по составу идентичны электродам, которые используют в руднотермических печах, но есть различия в геометрических размерах: сварочный электрод имеет диаметр 6 и 8 мм и длину 300 мм, а печной электрод 710 и 6000 мм.

Суть первого предлагаемого метода исследования заключается в фиксации прилагаемой нагрузки, с которой пресс воздействует на электрод, для измерения величины изгиба электрода, и определения предельных значений разрушения и трещинообразования, при которых происходила аварийная поломка (разрушение) электрода. Полученные данные периодически фиксировались и заносились в базу данных на ПК.

Суть второго метода исследования заключается в регистрации данных с лазерного дальномера при фиксированном изгибе стержня, который задаётся экспериментатором, с целью подтверждения возможности определить начало отклонения электрода от своего осевого положения до критического, при котором электрод начнёт разрушаться.

Результаты анализа экспериментальных данных, полученных на первой лабораторной установке позволили установить критическую нагрузку, при которой происходит поломка электрода. На второй установке была установлена возможность сигнализации начал изгиба электрода с помощью лазерного дальномера. Интерпретация полученных данных эксперимента была обоснована с точки зрения механики твёрдого тела.

Установлено, что на значение степени точности влияют условия изготовления и эксплуатации объекта, при создании которого будут использоваться эти экспериментальные данные. Условия изготовления, то есть возможности производства, ограничивают реально достижимую точность. Условия эксплуатации, то есть условия обеспечения нормальной работы объекта, определяют минимальные требования к точности. Точность экспериментальных данных также существенно зависит от объёма (числа) испытаний, т.е. чем их больше, тем (при тех же условиях) выше достоверность результатов исследования.

2.3 Обработка экспериментальных данных

Целью проведения экспериментальных исследований было определение качественно-количественных зависимостей, которые устанавливают соотношение между переменными, описывающими объект при работе в статическом режиме (в случае эксперимента это электрод и стержень) [35].

Для решения подобных задач, как правило, используют метод наименьших квадратов.

2.3.1 Применение метода наименьших квадратов для нахождения зависимости вероятности поломки электрода от степени отклонения от осевого положения

Целью проведения экспериментальных исследований было определение зависимости одной физической величины Y (изменение расстояния лазерного луча) от другой X (величина отклонения электрода от своего осевого положения). Этот эксперимент подразумевает наличие погрешности измерений. Таким образом, по экспериментальным данным (y_i, x_i) требовалось определить необходимую зависимость $Y(X)$. Метод наименьших квадратов достаточно часто применяют для решения подобных задач, при котором вероятная зависимость $Y(X)$ наилучшим образом согласуется с полученными экспериментальными данными. Таким образом, чтобы сумма квадратичных отклонений между сглаживающей кривой и экспериментальными значениями (испытаниями электрода печи РТП) сводилась к минимуму (2.1):

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_x)^2 \rightarrow \min \quad (2.1)$$

где y_i – фактическое (наблюдаемое) значение изучаемого явления; \bar{y}_x расчётное значение модели тренда; n – число наблюдений; $(y_i - \bar{y}_x)^2$ квадратичное отклонение между расчётным значением модели тренда и экспериментальными данными.

Было установлено во время обработки экспериментальных данных, что распределение X обусловлено ошибками измерений, а величина Y описывается законом нормального распределения (2.2):

$$f(y_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(y_i - \bar{y}_x)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (2.2)$$

где $\sigma = \sigma(y_i)$ – среднее квадратичное отклонение случайных величины Y , одинаковое в любой точке эксперимента ($X=x_i$) при условии равноточности измерений.

В практическом применении МНК для нахождения искомой зависимости следующие методы:

1. Общий вид зависимости априори известен на основании теоретических предпосылок, но необходимо рассчитать численные значения параметров этой зависимости.

2. Искомая зависимость заранее неизвестна, и отсутствуют всякие предположения о её математической зависимости. В таких случаях для описания исследуемой зависимости используют алгебраический полином n -ой степени (ряд Тейлора), но ограниченный пределами изменения аргумента.

В нашем случае выдвинуто предположение о том, что искомая зависимость изменение расстояния между лазерным измерителем и электродом от величины его изгиба носит нелинейный характер. Тогда формула (2.1) принимает вид (2.3):

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \varphi(x_i, a_0, a_1))^2 \rightarrow \min \quad (2.3)$$

Чтобы определить конкретные численные значения параметров, которые удовлетворяют условию минимума, необходимо взять частные производные по неизвестным параметрам от выражения, описанного формулой (2.3). В итоге получается система из двух уравнений (количество уравнений соответствует числу неизвестных). В конечном итоге система принимает вид (2.4):

$$\begin{aligned}
 a_0 \sum_i^N x_i^0 + a_1 \sum_i^N x_i^1 &= \sum_i^N x_i^0 y_i \\
 a_0 \sum_i^N x_i^1 + a_1 \sum_i^N x_i^2 &= \sum_i^N x_i^1 y_i
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Решение этой системы линейных уравнений позволяет получить численные значения параметров a_j .

2.3.2 Корреляционный анализ

Определить зависимость исследуемой случайной величины – изменение расстояния между лазерным измерителем и электродом от одной или нескольких случайных величин – отклонения электрода от своего осевого положения недостаточно, также необходимо установить тесноту зависимости. Из литературных источников известно, что две случайные величины могут быть связаны статической или функциональной зависимостями. Если в первом случае изменение одной величины влечёт за собой изменение другой, то такую зависимость принято называть корреляционной.

При исследовании искомой зависимости физической случайной вероятности поломки электрода от степени отклонения электрода от своего осевого положения подверглись анализу N пар числе (y_i, x_i) , которые получили из независимых опытов. Тесноту связи между величинами Y и X позволяют оценить эти данные, которая представлена в следующем виде (2.5):

$$Y = m_y + r_{yx} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (X - m_x) = a_0 + a_1 X
 \tag{2.5}$$

где m_y и m_x – математические ожидания соответствующих величин X и Y ; σ_y и σ_x – среднее квадратичное отклонение этих величин; r_{yx} – коэффициент корреляции определяется по формуле (2.6).

$$r_{yx} = \frac{k_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}
 \tag{2.6}$$

где k_{xy} – корреляционный момент случайной величины X и Y .

Величина коэффициента корреляции r_{yx} находится в пределах от -1 до +1 и является показателем тесноты линейной связи между X и Y . Чем ближе значение r_{yx} по модулю к единице, тем теснее эта связь.

Коэффициенты уравнения (2.5) a_0 и a_1 , которые нашли по методу наименьших квадратов, могут также использоваться для оценки тесноты линейной связи, по формуле (2.7):

$$a_1 = r_{yx} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \quad (2.7)$$

2.3.3 Регрессионный анализ

Чтобы метод наименьших квадратов, который используется для определения параметров аппроксимирующей модели, стал регрессионным анализом необходимо провести расчёт статистических оценок: оценка адекватности, оценка дисперсии воспроизводимости и оценка значимости коэффициентов.

Оценка дисперсии воспроизводимости (погрешности опыта) определяется на основании данных параллельных опытов и характеризует равнозначность измерений во всех опытах.

Проверка нулевой гипотезы о равенстве дисперсии во всех опытах, таким образом происходит проверка, на сколько значимо отличаются оценки дисперсии в каждом опыте, производилась с помощью критерия Кохрена. Этот критерий представляет отношение максимальной дисперсии $D_{y_{max}}$ к сумме всех дисперсий в N опытных точках, определяется формулой (2.8):

$$G = \frac{D_{y_{max}}}{\sum_{i=1}^N D_{yi}} \quad (2.8)$$

где D_{yi} и \bar{y}_i находятся по формулам (2.9) и (2.10)

$$D_{yi} = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (2.9)$$

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{ij} \quad (2.10)$$

где m – число параллельных измерений в i -ом опыте, N – число опытов.

Сравнением значения критерия Кохрена G , вычисленного по формуле (2.8), с табличным G_T проверяется гипотеза о равнозначности. При $G < G_T$ не подтверждается гипотеза равнозначности. При определении среднего значения \bar{y}_i погрешность опыта оценивалась среднеквадратичной погрешностью по формуле (2.11):

$$\sigma_{y_0}^2 = D_{y_0} = \frac{1}{mN} \sum_{i=1}^N D_{y_i} \quad (2.11)$$

где $m \cdot N = n$ – общее количество измерений.

С помощью критерия Фишера F проводилась оценка адекватности аппроксимирующей зависимости исследуемого объекта, который вычисляется как отношение дисперсии адекватности D_{ya} к дисперсии опыта D_{y_0} , рассчитанной по формуле (2.11). Рассеивание данных эксперимента \bar{y}_i аппроксимирующей зависимости характеризуется дисперсией адекватности, находится по формуле (2.12):

$$D_{ya} = \frac{1}{N-s} \sum_{i=1}^N (y_{pi} - \bar{y}_i)^2, \quad (2.12)$$

где s число параметров аппроксимирующей зависимости, определённых по методу наименьших квадратов; y_{pi} – расчётное значение функции в i -ой точке при аппроксимации её зависимостью вида $Y=f(X)$.

Тогда формулу для вычисления критерия Фишера F можно представить в виде (2.13):

$$F = \frac{D_{ya}}{D_{y_0}} \quad (2.13)$$

Расчётное значение критерия Фишера F , полученное в соответствии с формулой (2.13), сравнивалось с табличным значением $F_T = f[N-s; N(m-1)]$. При выполнении условия $F < F_T$, гипотеза об адекватности зависимости $Y=f(X)$ исследуемому объекту не отвергалась.

2.4. Выводы по главе 2

В данной главе было сделано:

1. на основе анализа особенности технологии производства кремния, условий эксплуатации электродов на РТП и основных методов неразрушающего контроля был выбран оптический метод как самый эффективный и простой в эксплуатации. Была разработана функциональная схема автоматической системы контроля отклонения электрода от своего осевого положения.

2. разработана программа экспериментальных исследований и две лабораторных установки. Первая установка – для изучения критического отклонения электрода от своего осевого положения, вторая – для определения зависимости расстояния между электродом и лазерным измерителем от степени изгиба электрода. Разработана методика проведения эксперимента с подробным описанием её элементов.

3. составлена программа обработки экспериментальных данных на основе метода наименьших квадратов, корреляционного и регрессионного анализов. Корреляционный анализ выполняется для определения тесноты зависимости между двумя исследуемыми величинами. Регрессионный анализ для расчёт статистической оценки погрешности опытов.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАФИТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

3.1. План проведения эксперимента

Графитированные электроды печи РТП являются ее основным рабочим элементом. Их эксплуатационные характеристики и качество в итоге определяют устойчивость теплового режима и эффективность работы печи в целом, поэтому контроль их состояния является важными параметрами для автоматической системы управления процесса получения кремния.

Порядок проведения испытаний важен, если входные параметры (факторы) при исследовании одного и того же объекта в течение одного опыта принимают разные значения.

В случаях, когда систематически действующие параметры сложно учесть и проконтролировать, их преобразуют в случайные, специально предусматривая случайный порядок проведения испытаний (рандомизация эксперимента). Это позволяет применять к анализу результатов методы математической теории статистики.

Порядок испытаний также важен в процессе поисковых исследований: в зависимости от выбранной последовательности действий при экспериментальном поиске оптимального соотношения параметров объекта или какого-то процесса может потребоваться больше или меньше опытов. Эти экспериментальные задачи подобны математическим задачам численного поиска оптимальных решений.

Ход проведения эксперимента на первой установке:

1. Установка и монтаж лабораторного оборудования:
 - 1.1 Подключение тензодатчика к ПК;
 - 1.2 Установка электрода в тигель с шихтой (кварцевый песок);
 - 1.3 Установка электрода в механический пресс;

1.4 Включение ПК и калибровка тензодатчика;

2. Проведение опытов:

2.1 Сжатие электрода до момента его сгибания, затем получение данных с тензодатчика о величине давления на электрод и измерение величины изгиба. Опыт повторить на электродах разной длины 15 и 30 см. Отметить факт наличия или отсутствия механических повреждений на торцах электрода.

2.2 Проведение серии экспериментов на определение максимальной величины изгиба электрода и величины давления, при котором он сломается.

2.2.1 Сжатие электрода и регистрация усилия, при котором он сломается, и величины изгиба;

3. Повторение опытов на электродах с диаметрами 6 и 8 мм. План эксперимента приведён в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – План проведения эксперимента по этапам

Условия		диаметр электрода, мм	
		6	8
1		2	3
С холодным электродом	Определение величины изгиба	+	+
С холодным электродом	Определение усилия, при котором электрод сломается	+	+

Ход проведения эксперимента на второй установке:

1. Установка и монтаж лабораторного оборудования:

1.1 Установка задатчика изгиба электрода (болт М10);

1.2 Установка стержня в разъем в металлическом бруске;

1.3 Установка и подключение лазерного дальномера. Дальномеры должны быть расположены параллельно электроду на расстоянии не более 2х мм;

2. Проведение опытов:

2.1 Задание минимального изгиба электрода при фиксации показаний лазерного измерителя. Далее задание изгиба в 1мм и фиксация показаний прибора. Опыт проводят до величины изгиба электрода в 8 мм.

2.2 Проведение серии экспериментов по определению зависимости показаний лазерного измерителя от величины изгиба электрода.

3.2. Статистическая обработка результатов эксперимента

Необходимость обработки результатов эксперимента (приведены в таблице 3.2 и 3.3 и рисунке 3.1) вызвана тем, что выборочный анализ отдельных данных вне связи с остальными результатами или же некорректная их обработка могут не только снизить ценность практических рекомендаций, но и привести к ошибочным конечным результатам. Обработка полученных данных включает:

- определение доверительного интервала среднего значения и дисперсии (или среднего квадратичного отклонения) величин выходных параметров (экспериментальных данных) для заданной статистической надежности;

- проверка на отсутствие ошибочных значений (выбросов), с целью исключения сомнительных результатов из дальнейшего анализа. Проводится на соответствие одному из специальных критериев, выбор которого зависит от закона распределения случайной величины и вида отклонений;

- проверка соответствия опытных данных ранее априорно введенному закону распределения. В зависимости от этого подтверждаются выбранный план эксперимента и методы обработки результатов, уточняется выбор математической модели.

Таблица 3.2 – Результаты проведения эксперимента по определению критической величины давления на электрод

№ опыта	Диаметр электрода 8 мм		Диаметр электрода 6 мм	
	Отклонение, мм	Усилие, кН	Отклонение, мм	Усилие, кН
1	5.0	1.187	6.0	0.604
2	4.0	1.433	5.0	0.643
3	4.0	1.371	4.0	0.592

Продолжение таблицы 3.2.

№ опыта	Диаметр электрода 8 мм		Диаметр электрода 6 мм	
	Отклонение, мм	Усилие, кН	Отклонение, мм	Усилие, кН
4	6.0	1.310	5.0	0.580
5	6.0	1.281	6.0	0.622
6	4.0	1.338	4.0	0.583
7	6.0	1.198	6.0	0.642
8	5.0	1.228	6.0	0.651
9	4.0	1.206	5.0	0.616
10	5.0	1.293	4.0	0.649
11	5.0	1.245	4.0	0.650
12	6.0	1.230	6.0	0.601
13	6.0	1.444	6.0	0.639
14	6.0	1.342	4.0	0.644
15	4.0	1.395	4.0	0.595
16	6.0	1.337	6.0	0.632
17	6.0	1.191	6.0	0.596
18	5.0	1.180	5.0	0.616
19	5.0	1.250	4.0	0.575
20	4.0	1.187	5.0	0.605

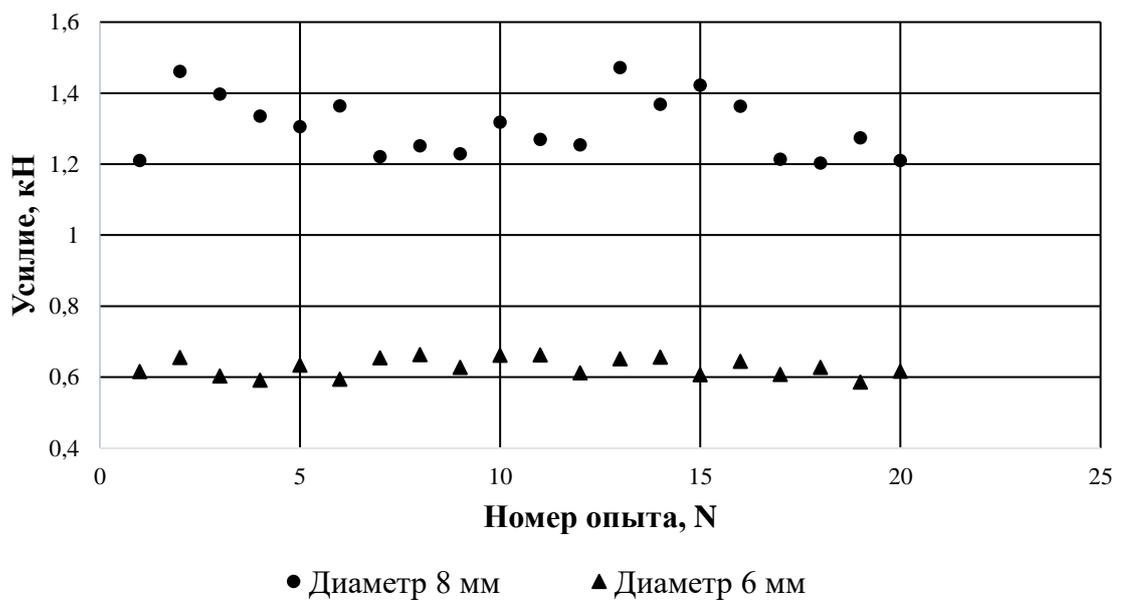


Рисунок 3.1 – Результаты проведения серии опытов по установлению критического давления на электрод электрода

Таблица 3.3 – Результаты проведения эксперимента по определению зависимости расстояния между электродом и лазерным измерителем от величины изгиба электрода

Отклонение электрода, мм	Расстояние между электродом и лазерным измерителем, мм
1	377.2
2	374
3	329.7
4	295.9
5	264.85
6	238.8
7	216.1
8	201.35

В таблице 3.3 приведены усреднённые значения, полученные при проведении серии опытов.

На рисунке 3.2 приведена зависимость расстояния между электродом и лазерным дальномером от изгиба электрода в ходе проведения серии экспериментов на лабораторной установке.

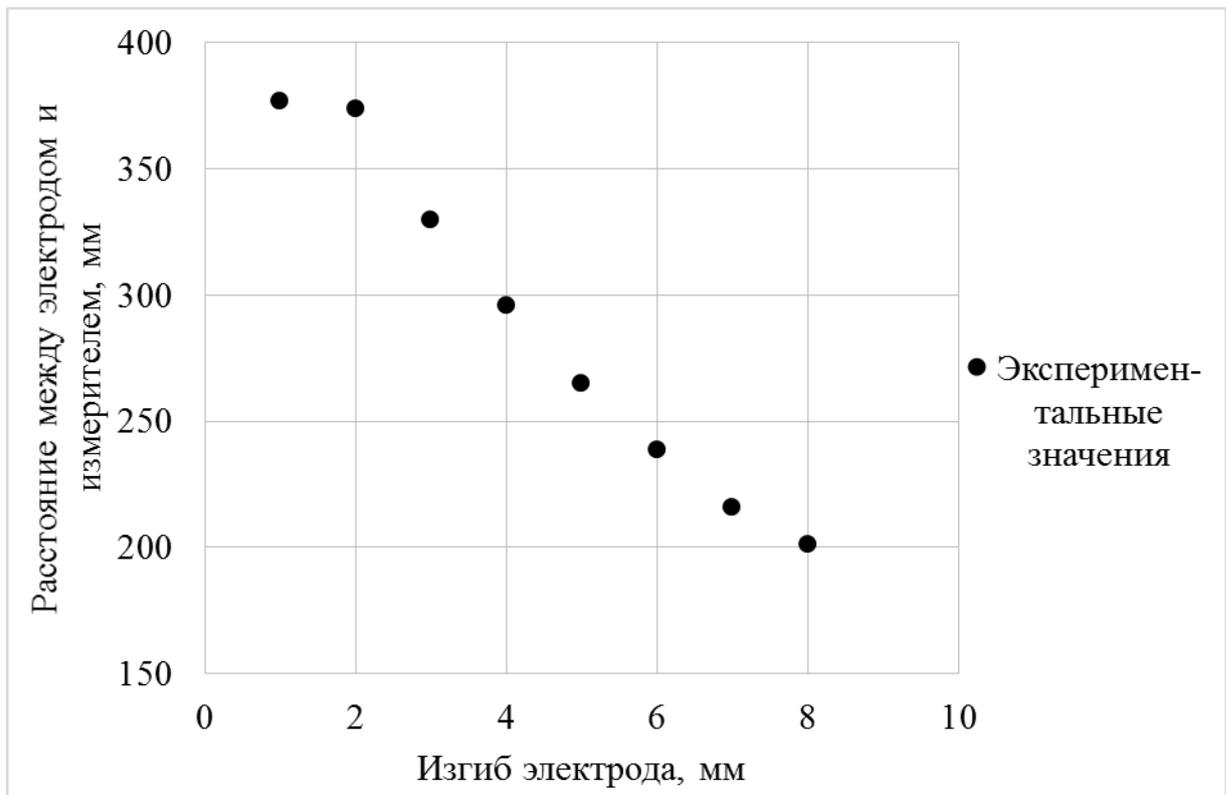


Рисунок 3.2 – Экспериментальные значения

В таблице 3.3 приведены расчётные данные по МНК для электрода диаметром 6 мм.

Методом наименьших квадратов находим итоговую зависимость, формула (3.1).

$$y = -27.669x + 411.75 \quad (3.1)$$

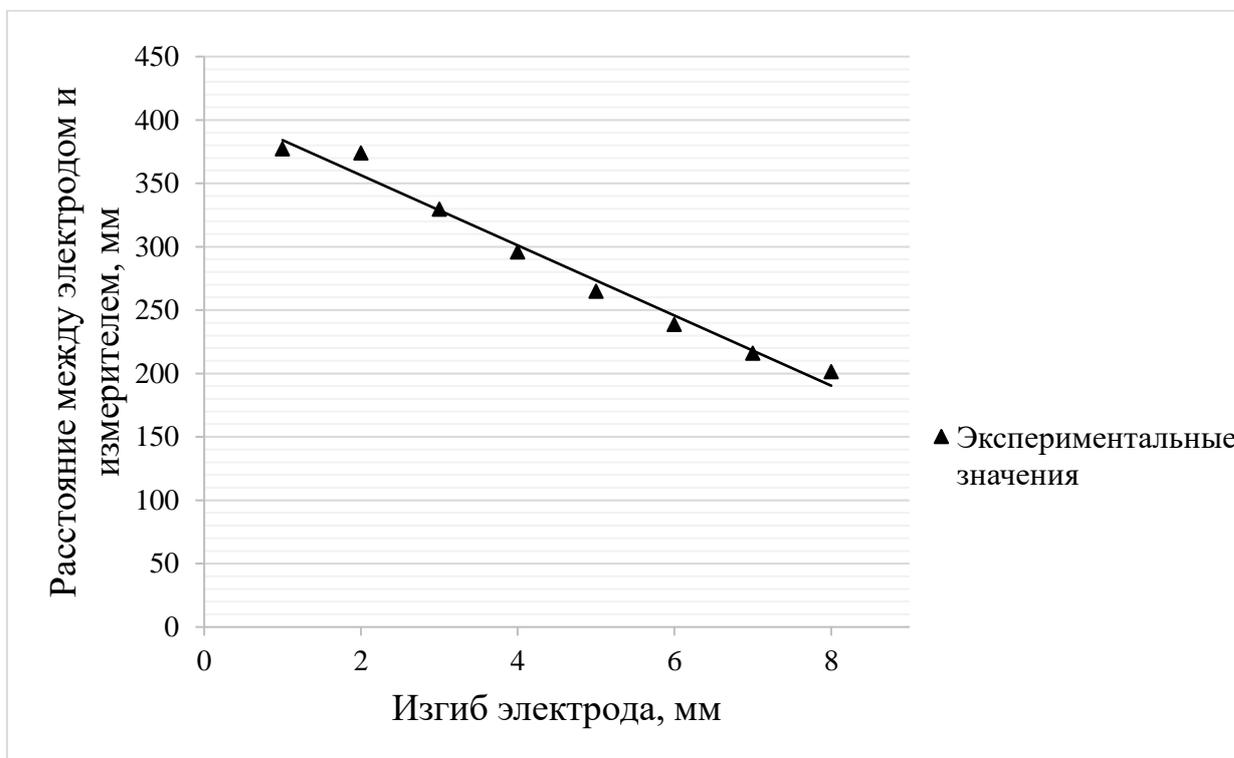


Рисунок 3.3 – Зависимость расстояния между электродом и лазерным измерителем от величины изгиба электрода

Из рисунка 3.3 видно, что зависимость достаточно точно аппроксимируется функцией, имеющей линейную зависимость.

Корреляционный анализ

Результаты корреляционного анализа представлены в таблице 3.5.

Формула нахождения математического ожидания (3.2):

$$m_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.2)$$

Формула нахождения СКО (3.3):

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2} \quad (3.3)$$

Коэффициент линейной парной корреляции:

$$r_{yx} = b \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad (3.4)$$

Таблица 3.5 – Результаты корреляционного анализа

Параметр	Значение
Математическое ожидание, m_x	4.5
Минимальное значение	1
Максимальное значение	8
СКО, σ_x	2
СКО, σ_y	5.5
Коэффициент линейной парной корреляции	0.9829

Регрессионный анализ результатов эксперимента

Чтобы проверить гипотезу равноточности измерений, удаление случайных данных, ошибок при проведении опытов с электродами РТП различного диаметра, используем критерий Кохрена, результаты приведены в таблице 3.6.

Расчёт критерия Кохрена ведётся по формуле (2.8).

Таблица 3.6 – Проверка равноточности экспериментальных данных

Параметр	Значение
Сумма дисперсий воспроизводимости	20897
Максимальная дисперсия воспроизводимости	139876
Критерий Кохрена	0.35

Табличное значение критерия Кохрена 0.39. Расчётное значение критерия оказалось меньше табличного, что подтверждает предположение о равноточности измерений во всех опытах и целесообразности дальнейших вычислений.

Далее была проведена оценка адекватности аппроксимирующей зависимости исследуемого объекта.

Рассеивание данных эксперимента аппроксимирующей зависимости вычислялся по формуле (2.11). Результаты проверки адекватности модели представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Проверка адекватности модели

Параметр	Значение
Дисперсия опыта	19853
Дисперсия адекватности	1743
Критерий Фишера	0.0878

Табличное значение критерия Фишера равняется 3.01, оно больше расчётного значения, поэтому, можно сделать вывод об адекватности выбранной линейной зависимости и полученных коэффициентов [69, 111].

3.3 Определение степени отклонения электрода от своего осевого положения

В ходе лабораторных испытаний была проведена серия экспериментов по изучению степени отклонения электрода от своего осевого положения на вероятность его поломки, а также по установлению зависимости показаний лазерного дальномера от степени отклонения электрода от своего осевого положения. Суть первой серии опытов заключалась в сдавливании электрода в механическом прессе, при этом фиксировались значения усилия и регистрировалась степень отклонения электрода. Electroды для проведения опытов были выбраны графитированные, по своим физическим свойствам аналогичные тем, которые используются в промышленности. Суть второй серии экспериментов было установление зависимости изменения расстояния между электродом и лазерным измерителем при изменении изгиба электрода до критического значения, при котором произойдёт поломка электрода или образование трещин и сколов.

Электрод для опытов брался из аналогичного материала, что и используется на производстве. Соотношение диаметра и длины у электродов из опы-

тов (150/8) и используемых на производстве (9000/710) одного порядка, поэтому критический изгиб электрода будет аналогичный, как и установленный в первой серии опытов – 5 мм.

Как показали серии экспериментов лазерный измеритель гарантированно сможет сигнализировать о начале изгиба электрода с точностью до 1 мм.

Задача исследования – определение степени изгиба электрода, при котором не будет происходить пластической деформации, а в нашем конкретном случае поломки электрода или образование трещин [4, 42, 67, 89].

3.4 Программный комплекс для определения положения электрода

На основании экспериментальных данных была разработана математическая модель упругого изгиба электрода. Результаты моделирования показаны на рисунке 3.4.

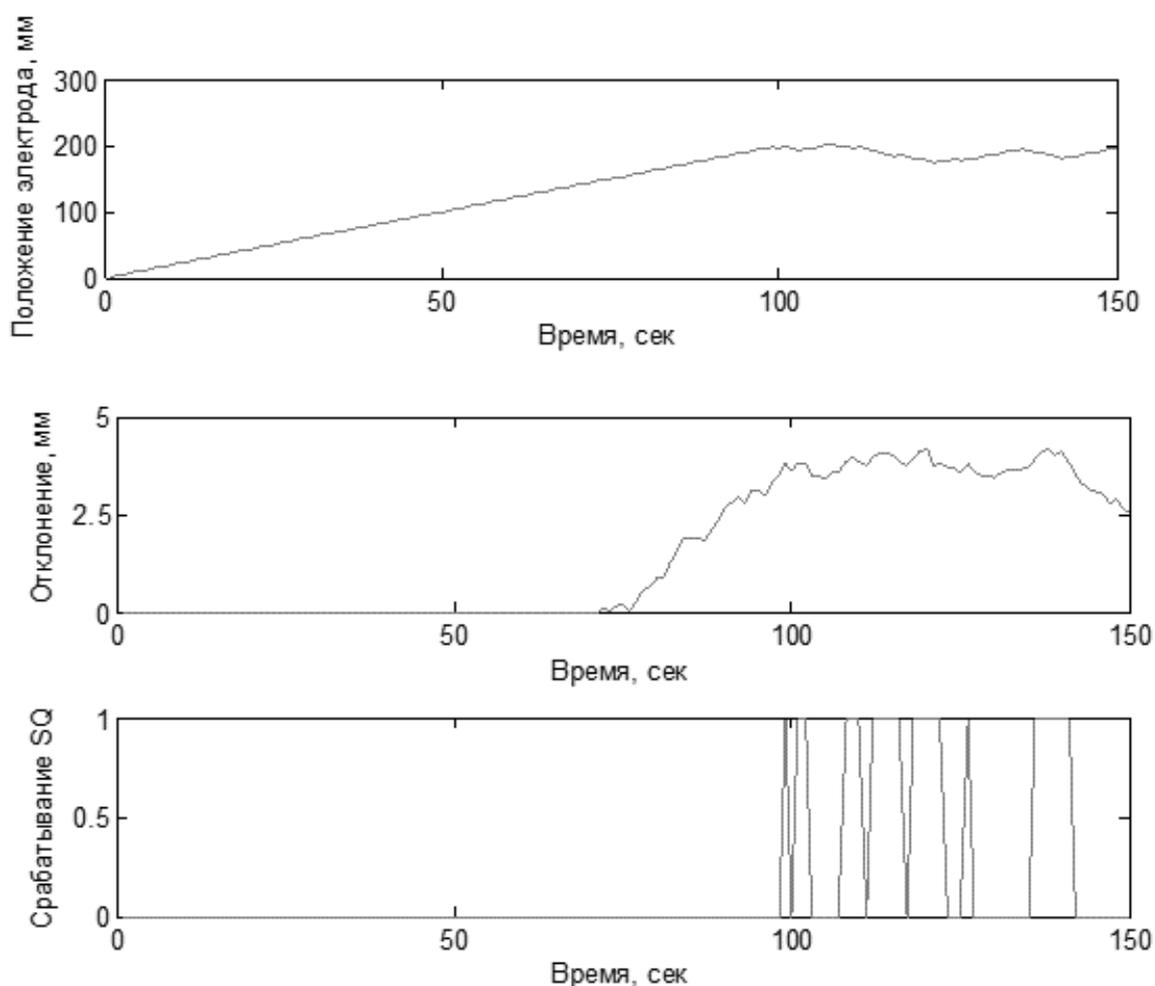


Рисунок 3.4 – Работа системы контроля положения электрода в РТП

Разработанный программный комплекс для контроля положения торца электрода в руднотермической печи в процессе получения металлургического кремния карботермическим способом предназначен для решения задачи контроля положения электрода во время перепуска при упоре электрода в шихту.

Разработанный программный продукт может быть адаптирован к критическим условиям (поломка или изгиб электрода при контакте с шихтой) действующего производства и применён на заводе, эксплуатирующие подобные печи [86]. Алгоритм работы данного программного комплекса представлен на рисунке 3.5

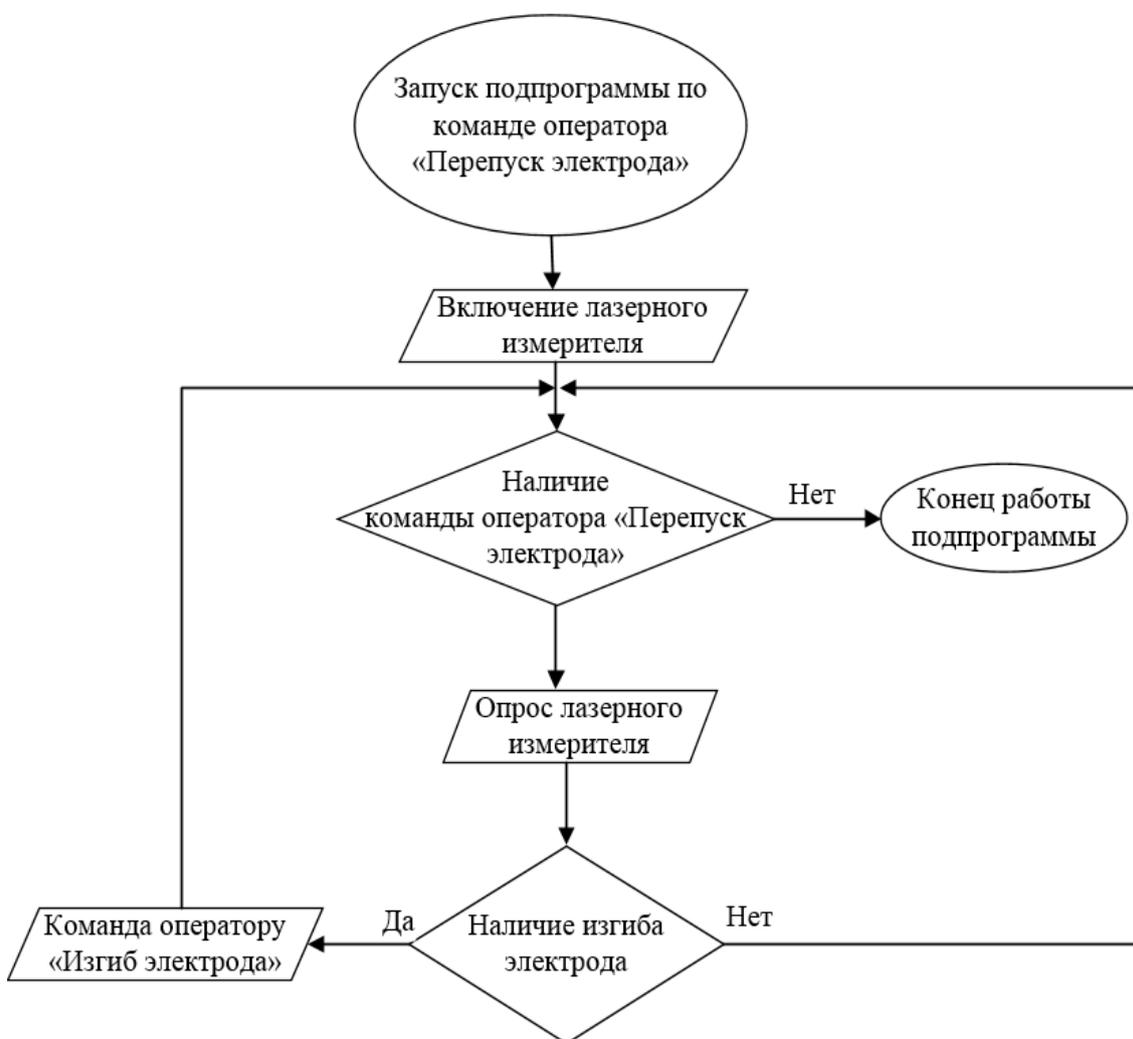


Рисунок 3.5– Алгоритм работы программы управления электродом

Этот программный продукт предполагается использовать в комплексе с 3х уровневой SCADA-системой. Он будет контролировать процесс перепуска

электродов в автоматическом режиме и сигнализировать оператору о изгибе электрода, до наступления момента поломки электрода [99].

3.5 Преобразование электрической энергии в тепловую в РТП

Преобразование электрической энергии в тепловую в РТП описывается четырьмя типовыми режимами [20, 40, 64]:

1. Режим работы чистого сопротивления (прямого нагрева). При таком режиме выделение тепла происходит исключительно в шихте и расплаве, т.е. через активное сопротивление, электрическая дуга отсутствует, это определяется выражением (3.6).

$$R = R_0 \quad (3.6)$$

2. Режим работы электрической дуги и в расплаве, определяется формулой (3.7). При таком режиме тепло выделяется не только в электрической дуге, но и в расплаве.

$$R = R_0 + R_d \quad (3.7)$$

3. Режим шунтированной дуги, определяется формулой (3.8). Такой режим также называют смешанным, поскольку выделение тепла происходит как в столбе электрической дуги, так и в активном сопротивлении материалов (шихта и расплав).

$$R = R_0 + R_d \cdot I_d + R_{ш} \cdot I_{ш} \quad (3.8)$$

4. Режим работы электрической дуги, описывается формулой (3.9). Выделение тепловой энергии происходит практически полностью в дуге.

$$R = R_d \quad (3.9)$$

Стабильный электрический режим работы РТП обеспечивает необходимое распределение тепловой энергии в печном пространстве. На это распределение влияют два фактора: электрический и технологический режимы. Это даёт возможность дать оценку распределению тепловой энергии в РТП по этим двум факторам [20, 40, 93, 102].

В РТП в зависимости от стадии плавки выделение тепловой энергии может происходить не только в электрической дуге, но и в шихтовых материалах, и в расплаве. РТП способны работать во всех перечисленных режимах или с учётом динамики технологического процесса менять режим. При карботермическом восстановлении кремния РТП работает в смешанном режиме, поэтому изменение баланса углерода даже на 5-10% способно изменить распределение тепловой энергии во внутриванном пространстве и вызвать нарушение хода технологического процесса вплоть до заваривания печи. Электрическая дуга является концентрированным источником тепловой энергии, благодаря ей становится возможным разогрев шихты до высоких температур, тем самым увеличивая скорость процесса восстановления кремния [62, 63, 68].

Сивцов А.В., проводя опыты на ООО «РУСАЛ Кремний Урал» на печи №3, отметил следующее: «Для высоких технико-экономических показателей соответствуют более низкие значения активного сопротивления – 4.09 мОм, а для низких 4.5 мОм. Более высокое общее активное сопротивление снижает вводимую электрическую мощность без повышения напряжения низкой стороны (переключения ступени трансформатора)». Для эффективного управления технологическим процессом необходимо постоянно поддерживать не столько номинальную величину подводимой электрической энергии, сколько рациональное распределение во внутриванном пространстве.

Известный факт, что при отклонении состава шихты от стехиометрии в интервале $\pm 5\%$ создаёт дисбаланс соотношения монооксида и карбида кремния в пределах (-14, 16%), а для отклонения в интервале $\pm 10\%$ этот показатель составляет (25 - 37,5%). Исходя из этого, можно сделать вывод, что отклонение содержания древесного угля в шихте более чем на 10% от предписанного технологической инструкцией приведет к снижению производительности печи с увеличением расхода электроэнергии до аварийного отключения печи, поэтому этот показатель необходимо сохранять на уровне не более 5%, около 1,5- 3% [37, 92, 112].

Учитывая особенности эксплуатации печных агрегатов, моделирование будет проведено с нормальным содержанием углерода в шихте, с отклонениями $\pm 5\%$ и $\pm 10\%$. Для этого необходимо определить мощность, подводимую в печь с вышеуказанным содержанием восстановителя в шихте [83]. Результаты отклонения активной мощности, подводимой к электроду, и общее сопротивление шихты от изменения баланса восстановителя в шихте.

Таблица 3.8 – Отклонения содержания восстановителя в шихте

№	Отклонение содержания восстановителя, %	Общее сопротивление шихты, мОм	Активная мощность, подводимая на электрод, МВт
1	-10	4,6	3,4
2	-5	4,3	3,6
3	0	4,0	3,9
4	+5	3,7	4,2
5	+10	3,4	4,4

Чтобы решить задачу распределения тепловых полей в зависимости от баланса углерода (тепловой и материальный балансы) применяем метод конечных разностей. Для упрощения задачи моделирования будем рассматривать прогрев цилиндра (электрода и ФРП) без внутренних тепловыделений (тепловые эффекты химических реакций) и без изменения концентраций. Подобные упрощения более рациональны для решения задач такого типа, когда достаточно чётко можно представить принцип расчёта сеточного метода, который лежит в основе современных программных пакетов для решения систем дифференциальных уравнений [16, 48, 49, 61].

Прогрев гарнисажа и футеровки стен РТП описывается следующими дифференциальными уравнениями, формула (3.10):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.10)$$

Граничные и начальные условия можно систематизировать, формула (3.11):

$$T(0, r) = T_H(r); \quad \frac{\partial T(t, 0)}{\partial r} = 0; \quad -\lambda \cdot \frac{\partial T(t, R)}{\partial r} = \alpha(T(t, R) - T_{00}) \quad (3.11)$$

В начальный момент времени распределение температур в шихте, гарнисаже и футеровке, (ФРП) определяется начальными условиями. Симметричное распределение температур по радиусу прогрева РТП описывается первым граничным условием. Второе граничное условие – это равенство теплового потока внутрь футеровки и гарнисажа и теплового потока от электрода и расплава [34, 38, 51].

В таком случае $0 \leq r \leq R$ – радиальная координата, где

λ – коэффициент теплопроводности прогреваемого материала, Вт/(м·К);

R – радиус печи, м;

α – коэффициент теплоотдачи из окружающей среды, Вт/(м²·К),

a – коэффициент температуропроводности нагреваемого материала, м²/с.

Введём в систему уравнений безразмерный радиус для удобства анализа, формула (3.12).

$$\rho = \frac{r}{R}; \quad r = \rho \cdot R; \quad dr = R \cdot d\rho; \quad dr^2 = R^2 \cdot d\rho^2 \quad (3.12)$$

Подставив уравнение (3.12) в (3.11) и (3.10), получим выражения (3.13) и (3.14):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{a}{R^2} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial T}{\partial \rho} \right) \quad (3.13)$$

$$T(0, \rho) = T_H(\rho); \quad \frac{\partial T(t, 0)}{\partial \rho} = 0; \quad -\lambda \cdot \frac{\partial T(t, 1)}{\partial \rho} = \alpha(T(t, 1) - T_{00}) \quad (3.14)$$

Совокупность дискретных точек с координатами $T(i, j)$ заменяет собой непрерывное пространство в координатах $T(\rho, t)$.

Производные заменяются на конечные разностные эквиваленты, которые в свою очередь выражены через соседние точки по временной и пространственной координатах. Расстояние между этими точки выразим следующим уравнением (3.15):

$$\Delta\rho = \frac{1}{N}; \rho = i \cdot \Delta\rho; \text{ и } t = j \cdot \Delta t, \quad (3.15)$$

Значение Δt установим для точности и адекватности, поскольку никаких других ограничений не существует.

Далее произведём замену производных на конечные разности в системе уравнений (3.16) и (3.17).

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T}{\partial \rho} \right|_i &\cong \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta\rho}; \quad \left. \frac{\partial c}{\partial \rho} \right|_{i+1} \cong \frac{T_{i+1}^{(j-1)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta\rho}; \\ \frac{\partial^2 T}{\partial T^2} &\cong \frac{\frac{T_{i+1}^{(j-1)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta\rho} - \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta\rho}}{\Delta\rho} = \frac{T_{i+1}^{(j-1)} - 2 \cdot T_i^{(j-1)} + T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta\rho^2}; \\ \frac{\partial T}{\partial t} &\cong \frac{T_i^{(j)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T}{\partial \rho} \right|_i &\cong \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta\rho}; \quad \left. \frac{\partial c}{\partial \rho} \right|_{i+1} \cong \frac{T_{i+1}^{(j-1)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta\rho}; \\ \frac{\partial^2 T}{\partial T^2} &\cong \frac{\frac{T_{i+1}^{(j-1)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta\rho} - \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta\rho}}{\Delta\rho} = \frac{T_{i+1}^{(j-1)} - 2 \cdot T_i^{(j-1)} + T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta\rho^2}; \\ \frac{\partial T}{\partial t} &\cong \frac{T_i^{(j)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Аналогично вводим конечные разности в уравнение (3.13) и (3.14), и таким образом получаем (3.18):

$$\begin{aligned} \frac{T_i^{(j)} - T_i^{(j-1)}}{\Delta t} &= \frac{a}{R^2} \cdot \left(\frac{T_{i+1}^{(j-1)} - 2 \cdot T_i^{(j-1)} + T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta\rho^2} + \frac{1}{i \cdot \Delta\rho} \cdot \frac{T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}}{\Delta\rho} \right); \\ T_i^{(j)} &= T_i^{(j-1)} + B \cdot (T_{i+1}^{(j-1)} - 2 \cdot T_i^{(j-1)} + T_{i-1}^{(j-1)}) + \frac{B}{i} (T_i^{(j-1)} - T_{i-1}^{(j-1)}) \\ B &= \frac{a \cdot \Delta t}{R^2 \cdot \Delta\rho^2} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Полученная система уравнений позволяет определить значения температур для всех точек рабочего пространства ФРП и во всех временных слоях

(3.20), при этом значение в начальной точке рассчитывается исходя из начальных условий, по формуле (3.19).

$$T_0^{(j)} = T_1^{(j)} \quad (3.19)$$

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

$$T_N^{(j)} \left(1 + \frac{\alpha \cdot R \cdot \Delta\rho}{\lambda}\right) = T_{N-1}^{(j)} + \frac{\alpha \cdot R \cdot \Delta\rho}{\lambda} \cdot T_{oc} \quad (3.20)$$

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

Итого получены уравнения (3.18-3.20) для расчёта тепловых полей как по пространственной так и по временным координатам. Порядок вычисления следующий: исходя из начальных условий рассчитываются тепловое поле во всём выбранном рабочем пространстве печи для начального временного интервала. Затем производится расчёт для нулевого временного слоя по формуле (3.18). Далее по формуле (3.19) производится расчёт температуры по оси печи, а температура гарнисажа и футеровки по формуле (3.20). После вышеперечисленных преобразований первый слой полностью собирается, и далее необходимо повторить вычисления для расчёта второго временного слоя. Процедура повторяется до выхода температуры на заданный интервальный профиль. На таком принципе основано математическое моделирование процессов с распределёнными параметрами, и подобные процедуры приводились в нескольких известных работах [61, 63, 90, 113].

На основе этого метода в рамках исследования было проведено математическое моделирование распределения энергии во внутривспечном пространстве РТП при различных отклонениях от номинального количества восстановителя при различно погружение электродов для определения степени перегрева [34, 88, 105, 126]. На рисунке 3.6 показано расчетное распределение температурных полей в РТП

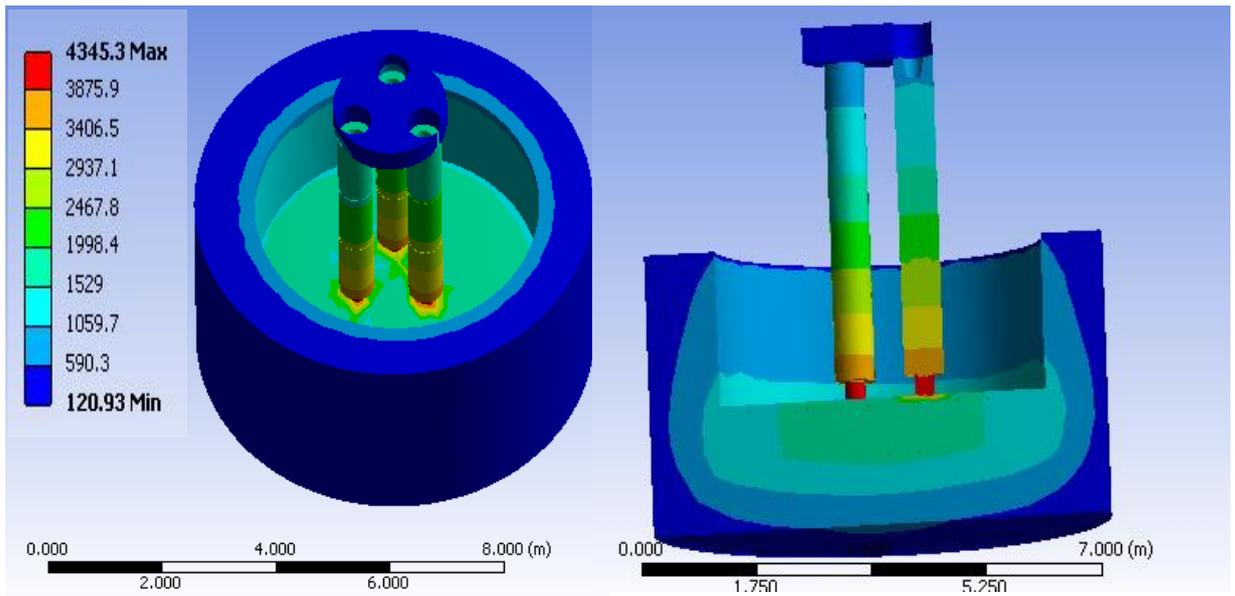


Рисунок 3.6 – Распределения температурных полей в РТП

Видно, что при стационарном режиме распределение теплового поля равномерно во всем объеме печи. Таким образом, при работе печи с отклонениями от технологического процесса возникнут очаги перегрева, которые можно будет достаточно точно определить в пространстве печи без визуального осмотра. Этот параметр может стать дополнительным для ввода данных о состоянии процесса для АСУ ТП.

3.6 Выводы по Главе 3

Первое научное положение: 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.

В данной главе было выполнено:

1. разработан план проведения эксперимента на первой и второй лабораторных установках.
2. произведена статистическая обработка экспериментальных данных, а также выполнено:

– корреляционный анализ – определение коэффициента линейной парной корреляции, он составил 0.98 для итоговой зависимости $y = -27.669x + 411.75$.

– регрессионный анализ – оценка адекватности аппроксимирующей модели (критерий Кохрена) составил 0.35, что меньше табличного значения 0.39, это подтверждает гипотезу равноточности измерений.

– оценка адекватности аппроксимирующей зависимости исследуемого объекта – критерий Фишера, он составил 0.0878, что меньше табличного значения 3.01. Это говорит, что итоговая зависимость адекватна.

3. Разработанный программный комплекс для контроля положения электрода в руднотермической печи в процессе получения металлургического кремния карботермическим способом, предназначен для решения задачи контроля положения электрода во время перепуска и при упоре электрода в шихту. Этот программный комплекс возможно адаптировать под условия действующего производства и внедрить в систему управления для сигнализации наличия изгиба электрода до момента его поломки или начала образования трещин.

4. Выполненное математическое моделирование распределения тепловых полей в руднотермической печи в зависимости от отклонения содержания восстановителя (баланс углерода). Эти данные указывают на необходимость ввода дополнительного контролируемого параметра в систему управления – влажности восстановителя.

ГЛАВА 4 РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧЬЮ

Расширение функций контроля и управления процессом получения металлургического кремния в РТП производится следующим образом: моделируется карботермическое восстановление кремния, по нему рассчитывается баланс углерода и распределение тепловых полей во внутривспечном пространстве. Таким образом решаются основные проблемы, возникающих на предприятиях, которые могут возникнуть в ходе технологического процесса в РТП [53, 56, 124].

4.1 Моделирование процесса восстановления кремния карботермическим способом

4.1.1 Процесс механизма восстановления кремния

Механизм восстановления кремния в РТП изучен достаточно подробно [13, 45, 47]. По последним данным установлено следующее.

Во-первых, восстановление примесей протекает параллельно с взаимодействием углерода с основным оксидом кремния. Во-вторых, восстановление всех оксидов и основных примесей протекает во взаимосвязи и соответствии с термодинамическим равновесием всей физико-химической системы смеси восстановителей и кварцита (таблица 4.1). Технология выплавки кремния описывается одной реакцией, т.е. главной реакцией технологии восстановления кремнезёма SiO_2 [66].



Таблица 4.1 – Основные реакции восстановления кремния из кварца

Реакции	Температура реагирования, °С	
	по термодинамической вероятности	то же с учётом смещения реагирующих фаз
$SiO_2 + 3C = SiC + 2CO$	1350 ÷ 1475	1350 ÷ 1625
$2SiO_2 + SiC = 3SiO + CO$	1625 ÷ 1850	1625 ÷ 1940
$2SiO = Si + SiO_2$	1900 ÷ 1710	1900 ÷ 1625
$(SiO)_p + SiC = Si_{ж} + CO$	1940 ÷ 2670	1940 ÷ 2670

Продолжение таблицы 4.1

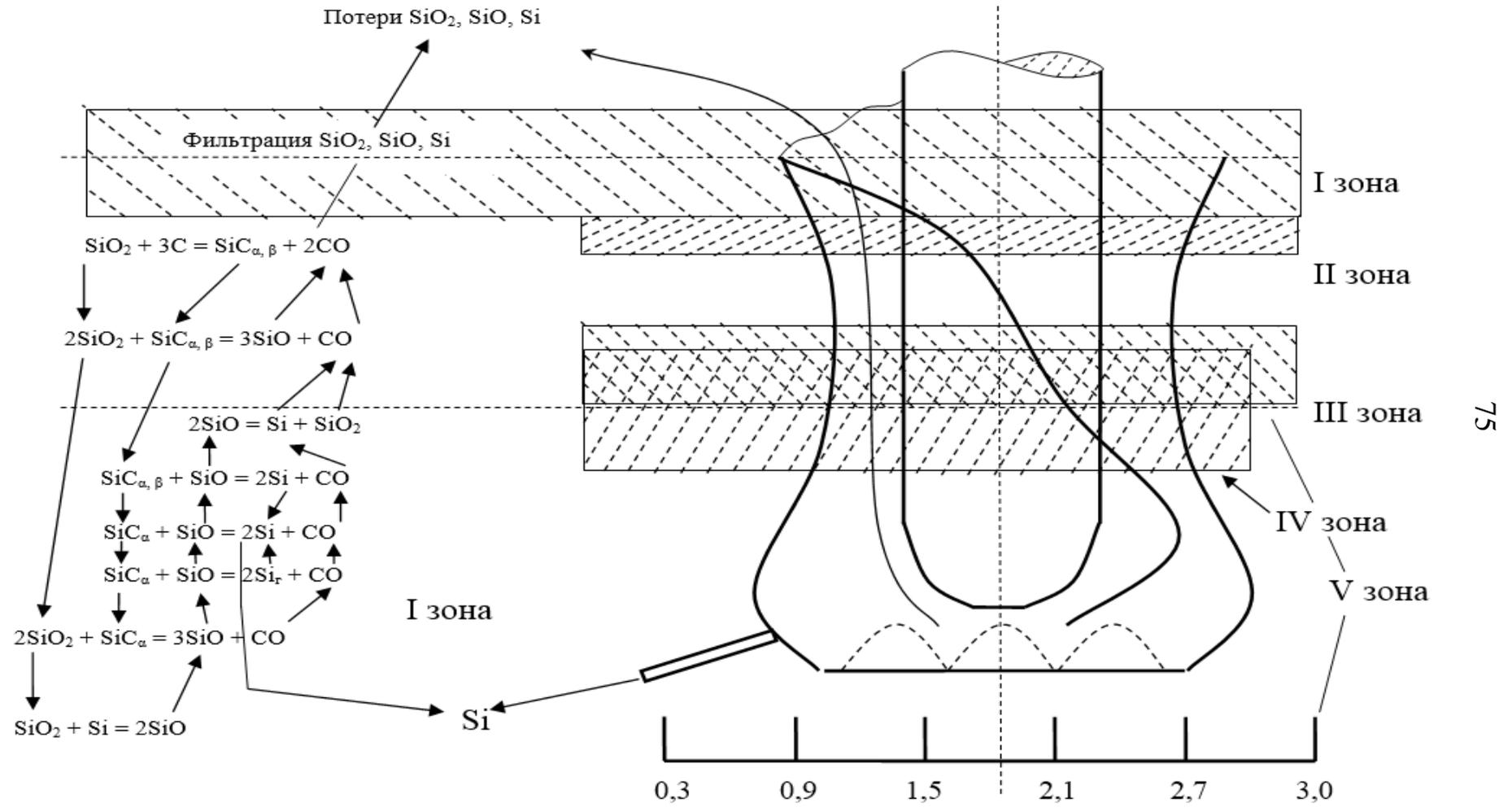
Реакции	Температура реагирования, °С	
	по термодинамической вероятности	то же с учётом смещения реагирующих фаз
$(SiO)_p + SiC = Si_2 + CO$	2300 ÷ 2670	2300 ÷ 2670
$SiO_2 + Si = 2SiO$	1860 ÷ 2670	1860 ÷ 2670
$SiO_2 + SiC = 2Si_{ж} + CO$	2300 ÷ 1940	2300 ÷ 1940

Физико-химические процессы, протекающие при выплавке кремния в руднотермических печах, характеризуются рядом специфических особенностей:

- наличие высокотемпературного дугового электрического разряда в ванне печи и газовых полостях вокруг электродов;
- чрезвычайно неравномерное тепловое поле ванны и связанные с ним интенсивный нагрев шихтовых материалов в местах активной работы колошника и, наоборот, замедленный нагрев материалов, оказавшихся вблизи футеровки;
- расслоение компонентов шихты в процессе дозирования и загрузки кварца на колошник печи;
- невысокая точность дозирования компонентов шихты (большие погрешности при взвешивании).

Фактически химизм восстановления кремния более сложен и представлен на рисунке 4.1 [36, 43].

Рисунок 4.1 – Процесс карботермического восстановления



Технологические зоны руднотермической печи хорошо видны на рисунке 4.2 [5, 11, 93]. Данное изображение может стать матрицей интерфейса телекоммуникатора SCADA- системы.

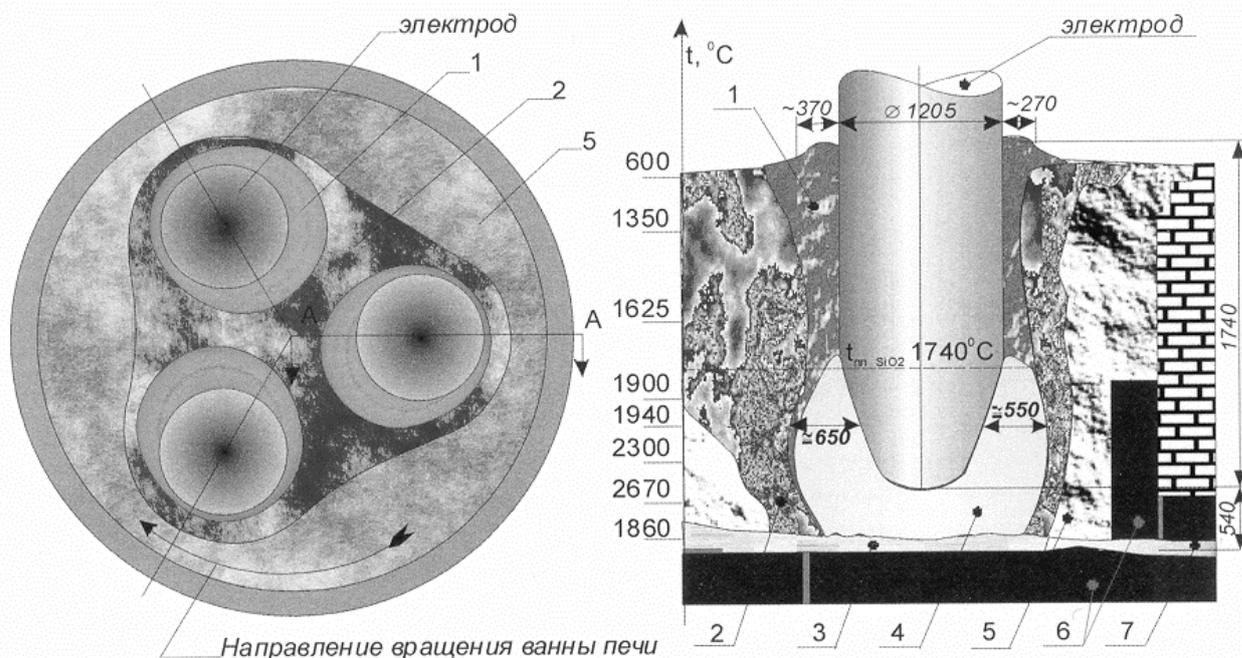


Рисунок 4.2 – Технологические зоны руднотермической печи

Позиция 1 – зона активного схода шихты (рабочая зона). В этой зоне происходят процессы нагрева шихты и схода шихты в рабочую полость вокруг электрода.

Позиция 2 – зона замедленного схода шихты. В этой зоне происходит спекание, когда из шихты уходит связанная влага, летучие соединения восстановителей, и начинаются процессы восстановления.

Позиция 3 – шлако-карбидная зона горна является структурой тигля и формируется из карборунда и недовосстановленного кремнезёмистого расплава. Зона определяется положением концов электрода от подины печи, электрическими режимами работы печи, составом используемых шихтовых материалов. Она является защитным слоем подины печи, препятствует выносу невосстановленных шихтовых материалов и местом их аккумуляции. При стабильном ведении технологии уровень шлако-карбидной зоны поддерживается

постоянным. Подплавление зоны приводит к образованию тугоплавких шлаков, трудно выводимых из печи и к длительному расстройству технологии.

Позиция 4 – газовая полость. Эта зона формирования источника тепла – электрической дуги. В ней протекают все высокотемпературные процессы и газификация окислов кремния. Стабильность этой зоны определяет весь ход технологического процесса и в конечном итоге производительность печи. Форма газовой полости зависит главным образом от устойчивого положения электрода и электрических режимов печи - сочетания тока и напряжения (при постоянной электропроводности шихты). При высоком напряжении и низком токе дуга растягивается, газовая полость становится узкой и вытянутой. При низком напряжении и высоком токе дуга очень короткая, газовая полость занимает малый объём, процессы плавки затруднены.

Позиция 5 – гарнисаж, образуется из тугоплавких соединений, получаемых в процессе плавки (карбидов кремния). Гарнисаж формируется в период пуска руднотермической печи и зависит напрямую от подаваемого в печь состава шихты, электрических режимов ведения плавки, положения электродов и других технологических особенностей процесса восстановительной плавки.

При изменении вышеперечисленных факторов гарнисаж печи меняет свой состав и форму, что может привести к расстройству хода технологического процесса, снижению сортности, зашлакованию печи, образованию трудно выводимых тугоплавких шлаков.

Позиция 6 – угольная футеровка ванны печи.

Позиция 7 – лётка печи – канал, формируемый в футеровке печи и гарнисаже, для выпуска расплава кремния из печи. Лётка печи требует постоянного обслуживания и ремонта в период проведения планово–предупредительных ремонтов (формирования лёточного канала, заделка выгоревшей части) [36].

4.1.2 Дозирование шихтовых материалов

Каждый загружаемый шихтовой материал до заданной массы, техническими условиями процесса (ТИ), из сортового бункера вибропитателем подаётся в весовой дозатор. Каждый вид кварцевого сырья имеет свой весовой дозатор. По достижении заданной массы вибропитатель отключается через концевой выключатель. Сигнал на отключение вибропитателя и открывание разгрузочного затвора весового дозатора поступает от прибора взвешивания [11].

Шихтовой материал разгружается в промежуточный бункер, освобождая весовой дозатор. После освобождения весового дозатора поступает сигнал на закрытие разгрузочного затвора. После того, как все материалы поступят в промежуточные бункера, идёт одновременное включение вибропитателей. Затворы дозаторов открываются последовательно через выдержку времени, зависящую от скорости сборочного конвейера, материал освобождается из промежуточных бункеров так, чтобы каждый последующий вид материала разгружался на ленту сборочного конвейера по движению транспортёрной ленты и загружался на предыдущий материал по всей его длине, обеспечивая образование «слоёного пирога». Это достигается тщательной регулировкой работы вибропитателей (частотой вибрации) и исключением «зависания» материала в промежуточных бункерах. Разрыв между навесками (колошами) по времени на сборном конвейере должен быть не менее 1-2 минут. При этом в печной карман необходимо загружать колошу, исключив её разделение на два кармана: 1 навеска – 1 карман.

Контроль за правильностью эксплуатации и работой весовых дозаторов осуществляется специальной службой весового хозяйства в соответствии с инструкцией по их обслуживанию. В конечном итоге это определяет соответствие материального баланса плавки. Операторы должны ежедневно проверять работу дозаторов и принимать оперативные меры по устранению обнаруженных недостатков. Результаты контроля фиксируются в журнале поверки

весов. При обнаружении отклонений от нормальной работы дозаторов необходимо немедленно устранить неполадку. В случае ввода контролируемого параметра при помощи датчика эту операцию можно автоматизировать, избегая влияние человеческого характера.

Оператор (шихтовщик) ведёт учёт подачи и расхода шихтовых материалов и шихты, поступающей за смену на РТП. На основании данных оператора старший плавильщик регистрирует в «карте плавок» расход шихтовых материалов. Находящаяся в печных карманах шихта должна соответствовать заданному соотношению шихтовых материалов, шихтовщик несёт за это персональную ответственность. Также он должен контролировать размер фракции на ленте конвейера до загрузки в сортовые бункера. Если установить камеру технического зрения на конвейер, то можно автоматически фиксировать и собирать данные по размерности шихты, и управляющим воздействием менять режим загрузки в печь через дозаторы. На практике случае несоответствия материалов заданному гранулометрическому составу ставят в известность дробильщика.

Расчет шихтовых материалов ведется на одну навеску шихты. Содержание твердого углерода в восстановителях рассчитывается по формуле (4.2):

$$C_{тв} = \frac{(100 - W) - (A + y)}{100} \quad (4.2)$$

где: W – содержание влаги, %

A – содержание золы, %

y – содержание летучих веществ, %

Содержание твердого углерода в восстановителях принято:

- в древесном угле – 0.7 ед.
- в колумбийском каменном угле – 0.55 ед.
- в казахском каменном угле – 0.48 ед.
- в каменном угле ш. Листвяжная – 0.53 ед.

- в буром угле – 0.34 ед.
- в нефтяном коксе – 0.86 ед.

Для расчетов принят коэффициент пересчета кварцита равный 0,4, показывающий, что для восстановления 1 кг кварцита требуется 0.4 кг твердого углерода.

Избыток твердого углерода в навеске определяется формулой (4.3):

$$C_{тв} = \frac{0,7 \times др.уголь + 0,86 \times н.кокс + 0,55 \times к.уголь}{0,4 \times кварцит}, \% \quad (4.3)$$

Пример расчета:

Задано:

1. Избыток твердого углерода – 110 %.
2. Количество каменного угля в навеске – 100 кг.
3. Количество колумбийского каменного угля – 160 кг.
4. Приход твердого углерода с нефтекоксом – 22 % от общего содержания твердого углерода.
5. Количество каменного угля в навеске.

Для примера работы и реализации программы загрузки шихты расчет ведем на навеску кварцита 450 кг.

Кварцит 450кг x 0,4 = 180 (кг углерода – 100% избытка); в пересчёте расчёт восстановителей с избытком 110% углерод - 198кг.

Установлена навеска:

количество каменного угля в навеске – 7,2 (кг углерода), в пересчёте = 15 кг;
 количество колумбийского каменного угля – 112,75 (кг углерода), в пересчёте = 205 кг;
 количество нефтяного кокса – 25,8 (кг углерода), в пересчёте = 30 кг;
 количество древесного угля в навеске – 52,25 (кг углерода), в пересчёте = 75 кг;

По стехиометрии в абсолютных условиях расход $C_{\text{тв}}$ равен 40 кг на 100 кг SiO_2 или 867 кг/т Si . Практически он выше: $42 \div 44$ кг на 100 кг SiO_2 , что соответствует $105 \div 110\%$ от теоретически необходимого. Это связано с:

- неконтролируемым выгоранием $C_{\text{тв}}$ на колошнике открытых печей;
- неконтролируемые потери на тракте шихтоподачи;
- неконтролируемый улет пыли восстановителя в газоходы.

Таким образом, если внести все эти значения в базу данных, то можно создать общую матрицу контроля в системе АСУ ТП. В нашем случае это может быть основанием создания алгоритма управления и отдельным блоком ПО в системе управления РТП.

4.2 Разработка адаптивной системы управления

4.2.1 Разработка способа управления с учётом баланса углерода

Разработанный программный комплекс помимо энергетических параметров (ток электродов, напряжение фазное и линейное на высокой и низкой стороне трансформатора и т.д.) ведётся контроль и управление технологическими параметрами: баланс углерода в печи, соотношение углеродистых восстановителей, количество примесей в кварците и восстановителе, влажность и зольность углеродистых восстановителей, поэтому появляется дополнительное управляющее воздействие – добавка навески корректирующей шихты.

Производится измерение текущих значений параметров (рисунок 4.3): на высокой стороне печного трансформатора линейного напряжения датчиком линейного напряжения и фазного напряжения датчиками фазного напряжения, тока измерительными трансформаторами тока, коэффициент мощности измерителем коэффициента мощности и количество электричества электрическим счётчиком, потреблённого печью. На низкой стороне трансформатора измеряется напряжение датчиком фазного напряжения и линейное напряжение датчиком линейного напряжения, и вычисляется значение тока низкой стороны трансформатора, также передаётся текущее номер ступени трансформатора из механизма их переключения. Текущее положение электрода регистрируется

датчиком положения электрода и сигнализатором верхнего и нижнего положений, вычисляется длина электрода исходя из наработанной мощности каждого конкретного электрода и величины его перепуска. Таким образом вычисляется положение торца электрода в печном пространстве. Анализатор влажности и зольности сырья определяет текущие значения влажности и зольность для углеродистых восстановителей, чтобы корректно рассчитать баланс углерода шихте [122].

Измерение электрических параметров осуществляется промышленными датчиками с унифицированным токовым сигналом – 4-20 мА, такие параметры как: ток, коэффициента мощности, напряжения фазное и линейное на высокой и низкой стороне трансформатора.

При возникновении отклонения от номинального режима работы печи, по алгоритму (рисунок 4.4) сначала проводится проверка влажности и зольности углеродистых восстановителей специальным анализатором, если обнаружилось отклонение (информация передается в базу данных системы управления), то после обработки информации и оценки необходимого соотношения кварца и восстановителя подаётся корректирующая навеска с «тяжёлой» или «лёгкой» шихтой в зависимости от отклонения.

Если баланс углерода шихты в норме, то выполняется проверка положения рабочего торца электрода датчиком положения электрода и сигнализатором верхнего и нижнего положений. При работе на коротких или длинных электродах их с помощью перепуска или поднятием/опуском устанавливают в номинальное положение. Если положение электрода соответствует заданной уставке, то производится проверка уровня колошника, и передается сигнал в блок данных. При высоком или низком уровне колошника, устраняют причины его возникновения (досыпают шихту или наоборот перестают её подавать). Если уровень колошника соответствует уставке, то проверяется электрический режим работы печи путём сравнения уставок с текущими показаниями датчиков линейного и фазного напряжения на высокой и низкой сторонах.

Рисунок 4.3 – Структурная схема

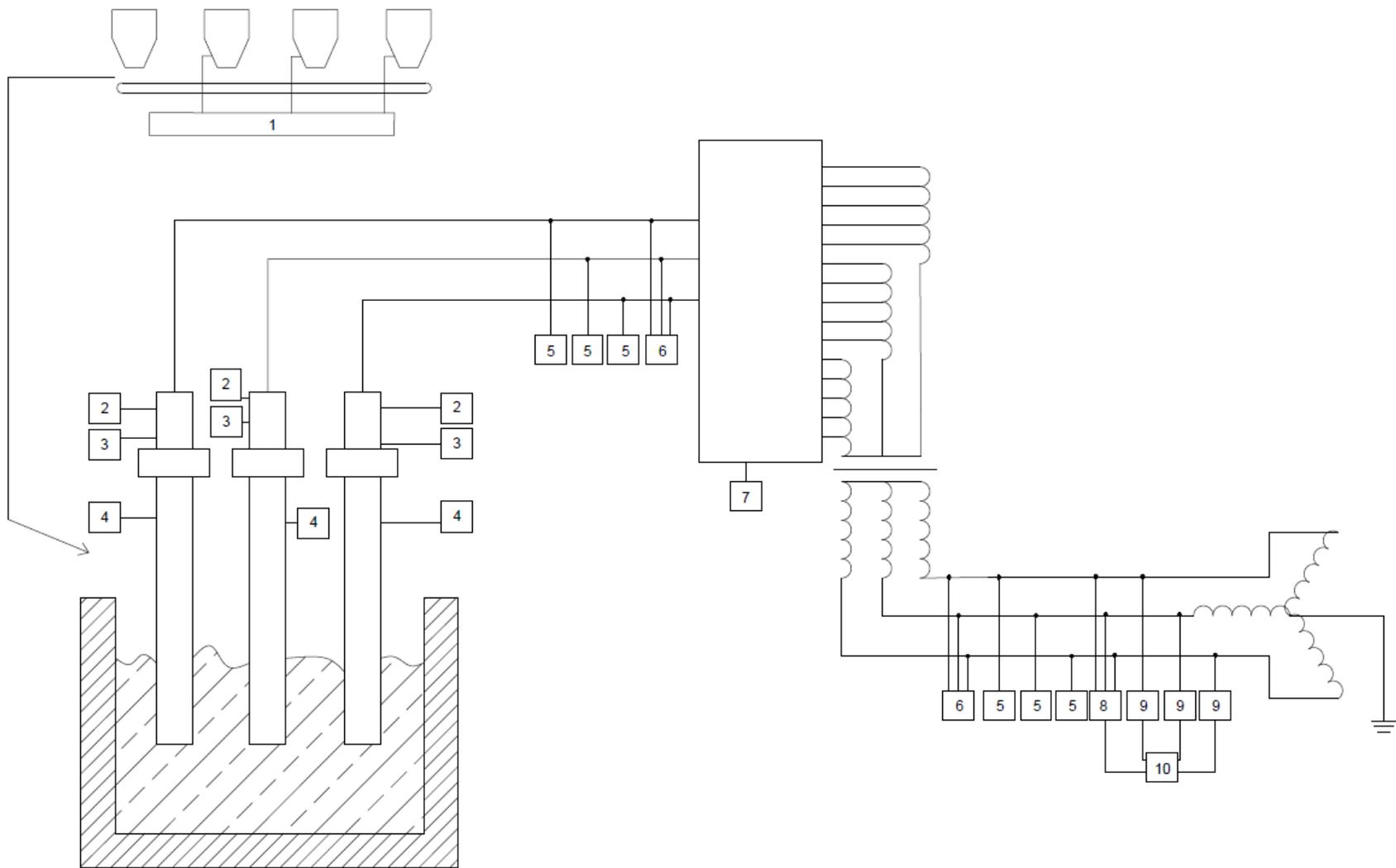
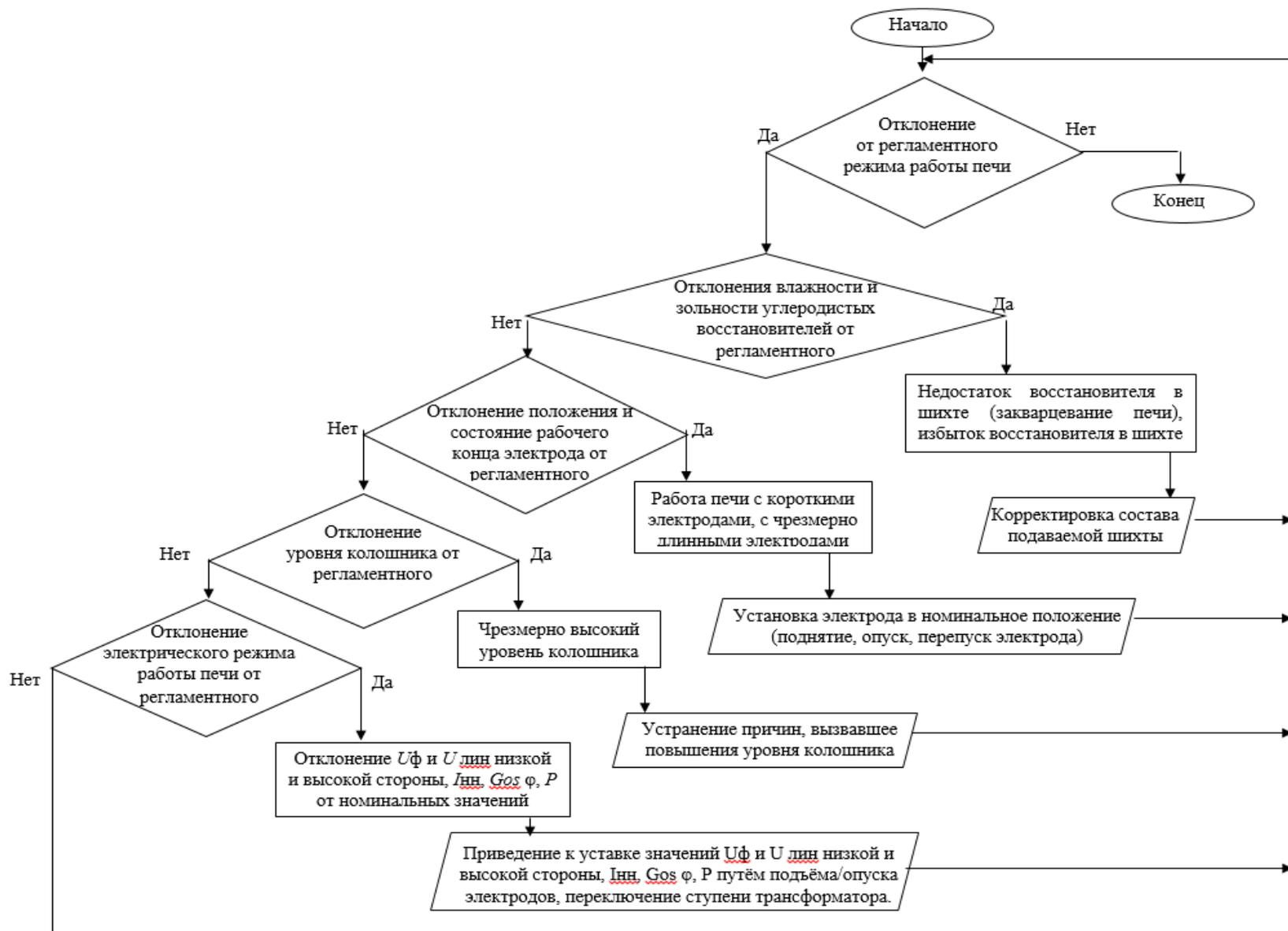


Рисунок 4.4 – Алгоритм работы программного комплекса



печного трансформатора, силы тока со значениями измерительных трансформаторов тока, коэффициента мощности со значением измерителя коэффициента мощности и количества израсходованной электроэнергии со показаниями электрического счётчика, номера ступени трансформатора, вычисленного значения тока электродов. Если обнаруживается отклонение от номинального режима, тогда производится: при высоком токе на электроде – его поднятие, низком – опуск, при сильном отклонении – перепуск электрода или переключение ступени трансформатора, при перекосе напряжения на электродах производится корректировка их положения [91].

При соответствии этих параметров по уставкам в системе запускается проверка действий персонала на соответствие техническим регламентам и должностным инструкциям.

Новым в этом способе является то, что помимо энергетических параметров ведётся контроль и управление технологическими параметрами: баланс углерода в печи, соотношение углеродистых восстановителей, влажность и зольность углеродистых восстановителей, поэтому появляется дополнительное управляющее воздействие – добавка навески корректирующей шихты. Весь кластер дополнительных параметров передаётся на верхний уровень на АРМ оператора.

В процессе получения кремния могут изменяться свойства углеродистых восстановителей, в частности влажность. При расчёте баланса углерода в печи технологический персонал не учитывает текущее значение влажности, а принимает значение нормативное, которое указано в сопроводительной документации, это приводит к дисбалансу восстановителя в печи [123, 124]. Избыток углерода ведёт к высокому уровню установки электродов, а также переходу работы электродов в дуговой режим, при повышенной нагрузке на электродах это вызывает снижение выхода кремния из печи и прекращение выхода шлака. Когда температура в печи падает, это приводит к частым отключениям печи по перегрузкам [33, 37, 72, 73, 82].

Данный способ подтвердил свою работоспособность на ООО «РУСАЛ-Кремний-Урал», г. Каменск-Уральский. При внедрении этого способа были достигнуты следующие результаты: увеличение выхода по кремнию, снижение выбросов монооксида кремния, снижение удельного расхода электроэнергии, повышение точности регулирования режима плавки, стабилизация технологических параметров.

4.2.2 Разработка адаптивного регулятора

Типовые адаптивные системы управления для идентификации объекта управления (настройки регулятора) имеют функции режима подачи на объект управления сигнал гармоническую форму, что приводит к отклонению системы от номинала, это в свою очередь негативно влияет на работу систему и приводит, как показано выше, к существенным экономическим потерям, вплоть до аварийной остановки РТП [71, 80, 81].

Предлагаемый способ не имеет указанных недостатков. Система адаптивного управления состоит из объекта управления, регулятора, дигратора и идентификатора. Структурная схема изображена на рисунке 4.5.

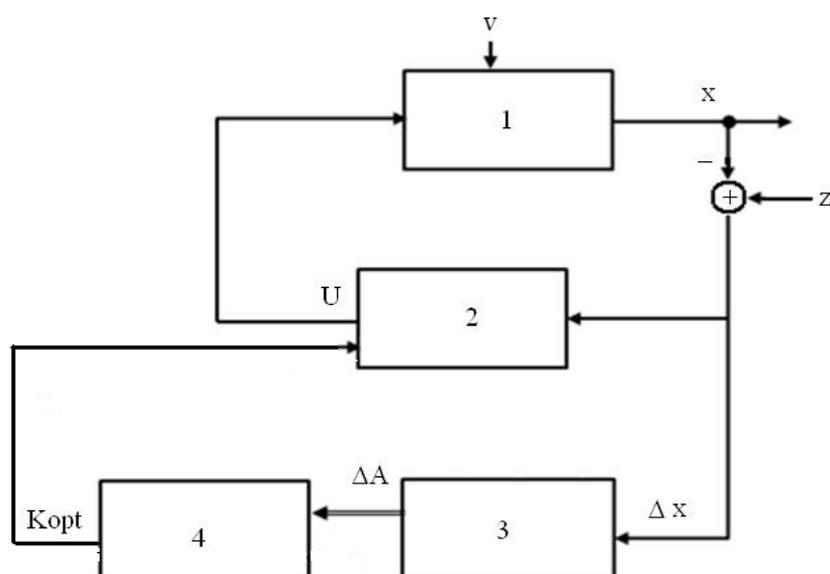


Рисунок 4.5 Структурная схема системы регулирования с адаптивной настройкой регулятора. 1 – расширенный объект управления, 2 – регулятор, 3 – идентификатор, 4 – дигратор (блок расчёта коэффициентов регулятора)

Для решения задачи предлагается реализовать следующий подход.

Введены следующие обозначения векторов:

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 имеют вид (4.4) [100, 108]:

$$x(t+1) - x(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) + v(t), \quad (4.4)$$

где u_t закон управления определяется формулами (4.5) и (4.6):

$$u_t = -K \cdot x_t, \quad (4.5)$$

$$K = 1/(1+\gamma) \cdot (B^T \cdot B)^{-1} B^T \cdot A. \quad (4.6)$$

Для оптимального регулятора в системе АСУ ТП, 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 (4.7):

$$u_t = -(B^T \cdot B)^{-1} B^T \cdot A \cdot x_t, \text{ т.е.} \quad (4.7)$$

где u_t определяется формулой (4.5).

Введём обозначение контура контроля выделенных дополнительных параметров, как единое целое: объект плюс регулятор. Из полученных соотношений (4.4) и (4.5) исключим управление и получим уравнение замкнутого контура регулирования (4.8):

$$x(t+1) = (A - B \cdot K)x(t) + v(t) \quad (4.8)$$

$$\Delta A = A - B \cdot K, \quad (4.9)$$

ΔA обозначена результирующая матричная константа замкнутого контура, которая находится по формуле (4.9).

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

Простейший способ идентификации линейной модели вида (4.8) по матрице ΔA – это метод наименьших квадратов (МНК).

$$\Sigma[x_{t+1} \cdot x_t^T] = \Delta A \cdot \Sigma[x_t \cdot x_t^T] \quad (4.11)$$

Находим:

$$\Delta A = \Sigma[x_{t+1} \cdot x_t^T] \cdot [x_t \cdot x_t^T]^{-1} \quad (4.12)$$

Первый цикл с $K_{нач}$, находим ΔA по формуле (4.12), затем считаем, что B нам известно, и итерационным методом находим A по формуле (4.13), а на следующем цикле, находим B , используя A с прошлого цикла, так через несколько циклов найденные нами коэффициенты приблизятся к коэффициентам модели и соответственно приблизятся настройки регулятора к оптимальным [115, 116].

$$A = \Delta A_1 + B \cdot K_{нач} \quad (4.13)$$

Далее находим K_{opt1} через A по формуле (4.6):

Второй цикл:

ΔA_2 рассчитываем по формуле (4.12)

$$B = (A + \Delta A_2) \cdot K_{opt1} \quad (4.14)$$

$$K_{opt2} = I / (I + \gamma) \cdot A \cdot B^{-1} \quad (4.15)$$

Алгоритм работы блока идентификатора:

вход X_{t+1} и X_t , а выход - ΔA , находится по формуле (4.12). Блок работает 30 циклов и в конце вычисляет ΔA , и передаёт в следующий блок.

Алгоритм работы блока дигратора:

вход ΔA , а выход K_{opt} , находится по формуле (4.12) и (4.15), на первом цикле берём коэффициент B и находим через него A (4.13), а затем и K_{opt1} (4.7), на втором цикле рассчитываем, по вычисленному на прошлом цикле коэффициенту A , B и K_{opt2} (4.15). Результаты математического моделирования представлены на рисунке 4.6.

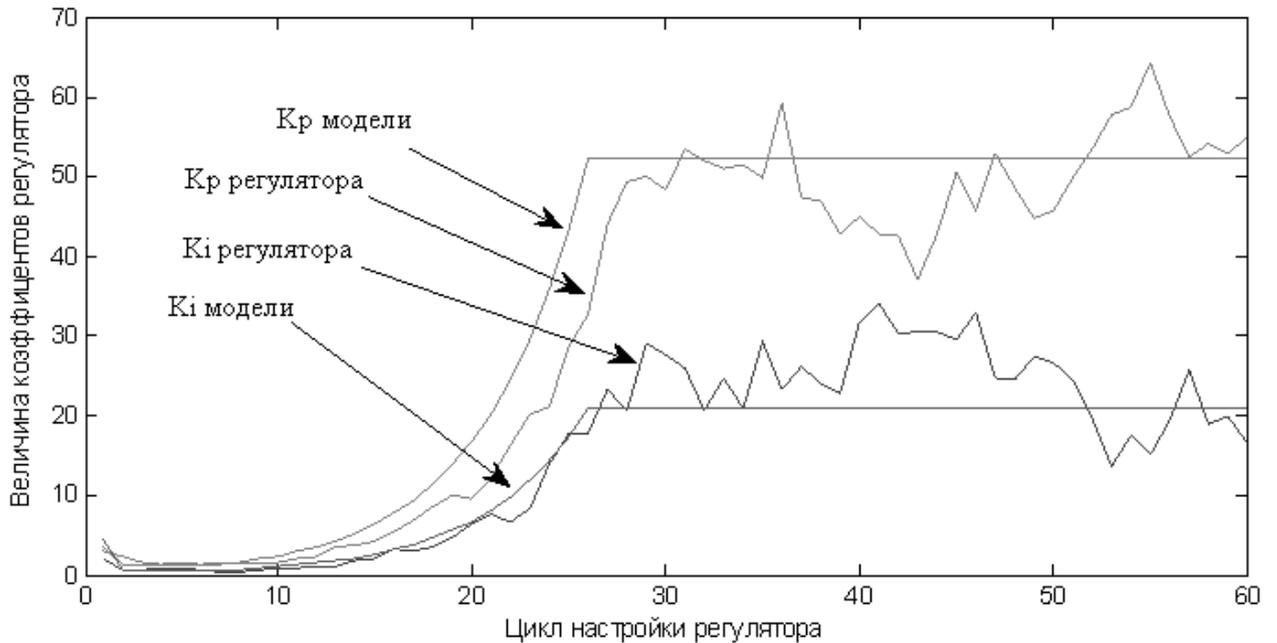


Рисунок 4.6 – Результаты математического моделирования, K_p , K_i — коэффициенты усиления пропорциональной и интегральной составляющих регулятора

Таким образом, если не использовать вышеперечисленные способы управления руднотермической печью, то получим перерасход электроэнергии, повышенный расход (сгорание) электрода, и в худшем случае – «закварцевание печи» (уменьшение ФРП), спекание шихты, появление мощных свищей, снижение и колебание токовой нагрузки, повышение вязкости шлака и затруднение выхода его из печи. Этот алгоритм настройки регулятора предлагается использовать для системы управления подачи шихтовых материалов, в частности восстановителя.

4.3 Расширение возможностей автоматизированного контроля и управления существующей SCADA-системы

Управлять сложными агрегатами, такими как печи РТП, эксплуатируемые на предприятии, невозможно без современных контрольно-измерительных приборов, применяемых для автоматизации технологических процессов. Управление сложными технологическими процессами можно полностью автоматизировать, и функции оператора сведутся только к наблюдению за ходом

процесса на верхнем уровне АСУ ТП – SCADA-системе, а редкие вмешательства будут нужны только в экстренных и аварийных ситуациях [8, 70, 84]. На рисунке 4.7 представлена многоуровневая SCADA-система производства металлургического кремния.

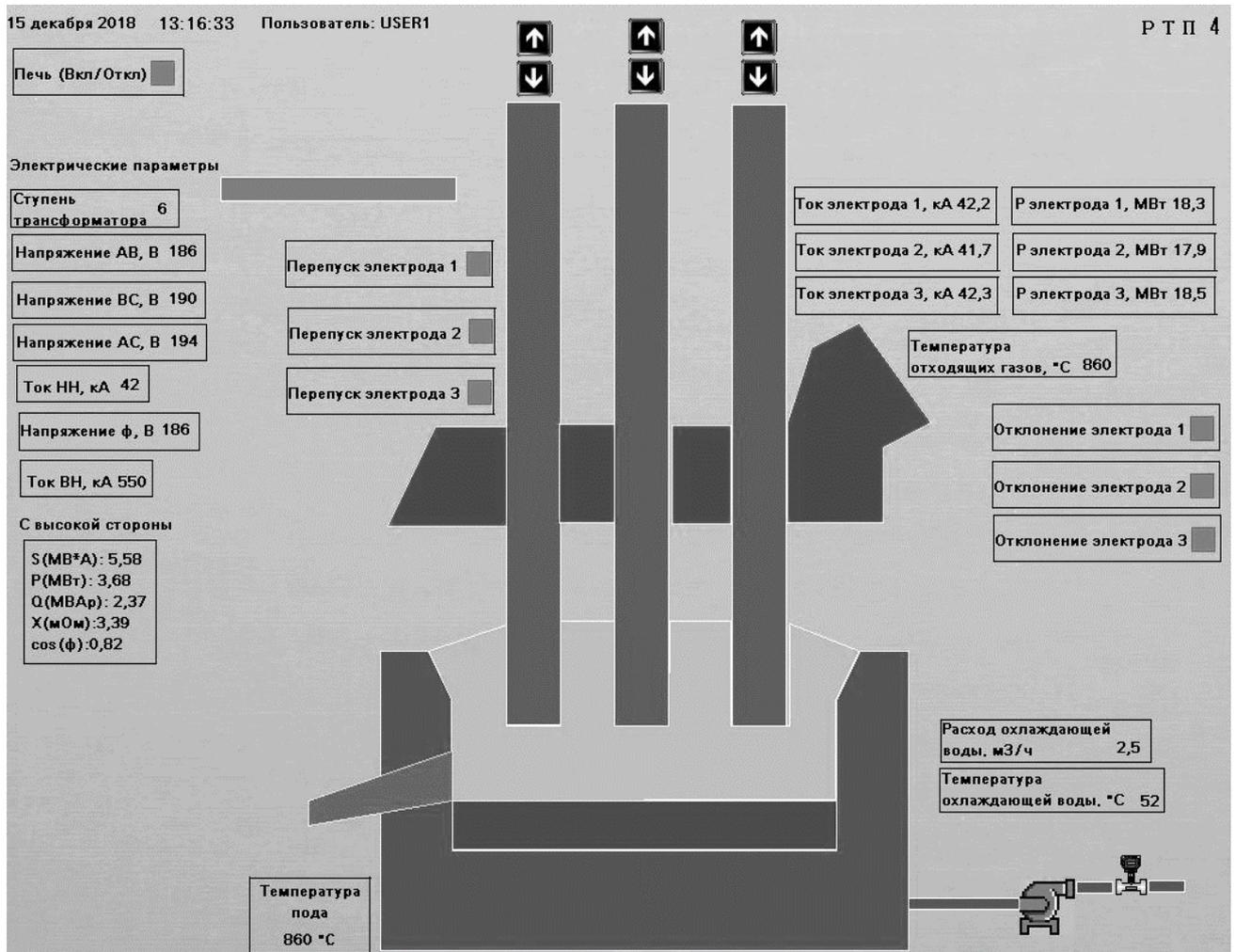


Рисунок 4.7 – Многоуровневая SCADA-система производства кремния

В качестве рекомендаций для внедрения можно предложить внедрение многоуровневой системы управления производством в виде SCADA-системы. Первый уровень – это уровень управления исполнителями механизмами, опроса полевых датчиков, контроля шихтовых материалов (химический состав, масса, содержание влаги).

Второй уровень – обработка данных, получаемых с нижнего уровня. На основе интегрированного в систему алгоритма – выдача сигналов управления

для исполнительных механизмов и согласование токовой нагрузки, а также передача данных о ходе технологического процесса (сила тока, положение электродов и их геометрия, температура процесса) в информационную сеть предприятия.

Третий уровень – оператора, на который поступает оперативная информация о производственном процессе в режиме реального времени на мнемосхему, изображающей технологический процесс. Также на мониторе АРМа отображаются сообщения об отклонениях параметров техпроцесса, в том числе и отклонение электрода от своего осевого положения.

Четвертый уровень – система управления предприятием и телекоммуникация, при которой создается цифровая база данных Big Data, которая учитывает движение товарно-материальных ценностей, готовой продукции, расчетов с поставщиками, кассовых и банковских операций. Также на верхнем уровне автоматизированной системы управления технологическом процессе (АСУ ТП) решается вопрос оперативного планирования и управления, технико-экономическое планирование и материально-технического снабжения [55, 56, 58].

По средней оценке, это позволит повысить выход годного кремния на 5-10% и снизить удельный расход электроэнергии на 3-5% при уменьшении расхода сырья на 1-2%. Мероприятия также позволят системно улучшить условия труда рабочего персонала.

Многоуровневая система автоматизации даст возможность получить высокую производительность труда, поскольку практически будет отсутствовать зависимость между производительностью печей и интенсивностью труда человека во время выплавки кристаллического кремния. Известно, что автоматизированные комплексы производства повышают социальную ответственность и эффективность труда, поскольку это одно самых вредных металлургических производств [109, 110, 117].

4.4 Экономическая эффективность от внедрения АСУ ТП с расширенными возможностями

Электротермический цех – многофункциональный объект, который предназначен для производства технического кремния методом восстановления SiO_2 (кварцита) в руднотермических печах с использованием электродов диаметром 710 мм, для выполнения производственных программ по выпуску технического и рафинированного кремния, кремния для литейного производства.

Себестоимость выпускаемой продукции (полуфабрикат или готовая продукция) зависит от приведённых сырьевых и топливно-энергетических затрат, расходов на содержание и эксплуатацию оборудования и цеховых расходов. Для определения себестоимости выпускаемой продукции составляется калькуляция, она представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Калькуляция себестоимости продукции

Статьи расхода	Единица измерения	Цена за единицу т. руб.	Фактическая		По проекту	
			Количество	Сумма, тыс. руб.	Количество	Сумма, тыс. руб.
1	2	3	4	5	6	7
I. Сырье, материалы и полуфабрикаты						
Кварцит	т	6.5	2.600	16.9	2.6	16.9
Нефтяной кокс	т	4.8	0.176	0.8448	0.17	0.816
Каменный уголь	т	5.6	0.270	1.512	0.25	1.4
Известь	т	3.7	0.012	0.0444	0.012	0.0444
Древесный уголь	т	25	1.543	3.8575	0.15	3.75
Электроды диаметром 710 мм	т	210	0.046	9.66	0.04	8.4
Итого				32.8187		31.3104
Возвратные отходы						
Пыль газоочисток	т	12	0.1	1.2	0.1	1.2
Итого за вычетом отходов				31.62		30.11
II. Вспомогательные материалы						
Воздух	нм ³	0.8	35	28	35	28
Глина огнеупорная	т	9	0.001	0.009	0.001	0.009

Продолжение таблицы 4.2.

Статьи расхода	Единица измерения	Цена за единицу т. руб.	Фактическая		По проекту	
			Количество	Сумма, тыс. руб.	Количество	Сумма, тыс. руб.
Шест гасильный	м ³	7	0.01	0.07	0.01	0.07
Электроды диаметром. 100 мм	т	150	2	0.3	0.002	0.3
Итого				28.379		28.379
III. Энергетические затраты						
Электроэнергия	тыс. кВт час	2	13813	27626	13122.35	26244.7
Вода свежая для подпитки	м ³	0.1	190	19	190	19
Итого				27645		26263.7
IV. Осн. заработная плата	тыс. руб.			3.58		3.58
V. Доп. заработная плата	тыс. руб.			0.54		0.54
VI. Страховые взносы на обязательное социальное страхование	тыс. руб.			1.07		1.07
VII. Содержание оборудования	тыс. руб.			17.04		17.04
VIII. Цеховые расходы	тыс. руб.			1.45		1.45
Цеховая себестоимость	тыс. руб.			2 131		2 131
На 1 т продукции				29859.68		28476.87

Расчёт экономической эффективности

Экономический эффект достигается за счет снижения расхода электроэнергии и расхода восстановителей через автоматизацию управления, вследствие снижения колебаний основных технологических параметров, за счёт внедрения АСУ ТП с расширенным функционалом. В данном случае удалось добиться снижения удельного расхода электроэнергии и снижения вероятности поломки электрода, повышения извлечения кремния за счёт более точного ведения технологического процесса.

Экономический эффект рассчитывается по формуле (4.16):

$$\mathcal{E}_н = (C_1 - C_2) \cdot A, \quad (4.16)$$

где себестоимость по проекту и фактическая $C_1=29859.68$ и $C_2=28476.87$ и A – годовой выпуск продукции (по данным предприятия).

Экономический эффект от внедрения программно-технического комплекса существенный и составляет:

$$\mathcal{E}_n = (29859.68 - 28476.87) \cdot 4500 = 6222637 \text{ руб.}$$

В качестве критерия оценки эффективности проектируемого объекта используем показатель – срок окупаемости дополнительных вложений. Срок окупаемости оборудования вычисляется по следующей формуле:

$$T = \frac{\Delta K}{\Delta C} = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2} = \frac{6000000}{6222637} = 0.96 \text{ года,}$$

где ΔK – дополнительные капитальные вложения руб., ΔC годовая сумма экономии от снижения себестоимости руб.

Экономический эффект рассчитывается по формуле (4.17):

$$\mathcal{E}_n = \Delta C \cdot (1 - H_n), \quad (4.17)$$

где ΔC – экономия по себестоимости за счёт организационно-технического внедрения мероприятия,

H_n налог, 0.2 – налог на прибыль.

И составляет $\mathcal{E}_\phi = 6\,222\,637 \cdot (1 - 0.2) = 4\,978\,109.88$;

Технико-экономические показатели участка

Рассчитанные в предыдущих разделах технико-экономические показатели сводятся в таблицу 4.3

Таблица 4.3 – Сводные технико-экономические показатели проекта

Наименование	Единица измерения	Значение показателей	
		По проекту	По действующему производству
Годовой выпуск продукции:			
в натуральном выражении	тыс. т	4.5	4.5
Капитальные вложения в основные фонды, всего	тыс. руб.	6000	0
В том числе:			
в оборудование	тыс. руб.	3000	0

Продолжение таблицы 4.3.

Наименование	Единица измерения	Значение показателей	
		По проекту	По действующему производству
Численность трудящихся, всего	чел.	5	5
В том числе:			
рабочих	чел.	4	4
Себестоимость продукции	руб./т	28476.87	29859.68
Срок окупаемости капитальных вложений	лет	0.96	-
Экономический эффект от внедрения оргтехмероприятия	тыс. руб.	4978	

4.5 Выводы по Главе 4

Второе научное положение: адаптивный алгоритм управления дозировкой шихты с учётом влажности восстановителя позволяет повысить производительность РТП на 5-10% и снизить удельный расход электроэнергии на 3-5 %.

В главе проведено расширение функционала автоматизированной системы управления процесса получения металлургического кремния в РТП и получены следующие результаты:

1. Произведено моделирование процесса карботермического восстановления кремния в РТП с учётом теплового баланса, с помощью которого можно определить влияние температуры на изменение протекания химических реакций в печи.

2. Разработан алгоритм адаптивного регулятора, который позволяет реагировать системе управления на изменяющиеся входные параметры – это, прежде всего, влажность и зольность восстановителей. Подобный алгоритм изменяет настройки регулятора без применения специальных управляющих воздействий на контур управления.

3. Для реализации способа повышения эффективности контроля и управления предложено внедрение в существующую SCADA-систему дополнительных параметров – это адаптивный регулятор и система определения состояния электрода.

4. Рассчитан экономический эффект от внедрения программно-технического комплекса. Он составляет 4. 978 млн. рублей, срок окупаемости – менее одного года. Главным фактором экономии является сокращение удельного расхода электроэнергии, как одного из основных составляющих себестоимости выпускаемой продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Произведён анализ состояния современных систем управления руднотермическими печами и выполнен патентный поиск. Они показали необходимость повышения информативности технологического процесса и диагностики оборудования РТП. Это возможно достичь путём внедрения в систему управления новых параметров, связывающих технологические и электрические параметры, что позволит значительно снизить колебания таких параметров как баланс углерода в шихте и в печи. Повышение эффективности управления возможно достичь внедрением многоуровневой системы управления, благодаря которой появится целостное представление о ходе технологического процесса.

2. Рассмотрены основные методы неразрушающего контроля с учётом особенностей технологического процесса, таких как высокие температуры, запылённость, мощные электромагнитные поля выбран – оптический метод. Разработан комплекс лабораторно-практических исследований, который позволит повысить технико-экономические показатели за счёт снижения вероятности поломки электрода в РТП, подавая сигнал о критическом изгибе электрода в систему управления.

3. Обработка результатов эксперимента по определению критического изгиба электрода, при превышении которого произойдёт поломка электрода, позволила установить, что изгиб электрода и усилие, оказываемого на него давления, имеет линейную зависимость. Она адекватно описывает экспериментальные данные с лазерным измерителем (проведена проверка по критерию Фишера). Для решения задачи контроля положения электрода во время

перепуска и при упоре электрода в шихту был разработан программный комплекс (№ 2017611642), который позволяет снизить вероятность поломки электрода. Выполненное математическое моделирование распределения тепловых полей в зависимости от отклонения содержания восстановителя (баланс углерода) указывает на необходимость ввода дополнительного параметра для АСУ ТП. Сформулировано первое научное положение: Контроль и регулирование положения электродов в шихте руднотермической печи определяется степенью отклонения от заданного осевого направления лазерного интегратора.

4. Проведено расширение функций контроля и управления процесса получения металлургического кремния в РТП, произведено 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 адаптивного регулятора, который позволяет реагировать системе управления на изменяющиеся входные параметры: это прежде всего влажность и зольность восстановителей. Подобный алгоритм изменяет настройки регулятора без применения 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 определения состояния электрода.

7. Рассчитан экономический эффект от внедрения программно-технического комплекса. Он составит 4. 978 млн. рублей, срок окупаемости – менее одного года. Главным фактором экономии является сокращение удельного расхода электроэнергии как одного из основных составляющих себестоимости выпускаемой продукции.

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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АСУ ТП	– автоматизированная система управления технологическим процессом
РТП	– руднотермическая печь
ДСП	– дуговая сталеплавильная печь
УКРМ	– устройство компенсации реактивной мощности
ПК	– персональный компьютер
OPC	– Open Platform Communications
ПЛК	– программируемый логический контроллер
АРМ	– автоматизированное рабочее место
SCADA	– Supervisory Control And Data Acquisition
КИП	– контрольно-измерительный прибор
НК	– неразрушающий контроль
ОНК	– оптический неразрушающий контроль
АЦП	– аналого-цифровой преобразователь

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматическое управление электротермическими установками: Учебник для вузов / А.М. Кручинин, К.М. Махмудов, Ю.М. Миронов и др. Под ред. А.Д. Свенчанского. – Москва: Энергоатомиздат. – 1990. – 416 с.
2. Авторское свидетельство № 1757132 СССР, МПК H05B 7/148(2006.01). Способ регулирования мощности в ванне трехфазной трехэлектродной электропечи: № 4871219: заявл. 17.08.1990: опубл. 23.08.1992 / Лыков А.Г., Розенберг В.Л., Лунин А.Г.; заявитель Всесоюзный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт электротермического оборудования. – 5 с.: ил. – Текст: непосредственный.
3. Авторское свидетельство № 1662019 СССР, H05B 7/148(2006.01). Способ регулирования мощности в ванне трёхфазной трёхэлектродной электропечи: №1662019: заявл. 25.04.1989: опубл. 07.07.1991 / Лыков А.Г., Розенберг В.Л., Лунин А.Г. и др. заявитель Всесоюзный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт электротермического оборудования. – 3 с.: ил. – Текст: непосредственный.
4. Анализ различных вариантов построения схем автоматического управления перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей и установок печь-ковш / А.А. Николаев и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2015. – № 2. – С. 90-100.
5. Анализ энерготехнологических режимов работы дуговых сталеплавильных печей при использовании различных видов шихты / В.И. Тимошпольский и др. // Литье и металлургия. – 2006. – № 4 (40). – С. 19-23.
6. Арменский, С.В. Разработка математической модели подэлектродного пространства руднотермических печей: Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург: СПбГТИ (ТУ), – 2004. – 131 с.

7. Афанасьев, В.Н. Математическая теория конструирования систем управления / В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Р. Носов. – Москва: Высшая школа. – 2003. – 614 с.
8. Безопасность жизнедеятельности в металлургии: Учебник для вузов / Л.С. Стрижко, Е.П. Потоцкий, И.В. Бабайцев и др. / Под ред. Стрижко Л.С. – Москва: Metallurg. – 1996. – 416 с.
9. Блинов, О.М. Автоматическое управление металлургическими процессами / О.М. Блинов, А.М. Беленький, В.Ф. Бердышев. – Москва: Металлургия. – 1989. – 384 с.
10. Богданов, С.П. Расчет руднотермических печей: методические указания. – Санкт-Петербург: СПбГТИ(ТУ). – 2011. – 38 с.
11. Брусаков, Ю.И. Распределение мощности в ванне электропечей между дугой и шихтой при производстве ферросилиция разных марок и технического кремния / Проблемы рудной электротермии: сб. докл. науч.-техн. совещ. «Электротермия-96». – 1996. – С. 148–154.
12. Вапник, М.А. Автоматическое управление руднотермическими печами / М.А. Вапник, Э.Э. Семенов, Обзорн. инф. – Москва: НИИТЭХИМ. – 1977. – 26 с.
13. Вапник, М.А. Системы автоматического управления электрическим режимом руднотермических электропечей / М.А. Вапники, Э.Э. Семенов, Обзорн. информация. – Москва: НИИ-ТЭХИМ. – 1978. – 27 с.
14. Васильев, В.В. Управление руднотермической электроплавкой сульфидного медно-никелевого сырья на основе гармонического анализа тока и напряжения электродов: диссертация кандидата технических наук. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова. – 2010. – 143 с.
15. Великанов, Т.Ф. Непрерывный контроль электроплавки стали на основе высших гармоник, генерируемых дугами / Т.Ф. Великанов, В.С. Князев // Сталь. – 1978, – № 4. – С. 324–328.

16. Волжин, А.С. Математическое описание и анализ структуры сложных комплексов управления // Изв. РАН: Теория и системы управления. –1998. –№1. – С. 22-27.
17. Волков, А.И. Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. – Москва: Современная школа. – 2005. – 608 с.
18. Воробьев, В.П. Электротермия восстановительных процессов. – Екатеринбург: УРО РАН, – 2009. – 268 с.
19. Воробьев В.П., Автоматизированная система контроля и управления процессом выплавки ферросплавов /В.П. Воробьев, В.А. Паньков, А.В. Сивцов // Компьютерные методы в управлении электротехнологическими режимами руднотермических печей: Сб. науч. тр. – 1998. – С. 269-271.
20. Воробьев, В.П. Оценка характеристик распределения энергии с учетом зонального строения рабочего пространства дуговых восстановительных печей / В.П. Воробьев, А.В. Сивцов // Проблемы рудной электротермии: сборник докладов научно-технического совещания «Электротермия-96». – 1996. – С. 177-178.
21. Грачев, А.Н. Способ текущего контроля симметричности трехфазной нагрузки в дуговых или руднотермических электропечах // А. Н. Грачев, Н.Н. Глухов // Компьютерные методы в управлении электротехнологическими режимами руднотермических печей. – 1998. – С. 255-261.
22. Глинков, Г.М. Контроль и автоматизация металлургических процессов / А.И. Косырев, Е.К. Шевцов; под науч. ред. проф. д.т.н. Г.М. Глинкова. – Москва: Металлургия. – 1989. – 352 с.
23. Григорян, В.А. Теоретические основы электросталеплавильных процессов / В.А. Григорян, Л.Н. Белянчиков, А.Я. Стомахин. – Москва: Металлургия. – 1987. – 272 с.
24. Горенский, Б. М. Автоматизация технологических процессов цветной металлургии на основе имитационного моделирования / Диссертация на соискание степени доктора технических наук. – Красноярск. – 2004. – 354 с.

25. Данцис, Я.Б. Об электрической дуге руднотермических печей / Труды Лен-НИИГипрохима. – 1967. – Вып. 1. – С. 5-12.
26. Добрынин, И.Ф. Электрическая дуга. – Москва: Знание. – 1958. – 32 с.
27. Дрессен, В.В. Основные принципы управления руднотермическими печами / В.В. Дрессен. М.З. Файницкий // Проблемы рудной электротермии: сборник докладов научно–технического совещания «Электротермия-96». – 1996. – С. 216-221.
28. Елизаров, В.А. Исследование гармонического состава тока в трехфазной электрической цепи с дугой / В.А. Елизаров, К.А. Елизаров, В.П. Рубцов // Электричество. – 2013. – № 3. – С. 12-17.
29. Емлин, Б.И., Справочник по электротермическим процессам / Б.И. Емлин, М.И. Гасик. – Москва: Металлургия. – 1978. – 424 с.
30. Ершов, В.А. Электрофизические процессы в ванне руднотермических печей / В.А. Ершов, С.А. Крапивина, А.А. Педро. – Ленинград: ЛТИ им. Ленсовета. – 1988. – 80 С.
31. Ефроймович, Ю.Е. Автоматика дуговых металлургических печей. – Москва: Металлургиздат. – 1952. – 98 с.
32. Жилов, Г.М. Автоматизация управления электротехнологическими режимами работы печей химической электротермии / Г.М. Жилов, М.И. Лифсон, С.К. Савицкий // Обзорн. инф. – Москва: НИИТЭХИМ. – 1985. – 37 с.
33. Заявка на изобретение № 95100472 Российская Федерация МПК H05B 7/148(1995.01), F27D 19/00(1995.01). Способ регулирования активной мощности трёхэлектродной руднотермической электропечи: №95100472/07, опубл. 1996. 07.27 / Годына В.В., Степанянц С.Л., Свищенко В.Я. и др.; заявитель акционерное общество «НИИАчермет». – 7 с.: ил.– Текст: непосредственный.

34. Иванушкин, В.А. Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов / В.А. Иванушкин, Ф.Н. Сарапулов, П. Шымчак. Монография. – Щецин: ЩГУ, 2000. – 310 с.

35. Ивченко, Б.П. Теоретические основы информационно-статистического анализа сложных систем. – Санкт-Петербург: ЛАНЬ. –1997. – 28 с.

36. Иркутский национальный исследовательский технический университет: официальный сайт. – Иркутск. Режим доступа: – URL: <http://www.istu.edu/structure/57/3946/> (дата обращения 11.12.2019). – Текст. Изображение: электронные.

37. Исследование взаимосвязи электрических и технологических параметров плавки нормального электрокорунда в руднотермических печах: Отчёт о НИР (заключ.) /; Руководитель А.А. Педро. – Ленинград: ЛТИ им. Ленсовета – 1982. – 90 с.

38. Капцов, Н.А. Электрические явления в газах и в вакууме. – Москва, Ленинград: Государственное издательство технико-теоретической литературы. – 1947. – 821 с.

39. Каримов, И.К. Комплекс программ для автоматизированного проектирования термических печей // Черная металлургия. – 1990. – №3. – С. 100-101.

40. Кляшторный, И.А. Распределение энергии в электрокорундовых печах // Отчет по теме А-58-1. – Ленинград: ВНИИАШ. – 1959. – 56 с.

41. Коротких, В.Г. Принципы создания и использования программных средств для отображения информации в автоматизированных системах обучения и управления металлургическими процессами / В.Г. Коротких, С.П. Молчанов // Черная металлургия. – 1997. – №12. – С. 46-49.

42. Коротков, П.А. Краткий сравнительный анализ устройств управления приводами электродов дуговых печей // Исследования в области химической электротермии Ю.А. Пушкин. – Ленинград. –1971. – Вып. 4. – С. 179-186.

43. Кручинин, А.М. Автоматическое управление электротермическими установками / А.М. Кручинин, К.М. Махмудов, Ю.М. Миронов; Под ред. А.Д. Свенчанского. – Москва: Энергоатомиздат. – 1990. – 416 с.
44. Кузовкин, В.А. Теоретическая электротехника. – Москва: Логос, – 2005. – 480 с.
45. Курбатов, С.М. Математическое моделирование и оптимизация сложных технологических структур и объектов. – Москва: Машиностроение. – 1997. – 80 с.
46. Лапшин, И.В. Автоматизация дуговых печей. – Москва: Типография ордена «Знак почёта» издательства МГУ. – 2004. – 166 с.
47. Липатов, Л.Н. Типовые процессы химической технологии как объекты управления. – Москва: Химия. – 1973. – 230 с.
48. Лыков, А.В. Теория теплопроводности. – Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, – 1952. – 392 с.
49. Макаров, А.Н. Законы теплообмена электрической дуги и факела в металлургических печах и энергетических установках. – Тверь: ТвГТУ. – 2012. – 164 с.
50. Максименко, М.С. Основы электротермии. – Ленинград: ОНТИ Химтеоретиздат. – 1937. – 141 с.
51. Марков, Н.А. Электрические цепи и режимы дуговых электропечных установок. – Москва: Энергия. – 1976. – 204 с.
52. 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.

53. 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.

54. 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.

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

56. 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.

57. Маслов, Д.В. Разработка алгоритмов и систем управления дугowymi сталеплавильными печами, снижающих поломки электродов / Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. – Москва: Московский энергетический институт (Технический университет) – 2014. – 134 с.

58. Медведев, А.В. Непараметрические системы адаптации. – Новосибирск: Наука. – 1983. – 173 с.

59. Микулинский, А.С. Оценка состояния руднотермического процесса по косвенным показателям // – Сталь. –1982. – №9, – С. 49-51.

60. Микулинский, А.С. Процессы рудной электротермии. – Москва: Металлургия. – 1966. – 280 с.

61. Минеев, А.Р. Моделирование электротехнологических процессов и установок / А.Р. Минеев, А.И. Коробов, М.Я. Погребинский. – Москва: «Компания Спутник+». – 2004. – 124 с.

62. Миронов, Ю.М. Электрическая дуга в электротехнологических установках: Монография. – Чебоксары: изд. Чуваш. Ун-та. – 2013. – 290 с.
63. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – Москва: Энергия. – 1977. – 344 с.
64. Моргулев, С.А. О шунтированной дуге ферросплавных печей и ее металлической проводимости / С.А. Моргулев, В.Я. Майер // Электротехника. – 1989. – № 2. – С. 46–48.
65. Немчинова, Н.В. Кислотно-ультразвуковое рафинирование кремния: монография / Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин. – Иркутск: ИрНИТУ. – 2016. – 160 с.
66. Немчинова, Н.В. Карботермический способ получения кремния высокой чистоты / Немчинова, Н.В. Клёц В.Э, Черняховский Л.В. // Цветные металлы. – 2001. – № 1. – С. 84-87.
67. Николаев, А.А. Разработка усовершенствованной системы автоматического управления положением электродов дуговых сталеплавильных печей и агрегатов ковш-печь / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, П.Г. Тулупов, И.А. Якимов // Электromеталлургия. – 2014. – №5. – С.15-23.
68. Никольский, Л.Е. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / Л.Е. Никольский, В.Д. Смоляренко, Л.Н. Кузнецов. – Москва: Metallургия. – 1981. – 344 с.
69. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. // 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергоатомиздат. Ленингр. отдние. – 1991. – 304 с.
70. Окунева, В.А. Разработка способов улучшения технико-экономических показателей и методики выбора рациональных режимов плазменно-дуговых сталеплавильных печей / Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. – Москва: Московский энергетический институт (Технический университет) – 2015. – 155 с.

71. 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.

72. Патент РФ №2352524 Российская Федерация, МПК C01B 33/025 (2002/01) Способ получения технического кремния: №2001123227/15: заявл. 20.06.2007: опубл. 20.04.2009 / Немчинова Н.В., Черняховский Л. В., Клёц В.Э.; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Иркутский государственный технический университет" (ГОУ ИрГТУ). – 13 с.: ил. – Текст: непосредственный.

73. Патент РФ №2556698, Российская Федерация, МПК H05B 7/148 (2006.01) Способ и система управления электротехнологическими режимами восстановительной плавки технического кремния в руднотермических печах: № 2013159307/07: заявл. 30.12.2013: опубл. 20.07.2015 / Ёлкин К.С., Ёлкин Д.К., Свищенко В.Я. и др.; заявитель общество с ограниченной ответственностью «Объединённая компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр». – 26 с.: ил. – Текст: непосредственный.

74. Педро, А.А. Роль химического взаимодействия электрода с расплавом в измерении гармонического состава тока в электродах печей химической электротермии / А.А. Педро, М.П. Арлиевский, В.А. Ершов // Электротехника. –1997. – №4. – С. 62-63.

75. Педро, А.А. Вентильный эффект в электродной печи / А.А. Педро, А.П. Суслов // Цветные металлы. – 2012. – №12. – С. 91-95.

76. Педро, А.А. Интенсификация электротермических процессов технологии неорганических веществ: Диссертация на соискание степени доктора технических наук. – Санкт–Петербург: СПбГТИ. –1998. – 296 с.

77. Педро, А.А. Природа и характер постоянной составляющей фазного напряжения в рудно-термической печи: монография / А.А. Педро,

Л.Е. Старкова, А.П. Суслов; под общей редакцией Педро А.А.. – Вологда: ВоГТУ.

– 2013. – 123 с.

78. Педро, А.А. Роль химического взаимодействия электрода с расплавом в измерении гармонического состава тока в электродах печей химической электротермии / А.А. Педро, М.П. Арлиевский, В.А. Ершов // Электротехника. – 1997. – №4. – С. 62-63.

79. Педро, А.А. Управление электродными печами на основе характеристик электрической дуги / А.А. Педро, М.П. Арлиевский, И.Н. Белоглазов, Д.А. Павлюк, В.В. Васильев // под ред. И.Н. Белоглазова. – Санкт-Петербург: Роза мира. – 2009. – 97 с.

80. Перельман, И.И. Оперативная идентификация объектов управления. – Москва: Энергоиздат. – 1982. – 272 с.

81. Плетнев, Г.П. Экспериментальное определение динамических характеристик энергоблока 80 МВт по каналам регулирующих и возмущающих воздействий / Г. П. Плетнев и др. // Теория и практика построения и функционирования АСУ ТП. – Москва: МЭИ. – 2003. – С. 74-79.

82. Погребисский, М.Я. Разработка способов и систем регулирования температуры электропечей сопротивления с улучшенными энергетическими показателями: Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. – Москва: Московский энергетический институт (Технический университет). – 2001. – 137 с.

83. Попов, А.А. Методы определения параметров электропечей с погруженной дугой // Электротехника. – 1996. – № 3. – С. 52-53.

84. Попов, А.Н. Новая концепция создания комплектных рудовосстановительных электропечей для металлургии и химической промышленности / А.А. Попов, Л.А. Рязанцев, В.Л. Розенберг // Электротехника. – 1991. – № 11. – С. 11–15.

85. Порада, А.Н. Электротермия неорганических материалов / А.Н. Порада, М.И. Гасик. – Москва: Металлургия. – 1990. – 231 с.

86. Пушкин, Ю.А К вопросу автономного управления электродами руднотермической печи: Исследования в области химической электротермии // Труды ЛенНИИГипрохима. – 1971. – Вып. 4. – С. 168-178.
87. Розенберг, В.Л. Состояние и перспективы развития современных рудовосстановительных печей в черной металлургии // Электротехника. – 1989. – №2. – С. 43–46.
88. Рубцов, В.П. Параметры дугового разряда и их влияние на эффективность работы электротехнологических установок / В.П. Рубцов, И.Ю Дмитриев, А.Р. Минеев // Электричество. – 2000. – № 12. – С. 34-39.
89. Рубцов, В.П. Исполнительные приводы электротехнологических установок. – Москва: МЭИ. –2002. – 72 с.
90. Рубцов, В.П. Моделирование в технике / В.П. Рубцов, М.Я. Погребичкий. – Москва: МЭИ. – 2008. – 104 с.
91. Савицкий, С.К. Некоторые результаты анализа функционирования автоматизированного управления перепуском электродов / Ю.Ш. Бельчиков, Т. Тасбулатов, С. Аусханов // Сб. науч. тр. // ЛенНИИГипрохим. – Ленинград. – 1985. – С. 66–73.
92. Савкин, А.В. Контроль электротехнологических параметров ванны РТП в темпе реального времени // Компьютерные методы в управлении электротехнологическими режимами руднотермических печей: Сб. науч. тр. // СПбГТИ(ТУ). – 1998. – С. 250–254.
93. Савкин, А.В. Текущий контроль распределения мощности в ванне руднотермической печи: Автореферат на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Тула: ТГУ. – 1995. – 20 с.
94. Свенчанский, А.Д. Автоматическое регулирование электрических печей // А.Д. Свенчанский, К.Д. Гуттерман, Н.Д. Прозорова. – Москва: Металлургия. – 1972. – 112 с.
95. Свенчанский, А.Д., Автоматизация электротермических установок / А.Д. Свенчанский, З.Л. Трейзон. – Москва: Энергия. –1968. – 321 с.

96. Свенчанский, А.Д. Электрические промышленные печи: дуговые печи и установки нагрева / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин. – Москва: Энергоиздат, – 1981. – 296 с.
97. Сергеев, П.В. Энергетические закономерности рудно-термических электропечей, электролиза и электрической дуги / П.В. Сергеев. – Алма-Ата: Издательство академии наук Казахской ССР. – 1963. – 249 с.
98. Сисоян, Г.А. Электрическая дуга в электрической печи. – Москва: Metallургия. – 1974. – 304 с.
99. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017611642 Российская Федерация. Система контроля электрода руднотермической печи в процессе получения металлургического кремния карбо-термическим 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.
100. Справочник по теории автоматического управления/ Под ред. А.А. Красовского. – Москва: Наука. – 1987. – 711 с.
101. Струнский, Б.М. Расчеты руднотермических печей. – Москва: Metallургия. – 1982. – 192 с.
102. Танхельсон, Б.М. Исследование распределения мощности в проводящих ваннах применительно к электрическим печам для плавки электрокорундовых материалов // Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. – ЛТИ им. Ленсовета. – Ленинград: Ленингр. технол. ин-т им. Ленсовета – 1969. – 223 с.
103. Тельный, С.И. Регулирование электрического режима работы руднотермических печей // Сб. науч. тр. Куйбышевского индустриального института. – 1950.– №3.– С. 45-51.

104. Усманов, В.П. Автоматизированная система обработки информации и управление технологическими процессами в электрохимическом производстве // Методы и средства управления технологическими процессами: Труды II междунар. науч. конф. – 1997. – С. 226-229.
105. Федченко, И.К. Измерение температуры электрической дуги. – Киев: Техніка. – 1966. – 154 с.
106. Физика дугового разряда: Сборник трудов / Под ред. М. Ф. Жукова. – Новосибирск: АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т теплофизики. – 1972. – 159 с.
107. Фитерман, М.Я. Роль информации и идентификации при создании АСУ // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2008. – №12. – С 42–49.
108. Фитерман, М.Я. Настройка контуров регулирования САР // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2007. – №8. – С. 17-25.
109. Фомичев, А.А. Алгоритмизация процессов контроля и управления руднотермическими печами на основе принципа декомпозиции // Компьютерные методы в управлении электротехнологическими режимами руднотермических печей: Сб. науч. тр. – 1998. – С. 206-219.
110. Фомичев, А.А. Идентификация нелинейных схемных моделей процессов рудной электротермии. – Тула: ТулГУ. – 1996. – 122 с.
111. Хардле, В. Прикладная непараметрическая регрессия. – Москва: Мир. – 1993. – 349 с.
112. Черный, А.А. Система математического моделирования сложных тепловых процессов/ А.А. Черный, В.А. Черный // Черная металлургия. – 1992. – № 8. – С. 54-57.
113. Шариков, Ю.В. Моделирование систем. Часть 2: Методы численной реализации математических моделей / Ю.В. Шариков, И.Н. Белоглазов. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный горный университет. СПб. – 2012. – 118 с.

114. Штейнберг, Ш.Е. Идентификация в системах управления. – Москва: Энергоатомиздат. – 1987. – 80 с.
115. Штейнберг, Ш.Е. Адаптация стандартных регуляторов к условиям эксплуатации в промышленных системах регулирования / Ш.Е. Штейнберг, И.Е. Залуцкий // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2003. – №4, – С. 18-24.
116. Штейнберг, Ш.Е. Настройка и адаптация автоматических регуляторов. Инструментальный комплект программ / Ш.Е. Штейнберг, И.Е. Залуцкий, Л.П. Сережин, И.Г. Варламов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2003. – №10. – С. 48-55.
117. Bascur, O. A. Improving metallurgical performance in pyrometallurgical processes / J. P. Kennedy // JOM. – 2004. – № 12. – PP. 33-36.
118. Rath, G. Der Elektroreduktionsofen – Ein Aggregat für die Nichteisenmetallurgie // Erzmetall. – 1990. – 43. – PP. 81–85.
119. Jones, J.A.T., "Electric Furnace Steelmaking", in The Making, Shaping and Treating of Steel / B. Bowman, P.A. Lefrank, R.J. Fruehan, Editor // The AISE Steel Foundation. – 1998. – PP. 525–660.
120. Kegel, K. Electroofentechnik in der Metallurgie. – Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft. –1988. – 385 p.
121. Louhi, M. China's environmental targets for sustainable growth and the technological challenges for the ferroalloys industry / Tang P., // INFACON XIII. – 2013. –PP. 979–987.
122. Martynov, S. Application of Production Processes Control Algorithm Using Adaptive Control System / I. Beloglazov, P. Petrov, S. Martynov // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2018. –PP. 1–4.
123. 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. –PP. 1–5.

124. 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. –PP. 1–4.
125. Nelson, L.R., Evolution of the mega-scale in ferro-alloy electric furnace smelting, Celebrating the mega scale: proceedings of the extraction and processing division symposium on pyrometallurgy // TMS2014. – 2014. – PP. 39–68.
126. Radu Balan. Modeling and control of an electric arc furnace Procetdings of the 15th Mediterranean Conference on Control&Automation. – July 27-29, 2007. – Athens, Greece: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). – 2007. – PP. 91-97.
127. Thomas, C.M. The Story of Electricity / L. C. Stephen. – New York. – Story of electricity Company: M.M. Marcy. – 1919. – 202 p.
128. Toulouevski, Y. Innovation in electric arc furnaces, the second edition, springler, / I. Zinurov. – Berlin: Springer Link. –2013. –PP. 120–155.
129. Viswanath, R.A. Comparison of different solution methodologies for melt-ing and solidification problems in enclosures / R.A. Viswanath, Y. Jaluria // Heat Trans-fer Part B Fundam. – 1993. – V.24. –PP. 77–105.