

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Масько Ольга Николаевна



СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ НАРУШЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ В
РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Бажин В.Ю.

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ.....	9
1.1 Анализ мирового производства металлургического кремния.....	9
1.2 Анализ технологического процесса карботермического восстановления кремния как объекта управления.....	11
1.3 Системы автоматизированного управления технологическим процессом карботермического восстановления кремния.....	16
1.3.1 Подсистема дозирования шихтовых материалов.....	18
1.3.2 Подсистема управления перепуском электродов.....	19
1.3.3 Подсистема управления электрическим режимом РТП.....	20
1.3.4 Обзор существующих решений в области автоматизированного управления энергетическим режимом РТП.....	21
1.3.5 Подсистема автоматизированного управления материальными потоками технологического процесса карботермического восстановления кремния.....	27
1.4 Перспективные направления повышения уровня управления технологическим процессом карботермического восстановления кремния.....	33
1.4.1 Первичная диагностика нарушений технологического процесса.....	34
1.4.2 Оперативный контроль качества кварцевого сырья в производстве кремния.....	36
1.4.3 Непрерывный контроль объемов пылевых выбросов.....	39
Выводы к главе 1.....	42
ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ.....	43
2.1 Исследование влияния примесей кварцевого сырья на технологический процесс карботермического восстановления кремния в РТП.....	43
2.1.1 Выбор параметров для оперативной оценки качества кварцевого сырья.....	46
2.1.2 Исследование возможности оценки качества кварцевого сырья с помощью системы технического зрения.....	47
2.1.3 Анализ результатов.....	50
2.2 Учет материального баланса.....	53
Выводы к главе 2.....	56
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ, ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СКОРОСТНЫХ ПРОФИЛЕЙ ВАННЫ РТП ВОДООХЛАЖДАЕМОГО СВОДА И ГАЗОХОДОВ.....	57

3.1 Исследование корреляции содержания микрокремнезема в отходящих из РТП газах и параметров пылегазовой смеси.....	57
3.2 Компьютерное моделирование РТП и газоотводящего тракта	60
3.3 Модель гидродинамики отходящих газов	61
3.3.1 Модель 1: РТП и свод печи с водяным охлаждением	63
3.3.2 Модель 2: газоходы без водяного охлаждения	67
3.3.3 CFD модель горения отходящих газов.....	71
Выводы к главе 3	74
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ НАРУШЕНИЙ ХОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫПЛАВКИ КРЕМНИЯ В РТП	77
4.1 Определение нарушений и диагностических параметров	78
4.2 Выбор контролируемых параметров	79
4.3 Анализ причинно-следственных связей.....	81
4.3.1 Нарушения углеродного режима	81
4.3.2 Нарушения электродного режима	83
4.3.3 Нарушения электрического режима.....	84
4.3.4 Дополнительные параметры оценки	86
4.4 Создание базы правил.....	87
4.5 Функциональные блоки системы диагностики нарушений.....	89
4.5.1 Анализ отходящих газов.....	91
4.5.2 Анализ качества кварцевого сырья	92
4.5.3 Расчет материального баланса	92
4.5.4 Интерфейс	94
4.6 Экономическая эффективность проекта	95
Выводы к главе 4	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	101
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт о внедрении результатов диссертации.....	112

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Анализ состояния и уровня автоматизации процесса восстановительной плавки кварцевого сырья в руднотермических печах (РТП) показал, что непосредственно контролируются только электрические параметры печи (ток, напряжение, мощность), в процессе управления присутствуют ручные измерения.

Особые проблемы восстановительной выплавки кремния связаны с входным контролем кварцевого сырья, когда качество загружаемого кварцита определяется путем отбора проб и анализа их рентгеноспектральным методом. Данный метод не может использоваться для автоматизированного управления процессом, так как обладает значительным запаздыванием, обусловленным отбором, подготовкой и транспортировкой проб.

Существует большой кластер неконтролируемых параметров. Непрерывный и прямой контроль температуры непосредственно в РТП затруднен из-за высоких температур и химически агрессивной среды. Контроль теплового режима ванны печи осуществляется по косвенным параметрам (значениям тока и напряжения) и не учитывает влияние химических процессов внутри печи во время плавки.

Применение газоанализаторов для определения химического состава отходящих газов также связано с погрешностью измерений, вызванной турбулентностью газового потока, высокой температурой и запыленностью дисперсной среды.

Оперативный контроль таких параметров процесса, как выбросы микрокремнезема и ключевые характеристики кварцевого сырья, может стать этапом создания системы диагностики нарушений хода технологического процесса, позволяющей технологическому персоналу оперативно принимать решения для предотвращения возникновения аварийных ситуаций.

Степень проработанности темы. Вопросами автоматизации и повышения эффективности процесса карботермического получения кремния занимались отечественные компании и институты, такие как АО «РУСАЛ ВАМИ», ФГБОУ ВО «СПБГТИ(ТУ)», ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина».

Значительный вклад в изучение и развитие процесса карботермического восстановления кремния в РТП, методов управления им внесли следующие ученые: С.В. Арменский, В.П. Воробьев, А.Н. Глинков, Б.М. Горенский, Я.Б. Данцис, Д.А. Диомидовский, В.А. Елизаров, В.А. Ершов, О.М. Катков, И.А. Кляшторный, И.Ю. Кожевников, И.Д. Кузнецов, И.В. Лапшин, А.Г. Лунин, А.Г. Лыков, М.С. Максименко, А.С. Микулинский, Н.В. Немчинова, А.А. Педро, Е.Х. Розенберг, А.В. Сивцов, М.Я. Фиттерман, С.И. Хитрики др.

Известны зарубежные авторы, изучающие вопросы повышения эффективности карботермического метода получения металлургического кремния, такие как I. Brede, J.-С.

Fischer, N.E. Kamfjord, I.T. Kero, E.H. Myrhaug, R. Perruchoud, A. Schei, M. Tangstad, G. Tranell, H. Tveit и др.

Актуальным является увеличение количества контролируемых параметров, а также расширение функций системы АСУ ТП карботермического восстановления кремния в руднотермических печах с использованием современных систем технического зрения и дополнительных контрольно-измерительных средств анализа атмосферы газоотводящего тракта печи.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ №22-29-00397.

Цель диссертационной работы – снижение длительности технологических простоев оборудования в процессе карботермического восстановления кремния в руднотермических печах.

Идея – для достижения поставленной цели необходимо реализовать автоматизированную систему диагностики нарушений технологического процесса с дополнительным функционалом анализа кварцевого сырья, непрерывной оценки объемов пылевых выбросов микрокремнезема, а также расширенного учета материального баланса плавки.

Объект исследования – система управления процессом карботермического восстановления металлургического кремния в руднотермических печах.

Предмет исследования – автоматизированная подсистема диагностики нарушений карботермического восстановления металлургического кремния в руднотермических печах.

Цель работы подразумевает решение следующих задач:

- провести анализ существующих автоматизированных систем управления процессом карботермического восстановления кремния в РТП на предмет расширения числа контролируемых параметров, патентный и литературный поиск соответствующих научно-технических решений;
- обосновать влияние состава (компонентов) кварцита на ход технологического процесса восстановления кремния в РТП для выбора параметров оперативной оценки качества кварцевого сырья;
- разработать методику оперативной оценки качества кварцевого сырья по выбранным параметрам;
- определить на основе разработанной модели вычислительной гидродинамики РТП и газоотводящего тракта взаимосвязь интенсивности образования микрокремнезема от параметров отходящих газов, а также выявить стабильные зоны потока отходящих газов для установки контрольно-измерительных приборов (КИП);

– разработать алгоритм и структуру автоматизированной системы диагностики нарушений хода карботермического восстановления кремния в РТП на основе экспертных знаний, дополненную блоками анализа отходящих газов, анализа кварцевого сырья и расчета баланса плавки.

Научная новизна работы

- научно обосновано применением системы технического зрения и разработано алгоритмическое обеспечение для оценки содержания Fe_2O_3 ;
- получена зависимость температуры отходящих газов от кинетики образования микрокремнезема;
- при помощи трехмерного математического моделирования получено распределение температурного поля пылегазовой смеси в газоотводящем тракте РТП и определены устойчивые зоны потока отходящих газов для размещения КИП.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработан автоматизированный способ оперативной оценки качества кварцевого сырья посредством визиометрического анализа изображений срезов образцов кварцита;
- создана автоматизированная экспертная система диагностики нарушений, позволяющая выявлять нарушения режима печи на основе расширенного количества контролируемых технологических параметров, таких как содержание микрокремнезема в отходящих газах, материальный баланс плавки, качество кварцевого сырья (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022666844 (Приложение А), № 2022663214 (Приложение Б)).
- результаты исследований использованы в деятельности компании АО «Союзцветметавтоматика им. Топчаева В.П.» при разработке автоматизированной системы контроля качества рудного сырья и его учета при подборе технологического режима процесса производства ферросплавов (акт о внедрении от 12.04.2023 (Приложение В)).

Методология и методы исследований

Работа выполнена с использованием метода научного обобщения, анализа литературных источников, патентных материалов и результатов исследований, полученных в ходе полупромышленных испытаний. Оцифровка и обработка результатов полупромышленных испытаний выполнена с применением программных пакетов Python и Origin 2021. Разработка трехмерной модели вычислительной гидродинамики проводилась в программном пакете AnsysWorkbench 2020R1.

В муфельной печи проведено лабораторное исследование температурной устойчивости кварцитов Первоуральского и Черемшанского месторождений, используемых в качестве основного сырья ООО «РУСАЛ Кремний Урал».

Тестирование системы технического зрения проводилось на образцах кварцита, отобранных с действующего производства ООО «РУСАЛ Кремний Урал» путем сравнения с результатами лабораторных исследований химического состава кварцита.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Контроль качества кварцевого сырья с применением системы технического зрения на основе алгоритмов цветовой фильтрации позволяет оценивать содержания Fe_2O_3 в кварците со средней относительной погрешностью 11-13% в зависимости от месторождения.

2. Внедрение в АСУ ТП процессом карботермического восстановления кремния в руднотермических печах системы диагностики, дополненной блоками анализа отходящих газов, анализа исходного сырья и расчета баланса печи, обеспечивает снижение длительности технологических простоев РТП на 30%.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается применением современных методов статистического анализа, разработкой адекватных зависимостей, совпадением теоретических и экспериментальных результатов, тестированием системы диагностики на промышленных архивных данных о ходе технологического процесса выплавки металлургического кремния в печах РТП.

Апробация результатов. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на конференциях: Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Научные исследования в современном мире. Теория и практика» (март 2022 года, Санкт-Петербург); Международная Научно-практическая Конференция «Сатпаевские чтения – 2022» (апрель 2022 года, Алматы); 5-й Международный семинар «Новые средства и системы автоматизации в горно-обогатительном производстве, металлургии и экологии» (октябрь 2022 года, Москва); Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (апрель 2023 года, Санкт-Петербург).

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

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 5 печатных работах (№ 2, 3, 4, 38, 76), в том числе в 2 статьях в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 3 статьях

в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Также получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения и библиографического списка, содержит 113 страниц машинописного текста, 39 рисунков, 13 таблиц, список литературы из 110 наименований и 3 приложения на 4 страницах.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

1.1 Анализ мирового производства металлургического кремния

Кремний – основное сырье для ряда стратегически значимых промышленных секторов. С развитием металлургической промышленности растет использование кремния металлургических марок в качестве легирующей добавки к специальным алюминиевым сплавам, на что расходуется около 50% производимого кремния. Значительную долю потребителей металлургического кремния составляют предприятия химической промышленности (преимущественно производители силиконов) (33%). Из кремния металлургического качества с чистотой до 98-99% производят поликристаллический кремний, являющийся сырьем для солнечной энергетики и полупроводниковой промышленности. На данный сектор приходится наименьшая доля потребления кремниевого сырья (около 24%) [100].

Производственные возможности отрасли ограничены системными требованиями производственного объекта, такими как размер и количество печей, электрические характеристики, возможность охлаждения и экологические факторы. После достижения конструктивных пределов, увеличение мощности возможно только за счет добавления дополнительных агрегатов.

Печи, применяемые для производства кремния, имеют принципиально одинаковую конструкцию. Физические различия между производствами заключаются в размерах печей, количестве электродов, а также в чистоте сырья и используемых источников углерода. К числу общих для всех предприятий по производству кремния характеристик можно отнести необходимость доступа к источникам кварцевого сырья, а также к электроэнергии [41].

Сдерживающим фактором для развития рынка металлургического кремния является высокая себестоимость производства за счет высокой энергоемкости процесса, высоких транспортных и трудовых затрат. Также отрицательное действие на производство кремния оказала пандемия Covid-19 и нестабильная геополитическая обстановка, что спровоцировало обвал цен на металлургический кремний (рисунок 1.1) [83].

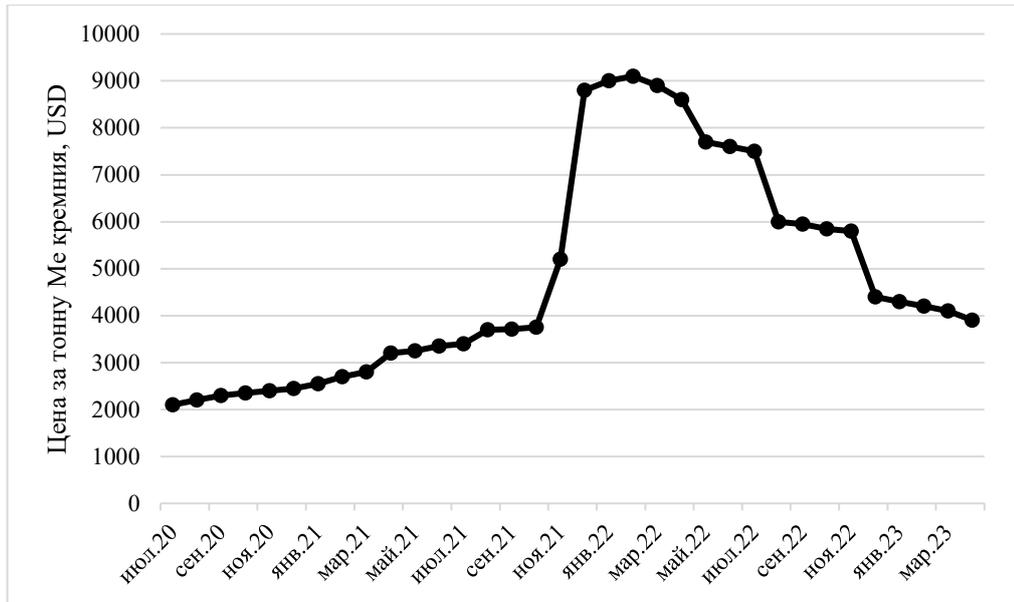


Рисунок 1.1 – Динамика цен на металлургический кремний [95]

Несмотря на текущие трудности, имеется устойчивая тенденция к развитию рынка благодаря увеличению спроса на алюминий-кремниевые сплавы, росту солнечной энергетики и строительной индустрии. Так, по данным прогнозной аналитики Technavio, рынок металлургического кремния с 2023 по 2027 года будет расти со скоростью около 5% в год.

Безусловными лидерами кремниевого производства являются китайские производители. Причем увеличивается число технологических линий, ориентированных на выпуск кремния высших марок, в том числе на кремний для «солнечной энергетики». О широком доступе к сырью свидетельствует разительный контраст между объемами производства кремния в Китае и других странах. В 2023 году в Китае было произведено 6,6 млн. тонн кремния (рисунок 1.2).

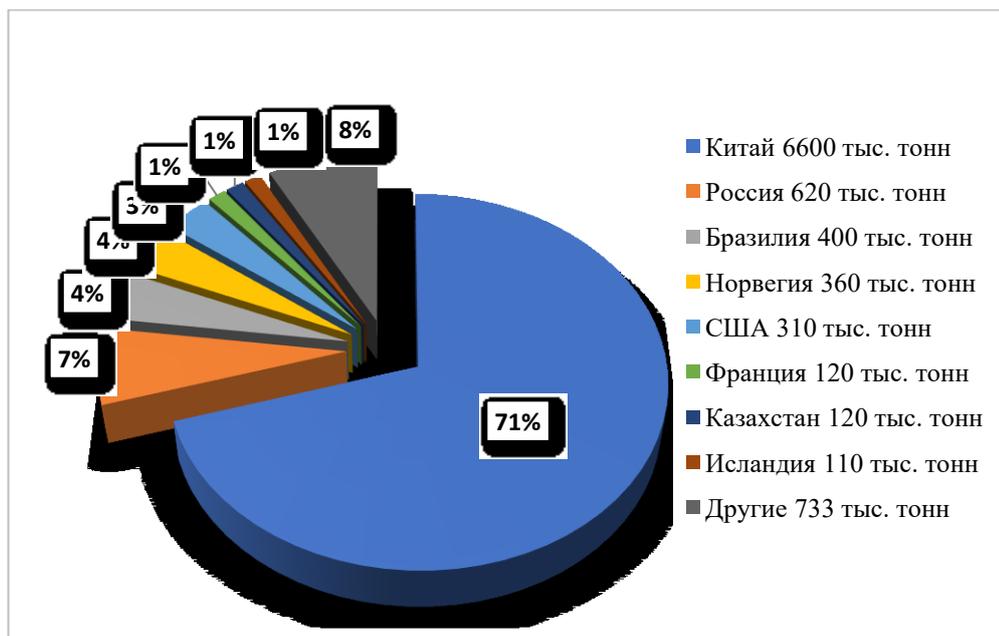


Рисунок 1.2 – Мировые объемы производства кремния за 2023 год [84]

Основной рост производственных мощностей пришелся на 2013-2020 годы и составил 93% от общемирового роста рынка кремния.

В России при наличии крупных источников качественного сырья (кварца SiO_2) металлургический кремний производится только на двух заводах: АО «Кремний» (г. Шелехов, Иркутской области) и ООО «РУСАЛ Кремний Урал» (г. Каменск–Уральский, Свердловской области). Несмотря на то, что в 2023 году Россия занимает 2 место по годовому объему произведенного кремния (620 тыс. тонн), эффективность технологической цепочки создания стоимости остается на низком уровне.

Остановка в конце 2019 года производства ООО «РУСАЛ Кремний Урал» стала значимым для российской кремниевой промышленности событием. Полный анализ производства, проведенный незадолго до остановки предприятия, выявил комплекс причин убыточности, характерных в большей или меньшей степени для российского производства кремния и ферросилиция в целом:

- нестабильное качество сырья, поставляемое различными поставщиками;
- недостаток эффективности системы газоочистных установок (ГОУ);
- отсутствие технологии реализации пылевых выбросов, основу которых (98%) составляет микрокремнезема;
- устаревшее оборудование и низкая степень автоматизации;
- недостаточная квалификация обслуживающего персонала.

Успешное возобновление производства ООО «РУСАЛ Кремний Урал» в 2021 году позволило России выйти на прежний уровень объемов выпускаемой продукции, однако для роста кремниевой промышленности, а также успешной конкуренции с китайскими производителями, принятых мер по модернизации и повышению эффективности технологического процесса выплавки металлургического кремния недостаточно.

1.2 Анализ технологического процесса карботермического восстановления кремния как объекта управления

В промышленности металлургический (технический) кремний получают посредством восстановления расплава SiO_2 углеродом при температуре 1800 °С между углеграфитовыми электродами в руднотермических печах (РТП) шахтного типа (рисунок 1.3).

Процесс плавки должен контролироваться на границе между термометаллургическими, химическими, электрическими и конструктивными областями, что позволяет достигать наилучших коэффициентов восстановления кремния и снизить удельное потребление сырья, электродов и электроэнергии [63].

Рациональный выбор и обоснование контролируемых и регулируемых параметров процесса позволяют минимизировать производство таких побочных продуктов, как карбид кремния, шлак и пылегазовые выбросы микрокремнезема, характерных для процесса карботермического восстановления кремния в РТП [109].

Технологическая цепочка производства кремния в РТП включает следующую последовательность операций: подготовка шихты, плавка ее в РТП, разливка кремния и его последующее измельчение для удаления шлаковых включений [43].

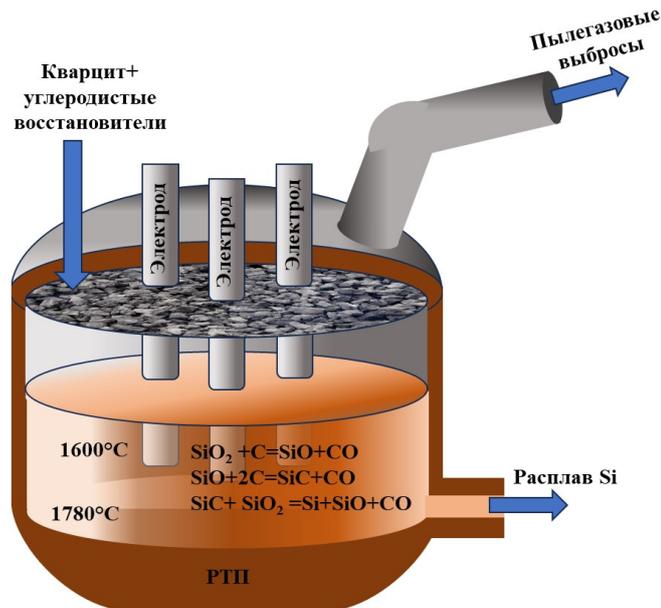


Рисунок 1.3 – Схема процесса выплавки кремния в РТП

Загрузка шихты в РТП – один из наиболее сложных этапов карботермического восстановления кремния. Пропорциональный состав шихтовых материалов непосредственно влияет на электрический режим печи и, впоследствии, на качество готового продукта [94].

Трудность процесса загрузки состоит в необходимости загрузки больших объемов шихты на сравнительно малой площади колошника (более 50 т на 70-80 м²). Именно на этапе загрузки печи появляются отклонения в материальном балансе. Обеспечение плавного, непрерывного опускания материалов в печь без остановок и обрывов является одной из главных аспектов управления РТП. Нарушение процесса схода шихтовых материалов затрудняет стабильность эксплуатации РТП [61].

Во время работы печи в ее свободном пространстве образуются газы и мелкодисперсные частицы SiO₂. Пылегазовая смесь покидает печь через выхлопные отверстия в своде печи. Давление в печи обычно регулируется до уровня чуть ниже атмосферного с помощью заслонки в воздуховоде [110].

Часть газоходов, расположенных вблизи свода печи, где газ наиболее горячий, могут иметь водяное охлаждение и/или огнеупорную футеровку для защиты конструкции от горячего газа. Воздуховоды для отходящих газов обычно оборудованы компенсаторами для учета теплового расширения. Из печи газ направляется в газоочистную установку, где охлаждается и очищается от твердых частиц пыли. Газоотводящий тракт печи оборудован системой сухой газоочистки, включающей в себя сеть циклонов и блоки рукавных фильтров. Для охлаждения высокотемпературной пылегазовой смеси до температуры 250 °С перед рукавными фильтрами могут использоваться змеевиковые охладители, оборудованные люками для сброса излишков пыли. Горячий газ может быть использован в котле-утилизаторе или другой системе рекуперации энергии [90].

Анализ литературных источников и производственных данных показывает, что руднотермическое восстановление кремния представляет собой сложно контролируемый процесс, сопровождаемый рядом возможных технологических нарушений.

Нарушение дозирования шихтовых материалов, изменение их крупности, неправильное обслуживание колошника, применение некачественного сырья, отклонение от установленной длины электродов (короткие или длинные), изменение установленного электрического режима, упущения в обслуживании летки приводят к расстройству технологического хода печи, которое влечет за собой ухудшение технико-экономических показателей, условий работы обслуживающего персонала, аварии [38, 39].

Недостаток восстановителя в шихте (закварцевание печи).

При недостатке углерода в работе печи происходят следующие отклонения от нормы:

- цвет сгорания отходящих газов на колошнике становится более светлым;
- затрудняется продвижение шихты в горне печи;
- появляются свищи с выбросом больших объемов отходящих газов;
- изменяется форма рабочего пространства печи;
- рабочие концы электродов обрастают нитями невосстановленного кремнезема;
- происходит заглубление электродов в шихту;
- токовая нагрузка на электродах становится неустойчивой и снижается/пропадает;
- давление отходящих газов растет.

Своевременное выявление недостатка восстановителя на ранней стадии позволяет внести коррективы в технологический процесс за счет подачи недостающего количества восстановителя на колошник. Зачастую, выявить данное нарушение получается только при длительной работе с недостатком восстановителя. При этом закарцевание печи может достигать критических

уровней, что приводит к негативным последствиям, включая прекращение выхода шлака, перегрев металла и потерю производительности печи [11].

Избыток восстановителя в шихте

Работа печи с избытком восстановителя в шихте характеризуется следующими признаками:

- глубина погружения электродов в шихту уменьшается при нормальной длине рабочих концов;
- токовая нагрузка на электроды возрастает;
- снижается температура и количество выходящего из печи расплава кремния;
- прекращается выход шлака из печи;
- газ выходит из леточного отверстия.

Работа с избытком восстановителя в шихте может привести к накоплению шлака в печи, снижению производительности и автоматическому отключению печи от перегруза трансформаторов по току. Для устранения этой проблемы необходимо проверить взвешивающие устройства компонентов шихты, чтобы убедиться в правильности их расчёта и, если необходимо, уменьшить количество избыточного восстановителя. Затем следует загрузить 2-3 «тяжелых» навески шихты на колошник печи в зависимости от излишка восстановителя. Для улучшения выхода шлака на колошник можно добавить известняк в количестве 10-20 кг в смену [11]

Работа печи с короткими электродами

Работа печи с короткими электродами по внешним признакам подобна работе с избытком восстановителя:

- шихта у электродов сходит обвалами;
- появляется характерный гул от работы электрической дуги;
- снижается токовая нагрузка на электродах вплоть до ее потери;
- снижается температура и количество выходящего из печи расплава кремния;
- прекращается выход шлака из печи;
- газ выходит из леточного отверстия.

Для исправления проблем с ходом печи, вызванных недостаточной длиной электродов, необходимо удлинить их рабочие концы с помощью дополнительных перепусков и глубже установить электроды на рабочих ступенях напряжения [11].

Работа печи с длинными электродами

Избыток длины электродов можно определить по следующим признакам:

- высокая и неравномерная посадка электродов;
- токовая нагрузки на электродах становится нестабильной;

- затрудняется продвижение шихты в горне печи;
- отсутствует гул работы электрической дуги печи из-за отсутствия обвалов шихты под электроды;
- увеличивается шлакообразование, вследствие чего снижается выход расплава кремния из печи.

Неправильное определение чрезмерной длины электродов может привести к заварцеванию печи из-за схожести симптомов с избытком восстановителя в шихте и попытке персонала уменьшить этот избыток, уменьшив содержание восстановителя или добавив больше обогащенной шихты под электроды. Когда электроды пытаются посадить, они могут уйти в шлак, что приведет к потере дугового режима и снижению сходимости шихты. Для исправления проблем с работой на слишком длинных электродах необходимо уменьшить перелет электродов до тех пор, пока их концы не достигнут нормальной длины. Если происходит потеря или существенное снижение напряжения на одном из электродов, возможно возникновение перекоса напряжения. В таком случае следует прекратить загрузку шихтовых материалов под этот электрод, поднять его вручную и проплавить тигль, пока не возникнет дуга. Затем можно постепенно присаживать электрод, добавляя шихту по мере необходимости, пока напряжение не стабилизируется [11].

Изменение формы рабочего пространство

Образование настывей из-за затрудненного схода шихты снижает проходимость колошника, и в конечном итоге приводит к провалу гарнисажа из-за прекращения схода шихты в этих областях. Отложения настывей в районе леточного отверстия особенно негативно влияют на работу печи.

Причиной образования настывей могут быть следующие факторы:

- нарушение точности взвешивающе-дозировочной системы;
- несоответствие гранулометрических параметров компонентов шихты установленным требованиям.

Так, в мелких фракциях кварцита и восстановителя содержится повышенное количество примесей, что приводит к увеличению количества шлака в печи, снижению сортности. Кроме этого, мелкие фракции ухудшают газопроницаемость шихты, колошник печи «спекается», газовыделение происходит преимущественно в виде свищей. При чрезмерно крупной фракции кварцита (более 100 мм) уменьшается скорость восстановления кремнезема. Крупный кварцит способствует сегрегации шихты на колошнике. Крупный фракционный состав восстановителя увеличивает электропроводность шихты, поэтому отмеченные признаки расстройства хода печи, свидетельствующие об избытке восстановителя, могут являться и следствием превышения

размеров кусков восстановителя установленным нормам при нормальной (в весовом количестве) навеске восстановителя в шихте [11].

1.3 Системы автоматизированного управления технологическим процессом карботермического восстановления кремния

АСУ ТП карботермического восстановления кремния должна выполнять следующие функции:

- автоматизированное управление электрическим режимом РТП с помощью перемещения электродов и переключения ступеней печных трансформаторов;
- контроль положения механизмов для перемещения электродов, переключения ступеней напряжения и проведения перепуска в автоматическом режиме;
- использование датчика для автоматического определения положения стыков электродов относительно токосъемных колец и колошника с учетом проскальзывания электрода;
- контроль параметров температурного режима печи (температура отходящих газов, стенок и подины печи), работы систем охлаждения и анализ работы технологического оборудования;
- автоматическое управление различными процессами в печи, включая выключение при падении давления, управление насосами и подъем электродов при превышении максимального значения тока;
- автоматическое управление положением ванны в печи с помощью привода постоянного тока и визуализация данных, архивирование и отображение информации в различных форматах;
- просмотр архивных данных в виде таблиц, графиков, сообщений и отчетов для различных временных интервалов.

Для реализации перечисленных функций целесообразно использовать иерархическую техническую структуру АСУ ТП, включающую 3 уровня управления:

0. Уровень получения информации: локальные средства контроля (датчики) и исполнительные механизмы, установленные на технологических объектах управления,
1. главные ПЛК, панели удаленных вводов/выводов, интеллектуальные пусковые устройства двигателей, щиты управления двигателями и ПЛК, промежуточные пульты, установленные по месту;
2. Уровень управления технологическим процессом, включая операторскую станцию, печные контроллеры, SCADA систему.

При этом параметры расплава внутри печи – температура и физико-химические превращения – остаются вне системы управления, поскольку установка КИП непосредственно в ванну печи для проведения прямых измерений невозможна из-за агрессивности рабочей атмосферы (запыленность и высокие температуры), так же, как и достаточно точное для использования в АСУ ТП определение температуры расплава по косвенным электрическим параметрам. Таким образом, РТП фактически представляет собой черный ящик, где известно состояние материала на входе (шихта) и выходе (расплав кремния и побочные продукты), а также состояние оборудования, что требует расширения функциональных действий системы управления за пределы уровня АСУ ТП [15].

Существующие системы контроля и автоматизированного управления на действующих предприятиях в большинстве своем ограничены АСУ ТП и зачастую не имеют уровня SCADA, не соответствуют современным требованиям, в частности, в вопросах расхода основных и вспомогательных ресурсов и учета промышленных выбросов. Отсутствие оперативного контроля расходных статей материального баланса приводит к потерям основного сырья и низкой управляемости процесса. Целесообразно внедрение специальных автоматизированных систем учета материальных потоков и расчета материальных балансов [15].

Исходя из причин технологических нарушений хода РТП, к основным параметрам, влияющим на процесс выплавки кремния, относятся:

- физико-химический, гранулометрический состав, качество подготовки и дозирования шихтовых материалов;
- качество (правильность и своевременность) загрузки шихты в печь и обработки колошника печи;
- электрический режим работы печи;
- режим работы электродов;
- состояние летки;
- качество обслуживания печной установки персоналом.

Подача энергии и других ресурсов также должна изменяться в соответствии с условиями, существующими в печи в данный момент, что требует контроля основных параметров процесса в режиме реального времени.

Однако ряд параметров, необходимых для анализа и управления процессом, не может быть измерен напрямую из-за агрессивности атмосферы и высоких температур внутри печи, что ведет к недостатку информации для эффективного управления процессом.

Сложность управления выплавкой кремния в РТП приводит к необходимости выделения подсистем управления отдельными режимами технологии.

– *Подсистема управления шихтовым режимом.* Осуществляет расчет навески компонентов шихты для получения заданного качества расплава кремния и его стабилизацию за счет корректировки пропорционального состава сырьевой смеси. Основное оборудование подсистемы включает накопительные бункеры, взвешивающие и дозирующие механизмы, транспортные и загрузочные устройства.

– *Подсистема управления перепуском электродов.* Определяет положение электродов относительно ванны печи, обеспечивая оптимальную глубину погружения электродов в расплав. Элементами подсистемы являются электрододержатели, стальной кожух с ребрами жесткости, электродная масса, устройства перемещения и перепуска электрода.

– *Внешняя подсистема управления электрическим режимом.* Подсистема обеспечивает управление печными трансформаторами, короткой сетью, электродами и установкой продольно-емкостной компенсации [100].

1.3.1 Подсистема дозирования шихтовых материалов

Подсистема дозирования предназначена для обеспечения рационального темпа загрузки руднотермических печей шихтой заданного состава путем автоматизированного выполнения контроля, анализа, координации и регулирования основных параметров процесса дозирования шихтовых материалов.

В шихтовом отделении применяется порционный принцип автоматизированного дозирования шихты. При этом выполняются следующие задачи:

- обеспечение заданного соотношения согласно навескам компонентов шихты;
- чередование загрузки материалов, когда каждый последующий материал по движению ленты сборного конвейера накладывается на предыдущий по всей его длине.

Системы подачи сырья могут иметь разные конструктивные элементы (сложность): от простых ручных систем, в которых партии материала отмеряются вручную и доставляются в бункер, откуда смесь подается в печь с помощью тачек или фронтального погрузчика, до полностью автоматизированных систем, включающих бункеры, системы взвешивания и автоматические питатели. Большинство современных печей степени автоматизируют процессы обработки и дозирования сырья. Руда и восстановители поступают на склад сырья. Гранулированные материалы могут храниться на открытом складе или в бункерах, откуда они перемещаются с помощью ленточных конвейеров. На предприятиях с несколькими печами, как правило, имеется общий склад сыпучих материалов, оборудованный наклонными, челночными, передаточными или скиповыми транспортерами и промежуточными бункерами для подачи материала в печи в нужных пропорциях в определенное время. В бункерах могут быть установлены сита для предотвращения попадания в них крупногабаритных или слишком мелких

частиц. Сырье подается со склада в систему перевалочных бункеров, предназначенных для определенного вида сырья [8].

Для обеспечения точности дозирования и контроля системы необходимы регулярные процедуры контрольного взвешивания. Контрольное взвешивание производится в статике весовыми грузами один раз в неделю.

Соотношение компонентов шихты (состав навески) устанавливается на основании анализа сырьевых материалов с учетом данных технологического анализа и рабочей влаги восстановителей (анализ проводится в соответствии со схемой технологического контроля производства технического кремния), технологических анализов кремния по печам [77].

Материал забирается из бункеров с помощью вибрационных питателей, которые выгружают его в весовые бункеры для приготовления необходимой смеси. Конвейеры подают шихту в загрузочные бункеры, расположенные над каждой печью. Каждый бункер загрузки оборудован датчиками для определения уровня материала.

На загрузочных желобах устанавливаются гидравлические затворы, позволяющие перекрыть систему подачи в печь. Печи этого типа имеют дроссельную подачу шихты. Это означает, что при нормальных условиях работы загрузочный лоток всегда открыт, а поверх шлака находится куча шихты. По мере расходования этого материала он заменяется сырьем из загрузочного бункера без необходимости вмешательства в процесс управления [94].

1.3.2 Подсистема управления перепуском электродов

Глубина погружения электродов в шихту и их расход являются основными параметрами, определяющими положение реакционной зоны. Положение активной зоны влияет на тепловой и электрический режимы печи и на ход восстановительного процесса в целом.

При высоком расположении электродов зона плавления перемещается вверх, что резко ухудшает ход процесса: увеличиваются тепловые потери с колошниковыми газами, затрудняется обслуживание перегретого колошника, уменьшается извлечение кремния вследствие пылевыноса.

Для обеспечения надлежащего хода технологического процесса необходимо обеспечить оптимально устойчивое погружение электродов. Для поддержания постоянной длины электрода по мере его сгорания производится перепуск. Величина перепуска зависит от качества шихтовых материалов, параметров электрического режима [97].

Известны следующие разновидности методов контроля заглубления электродов:

- ультразвуковые, с помощью генератора звуковых колебаний, подключаемого к металлическим стержням на концах электродов;

- методы, основанные на сопоставлении длины электрода с электрическими (индуктивными и емкостными), магнитными и тепловыми свойствами среды надэлектродного пространства;
- статистический метод, основанный на эмпирической зависимости расхода электрода от параметров процесса (расход электроэнергии и восстановителя, выход расплава) [101].

Все перечисленные методы не обладают достаточной точностью, что делает актуальными вопросы разработки устройства для непрерывного измерения заглубления электродов РТП. На большинстве предприятий контроль длины рабочих концов электродов осуществляется эпизодически посредством расчета и замеров. При этом замер рабочего конца электродов производится только при длительном расстройстве хода РТП, поскольку эта операция требует отключения печи, что приводит к нарушению технико-экономических показателей. Расчет длины рабочего конца осуществляется на основании предыдущего замера, величины перепуска и съема электроэнергии [37].

Для предотвращения же слишком высокого положения электродов проводят ежесменный перепуск на фиксированную длину, составляющую в среднем 2-2,5 мм на 1 тыс. кВтч съема.

1.3.3 Подсистема управления электрическим режимом РТП

Основная задача подсистемы управления электрическим режимом заключается в регулировании потребляемой электроэнергии по каждой фазе (связанной с каждым электродом). Подсистема осуществляет стабилизацию активной мощности печи и отдельно по каждому электроду за счет управления переключением ступеней напряжения печных трансформаторов и приводом перемещения электродержателей.

Контроль электрического режима осуществляется по следующим параметрам: сила тока в электродах, напряжение печных трансформаторов, напряжение на электродах относительно подины, активное сопротивление на электродах, полное сопротивление на электродах, активная мощность печи, реактивная мощность печи, активная мощность на электродах, реактивная мощность на электродах, коэффициент мощности печи, коэффициент мощности на электродах [37].

Одним из важных параметров, контролируемых и регулируемых персоналом печи, является глубина погружения электродов. Избыток углерода восстановителя в шихте снижает электрическое сопротивление, поэтому глубина погружения электродов в шихту уменьшается. Недостаток восстановителя приводит к увеличению электрического сопротивления и перемещению электрода вниз (т.е. к более глубокому погружению). Значительные отклонения в

глубине погружения электродов являются нарушениями технологического режима процесса [73].

На рисунке 1.4 приведена структурная схема автоматизации управления электрическим режимом РТП.

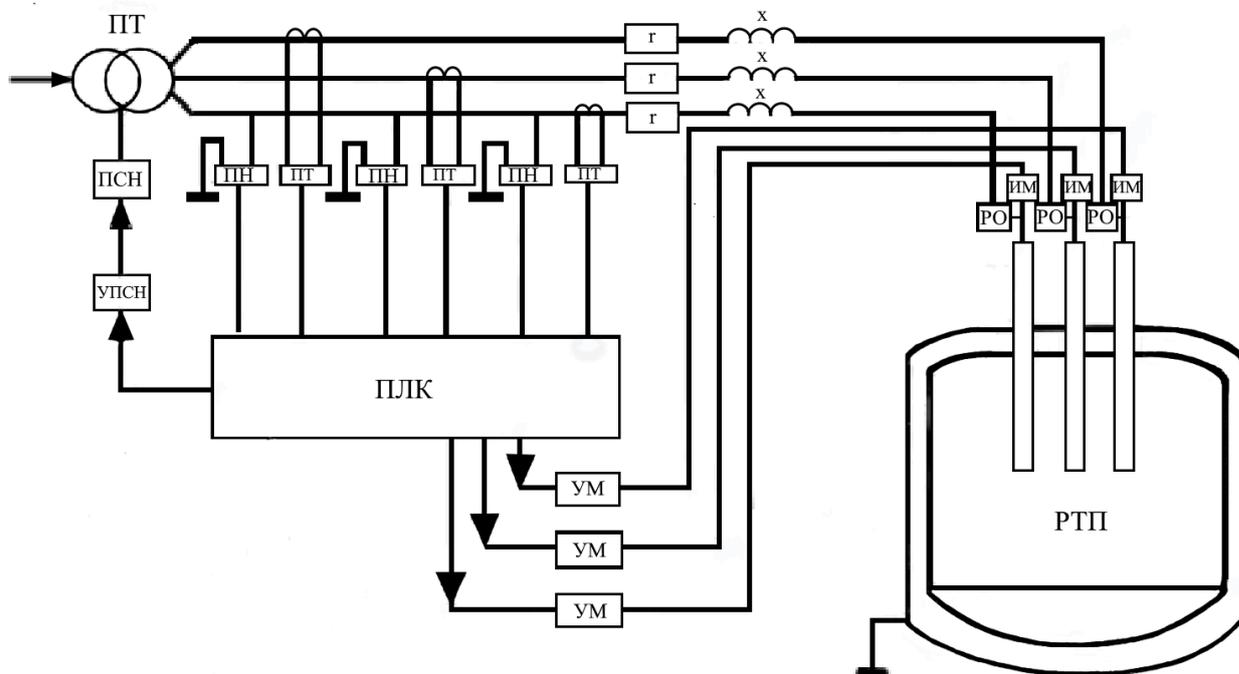


Рисунок 1.4 – Структурная схема подсистемы управления электрическим режимом РТП [73]
 ПТ – печной трансформатор; ПСН – переключатель ступеней напряжения; УПСН – устройство привода переключателя ступеней напряжения; ПН – преобразователь напряжения; ПТ – преобразователь тока; ПЛК – программно-логический контроллер; УМ – усилитель мощности; ИМ – исполнительные механизмы привода перемещения электродов; РО – реле отключения движения электродов; r, x – активное индуктивное сопротивление короткой цепи.

1.3.4 Обзор существующих решений в области автоматизированного управления энергетическим режимом РТП

С точки зрения стабилизации энергетического режима перспективными представляются исследования влияния способа загрузки дуговых печей и последующего распределения шихты в РТП. Динамический промышленный эксперимент был проведен на печи мощностью 30 МВА компании «Гау-Кен Темир». В лабораторной печи большой емкости были установлены две камеры плавления.

Первая стадия экспериментов привела к нарушению баланса энергетических и материальных потоков в системе, что привело к скольжению заряда и неуправляемой скорости подачи.

Эксперименты второй стадии, наоборот, были сосредоточены на восстановлении баланса. Данные исследования проводились в течение 3 дней в промышленных условиях и позволили определить параметры технологического процесса, такие как расход электроэнергии, средняя динамическая мощность, производительность печи и мощность на единицу площади пода. Был составлен материальный баланс для плавления железа, алюминия, кальция и кремния. Было принято решение впервые использовать понятие избытка шихты относительно необходимого количества при реальной мощности печи. Это было сделано с целью определения условной величины нагрузочного баланса, которая определяется как соотношение загруженных партий к теоретически рассчитанному числу, обеспечивающему равновесие материальных и энергетических потоков в печном пространстве.

Предложенный метод достижения равновесия (рисунок 1.5) был разработан для поддержания скорого устранения критичных состояний в промышленной печи [8]. В ходе исследований было предложено определение избытка шихты относительно требуемого количества, что помогло установить условный нагрузочный баланс, увеличить время между обработками колошника до 30 минут и стабилизировать равновесие между материальным и тепловым потоками. Технико-экономическим результатом предлагаемой методики является увеличение объема выпускаемого кремния на 15%, а также стабилизация колебаний в фазном токе.

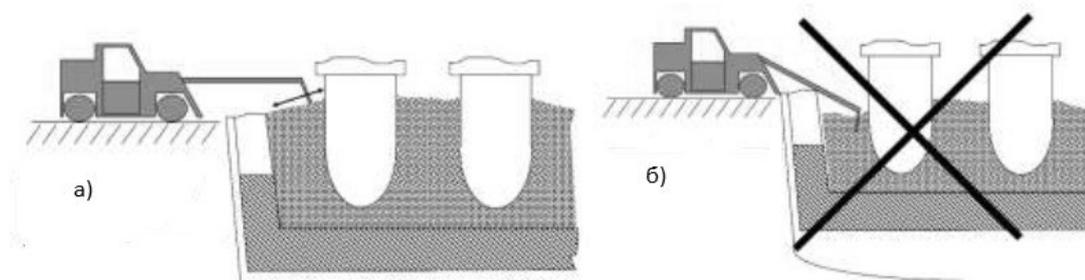


Рисунок 1.5 – Распределение сырья в печи: а) правильное ведение операций; б) неправильное ведение операций [8]

Использование акустических датчиков значительно улучшает мониторинг свойств и положения подаваемого материала. Датчики обычно размещены в твердой фазе, разделенной на сегменты, для каждого из которых предусмотрен минимум один датчик. Сигналы акустики создаются электрической дугой между электродами и нагрузочным материалом, именно они вызывают звуковой фон. Датчики акустики измеряют сигналы, проходящие сквозь загруженный материал или отраженные от него, чтобы определить параметры загруженного в печь материала. Мониторинг необходим для повышения производительности печи и снижения энергозатрат, а также для предупреждения поломок электродов. В результате внедрения метода акустического

контроля материала удалось сократить энергопотребление на 10-15% и улучшить качество расплава [26].

Для исследования влияния свойств шихты на энергетический режим печи специалисты ОАО «Ниигипрохим Санкт-Петербург» разработали метод, который основывается на определенной дозировке восстановителя. Они выявили необходимость учета связи базового параметра шлака с электрическими параметрами, а также показали важность анализа ошибочных дозровок других компонентов шихты, чтобы избежать негативного воздействия процесса перехода по каналу «шихта-шлак».

Применение данного метода требует контроля определенных параметров. В рамках предложенной системы сила электрического тока зависит от эксплуатационной мощности печи и наличия определенного соединения или элемента в шлаковой массе. Регулирование тока к среднему значению осуществляется через канал «шихта-шлак», учитывая степень инерции управляемого объекта. Для оценки динамики объема восстановителя проводится анализ. В качестве дополнительного контролируемого параметра вводится мониторинг положения рабочей части электрода в рабочей (углеродистой) зоны [23].

Один из основных факторов, оказывающих влияние на электрический режим РТП, – это износ электродов, нестабильное удельное электросопротивление шихты и колебания питающего напряжения. Существуют различные способы регулирования электрического режима, включая перемещение электрода и изменение напряжения для оперативной корректировки, а также подачу шихты в конкретную зону печи при изменении состава шихты для регулирования удельного электросопротивления материала для длительной коррекции.

Одним из перспективных методов управления электротехнологическим режимом, предложенным Максимовым А.А., является коррекция электрических параметров путем изменения напряжения трансформатора печи или параметров процесса путем смещения электродов.

Во время замены и перестановки электрода поддерживается установленный уровень тока путем смещения электрода в определенных пределах. При этом происходит контроль тока электрода, положения электрододержателя и других параметров. Регулирование тока возможно путем воздействия на трансформатор печи. При нахождении электрододержателя в самом нижнем положении определяются зона коксования и расстояние между «электрод-под». Эти параметры изменяются в зависимости от сигнала о смещении реального положения зоны коксования от заданного. Это позволяет оптимизировать электрический режим печного процесса. Параметры трансформатора изменяются. При достижении запланированного уровня потребления электрической энергии происходит корректировка уровня перепуска по сигналу из контура управления.

Контроль за расположением электродов и состоянием их работы проводится непрерывно с помощью гидравлической системы. Одновременно измеряется температура пода в печи, а чтобы поддерживать равновесие температуры, днище печи обдувается. Также осуществляется регулировка состава и подачи шихты. Мониторинг шихты проводится от дозатора до печи, при этом проверяется наличие шихты на всей линии производства, весовые сигналы подвергаются специальной обработке, проводится автонастройка веса тары и нулевого дрейфа [22].

Процесс плавки кремния в электродуговой печи, особенно восстановительная плавка, затруднен из-за высокой температуры, которая мешает контролировать и управлять процессом. Одной из трудностей является сложность собирать точные данные о параметрах плавки из-за высоких температур. Образование больших количеств побочных компонентов также усложняет использование датчиков. Для преодоления этих проблем наилучшим методом является компьютерное моделирование процесса плавки. Путем комбинирования вычислительных моделей с промышленными экспериментами возможно оптимизировать производство кремния определенной марки без необходимости проведения дорогостоящих экспериментов. Такой подход позволяет выявить факторы, влияющие на качество продукции.

Для разработки моделей процессов часто используются программы Matlab и Simulink. В программе Matlab представлена электросхема для электродуговой печи (см. рисунок 1.6), которая позволяет определить экстремумы функции для тока всех электродов.

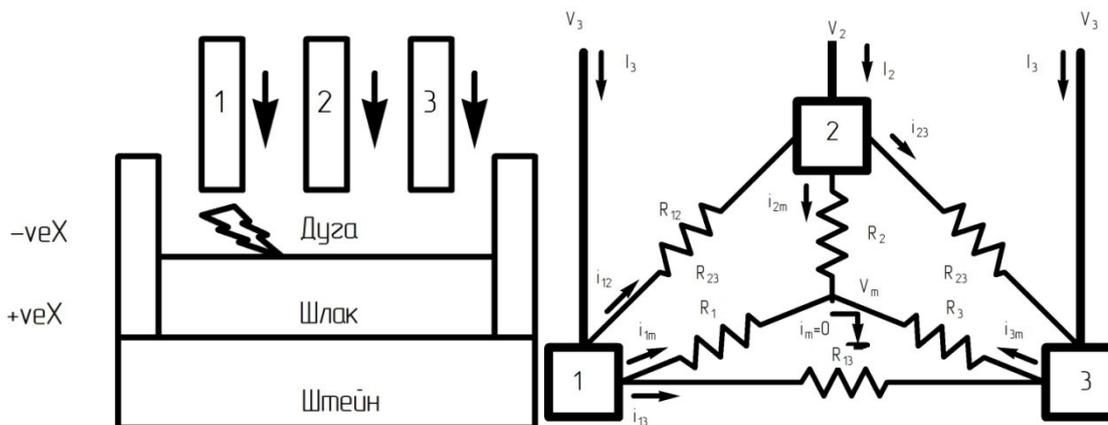


Рисунок 1.6 – Физическая и электрическая модели электродуговой печи соответственно [25]

Так, в работе [25], базовая блок-схема электродуговой печи была выполнена в форме линейного вывода конкретных показателей тока и мощности. Для выяснения положения электродов задействованы шаговые функции.

Для обеспечения управления системой было предложено применить принцип обратной связи в закрытом контуре, где выходной ток подавался с обратным знаком и затем вычитался из исходного значения для создания сигнала ошибки, который передавался на регулятор ПИД.

Из приведенных примеров видно, что создание модели печи или отслеживание режима работы электротехнологии напрямую связано с мониторингом состояния рабочей части электрода, его положением, расстоянием между электродами и другими параметрами. Определение положения рабочего конца электрода в процессе работы печи можно осуществить путем одновременного измерения напряжения между двумя точками на внешней поверхности стенки печного резервуара и тока, подаваемого на электрод, что поможет определить местоположение рабочей части электрода [24].

Авторы Горного университета разработали программный комплекс для отслеживания местоположения электрода в руднотермической печи во время выделения металлического кремния карботермическим методом. Он решает задачу контроля положения электрода при его погружении в не проводящую ток шихту, чтобы избежать изгиба электрода, что может негативно сказаться на электрическом режиме процесса. С помощью этого программного комплекса можно непрерывно отслеживать изгиб электрода, строить графики, задавать начальные условия и создавать модель процесса перепуска электрода в печи. Все это позволяет значительно повысить эффективность плавки.

Программная разработка помогает выполнять следующие задачи: считывание начальных условий, непрерывный контроль уровня изгиба электрода и построение графиков. В программу включено требование установить начальные условия, такие как начальное положение электрода, предельное значение изгиба, время создания модели и момент соприкосновения шихты с электродом. Среди прочего, программа также включает создание модели процесса износа электрода в РТП, включая поддержание электрода и его изгиб при соприкосновении с не проводящей ток шихтой [21].

Исследование дополнительных управляемых параметров и изучение их взаимодействия с энергетическим режимом работы печей было проведено профессором Педро А.А. В его работах были разработаны уравнения, отражающие изменения постоянной составляющей (ПС) напряжения РТП в зависимости от электротехнологических параметров работы печи, также были подробно рассмотрены взаимосвязи параметров РТП.

Один из основных факторов, влияющих на эффективность дуговой плавки, – это промежуток между электродами. Управление электрическим режимом дуговой печи может осуществляться путем изменения подаваемого напряжения или регулирования длины межэлектродного промежутка, что является более удобным способом коррекции напряжения на дуге.

В основе метода определения необходимости перепуска печного электрода в целях получения карбида кальция была заложена зависимость ПС от параметров ванны, а именно ее

глубины. Положение и длина рабочей части электрода определяется посредством определения зависимости ПС от местоположения рабочей части электрода по отношению к уровню расплава.

Выведенные уравнения помогают по величине ПС следить за уровнем расплава, определять местоположение электрода по отношению к этому уровню, параметры рабочей части электрода, распределение тока и мощности между дугой и расплавом.

Измерение и регулирование расстояния между электродами осуществляется на основе напряжения на дуге. Напряжение измеряется в момент расплавления электрода на центральной части его торцевой поверхности под воздействием аксиального магнитного поля. Сила тока в этом случае максимальна. Действие на расплав и дугу осуществляется магнитным полем с частотой 10-25 Гц и периодом 10-50 секунд. Расстояние между электродами поддерживается в диапазоне 40-80 мм. Этот метод помогает сохранить стабильное расплавление электрода и необходимое расстояние между ними.

Также примером управления межэлектродным расстоянием по итогам измерения напряжения дуги является выплавка слитков из титановых сплавов. В результате возникают токовые импульсы с обратной полярностью и измеряемой длительностью. Этот метод позволяет определить реальный промежуток между электродами и регулировать положение расходуемого электрода относительно выплавляемого слитка. Точность измерения промежутка между электродами значительно возрастает при использовании данного метода [21].

Для обеспечения оптимального энергетического режима печи необходимо не только контролировать основные технологические параметры, но и уметь быстро реагировать на возможные аварийные ситуации, например, перемещая электрод внутри печного пространства. Применение сигнального устройства на механизме передвижения электрода позволяет выявить момент упирания электрода в подину. Снижение механизма передвижения электрода останавливается после отправки сигнала в сигнальную и управляющую цепи. Это приводит к восприятию электродом вертикального усиления от массы устройства перепуска. При этом влияние на электрод веса остальных подвижных частей системы исключено. В случае отрыва электрода от подины (возврат к нормальному положению) устройство для перепуска принимает исходное местоположение на траверсе по причине постоянной фиксации от горизонтальных смещений. Это помогает избежать повреждений и увеличивает надежность работы печи.

Для того чтобы кремниевая промышленность оставалась конкурентоспособной, необходимо снижать выбросы и увеличивать энергоэффективность при плавке. Один из перспективных способов достижения этих целей – это непрерывный анализ отходящих газов и управление технологическим процессом по замкнутому циклу. Оценкой энергоэффективности процесса может служить количество выбрасываемых ценных компонентов – микрокремнезема. Этот критерий позволяет оценить энергоэффективность печей с учетом их экологической

безопасности. Оценка энергетической эффективности по объему тонкодисперсных частиц сырья, выбрасываемых из плавильной печи в отходящие газы, не противоречит традиционным методам измерения и оценки эффективности работы оборудования [21].

1.3.5 Подсистема автоматизированного управления материальными потоками технологического процесса карботермического восстановления кремния

Учет движения материалов, контроль материального баланса – один из главных инструментов для финансового и технического управления производством, базирующийся на расчете материальных балансов процессов переработки сырья в готовый продукт.

Материальный баланс является основным показателем работы цеха и предприятия в целом, отражающим степень эффективности технологического процесса. На основании материального баланса рассчитываются как выход готовой продукции (металлургического кремния), так и потери ценных компонентов, производится анализ технологии и т.д. Очевидно, что более точный баланс даёт более правильное представление о процессе, позволяет раскрыть резервы производства.

В процессе измерений массовых концентраций компонентов, участвующих в технологическом процессе, неизбежно присутствуют погрешности измерений. Совокупность их приводит к неверной оценке ресурсов предприятия, порождает финансовые риски.

Точная информация о составе сырья и конечного продукта имеет решающее значение для снижения возможных убытков, связанных с неверной оценкой запасов материалов, а также для быстрой их идентификации.

Автоматизированный контроль материального баланса позволяет:

- стратегически планировать производственные ресурсы (цифровая логистика);
- фиксировать любые изменения в составе и количестве сырья;
- определять неучтенные материальные потери;
- рассчитывать и учитывать погрешности измерения;
- сверять входные и выходные потоки за расчетный период.

Отсутствие своевременных адекватных данных о концентрациях шихтовых компонентов, запасах материалов, расходе углерода приводит к нерациональному использованию сырьевых и энергетических ресурсов, а также влечет за собой вынужденные простои производства. Нескорректированный материальный баланс углерода по шихте, допущенные неточности при его расчете приводят к росту выбросов монооксида кремния, что негативно сказывается на состоянии окружающей среды и снижает степень извлечения кремния. При создании новых современных технологий должен быть учтен опыт передовых отечественных предприятий по производству металлургического кремния. Новые технологии должны решать задачи по ресурсо-

и энергосбережению, а также по улучшению экологической обстановки в регионе путём сокращения выбросов микрокремнезема в атмосферу.

В качестве типового примера системы управления материальными потоками, ввиду отсутствия данных о подобных системах в производстве кремния, рассмотрим автоматизированную систему учета материальных потоков и расчета материального баланса металлургического цеха Медного завода ОАО «ГМК «Норильский никель», разработанную компанией «Сумма технологий» (рисунок 1.7). Металлургический цех Медного завода – одно из наиболее значимых дочерних предприятий ОАО «ГМК «Норильский никель». Задача автоматизации учета материальных потоков и расчета баланса металлов здесь стоит особенно остро. Продукция металлургического цеха – около четверти всей товарной продукции компании. В рамках цеха выполняется учет 72 продуктов, по каждому из которых проводится анализ количества и процентного содержания от 2 до 32 химических элементов, всего контролируется более 830 параметров.

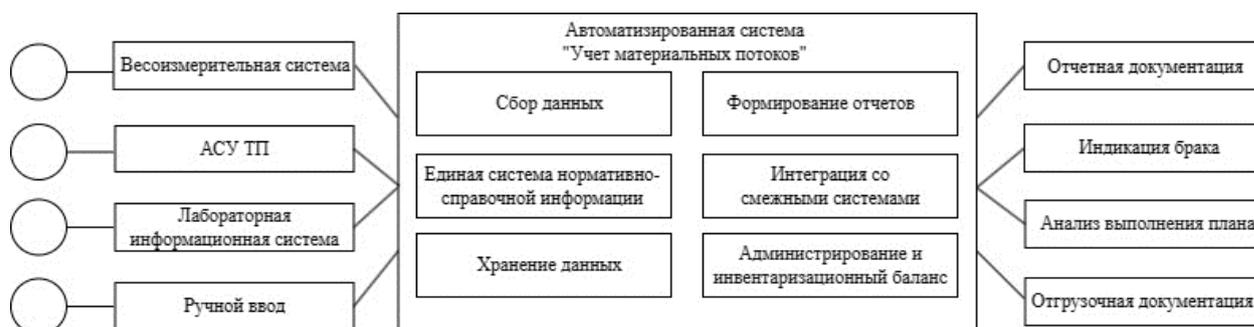


Рисунок 1.7 – Функциональная структура автоматизированной системы «Учет материальных потоков» металлургического цеха Медного завода.

Система позволяет отслеживать ценные компоненты в составе материалов по всем переделам цеха. Разработка системы сопровождалась внедрением автоматизации операции взвешивания продуктов [14].

Автоматизированная система учета материальных потоков и расчета баланса металлов обеспечивает более точный контроль основных технологических параметров работы металлургического цеха Медного завода, минимизирует ошибки при формировании документации на продукцию, своевременно предоставляет достоверные данные для анализа качества сырья, оптимизации процессов обогащения и увеличения коэффициента извлечения драгоценных металлов.

Производство, организованное предприятием «Норильский никель», представляет собой многостадийную цепочку создания стоимости готовой продукции от добычи руды до металлообработки. Непрерывная трансформация производства, в том числе и цифровая,

огромное количество взаимосвязанных объектов делает невозможным сколько-нибудь точное количественное определение эффективности конкретной АСУ.

В случае баланса металлов, можно дать оценку эффективности работы комплексной АСУ, охватывающей все подразделения «Норильский никель», включая и рассматриваемую систему металлургического цеха Медного завода:

- на 90% автоматизирован сбор данных, в результате чего минимизированы риски искажения балансовых данных;
- на 70% сокращены трудозатраты на сбор и формирование балансовой отчетности.

Для управления материальными потоками обычно не создается отдельной автоматизированной системы. Автоматизация управления материальными потоками осуществляется путем внедрения систем оперативного управления производством – систем класса MES (manufacturing execution system), где учет материальных потоков и сведение материального баланса являются функциями лишь одного из нескольких системных приложений (модулей) [76].

Для анализа перспектив применения MES систем для управления материальными потоками получения кремния рассмотрим ферросплавное производство, имеющее много общего с предприятиями, выпускающими металлургический кремний.

Основной продукт ферросплавных производств – ферросилиций. Процесс выплавки ферросилиция также основан на восстановлении кремния из его диоксида в кварците углеродом кокса и угля в руднотермической печи и сплавлении его с железом стальной стружки. При получении ферросилиция имеют место те же проблемы, что и при получении металлургического кремния, а именно, влияние состава шихты на электрический режим печи и пылевынос ценных компонентов; данные возмущающие факторы возможно устранить, повысив уровень автоматизации производства, в том числе путем внедрения MES-решения.

Результаты внедрения действующей системы класса MES, а именно ее модуля, отвечающего за учет сырьевых ресурсов, рассмотрены на примере Аксуского завода ферросплавов. Информационная система предприятия (ИСУП) разработана на базе программной платформы Wonderware и представляет собой единое информационное пространство, охватывающее основные цеха и вспомогательные подразделения (рисунок 1.8). Данная система была внедрена на производство в 2008 году с целью сокращения производственных затрат за счет выявления мест и причин производственных потерь, нецелевого использования сырья, материалов и готовой продукции [5].

Автоматизированная система учета и контроля материальных потоков (АСУМП) интегрирована в ИСУП завода и является комплексом программно-технических средств для

измерения, ведения учета и контроля движения сырьевых материалов и готовой продукции на цеховом уровне и уровне предприятия.

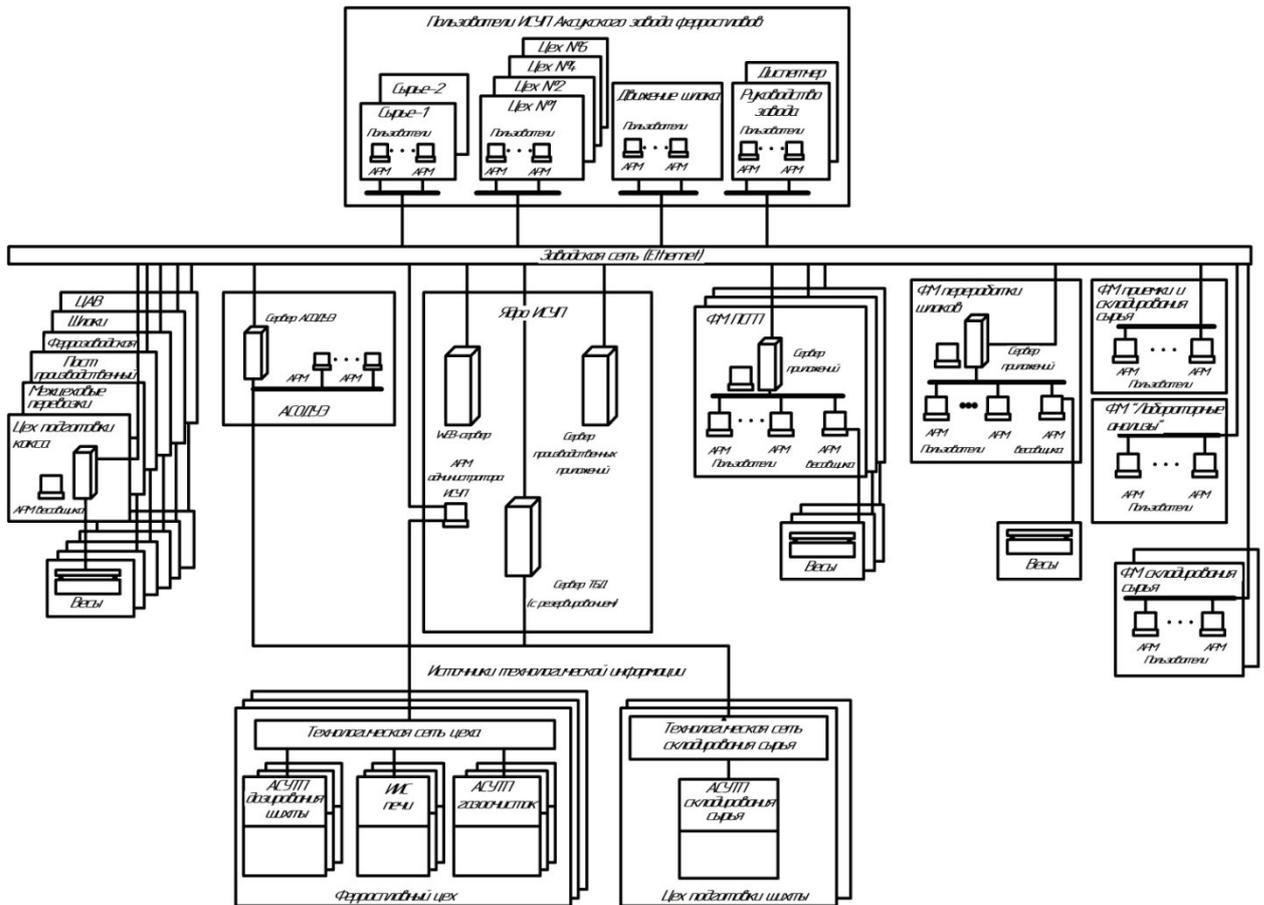


Рисунок 1.8 – Структура ИСУП Акхуского завода ферросплавов.

(ЦАВ – центральная автомобильная весовая; ФМ ПСГП – функциональный модуль производства, складирования и отгрузки готовой продукции; ИИС – информационно-измерительная система; арм –автоматизированное рабочее место)

На рисунке 1.8 представлена подробная структура ИСУП Акхуского завода ферросплавов, состоящая из:

- ядра ИСУП;
- автоматизированной системы оперативно-диспетчерского контроля и управления энергоснабжением (АСОДУЭ);
- функциональных модулей;
- АСУМП.

Внедрение системы осуществлялось поэтапно в виде функционально-законченных узлов учета материальных потоков (от отгрузки сырья до выгрузки готовой продукции).

В результате определяются следующие качественные улучшения:

- повышение эффективности производства за счет контроля и анализа используемых ресурсов и технологических процессов изнутри;
- рост качества готового продукта (сокращение брака, отходов);
- обеспечение соответствия требованиям заказчиков и надзорных органов благодаря отслеживанию движения продукта от сырья до получения готового продукта.

В отношении экономической эффективности внедрения MES ожидалось следующие результаты:

- снижение простоев технологического оборудования на 5%;
- снижение удельного расхода сырья на производство ферросплавов на 1%;
- снижение удельного расхода энергоресурсов на производство ферросплавов на 2% [5].

Основные функции MES-систем для ОАО «Кузнецкие ферросплавы»:

- сбор и хранение данных (DataCollection/Acquisition, DCA);

Сбор информации со всех АСУ ТП и других смежных автоматизированных систем, относящихся к ходу производственного процесса: электрический режим работы печи, точный состав шихты в удельном весе, параметры качества готовой продукции и др.

- управление производственным процессом (Process Management, PM);

Оперативный мониторинг корректирования производственного процесса либо в автоматическом, либо в автоматизированном (с участием оператора) режиме. В любом случае в основе данной функции лежит интеллектуальная экспертная система, которая на основе анализа исторических данных о параметрах технологического процесса и полученного расплава подбирает оптимальный состав шихты, а также электрический режим печи.

- управление качеством (Quality Management, QM);

Осуществляет управление лабораторными исследованиями параметров произведенного ферросилиция, а также обеспечивает анализ измеренных показателей в режиме, близком к реальному времени.

- анализ эффективности (Performance Analysis, PA).

Формирование отчетов о фактических результатах производственной деятельности, сравнение их с историческими данными и ожидаемым коммерческим результатом. Формирование и сведение материального баланса для передачи его в ERP-систему (enterprise resource planning) [12].

Для получения достоверных данных одновременно с внедрением MES на ОАО «Кузнецкие ферросплавы» была произведена модернизация действующей АСУ ТП. Были введены в действие измерительно-контрольные комплексы для определения влажности/обледенения компонентов

шихты на ленточном конвейере, а также измерения фактической массы расплава ферросилиция, усовершенствован контроль электрического режима печей.

Успешная реализация проекта существенно повысила рентабельность предприятия. Так, с 2007 по 2012 года в условиях мирового экономического кризиса удалось увеличить выплавку ферросилиция на 12%, а также повысить производительность труда.

Основные игроки на рынке кремния и поликремния стремятся расширить вертикальную интеграцию своего бизнеса. Зарубежные предприятия ориентированы на выпуск поликристаллического кремния, используемого в солнечной энергетике и полупроводниковой промышленности, что повышает ценность готового продукта и рентабельность производства.

Ввиду сложности производственной цепочки и многостадийности процесса подготовки сырья, уровень автоматизации, в том числе и автоматизации верхнего уровня, представляет собой единую сеть, охватывающую все этапы производства. Ниже приведены примеры организации систем оперативного управления, в том числе автоматизированных систем управления материальными потоками на предприятиях, выпускающих поликремний [13].

Так, международная компания WackerPolysilicon AG (Германия, США) с целью минимизации производственных затрат запустила общегрупповую программу — WackerOperatingSystem (WOS) для увеличения производительности через внутреннюю цепочку снабжения: от обслуживания и закупки сырья через производство до упаковки и отгрузки готового продукта. Компания Wacker имеет собственную академию для подготовки кадров, обслуживающих WOS.

В компании REC Silicon ASA (Норвегия / США) в декабре 2006 года была установлена MES система в масштабе предприятия на базе OSIsoft PI datahistorian. Его встроенный интеллектуальный прогноз может повысить эффективность работы предприятия на 2% и более.

Компания SUPCON XinteEnergyCo. (Китай) выиграла контракт на разработку комплексных решений для интеллектуального завода по проекту модернизации производственной базы поликремния мощностью 36 000 т/год от XinteEnergyCompany в 2018 году. SUPCON будет поставлять комплексное интеллектуальное решение для последующего внедрения, охватывающие как управление отдельными процессами, так и управление общей информацией предприятия.

Анализируемые зарубежные предприятия по производству кремния шли по пути объединения информационных систем, автоматизирующих деятельность тех или иных производственных подразделений, не обособляя каждый передел и технологический процесс. На этих заводах установлены полностью интегрированные системы контроля материальных потоков, оформляющие оперативные данные в едином для предприятия формате отчетности. Это

позволяет избежать разрозненных, плохо сочетающихся друг с другом данных и создать адекватную аналитическую базу для стратегического планирования ресурсов [76].

1.4 Перспективные направления повышения уровня управления технологическим процессом карботермического восстановления кремния

Технологический процесс восстановительной выплавки кремния имеет особенности, затрудняющие организацию контроля и управления. Высокая температура затрудняет процедуру получения объективных данных о параметрах плавки и поведении расплава в печи. Еще один факт, обуславливающий сложность процесса, — образование больших объемов микрокремнеземной пыли [91].

Основные препятствия развития автоматизации процесса выплавки кремния в РТП включают:

1. Сложность исследования процессов в ванне печи из-за высоких температур и агрессивных условий эксплуатации, что затрудняет проведение глубоких исследований.
2. Отсутствие достаточной надежности и автоматизации в системах обслуживания устройств.
3. Нехватка специализированных КИПиА для точного измерения таких значимых параметров процесса, как температура расплава, выбросы микрокремнезема, взвешивание расплавленных материалов, а также автоматическое определение основных компонентов в шихте.

Традиционная автоматизация электродуговой печи преимущественно направлена на управление электрическим режимом, углеродным режимом и позиционирование электродов. Система регулирования, отвечающая современным требованиям, должна обеспечивать безопасную и эффективную эксплуатацию РТП даже в сложных условиях, создавая условия для бесперебойного протекания процесса [72].

При существующих ограничениях, связанных с наблюдаемостью восстановления кремнезема в ванне печи, для повышения качества управления в производстве металлургического кремния необходимо решить вопрос контроля материальных потоков на входе и выходе из РТП (кварцевое сырье и микрокремнезем). Увеличение количества контролируемых параметров без изменения методов и принципов организации, планирования, управления и контроля производственных процессов не позволяет решить существующие проблемы [36].

Для достижения достаточной эффективности управления процессом необходимы системные решения, расширяющие существующий уровень автоматизации за счет внедрения экспертной системы для ранней диагностики нарушений технологического режима плавки (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Место диагностической системы в АСУ ТП выплавки металлургического кремния

1.4.1 Первичная диагностика нарушений технологического процесса

Для эффективного управления процессом, оперативного выявления и исправления нарушений хода печи необходим автоматический контроль большого числа параметров:

- гранулометрический и химический и пропорциональный состав шихты;
- рабочая мощность печи;
- рабочее напряжение и ток;
- длина рабочих концов электродов;
- температура расплава внутри печи;
- расход шлака на выходе из печи;
- химический состав продуктов плавки;
- температура продуктов плавки;
- расход и химический состав отходящих газов;
- объемы пылевых выбросов;
- температура отходящих газов;
- расход и температура охлаждающей воды.

Руднотермические печи представляют собой комплексные объекты для наблюдения и контроля. Высокая химическая агрессивность рабочей среды и экстремальные температуры ограничивают использование стандартных измерительных устройств, что затрудняет точное и непрерывное измерение процессов в печи. Управление выплавкой кремния осуществляется при ограниченной доступности информации, и значительная часть данных оценивается только качественно. Неопределенность условий управления усугубляется отсутствием данных для оценки вероятности различных случайных событий, таких как обвалы шихты, недостаток углерода, неравномерное распределение токовой нагрузки, скачки напряжения и другие технологические нарушения [27].

Автоматизированный контроль параметров руднотермического восстановления кремния, измеряемых с требуемой точностью, ограничивается электрическими характеристиками, в то время как многие целевые технологические параметры либо контролируются с существенной погрешностью и частотой дискретизации, либо не контролируются.

На производстве качество исходного сырья традиционно проверяется путем отбора проб с последующим рентгеноспектральным анализом. Этот метод не подходит для автоматизированного контроля из-за временных задержек, связанных с подготовкой и транспортировкой проб [107].

Прямой непрерывный контроль температуры внутри РТП ограничен из-за экстремально высоких температур. Оценка теплового режима печи осуществляется через мониторинг температуры пода и стенок с помощью термопар, но эта информация лишь слабо отражает условия внутри ванны из-за значительной инерционности процесса. Контроль теплового режима на основе косвенных данных, таких как ток и напряжение, не отображает химические преобразования, происходящие в печи [57].

Использование газоанализаторов для определения состава отходящих газов часто сопряжено с ошибками измерения, которые усугубляются турбулентностью потоков, высокими температурами и загрязнением газа твердыми частицами, что затрудняет точное измерение объемов пылевых выбросов.

Таким образом, объективных данных обо всех необходимых для эффективного управления процессом параметрах недостаточно, что вынуждает персонал принимать решения по корректировке режима плавки, исходя из собственного опыта и интуиции.

Для снижения влияния человеческого фактора необходимо привлекать дополнительную информацию, такую как результаты лабораторных анализов, отчеты о проверках оборудования, качественные характеристики процесса, подвергающиеся систематизации и анализу системой диагностики. Система позволяет не доводить процесс до аварийного состояния, а

диагностировать нарушения его хода на ранней стадии для возвращения его в регламентные рамки.

Анализ основных негативных проявлений технологического процесса (повышение пылеобразования, потеря токовой нагрузки и т.д.) показал, что схожие симптомы могут указывать на разные причины нарушений. Таким образом, основной задачей системы диагностики является дифференцирование нарушений, имеющих схожие симптомы.

При выборе контролируемых показателей для системы диагностики за основу следует принимать опыт обслуживающего персонала и внутренние регламентирующие документы предприятия. Для определения нарушений в систему включены доверительные интервалы регулирования значения ключевых параметров и их комбинации, соответствующие конкретному нарушению хода печи [10].

1.4.2 Оперативный контроль качества кварцевого сырья в производстве кремния

Использование кварцевого сырья из разных источников изменяет производительность печи. Влияние кварцита будет зависеть от температурного профиля печи, а также влиять на него.

Кварцит может определять на работу печи, оказывая воздействие на:

- загрузку материалов, который может изменяться в зависимости от физических свойств кварцита, таких как чистота и зернистость;
- удаление газов, что важно для поддержания нужной атмосферы внутри печи и оптимального отвода продуктов реакции;
- скорость химических реакций, включая процессы восстановления SiO_2 , что непосредственно влияет на производительность печи и качество получаемого кремния;
- распределение энергии и температур в печи, что критически важно для поддержания стабильности процесса плавки и минимизации энергетических потерь.

Для получения стабильного потока отходящих газов шихтовая смесь не должна содержать избыточное количество мелкой фракции. В процессе нагрева кварц разрушается до мелкой фракции как при нагреве в шихтовой смеси, так и в результате перегрева при контакте с поверхностью шихты, имеющей температуру 700-1300 °С. Количество образующейся мелочи сильно зависит от источника кварца [6].

Данные лабораторных исследований показывают, что кварцевая мелочь не является основным фактором, определяющим проницаемость и давление газа в печи. Считается, что более важным фактором является засорение частиц SiO -конденсатами, хотя это и не подтверждено документально. Большая площадь поверхности мелких частиц по сравнению с кусковым материалом создает условия для более интенсивной конденсации SiO , более быстрого теплообмена и более высокой скорости реакции [47].

Образование мелких частиц кварца может влиять на работу печи. Для стабильной работы печи необходим устойчивый нисходящий поток сырья. Образование и засорение материалов в результате SiO-конденсации будет влиять на поток. На поток также влияют размягчение, плавление кварцита и изменение его вязкости. Свойства плавления у разных источников кварцита различны. Таким образом, наблюдаемые различия в плавящихся свойствах кварца разных источников могут приводить к изменению производительности печи в зависимости от источника кварца [49].

Исходя из этих соображений, можно предположить, что для работы печи наиболее подходящим будет кварцевый источник с высокой температурой размягчения, малой разницей температур между размягчением и плавлением, который плавится относительно быстро и полностью расплавляется при температуре около 1800 °С. Переход от одного кварцевого источника к другому может привести к периодам нестабильности в работе печи.

Содержание распространенных второстепенных компонентов в кварце, таких как Na₂O, Fe₂O₃, CaO и Al₂O₃, изменяет как скорость твердофазных превращений, так и снижает температуру солидуса. Жидкая фаза начнет формироваться при температуре ниже 1720 °С, а жидкая и твердая фазы будут сосуществовать в интервале плавления. Предполагается, что свойства кварцита при плавлении влияют как на поток материала и газа в печи, а также на скорость реакции и, соответственно, на распределение энергии и температуры [89].

Необходимо, чтобы кремнеземсодержащее рудное сырье включало минимум оксидов железа, фосфора, титана, щелочных металлов и других элементов, переходящих в процессе их карботермического восстановления в конечный продукт и снижающих его потребительские качества. Однако определяющим фактором, обеспечивающим нормальный ход плавки, является не столько низкое содержание примесей, сколько его стабильность. В таблице 1.1 представлены колебания примесных элементов в кварцевом сырье, применяемом в производстве металлургического кремния.

Таблица 1.1 – Изменение содержания основных примесей в кварците при составлении шихты для плавки [100]

Элементы-примеси	Колебания элементного состава шихты, ppmw
Al	300-3200
Ca	75-160
Fe	100-1500
Ti	20-200
Na	50-170
Mg	20-140
P	5-50
B	10-45

Существуют проблемы на стадии подготовки и загрузки шихты в производстве металлургического кремния. Имеется ряд исследований, посвященных влиянию углеродных восстановителей на выплавку кремния в РТП, на основе которых сформированы определенные требования к их качеству.

Единого стандарта, регламентирующего его качество кремнеземсодержащего сырья, нет. Действующие ГОСТы на кварциты регламентируют только единичные параметры, такие как содержание SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , а также гранулометрический состав. Причина отсутствия стандартов по ряду других примесей, существенно влияющих на эффективность и результат плавки, заключается в том, что даже при сходном химическом составе кварциты разных месторождений восстанавливаются по-разному, что определяется в первую очередь структурным составом кварцита (кварца) [75].

Анализ производственных данных выплавки технического кремния в РТП показал, что низкое качество кварцита отрицательно влияют на эффективность технологического процесса, объемы пылевых выбросов, а также на чистоту конечного продукта. Для достижения эффекта от стабилизации качества минерального сырья необходимо осуществлять непрерывный контроль химического и фракционного состава.

Требования к кварциту для производства металлургического кремния в РТП традиционно определяются лишь химическим и гранулометрическим составом. Структурный анализ, определяющий реакционную способность и степень газификации кварцита, на действующих предприятиях не проводится ввиду отсутствия методики исследования [103].

Контроль фракционного состава подготовленного сырья осуществляется после дробления отсевом мелких фракций вибрационным грохотом, где класс -20 мм подаётся в накопительный бункер и затем вывозится на площадку отходов, а класс $+20$ мм поступает в сортовые бункера кварцита. Большое количество мелких частиц будет препятствовать равномерному потоку сырья вниз и отходящих газов вверх. Это может привести к небольшим всплескам газа или каналы в печи, и, следовательно, более низкий выход Si, так как поднимающийся SiO не улавливается [29].

Выбор навески шихты перед загрузкой осуществляется технологическим персоналом электротермического отделения на основании ряда факторов и технологических параметров работы руднотермической печи: силы тока, напряжения на электродах, посадки электродов, состояния колошника, количества загруженной шихты за предыдущий период смены, фактического схода шихты, графика перепусков, фактической или расчетной длины электродов.

Методика контроля пропорционального, фракционного и химического состава кварцевого сырья не предполагает управления процессом производства кремния, подготовки и загрузки шихты. Контроль методом рентгеноспектрометрического анализа проб не позволяет оперативно влиять на технологический процесс и примесные элементы в сырье. Также грохочение не

позволяет избежать попадания кусков диаметром менее 20 мм в печь в результате отсутствия автоматического контроля [17].

Таким образом, в АСУ ТП производства кремния требуется подсистемы контроля и управления качеством минерального сырья, представляющая собой совокупность технических, технологических и организационных средств. Проблему оперативного контроля и управления качеством сырья можно решить только при системном подходе совместно с точечным отбором проб для калибровки системы управления [2].

1.4.3 Непрерывный контроль объемов пылевых выбросов

Одной из важнейших проблем производства металлургического кремния является большие потери кварцевого сырья через пылевые выбросы в виде микрокремнезема. Частицы микрокремнезема являются побочным продуктом выплавки кремния, образующимся вследствие реакции горения монооксида кремния с кислородом. Эти наночастицы, используются в различных композиционных материалах. Технологический режим производства кремния влияет не только на выход микрокремнезема, но и на качество и свойства частиц. В зависимости от области применения предпочтительны определенные размеры частиц, насыпная плотность и их модификация, что делает критически важным для успешного сбыта контроль и управление процессом, углубленное изучение условий образования и роста микрокремнезема с необходимой структурой [33].

Изучение процессов образования микрокремнезема в производстве металлургического кремния продолжает оставаться актуальным направлением исследования. Микрокремнезем формируется из частиц монооксида кремния (SiO), которые не вступают в реакцию с углеродом или не конденсируются на более прохладных поверхностях, а вместо этого уносятся в виде газа в зоны с более низкими температурами. Основываясь на фазовом равновесии системы Si-O-C , исследования выявили, что микрокремнезем может образовываться несколькими путями:

1. В газовой фазе в печах при температурах 1100-1500°C из-за реакций между монооксидом кремния и монооксидом углерода. При охлаждении монооксид кремния может диспропорционировать или конденсироваться, что ведет к возвращению значительной части микрокремнезема в процесс.

2. В результате окислительных реакций, часто происходящих в печах с нерегулируемой атмосферой, где происходит снижение содержания карбида кремния, кремния и углерода в пылевых выбросах, что приводит к образованию микрокремнезема в основном как диоксида кремния.

3. За счет механического уноса пылевых частиц сырья, особенно в процессах рудоподготовки.

Основной задачей на пути повышения эффективности производства для современных предприятий, выпускающих металлургический кремний, остается снижение выбросов микросилики [56, 67]

В процессе производства одной тонны металлургического кремния на предприятиях образуется 400-450 кг дисперсного углеродистого микрокремнезема. Состав пыли может варьироваться в зависимости от состава шихты, электрического режима печи. Основными компонентами являются SiO_2 (до 85%) и твердый углерод (7-8%), а также карбид кремния (5%).

Основным механизмом образования микрокремнеземной пыли является конденсация SiO , в то же время небольшая доля (<1%) пылевых частиц образуется при его разбрызгивании. При отсутствии газоочистных сооружений (далее – ГОУ) 30-40% микрокремнезема выбрасывается через фонарные выбросы, другая часть осаждается на производственных территориях и собирается вручную в тару (типа «биг-бег»).

Конденсация представляет собой ограничивающий фактор для увеличения производства кремния, поскольку из начального объема газа возможно извлечь только примерно 20-25%. В промышленных условиях можно применять два основных метода для повышения выхода кремния:

1) Первый метод заключается в усилении процесса конденсации для увеличения выхода кремния. Это подразумевает большую доступную площадь и продолжительность времени конденсации, что, в свою очередь, требует перестройки печей для кремния. Печи должны быть более высокими и объемными, чтобы эффективно улавливать выходящий газ и создавать необходимый температурный градиент для конденсации. Это также улучшит реакционную способность углерода и приблизит к максимальному извлечению $\text{SiO}(\text{г})$, хотя и увеличит сложность операций из-за потенциального засорения в более обширном пространстве.

2) Второй метод направлен на минимизацию конденсации, предполагая полное превращение газа в зоне высокой температуры. Хотя полностью прореагировать весь SiO в зоне высоких температур невозможно из-за равновесных ограничений, можно использовать вторичную камеру для рециркуляции SiO из отходящего газа после его очистки от микрочастиц и микрокремнезема, что предотвратит засорение системы. Этот метод заставляет газ реагировать в зоне высоких температур, где более высокая концентрация SiO способствует более быстрой и эффективной реакции на получение кремния. Однако такая система требует поддержания температуры печи выше $1500-1600^\circ\text{C}$ для предотвращения конденсации, что повышает энергопотребление [85].

Таким образом, каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки, которые необходимо учитывать при выборе оптимальной стратегии для максимизации производства кремния.

Проблема непрерывной оценки количества пылевых выбросов и их улавливания состоит в том, что кремниевая пыль крайне тонка (около 80% генерируемой пыли имеет фракцию менее 1 мкм) и плохо улавливается; на эффективность пылеулавливания влияет ее крупность. Задачу необходимо решать комплексно. Повышение качества шихтовых материалов и соблюдение технологического режима РТП, внедрение системы управления материальными потоками, оперативный контроль количества улавливаемой пыли позволяют значительно снизить уровень пылевых выбросов в производстве технического кремния [62, 66].

Для адекватной оценки пылевых выбросов в производстве металлургического кремния используются два основных типа методов измерения:

1. Непосредственный контроль в пылегазовом потоке, выходящем из печи, где часто применяются оптические датчики, требующие специализированной калибровки под конкретные условия производства.

2. Экстрактивные методы, которые включают отбор проб для анализа.

В индустрии кремния испытаны различные экстрактивные методы для количественного определения твердых частиц:

– Гравиметрические фильтры предлагают надежный, экономичный и простой способ оценки массовой концентрации выбросов микрокремнезема, однако не подходят для непрерывного мониторинга.

– Стандартные оптические счетчики частиц и счетчики конденсационных частиц, которые часто не адекватны для условий кремниевых заводов из-за измерения слишком низких концентраций твердых частиц [65].

Мониторинг отходящих газов в производстве кремния и его сплавов связан с рядом специфических проблем:

– температура газа в непосредственной близости от свода печи очень высока (500-600 °С), что приводит к необходимости разбавления газопылевого потока перед контактом с чувствительным прибором в случае экстрактивных измерений;

– высокая концентрация твердых частиц перед фильтром может привести к быстрому абразивному износу измерительных приборов в газовых потоках, которые находятся в контакте с частицами, а также влияет на точность измерения;

– турбулентный режим движения газа обладает широким спектром временных и пространственных масштабов пульсаций всех характеристик потока, что приводит к неравномерному распределению вещества в потоке и, как следствие, искажению результатов измерения [76].

Описанные проблемы делают актуальным поиск новых решений, связанных со сквозным оперативным контролем материальных потоков технологической цепочки производства кремния в РТП.

Выводы к главе 1

Анализ производств металлургического кремния выявил низкий относительно альтернативных пирометаллургических производств уровень автоматизации технологического процесса. Локальные системы управления и наличие нижнего уровня АСУ ТП не может полностью решить проблему расхождения материальных балансов и нерационального использования энергетических и материальных ресурсов. При этом нерешенными остаются задачи оперативного входного контроля сырья, а также одного из ключевых параметров технологического процесса – объема выбросов микрокремнезема.

С целью повышения эффективности существующей системы управления процессом плавки в РТП и получения высоких технико-экономических показателей процесса необходим комплексный подход к управлению процессом. Такой подход позволит повысить технико-экономические показатели процесса, уменьшить потери сырья с выбросами микрокремнезема и снизить себестоимость выплавки кремния.

Для повышения эффективности производства кремния в РТП с точки зрения автоматизации требуется:

1. Расширение функционала существующих локальных систем управления за счет увеличения контролируемых параметров.

С этой целью проводится поиск новых функциональных зависимостей с помощью методов цифрового моделирования областей РТП, недоступных для наблюдения.

2. Сквозной учет и анализ материальных потоков производства.

Внедрение модуля, осуществляющего предиктивный расчет баланса плавки для получения целевых марок кремния, анализ расхождений и корректировку по результатам плавки.

3. Ранняя диагностика нарушений хода технологического процесса.

Реализация автоматической системы диагностики нарушений хода технологического процесса для снижения влияния человеческого фактора и возможности ликвидации аварийных ситуаций за счет оперативной корректировки хода технологического процесса. Система диагностики позволяет также объединить в одно целое уже существующие локальные АСУ отдельных параметров.

ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ

2.1 Исследование влияния примесей кварцевого сырья на технологический процесс карботермического восстановления кремния в РТП

Для анализа внутренних процессов карботермического восстановления кремния при ограниченных возможностях наблюдения и контроля применяются методы физического и цифрового моделирования, поскольку традиционные физико-химические методы не дают исчерпывающего представления о происходящем в ванне печи.

Качество минерального сырья определяется различными функциональными характеристиками, включая содержание примесей, прочность, минеральный и структурный состав, а также влажность шихты. Большое значение имеет стабильность химического состава рудной массы, оказывая непосредственное влияние на качество кремния и реакционную способность шихты. Присутствие в сырье примесей CaO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 приводит к образованию трудновосстановимых шлаков, что при превышении допустимого порогового значения, негативно сказывается на процессе получения кремния [29, 69].

Важным параметром является температура размягчения кварцита, чувствительная к наличию различных примесей, в том числе и железа. Кварцит — это метаморфическая порода, в основном состоящая из кварца. В чистом виде кварц начинает размягчаться при температуре около 1650–1750 °С. Примеси могут существенно изменить это значение [48]. Примеси могут существенно изменить это значение.

Примеси железа, такие как оксиды железа (FeO , Fe_2O_3), снижают температуру плавления и размягчения кварцита. Зависимость температуры размягчения от содержания железа не является линейной и может сильно варьироваться в зависимости от формы присутствия железа, его окислительного состояния и присутствия других примесей. К примеру, если железо находится в форме оксидов, оно может образовывать низкотемпературные эвтектики с кремнеземом, что приводит к значительному снижению начальной температуры плавления частиц кварцита. Кроме того, железо может участвовать в образовании жидкофазных составляющих при более низких температурах, что также будет способствовать снижению температуры размягчения кварцита.

Работы Рингдалена и Тангстад (рисунок 2.1) показали, что корреляция между содержанием Al_2O_3 и температурой размягчения не всегда очевидна, содержание оксидов железа может существенно понижать эту температуру [88, 89].

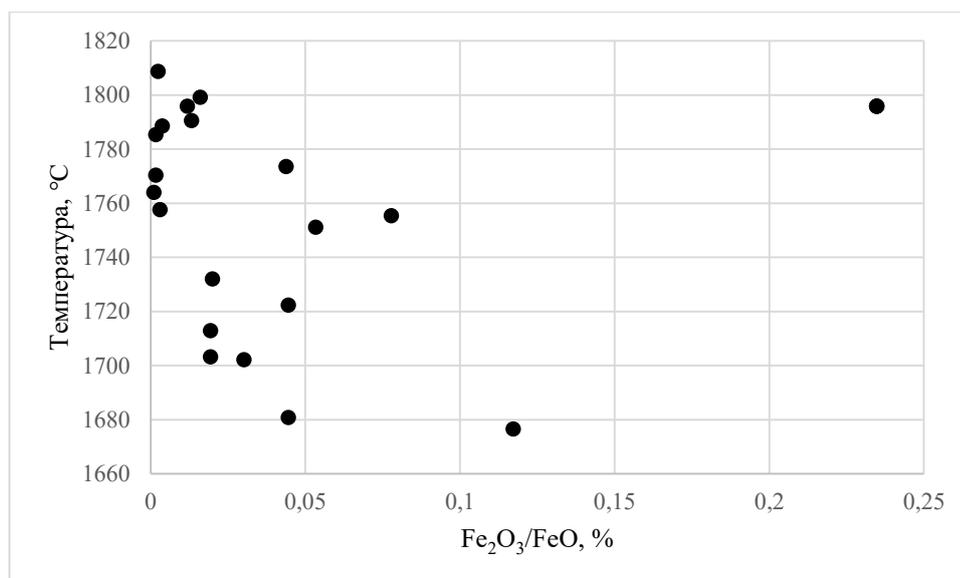


Рисунок 2.1 – Зависимость температуры размягчения кварцевого сырья от концентрации в нем оксидов железа [89]

Для более точной оценки влияния химического состава на температурные свойства кварцитов Первоуральского и Черемшанского месторождений, используемых в качестве основного сырья ООО «РУСАЛ Кремний Урал» были проведены лабораторные исследования термостойкости образцов кварцитов. Химический состав кварцитов из партий разных марок указанных месторождений приведен в таблице 2.1 (А – Первоуральский кварцит, В – Черемшанский кварцит, С – Первоуральский кварцит, отобранный из партии по визуальным признакам существенного содержания железа).

Таблица 2.1 – Усредненный химический состав анализируемых образцов кварцита

Кварцит, %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O
А	98,48	0,24	0,30	0,01	0,02	0,11	0,01	0,02	0,06
В	99,52	0,17	0,09	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02
С	98,31	0,21	0,47	0,02	0,02	0,14	0,01	0,02	0,05

В муфельной печи L 9/13 с предельной температурой нагрева 1300 °С (рисунок 2.2) проводили нагрев для исследования термостойкости образцов. Обогрев печи осуществляется с двух сторон. Приточный воздух регулировали через отверстие в двери, а отходящие газы и летучие компоненты удаляются через вытяжное отверстие в задней стенке печи. Автоматизированный контроль за соблюдением выбранных режимов работы печи осуществляется с помощью контроллера В510 (5 программ с 4 сегментами в каждой).

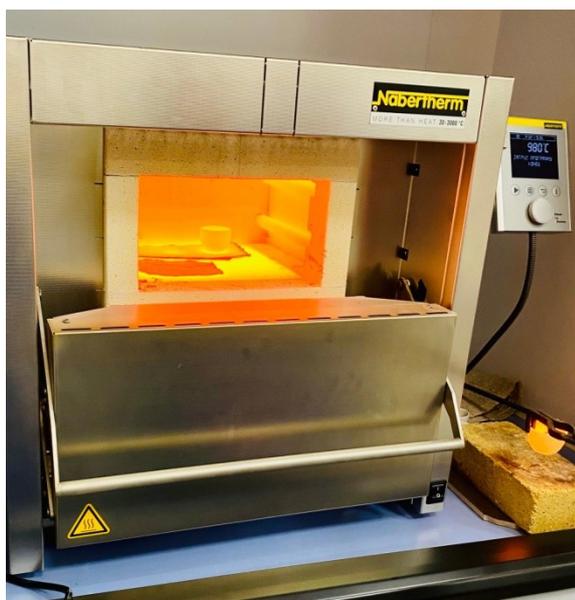


Рисунок 2.2 – Процесс эксперимента в муфельной печи

Алгоритм проведения опытов включает следующие этапы:

1. Подготовка шихты. Отобранные на ООО «РУСАЛ Кремний Урал» представительские пробы кварцита Черемшанского и Первоуральского месторождений дробятся до размеров 5-15 мм. Древесный уголь дробится до размеров 5-10 мм. Формируется 5 образцов шихты из расчета массы древесного угля к массе кварцита 2:1. Получено 2 навески шихты с массой кварцитов 6 г., общей массой каждой навески 18 г.

2. Нагрев образцов кварцита. Тигли с шихтой устанавливаются в электрическую муфельную печь с дальнейшей выдержкой 30 минут при температуре от 1100°C. По истечении установленного времени, тигли вынимаются из печи и охлаждаются до комнатной температуры.

3. Количество потрескавшихся и разрушенных образцов фиксировались, в случае разрушения производилось рассеивание материала. Количество фракции 0-5 мм принято за унифицированный показатель средней термостойкости материала (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Образцы после нагрева кварцита в муфельной печи

Полученные результаты опытов приведены в таблице 2.2

Таблица 2.2 – Результаты анализа образцов кварцитов на термостойкость

Исследуемый образец	Термостойкость при 800 °С, %	Термостойкость при 1100 °С, %
А	0,10	1,9
В	0,00	0,2
С	0,12	2,4

2.1.1 Выбор параметров для оперативной оценки качества кварцевого сырья

На предприятии ООО «Русал Кремний Урал» контроль взятие образцов для контроля качества кварцита осуществляется сразу после разгрузки вагонов, посредством рентгеноспектрометрического анализа подготовленных проб. Из каждой партии кварцита выбираются пробы по методу конверта с пятью точками отбора, которые составляют не менее 0,01% от общего объема партии. В настоящее время используются кварциты ООО «Первоуральский динасовый завод» и АО «Кремний рудник Черемшанский», хотя ранее также поступали кварциты из Светлореченского и Глуховского месторождений. При этом контроль осуществляется только за содержанием примесей Al_2O_3 , Fe_2O_3 , и CaO , а также гранулометрическим составом [42].

На рисунке 2.4 представлены результаты анализов входных партий кварцитов за период с марта 2022 по август 2022 года ООО «Русал Кремний Урал» по двум основным примесным оксидам – Fe_2O_3 и Al_2O_3 . Из графиков видно, что содержание оксида алюминия в кварцитах соответствует необходимым стандартам для технологического процесса, в то время как содержание оксида железа может значительно варьироваться в пределах одной партии, что делает необходимым разработку более оперативных методов контроля за содержанием Fe_2O_3 .

Из анализа литературы [29, 78, 103] определено, что основные примеси, влияющие на процесс производства металлургического кремния, включают алюминий (Al) и кальций (Ca), а также титан (Ti) из-за его высокого содержания и значительной степени перехода в кремний. Оксид кальция в сочетании с алюминием и кремнием образует сложные, тугоплавкие оксиды, формирующие шлаковую фазу, которая снижает качество получаемого кремния [50].

Примеси железа оказывают значительное влияние на процесс восстановления кремнезема и делая тем самым кварциты с высоким содержанием железа менее подходящими для эффективного производства, поскольку железо:

- не удаляется из процесса в виде газов с коэффициентом перехода в кремний близким к 100%;

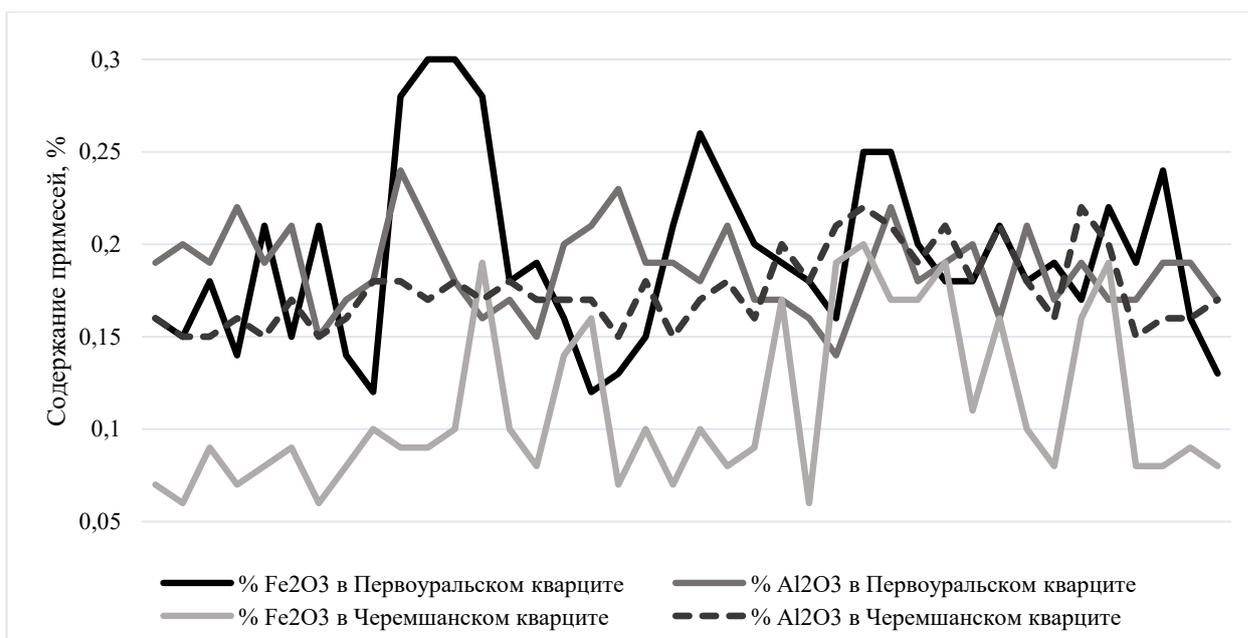


Рисунок 2.4 – Результаты контроля кварцита поставляемого на ООО «Русал Кремний Урал»

- значительно снижает температуру начала процесса восстановления кремнезема;
- при высоком содержании железа в сырье опережающее развитие получают процессы плавления, что может привести к недовосстановлению кремнезема [17, 18].

Проблемы с периодическими изменениями состава шихты могут быть решены путем использования систем технического зрения. Такие системы фиксируют отдельные элементы материального потока, обрабатывают полученные изображения и анализируют их, чтобы формировать базу данных качества и предоставлять рекомендации для оптимизации процесса.

Техническое зрение использует цифровые фото- или видеоизображения для распознавания целевых объектов. Применяются алгоритмы цветовой фильтрации для выявления примесей по цветовым различиям, что позволяет контролировать наличие и распределение примесей в кварците. Однако метод имеет ограничения, связанные с разграничением близких цветов и необходимостью адаптации алгоритмов к изменениям типов анализируемых минералов [93].

2.1.2 Исследование возможности оценки качества кварцевого сырья с помощью системы технического зрения

На основе визиометрического анализа системой технического зрения определяется массовое содержание и размеры включений оксида железа в кварцевом сырье, что существенно влияет на его качество. Эффективность этого процесса зависит от точной настройки алгоритмов цветовой фильтрации, которые фокусируются на выделении специфических цветовых признаков, способных идентифицировать примеси железа [16, 28, 80].

Основным этапом разработки такого алгоритма является выбор цветовых характеристик для сегментации изображений. В данном случае, алгоритм ограничивается использованием заранее определенных наборов цветов, которые считаются наиболее представительными для инородных включений, типичных для каждого исследуемого месторождения (рисунок 2.5). В частности, для кварцитов из двух разных месторождений применяются две разные палитры цветов, каждая из которых настроена на определение содержания включений Fe_2O_3 . Улучшение алгоритмов цветовой фильтрации может включать в себя разработку системы машинного зрения, способной адаптироваться к изменениям в характеристиках сырья, что обеспечит более гибкий и надежный контроль качества в динамичных условиях производства.

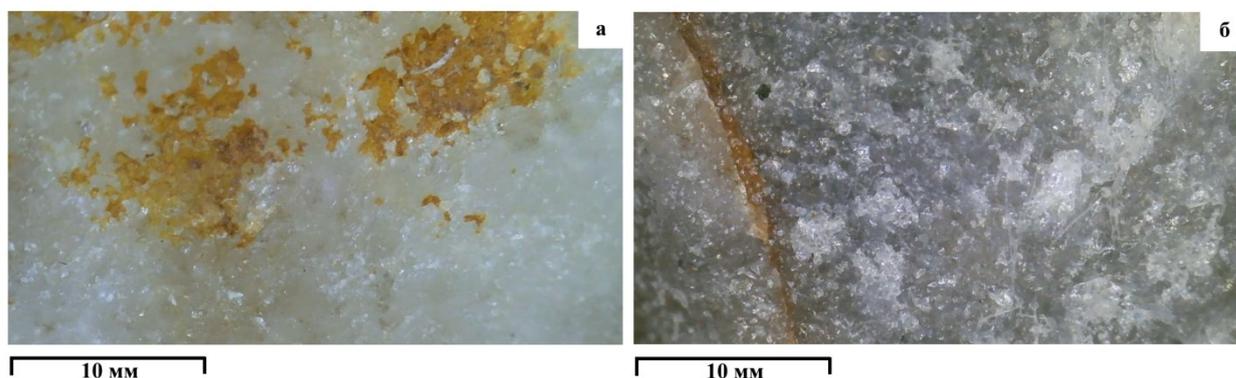


Рисунок 2.5 – Макрофотографии образцов кварцита 2-х месторождений: а) Первоуральского б) Черемшанского

Для повышения точности цветового анализа при обработке изображений целесообразно использовать гибридный алгоритм, объединяющий цветовые модели RGB и HSV. Первоначально массивы RGB преобразуются в формат HSV, который более интуитивен и соответствует человеческому восприятию цвета. Этот переход позволяет более точно управлять параметрами оттенка, насыщенности и значения [51].

Коррекция цвета в модели HSV включает в себя настройку каждого параметра – оттенка (h), насыщенности (s) и значения (v) – путем сравнения цветовых координат каждого пикселя с заранее определенными значениями из эталонной цветовой карты, связанной с областью анализа. Этот метод обеспечивает точное представление цветовых атрибутов и их соответствие реальному внешнему виду анализируемых объектов [44].

При получении цветных изображений сторон кварцитов определяют их суммарную площадь и общую площадь изображений всех инородных включений. Для перевода в объемную долю используется формула 2.1, основанная на представлении площади рассматриваемой грани в виде шара.

$$\omega = \frac{\sum_{n=1}^M \frac{4P_s \sqrt{P_s}}{3\sqrt{\pi} \cdot 753,3}}{M} \quad (2.1)$$

Где ω - объемная доля примесей в кварците;

P_s – % относительная площадь вкраплений на срезе;

M – число обработанных снимков.

Предлагаемый алгоритм анализа изображений (рисунок 2.6) состоит из двух основных этапов:

1. Идентификация объекта и предварительная обработка изображений: Первый этап включает в себя определение местоположения целевого объекта в кадре, а также предварительную обработку изображения для улучшения его качества. Это может включать регулировку яркости, контрастности или применение фильтров для уточнения деталей изображения.

2. Анализ цветового распределения: После выбора наиболее рациональной цветовой модели, основанной на месторождении кварцита, алгоритм регистрирует определенные цветовые зоны на изображении. Затем рассчитывается их процентное покрытие от общей площади изображения. Если эти зоны превышают заданный предел, алгоритм вычисляет центр объекта и инициирует определенное действие, например отбросить изображение или пометить его для дальнейшего изучения.

Выбор цветовой модели осуществляется в соответствии с особенностями местонахождения источника кварцита. Изображение обрабатывается с помощью CNN – типа глубокой нейронной сети, оптимизированной для структурированных данных сетки и высокоэффективной в задачах классификации изображений и распознавания объектов. CNN обрабатывает изображение и выдает данные, указывающие на вероятный источник кварцита и уровень доверия к этому определению [40].

Необходимо отметить, что CNN обучается с помощью TensorFlow, популярной библиотеки машинного обучения, на наборе данных помеченных фотографий конкретных месторождений кварцита. Для обучения используется конволюционная модель классификации и локализации, например resnet 50 с разрешением 640x640 пикселей из модельного зоопарка Google. Это позволяет с высокой точностью различать изображения при относительно небольшом наборе данных. Тестирование нейронной сети показало, что общая точность обученной модели составила 96,25 %.

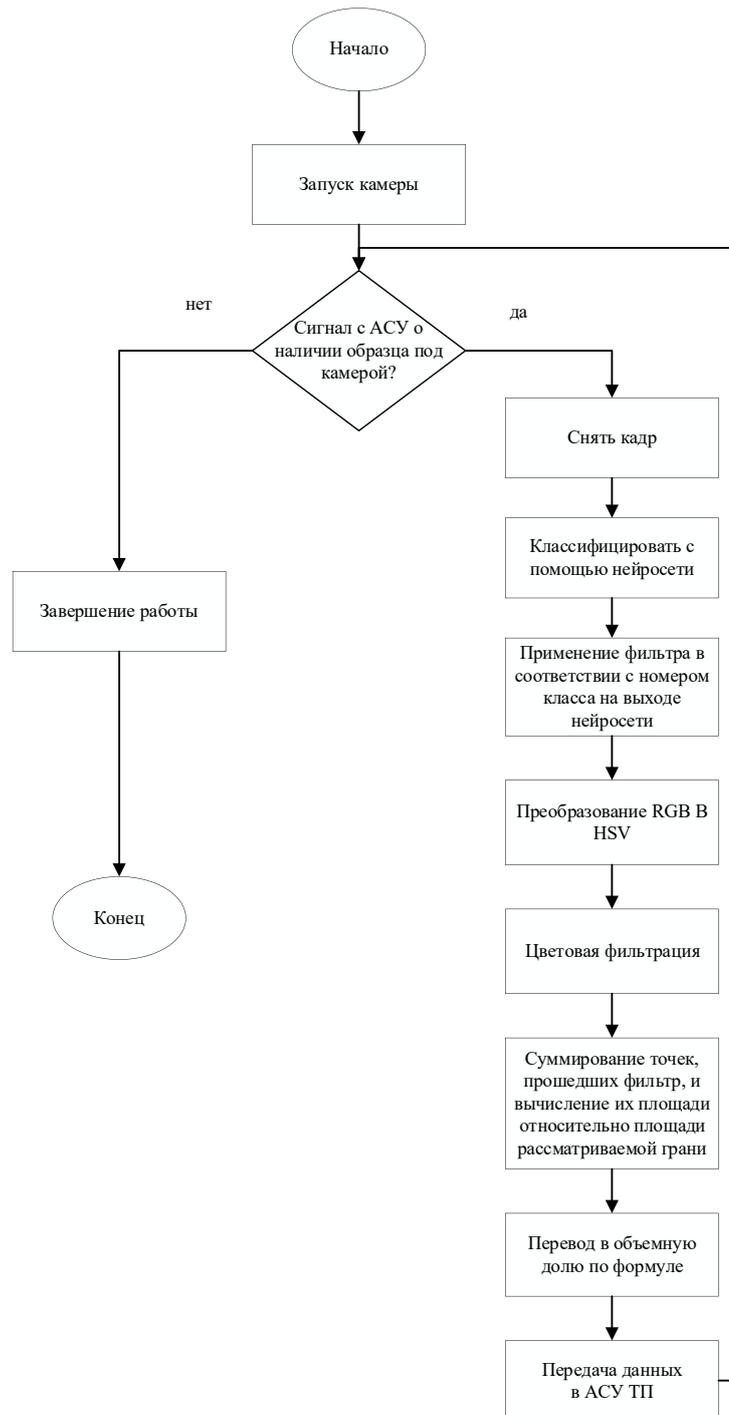


Рисунок 2.6 – Алгоритм визиометрического анализа образцов кварцита

2.1.3 Анализ результатов

Требования к содержанию оксидов железа в кварцевом сырье для ООО «Русал Кремний Урал» составляет $<0,35\%$. Для исследования были отобраны образцы кварцитов двух месторождений, используемых на предприятии в качестве сырья – Черемшанского и Первоуральского с наиболее выраженными визуальными примесными включениями железа.

Процесс программной обработки цветных изображений срезов кварцитов, полученных с помощью фото-микроскопа представлен на рисунках 2.7-2.8.

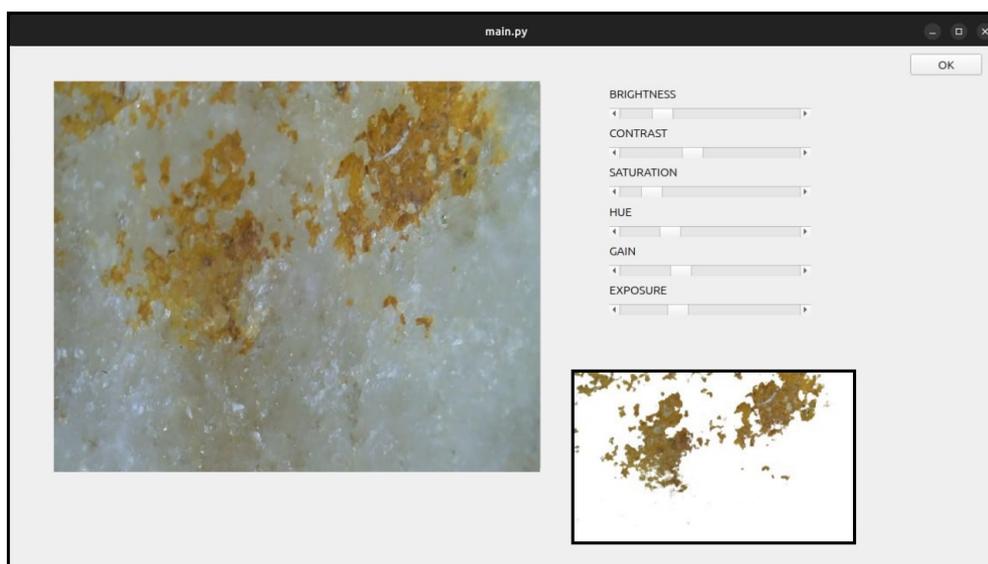


Рисунок 2.7 – Обработка изображений: калибровка камеры микроскопа

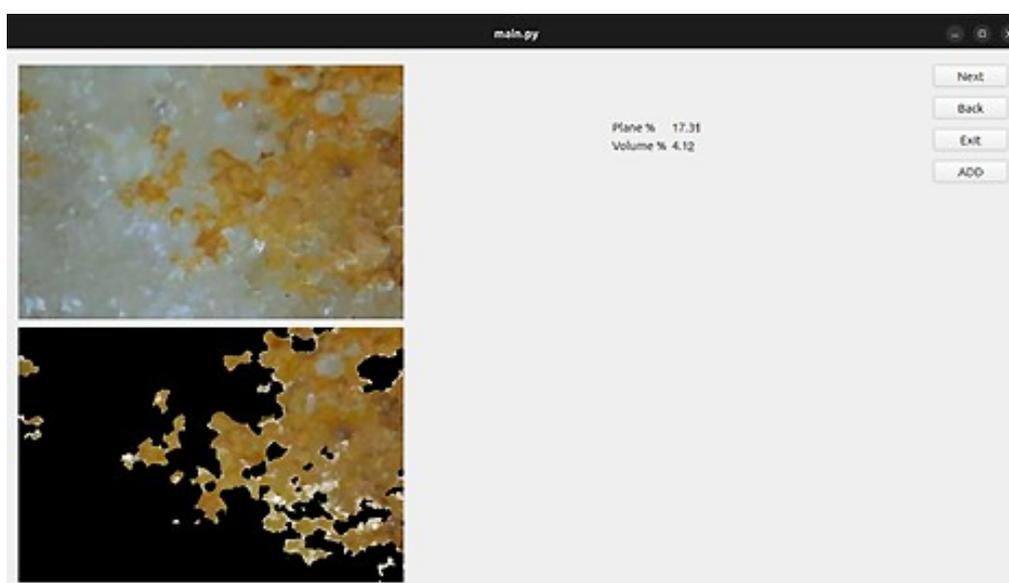


Рисунок 2.8 – Результат программной обработки изображений

По результатам верификации качества работы системы посредством рентгеноспектрального анализа исследуемых образцов наблюдается относительно хорошая корреляция между геохимией образцов и визуальными характеристиками (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Результаты анализа образцов кварцитов на содержание примесей железа

Месторождение	№ образца	Доля Fe ₂ O ₃ по результатам работы системы, %	Доля Fe ₂ O ₃ по результатам лабораторных анализов, %	Абсолютная погрешность измерений, %
Первоуральское	1	1,71	1,53	0,23
	2	4,12	3,81	0,18
	3	3,84	3,48	0,31
	4	2,32	2,51	0,36

Продолжение таблицы 2.3

Первоуральское	5	0,93	0,82	0,19
	6	0,84	1,01	0,11
	7	3,38	3,02	0,17
	8	1,85	1,67	0,36
Среднее значение абсолютной погрешности измерений, %				0,23
Черемшанское	9	0,61	0,73	0,12
	10	0,94	0,85	0,09
	11	0,72	0,84	0,12
	12	0,63	0,76	0,13
	13	0,51	0,63	0,12
	14	0,96	0,86	0,1
	15	1,17	1,08	0,09
	16	0,75	0,87	0,12
Среднее значение абсолютной погрешности измерений, %				0,11

Применение предлагаемого способа оперативного контроля одной из самых значимых для карботермического восстановления кремния примеси – железа – позволяет своевременно реагировать на колебания качества кварцевого сырья, например пересчетом шихтовой формулы и вводом дополнительной дозы кварцита с пониженным содержанием железа.

Абсолютная погрешность при анализе 8 образцов составила в среднем 0,23% для кварцита первоуральского месторождения и 0,11% для черемшанского, что закономерно относительно разницы в чистоте образцов анализируемых месторождений. Полученные значения погрешности измерений являются приемлемыми для оценки качества кварцевого сырья, поскольку не превышают целевое пороговое значение содержания примесей железа в кварцевом сырье, соответствующее 0,35%.

Промышленная реализация предлагаемой методики позволяет провести оперативный анализ около 1% от всего потока кварцита, транспортируемого в загрузочные бункера, что значительно больше объема, анализируемого традиционным рентгеноспектральным методом. Однако, преимущество предлагаемого решения заключается не столько в повышении объема анализируемого материала, сколько в непрерывности проведения анализа. Система технического зрения позволяет оперативно контролировать материал на протяжении всего пути движения по предприятию, отслеживая при этом момент изменения забора сырья от одной партии к другой. Статистический анализ по выборке последовательности кадров камеры позволяет с большой достоверностью установить содержание железа в материальном потоке кварцита в определенный период времени, что дает оператору возможность своевременно принять одно из возможных решений:

- исключить кварцит ненадлежащего качества из технологической цепочки;

- довести среднее содержание железа в кварцевом сырье за счет добавления более чистых марок кварцита (Черемшанского месторождения);
- в дальнейшем провести анализ причин нарушения хода плавки и качества конечного продукта при попадании кварцита несоответствующего качества в РТП.

Для повышения точности работы системы технического зрения, необходим статистический анализ полученных результатов, и сопоставление их с результатами входного контроля кварцевого сырья методом рентгеноспектрального анализа, а также автоматический учет материального баланса кварцевого сырья.

По предварительным оценкам, внедрение системы технического зрения позволит увеличить прогнозируемость качества кварцевого сырья на входе в РТП до 88 % в динамическом и до 95 % в статическом режиме (когда сырье из разных партий не смешивается).

2.2 Учет материального баланса

Материальный баланс – это основополагающий показатель любого технологического процесса, позволяющий осуществлять сквозной контроль процесса при ограниченной наблюдаемости объекта контроля. Определение оптимального процентного и количественного составов шихтовых компонентов является серьезной проблемой при ведении плавки. Расчет материального баланса производят практически вручную, основываясь на производственных данных, что делает подбор параметров загрузки шихты весьма трудоемкой операций [14].

В данном случае основное внимание уделяется качеству кварцевого сырья в процессе. В основе алгоритма учета баланса находятся полученные зависимости объема и характера выбросов микрокремнезема от ряда факторов, таких как химический и гранулометрический состав, структурные особенности кварцевого сырья, температура плавки и т.д.

В работе [7] представлены результаты исследования влияния температуры и крупности кварцитов 4-х месторождений на степень восстановления кремния термогравиметрическим методом.

Для расчета степени восстановления кремния была использована формула 2.2.

$$\alpha = \frac{m_o}{\sum(m_o)} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

где m_o – количество кислорода, удаленного из образца;

$\sum(m_o)$ – общее количество кислорода в восстанавливаемом образце кварцита.

Используя графики, представленные на рисунке 2.9, были получены зависимости выбросов основной составляющей пылевых выбросов диоксида кремния от температуры для различных фракций четырех месторождений кварцитов (таблица 2.4), которые в совокупности с

базовым алгоритмом расчета материального баланса выплавки кремния, составляют основу расчетной части системы.

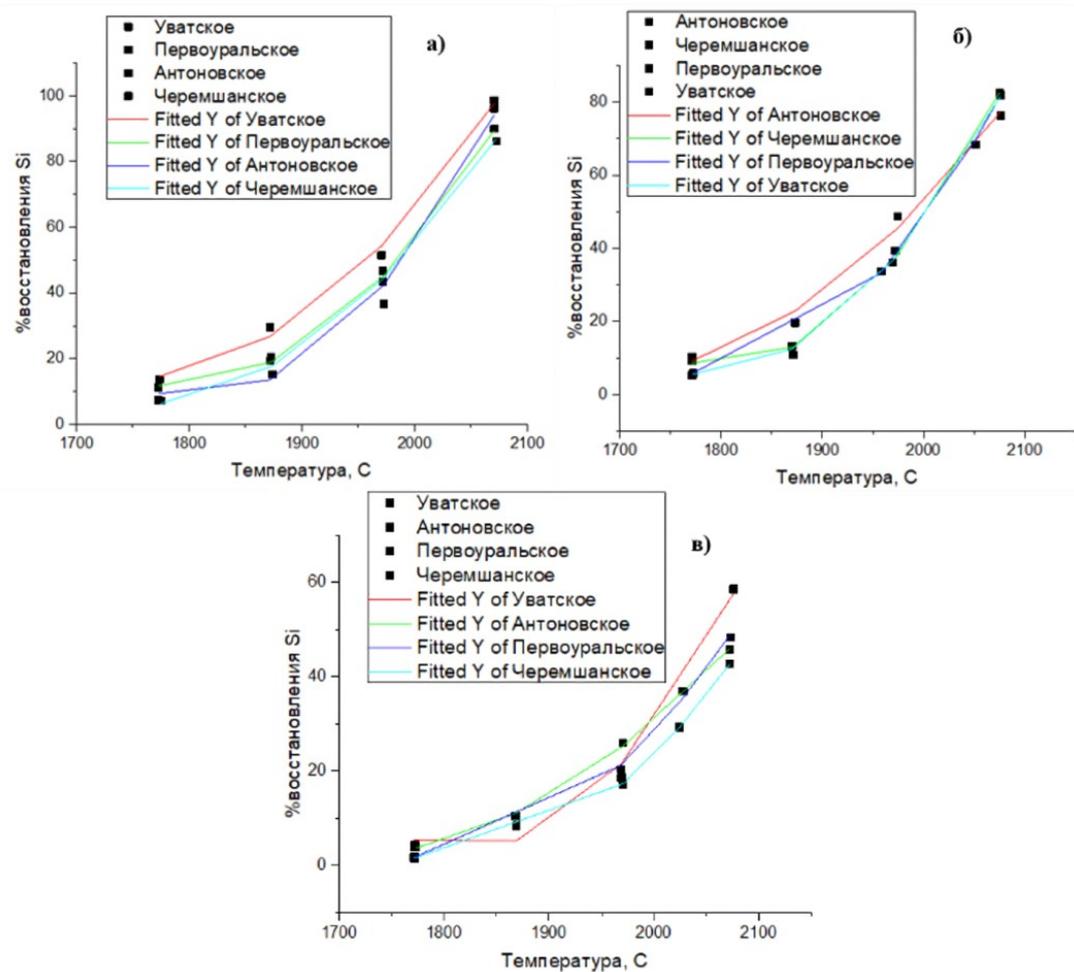


Рисунок 2.9 – Зависимость степени восстановления кремния из кварцитов различных месторождений от температуры и фракции (а) – 10-20 мм, б) – 20-30 мм, в) 30-40 мм. [7]

Таблица 2.4 – Зависимость массы выбросов микрокремнезема от месторождения, фракции и температуры плавки

Месторождение	Фракция	Формула
Первоуральское	10-20 мм	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (3975,36 - 4,4t + 0,00122t^2))}{100}$
	20-30 мм	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (3046,98 - 3,4t + 0,00095t^2))}{100}$
	30-40 мм	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (2393,13 - 2,73t + 0,0008t^2))}{100}$
Антоновское	10-20 мм	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (2389,855 - 2,72t + 0,00078t^2))}{100}$
	20-30 мм	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (2783,32 - 3,12t + 0,00087t^2))}{100}$

Продолжение таблицы 2.4

Антоновское	30-40 мм	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (1223,32 - 1,47t + 0,00041t^2))}{100}$
Черемшанское	10-20 мм	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (3169,72 - 3,52t + 0,00098t^2))}{100}$
	20-30 мм	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (2758,15 - 4,4t + 0,00087t^2))}{100}$
	30-40 мм	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (1743,75 - 1,96t + 0,00055t^2))}{100}$
Уватское	10-20 мм	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (1840,6 - 2,04t + 0,00057t^2))}{100}$
	20-30 мм	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (894,7 - 1,05t + 0,00031t^2))}{100}$
	30-40 мм	$m_{\text{микрокремнезема}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (2797,44 - 3,07t + 0,00084t^2))}{100}$

Чтобы решить проблему своевременного учета и корректировки параметров, характеризующих качество кварцевого сырья, была разработана математическая модель объекта управления (процесса выплавки кремния в РТП) с помощью ПО Python.

С учетом происходящих во время плавки фазовых превращений и реакций, включая обратные, баланс по кремнезему можно разделить на 4 этапа.

1. *Формирование и подготовка шихты.* Объединение масс кварцита с учетом химического состава. При этом, осуществляется контроль и измерение следующих параметров: масса шихтовых компонентов, химический и гранулометрический составы.

2. *Нагрев и плавление шихты в руднотермической печи.* Осуществляется контроль электрического режима РТП и твердых продуктов плавки с учетом обратимых реакций, и соблюдаются условия «черного ящика». Температура расплава контролируется с помощью электрических параметров печи.

3. *Переход пыли в газоходный тракт системы газоочистки.* Контроль движения пылегазовой смеси.

4. *Сбор отходов на системе ГОУ после электрофильтров.* Выходной параметр баланса. Измерение параметров: масса микрокремнезема с фильтров газоочистки, химический состав [35-36].

При помощи GUI (graphic user interface) таблицы оператор вводит процентное содержание кварцитов различных марок. Исходные данные о химическом и гранулометрическом составе кварцитов, распределение оксидов элементов, распределение восстановленных элементов

предполагается получать в режиме реального времени от системы технического зрения и по данным лабораторных исследований входных партий сырья.

Данный алгоритм объединяет традиционный расчет материального баланса, а также учитывает влияние температуры в печи и гранулометрический состав кварцитов, обеспечивая выполнение следующих функций: обработка данных для вывода состава и количества образующегося микрокремнезема в зависимости от ключевых параметров (температуры в печи, гранулометрического и химического составов кварцевого сырья) и кремния в виде таблиц и графических зависимостей [2].

Выводы к главе 2

Описана автоматическая система анализа качества кварцевого сырья для производства металлургического кремния на основе оценки визуальных характеристик кварцита. Разработанный алгоритм базируется на цветовой фильтрации изображений срезов минералов.

Алгоритм визиометрического анализа для минерального состава кварцита использует многоуровневую цифровую обработку изображений. Основываясь на RGB формате, который раскладывает цвета на красный, зелёный и синий, алгоритм позволяет точно идентифицировать примеси в руде. Дополнительно, использование параметров формата HSV, таких как спектральные характеристики, насыщенность и яркость, усиливают анализ.

Результатом работы являются данные о массовом количестве вкраплений примесей железа, при этом средняя достоверность оценки коррелирует с данными рентгенспектрального анализа на 88 %. Положительными эффектами внедрения предлагаемой системы технического зрения являются оперативность оценки качества кварцевого сырья, что позволяет принимать меры по корректировке пропорционального состава шихты руднотермической печи.

Однако, несмотря на значительные преимущества автоматической системы анализа качества сырья, некоторые параметры процесса производства металлургического кремния могут быть недоступны для контроля с использованием технического зрения. Для учета этих параметров и прогнозирования их влияния на процесс выплавки кремния в руднотермической печи была разработана программа автоматизированного контроля материального баланса. Алгоритм учета баланса опирается на исследования влияния температуры и крупности кварцитов различных месторождений на степень восстановления кремния. Как итог, разработанный алгоритм учета материального баланса объединяет традиционные методы расчета с учетом влияния температуры и гранулометрического состава кварцитов, обеспечивая более точный контроль процесса производства металлургического кремния, позволяя прогнозировать выбросы микрокремнезема в зависимости от различных факторов.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ, ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СКОРОСТНЫХ ПРОФИЛЕЙ ВАННЫ РТП ВОДООХЛАЖДАЕМОГО СВОДА И ГАЗОХОДОВ

3.1 Исследование корреляции содержания микрокремнезема в отходящих из РТП газах и параметров пылегазовой смеси

Характерной особенностью производства кремния в РТП является наличие промежуточного технологического газа, состоящего из SiO и CO. Большая часть этого газа поднимается в шихту, реагирует с углеродными материалами и в конечном итоге сгорает на колошнике.

На рисунке 3.1 представлены входные и выходные потоки газоотводящего тракта производства кремния в печи.

Наиболее значимые физико-химические превращения происходят в соответствии со следующим алгоритмом:

1. SiO и CO из печи (или SiO при окислении металла) реагируют с кислородом воздуха, окисляясь до SiO₂ и CO₂.
2. SiO₂ конденсируется в жидкие капли, которые при столкновении собираются в более крупные капли. Конденсация в капли является высокоэкзотермической реакцией.
3. При снижении температуры процесса столкновение между каплями больше не приводит к образованию новых частиц, и рост приостанавливается. Теперь отходящий газ представляет собой частицы пыли и газовую смесь, состоящую из NO, CO₂ и избытка N₂/O₂ [56].

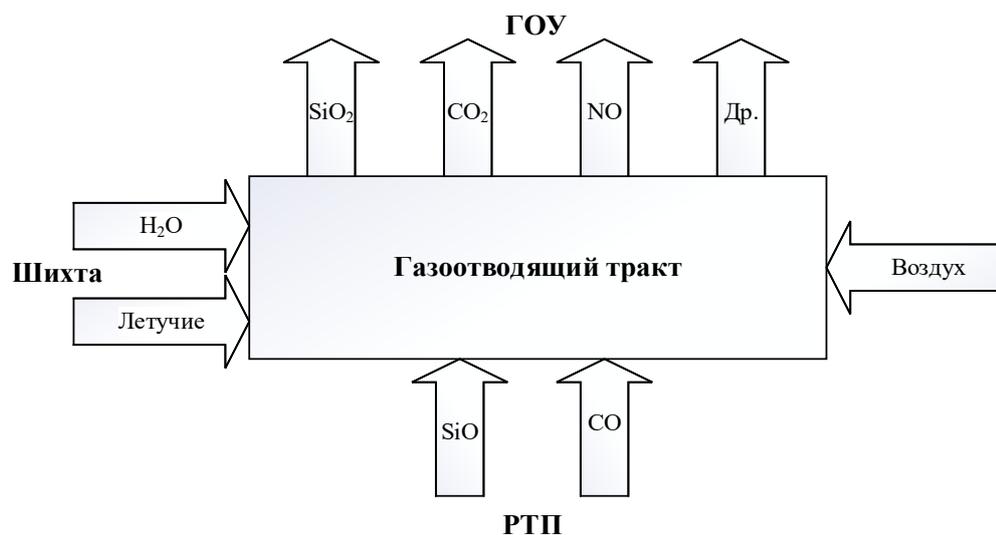


Рисунок 3.1 – Схема входных и выходных потоков газоотводящего тракта РТП для производства кремния [56]

В работе [61] представлены результаты исследований отходящих газов одного из крупнейших предприятий по производству кремния – Elkem. Целью измерений было изучение

того, как изменяется образование NO с течением времени. Температура отходящих газов, химический анализ и скорость газа в газоотводящем тракте измерялись в месте ламинарного режима потока, расположенного между печью и рукавным фильтром с помощью инфракрасного анализатора дымовых газов Testo 350 XL [45].

На предприятии объемы пылевых выбросов контролируются двумя способами:

- концентрация пыли в газоотводящем тракте определяется за счет измерения процента потери света, пропускаемого через газоход.
- масса микрокремнезема регистрируется с помощью автоматической системы взвешивания. После сбора в рукавном фильтре пыль механически транспортируется к пневматическому дозатору, собирающему 150 кг микрокремнезема перед отправкой его в бункер-накопитель. Погрешность взвешивания на заводе неизвестна, но точность весовых ячеек составляет 1,5 кг, что равно 0,5% от общего веса на отправку.

Поскольку концентрация SiO₂ в канале измеряется мгновенно, это позволяет проводить измерения в отношении корреляций и вариаций отходящего газа. Результаты для NO и SiO₂ представлены на рисунке 3.2.

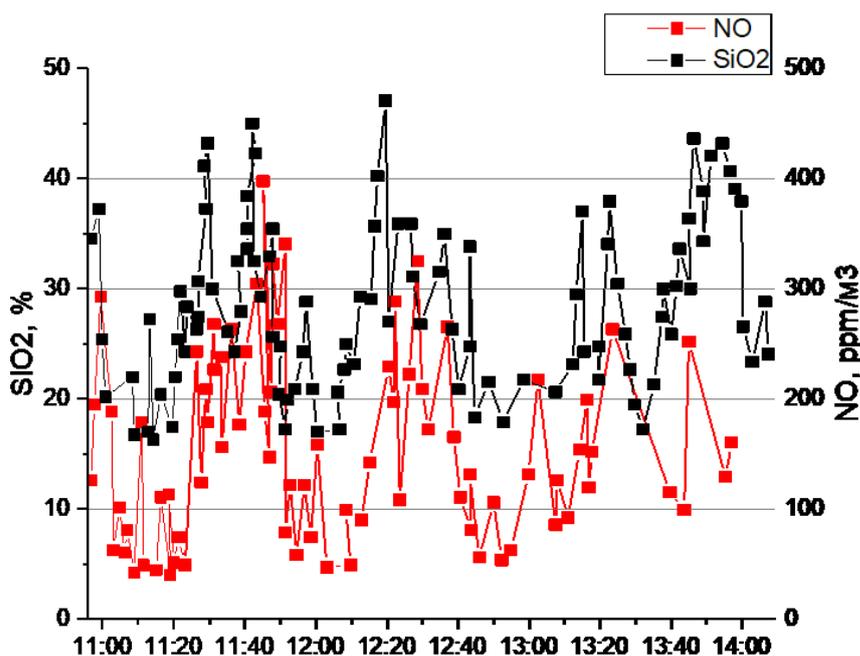


Рисунок 3.2 – Результаты измерений концентрации пылевых выбросов и NO на предприятии Elkem [45]

Большой разброс в количестве образующегося микрокремнезема из печи обусловлен вариациями технологического процесса, а также недостаточной точностью оптического анализатора. Основными технологическими причинами являются:

- добавление новых материалов;

- нарушение схода шихты и образование пустот в материалах;
- повышение давления в печи;
- нарушение отсоса дымовых газов.

Анализ результатов измерений, представленных на рисунке 3.2 выявил корреляцию между NO и SiO₂, предлагаемую авторами к применению в качестве основы методики контроля NO. Возможным объяснением наблюдаемой корреляции является предположение о том, что энергия, выделяющаяся при сгорании, нагревает воздух, окружающий частицы, в результате чего образуется NO по механизму Зельдовича. Для дальнейшего рассмотрения можно представить себе трехступенчатую цепочку реакций, в результате которых образуются SiO₂ и NO. Однако, при контроле массы микрокремнезема по факту переполнения блоков рукавных фильтров зависимость между образованием микрокремнеземной пыли и оксида азота не пригодна для определения концентрации пылевых выбросов с достаточной степенью достоверности [86].

Для поиска более надежной зависимости был проведен анализ физико-химического процесса окисления SiO до микрокремнезема, сопровождаемого выделением тепловой энергии.

Существует несколько источников энергии в отводящем газе, основными из которых являются энергия сгорания SiO и CO, а также лучистый и конвективный нагрев от горячих поверхностей, таких как корпус печи, ковш и расплавленный металл. Из всех этих источников сгорание SiO и CO обычно варьируется в наибольшей степени. Нагрев газов от ванны печи достаточно постоянен при оценке за короткие промежутки времени, в зависимости от загрузки печи и толщины футеровки печи.

Особенностью горения SiO является то, что кинетика горения оказывается намного быстрее, чем у других компонентов, в частности CO и углеводородов. Кроме того, конечным продуктом является твердый продукт – микрокремнеземная пыль.

Важным аспектом является распределение газообразного SiO на поверхности шихты. При нормальном ходе печи SiO распределяется на поверхности шихты довольно равномерно и повторяет распределение потоков других печных газов. Однако при нарушении хода печи большое количество газа SiO поступает непосредственно из кратера в атмосферу над шихтой по одному или нескольким каналам, что приводит к повышению температуры газов и образованию большого количества SiO₂ [82].

На рисунке 3.3 показаны результаты сравнения значений концентрации твердых частиц в отходящем газе в процессе выливки расплавленного металла и температуры отходящих газов. При этом для доокисления SiO применяется кислородное копые. Кислородное копые представляет собой стальную трубку с керамическим покрытием и наконечником, содержащим несколько сопел для подачи на поверхность расплава струй кислорода со сверхзвуковой скоростью.

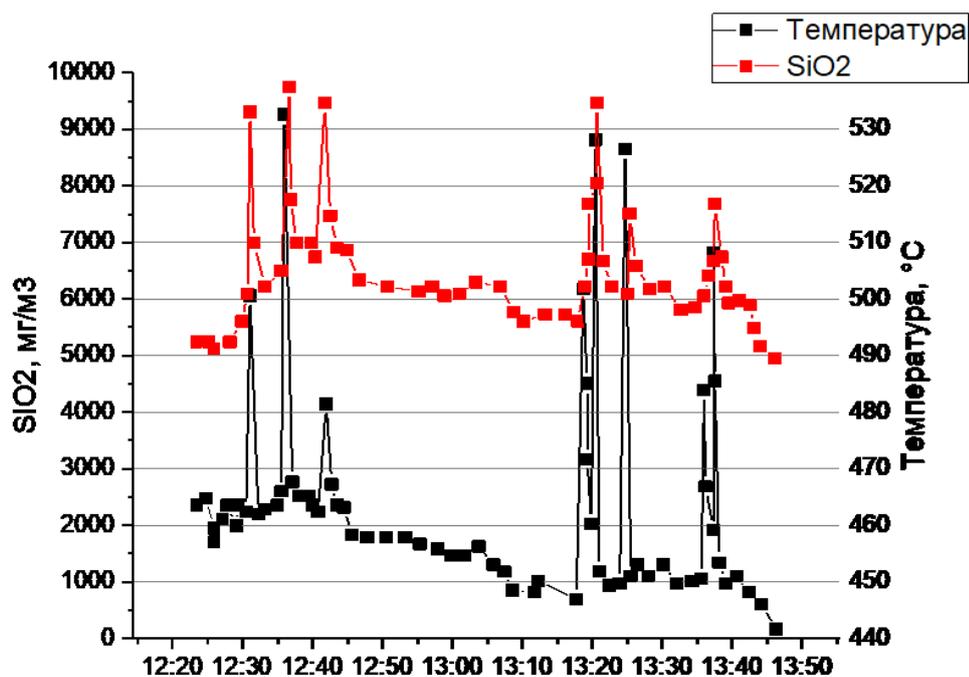


Рисунок 3.3 – Результаты измерений концентрации пылевых выбросов и температуры на предприятии Elkem [34]

Концентрация SiO_2 была измерена прибором LaserDust. Прибор измеряет, насколько сильно лазерное излучение блокируется частицами, что позволяет определить концентрацию частиц, используя их размер и плотность. Результаты эксперимента показали, что концентрация пыли в отдельные периоды времени была превышала измерительные способности прибора. Для восстановления пробелов в измерениях, проводился расчет на основе данных с фильтров. За исключением периодов, когда LaserDust был насыщен, измерения были хорошо согласованы.

Проведенный эксперимент показал хорошую корреляцию между температурой и образованием микрокремнезема. Пиковые скачки температуры и концентрации согласуются с периодами применения кислородного копя [34].

Теоретическое обоснование в виде преобладания в отходящих газах энергии, вносимой реакцией сгорания SiO , а также результаты проведенного на заводе Elkem эксперимента, указывают на целесообразность проведения дополнительных исследований для определения корреляции температуры отходящих газов в газоходе и концентрации микрокремнезема в них.

3.2 Компьютерное моделирование РТП и газоотводящего тракта

Во время пирометаллургических процессов восстановления возникают определенные трудности в связи с контролем и измерением параметров высокотемпературных и химически агрессивных сред. Применение цифровых моделей реальных технологических процессов позволяет решить ряд важнейших производственных задач, в том числе и для производства кремния.

1. Цифровая модель может быть использована для анализа данных для диагностики, прогнозирования и анализа принятых решений.

Анализ отклонений и недостатков посредством имитационного моделирования конкретного агрегата дает представление о причинах предполагаемых остановок производства. На основе анализа накопленного массива данных (BigData) модель может имитировать любые изменения, возникающие в технологическом процессе, вследствие произошедших в системе событий и сбоев, и ответить на вопросы о причине изменений.

2. Цифровые модели физических агрегатов также разрабатываются для обучения обслуживающего персонала, устойчивой работы оборудования, в том числе для корректирующих действий операторов АСУ ТП.

Постоянный рост вычислительных мощностей и измерительных технологий в последние годы открыл принципиально новые возможности для компьютерного моделирования крупных производственных объектов.

Применительно к РТП для производства кремния, целесообразна разработка модели вычислительной гидродинамики (CFD) для исследования параметров отходящих газов, распределения температурных и скоростных полей в ванне печи и газоотводящем тракте [79].

Целями создания модели являются:

- поиск стабильных зон в пылегазовом потоке газоотводящего тракта РТП для определения возможных мест установки газоаналитического оборудования;
- подтверждение гипотезы зависимости температуры отходящих газов от степени окисления SiO до твердых частиц микрокремнезема.

Моделируя горение, можно получить необходимую информацию о распределении температурных полей. Для получения достоверных результатов необходимо тщательно смоделировать газодинамику, химические реакции и их взаимодействие. Для моделирования использовался коммерческий CFD-код ANSYS Fluent 2020 R1 с его стандартными моделями.

Для адекватной реализации модели в ANSYS Fluent было решено разделить область печи и газоотводящего тракта на 3 части:

- ванна печи с расплавом и шихтой;
- водоохлаждаемый свод печи с водоохлаждаемой частью газоходов;
- газоотводящий тракт без футеровки и водоохлаждения.

3.3 Модель гидродинамики отходящих газов

В большинстве случаев при учете фундаментальных законов гидрогазодинамики в газоходе печи поток дымовых газов имеет высокое значение Рейнольдса и является турбулентным из-за низкой плотности пылегазовой смеси.

Турбулентность отходящих газов оказывает существенное возмущающее воздействие на ключевые параметры потока, такие как концентрация компонентов пылегазовой смеси в точке измерения, температурный и скоростной профили газоотводящего тракта печи. В результате каждый турбулентный вихревой объем имеет свою уникальную концентрацию вещества и температуру. Для получения точных данных о параметрах потока необходимо определить зоны переходного режима с наименьшим количеством турбулентных пульсаций.

Переходный режим характеризуется низкой скоростью перемешивания частиц и пульсациями по сравнению с турбулентным потоком. Основным параметром, позволяющим идентифицировать изменение режима течения в потоке, является число Рейнольдса (Re). Для рассматриваемого случая примем, что Re для ламинарного потока в гладких прямых трубах с интенсивным возмущением на входе составляет 2300. При значениях Re выше этого и до определенного предела наблюдается переходный (смешанный) режим, после которого вероятно турбулентное течение. В цилиндрических трубах переходной интервал может значительно варьироваться, если начальное возмущение среды уменьшить до 50 000 [68, 70, 92].

К факторам, оказывающим влияние на турбулентность дисперсной среды, относятся: кинетика и термодинамика пылегазового потока; скорость движения твердых частиц с учетом многофазного потока (межфазный обмен); внешние границы газового потока в различных зонах; конечная стадия процесса и давление на поверхность электрофилтра.

Критерии Рейнольдса для различных режимов течения:

- $Re < 2 \times 10^3$ – полностью ламинарный поток;
- $Re > 10^4$ – развитие турбулентности, однако в начале трубы по-прежнему сохраняется участок с ламинарным пограничным слоем;
- $Re > 5 \times 10^4$ – турбулентный пограничный слой начинает формироваться практически от начала трубы;
- $2 \times 10^3 < Re < 10^4$ – переходный режим течения и теплообмена [38].

Критерии Рейнольдса для различных режимов течения показывают, что при определенных значениях Re поток может быть как ламинарным, так и турбулентным. Для турбулентного потока характерно увеличение отношения средней скорости к максимальной с увеличением турбулентности. Задача определения параметров течения многокомпонентного газа может оказаться сложной из-за изменения предельных значений при переходных потоках. Эта проблема особенно ярко выражена в случае предельных значений расхода, поскольку существующие стандартные модели могут оценить только среднюю скорость потока в газоходе при усреднении значений критерия Рейнольдса в ANSYS Fluent [54].

Газоотводящий тракт карботермического восстановления кремния в РТП был смоделирован для выявления зон стабильного течения, в которые можно было бы установить контрольную точку для определения концентрации выхлопных газов.

Классификация существующих методов и подходов для численного моделирования турбулентных потоков основана на уровне детализации, необходимом для уточнения и обнаружения турбулентных пульсаций, а также их энергетического спектра и типа течения. В зависимости от этого методы можно разделить на три группы:

- Direct Numerical Simulation (DNS) – прямое численное моделирование;
- Large Eddy Simulation (LES) – моделирование крупных вихрей;
- Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) – модель с осреднением по Рейнольдсу [102].

Наилучшим решением для учета крупномасштабных турбулентных вихрей и течения в пограничном слое является гибридный подход, в рамках которого модель RANS активируется в пристеночной области, а модель LES вдали от нее. Таким является метод моделирования отсоединённых вихрей Detached Eddy Simulation (DES), который учитывает уменьшение турбулентных вихрей вблизи твердой поверхности, что требует существенно больших вычислительных ресурсов, чем предыдущие 2 метода. При учете влияния пограничного слоя на турбулентность явное разрешение даже наиболее крупных вихрей в пограничном слое требует значительного измельчения расчётной сетки, что приводит к недопустимому росту длительности вычислений [58, 92].

Решить проблему можно с помощью локальной модели вихревой вязкости, адаптированной для пристеночных течений Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (WALE)[38, 55].

3.3.1 Модель 1: РТП и свод печи с водяным охлаждением

В качестве исходных данных, помимо переменных, указанных в таблицах 3.1-3.3, а также размеров, были доступны следующие параметры: толщина водоохлаждаемого слоя 0,06 м; толщина боковой футеровки 0,05 м; и толщина неохлаждаемой части свода из шамотного кирпича, 0,5 м.

Сетка этой модели состояла из 2 037 611 элементов для достижения достаточной точности моделирования и имела минимальное ортогональное качество не менее 0,1 (рисунок 3.4). Модель турбулентности LES WALE использовалась для решения задачи дозвукового течения переменной плотности с помощью связанного решателя на основе давления. Реальная газовая модель Soave-Redlich-Kwong модель использовалась для газовой смеси.

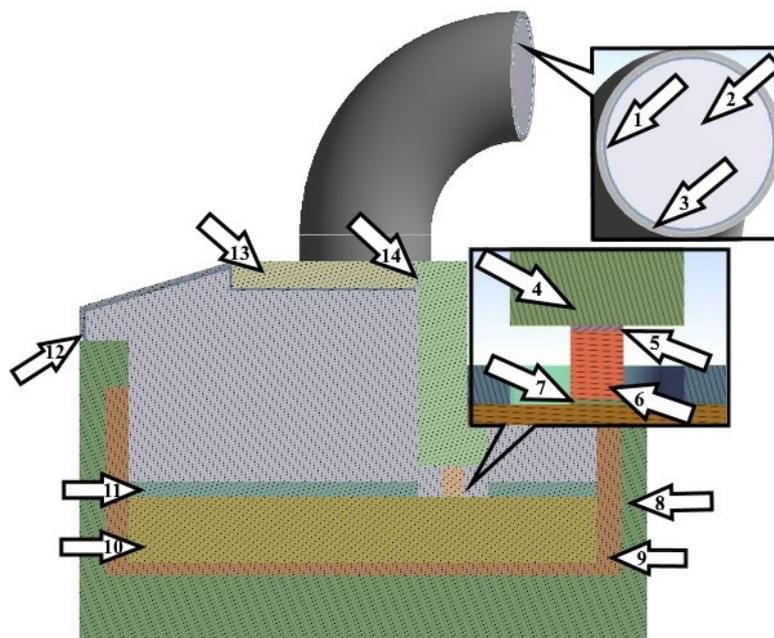


Рисунок 3.4 – Геометрия CFD модели газовых потоков руднотермической печи с разрезом по оси симметрии

1–бетонная футеровка свода печи, 2 – pressure_outlet отходящих газов, 3 – pressure_outlet водяного охлаждения, 4 – электрод, 5 – вход газа в электрическую дугу, 6 – электрическая дуга, 7 – выход газа из дуги, 8, 13 – шамотный кирпич, 9 – углеродные блоки, 10 – расплав кремния, 11 – шихта, 12 – massflow_inlet водяного охлаждения, 14 – massflow_inlet воздуха через зазоры вокруг электродов

Таблица 3.1 – Граничные условия модели

Вещество	Параметр	Вход
Водяное охлаждение	Тип граничных условий	massflow_inlet/ pressure_outlet
	Массовый расход, кг/с	278
	Температура, °C	35
Воздух через зазоры вокруг электродов	Тип граничных условий	massflow_inlet
	Массовый расход, кг/с	1
	Температура, °C	35
Печные газы	Тип граничных условий	Source terms/pressure_outlet
	Масса	0,1 кг/м ³ с
Электрическая дуга	Тип граничных условий	Фиксированные значения
	Аксиальная скорость, м/с	-375
	Температура, °C	4650

Продолжение таблицы 3.1

Вход в электрическую дугу	Тип граничных условий	Фиксированные значения
	Радиальная скорость, м/с	-330
Выход из электрической дуги	Тип граничных условий	Фиксированные значения
	Радиальная скорость, м/с	375
	Температура, °С	4650

Таблица 3.2 – Усредненный состав отходящих газов, %

Компонент газовой смеси	%
CO	88,6
CO ₂	4,81
CH ₄	1,42
N ₂	2,5
H ₂	2,67

Таблица 3.3 – Усредненный состав пыли кремниевого производства

Хим. компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	C	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	TiO ₂	SiC
%	85,41	0,46	0,30	1,50	1,24	6,09	0,08	0,16	0,12	0,31	0,02	5,03

В основе моделирования двухфазной дисперсионной системы газ-твердые частицы лежит метод Лагранжа. Моделируются частицы микрокремнезема, имеющие диаметр 250 мкм и теплопроводность 0,09 Вт/(м·К).

Таким образом, баланс сил, действующих на частицу, прогнозирует траекторию частиц дискретной фазы путем интегрирования баланса сил на частицу, который записывается в системе отсчета по Лагранжу. Этот баланс силы уравнивает величину инерции с силами, действующими на частицу, и может быть представлен (для направления в декартовой системе координат) как [79]:

$$\frac{dU_p}{dt} = F_D(U - U_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (3.1)$$

где $F_D(U - U_p)$ – сила сопротивления на единицу массы частицы;

U – скорость дисперсионной среды, м/с;

U_p – скорость частицы, м/с;

ρ – плотность дисперсионной среды, кг/м³;

ρ_p – плотность частицы, кг/м³;

g_x – ускорение свободного падения, м/с².

На выходе из водоохлаждаемой части газопропускной системы скорость потока газа составляла 5,5 м/с, что эквивалентно массовому расходу 15,54 кг/с. Температура смеси составляла 450 °С.

Поскольку модель имела горизонтальную симметрию, были оценены распределение температуры и скорости по площади поперечного сечения в центре одной из водоохлаждаемых частей газопроводов (рисунки 3.4, 3.5). Эта модель позволяет определить входные параметры и оценить возможные вариации между ними. Таким образом, была создана история прогнозирования для следующей части ГОУ, в которой стальной газ проходит через модель раздвижного затвора. Это обеспечивает стабильные начальные характеристики для решения дальнейших задач моделирования [38].

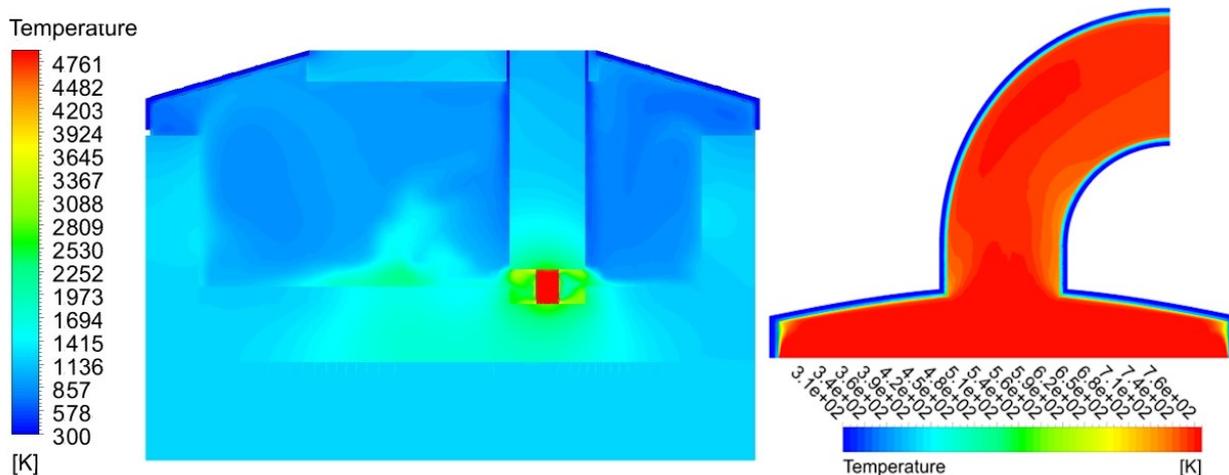


Рисунок 3.4 – Сечение контура распределения температуры модели 1.

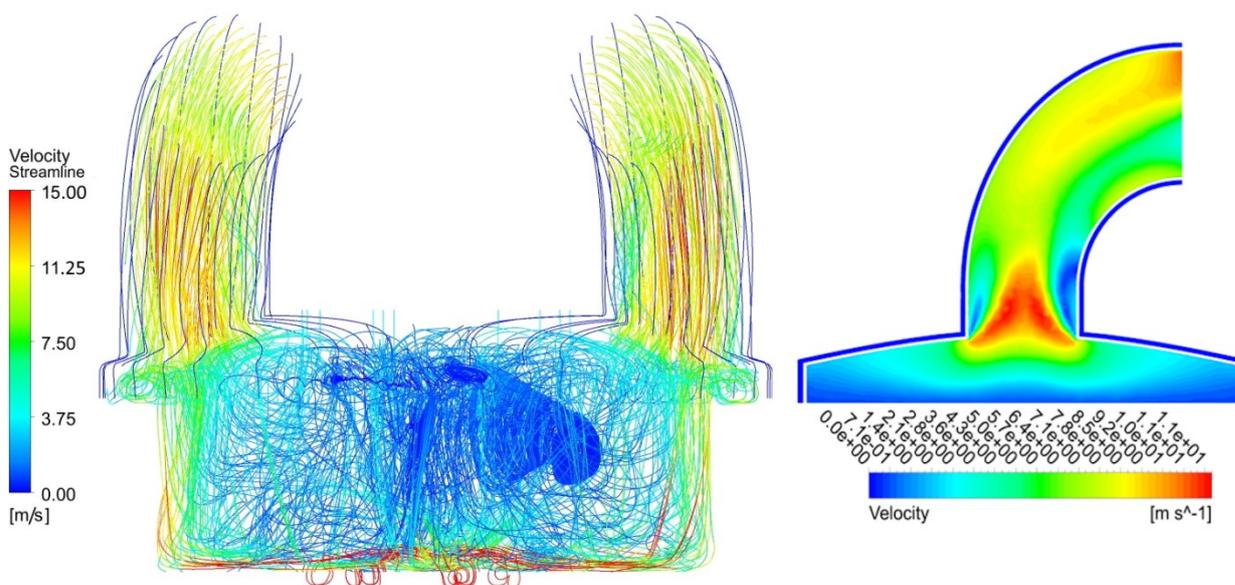


Рисунок 3.5 – Сечение контура распределения скорости в модели 1.

3.3.2 Модель 2: газоходы без водяного охлаждения

Моделируемая часть системы отходящих газов состоит из газоходов с жесткой стальной рамой и скользящей заслонкой, которая действует как регулятор скорости газа и расположена на стыке газоходов. Эта часть представляет наибольший интерес для моделирования и дальнейшего анализа, поскольку здесь прогнозировалось наличие стабильных зон. Граничные условия модели представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Граничные условия модели 2

Параметр	Вход	Выход
Тип граничных условий	<u>massflow_inlet</u>	<u>pressure_outlet</u>
Гидравлический диаметр, м	3	2,7
Массовый расход, кг/с	15,54	-
Избыточное давление, Па	-	0
Температура, С	430	-
Re	117255,6	266330
Турбулентная интенсивность, %	3,72	3,35

В этой модели было 2 739 629 элементов сетки (рисунок 3.6). Сетка имела приемлемое среднее ортогональное качество 0,79.

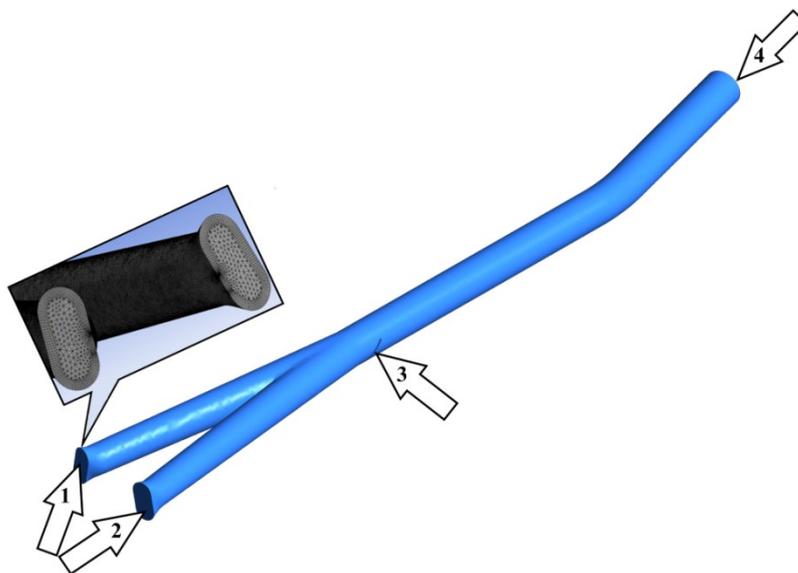


Рисунок 3.6 – Модель газоходов. (1, 2 – вход отходящих газов; 3 – шиберная заслонка; 4 – выход входящих газов)

Исходя из того, что наиболее устойчивые потоки в моделях не будут ламинарными из-за высоких скоростей, рекомендуется учитывать переходный режим, который был определен с помощью ANSYS Fluent. Коэффициент Re был рассчитан с помощью классического уравнения:

$$Re = \frac{w \cdot d_{\text{см}} \cdot \rho_{\text{см}}}{\mu_{\text{см}}} \quad (3.2)$$

где w – характерная скорость, м/с;

$d_{см}$ – гидравлический диаметр, м;

$\rho_{см}$ – плотность смеси, кг/м³,

$\mu_{см}$ – коэффициент динамической вязкости смеси газа, Па·с.

Для определения коэффициента динамической вязкости использовалась формула Сазерленда:

$$\mu_t = \mu_0 \cdot \frac{273+C}{T+C} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{3/2} \quad (3.3)$$

где μ_t – коэффициент динамической вязкости газа при температуре, Па·с;

μ_0 – коэффициент динамической вязкости газа при 0 °С, Па·с;

T – абсолютная температура газа, К;

C – постоянная Сазерленда.

Коэффициент динамической вязкости газовой смеси может быть найден следующем соотношением:

$$\frac{M_{см}}{\mu_{см}} = \frac{a_1 M_1}{\mu_1} + \frac{a_2 M_2}{\mu_2} + \dots + \frac{a_n M_n}{\mu_n} \quad (3.4)$$

где $M_{см}, M_1, M_2, \dots, M_n$ – молекулярные массы смеси газа и отдельных его компонентов соответственно, кг/моль;

a_1, a_2, a_n – содержание в смеси газа компонентов в объемных долях единиц;

$\mu_{см}, \mu_1, \mu_2, \mu_n$ – коэффициенты динамической вязкости соответственно смеси газа и отдельных компонентов, Па·с.

Плотность смеси печных газов:

$$\rho_{см} = y_1 \rho_1 + y_2 \rho_2 + \dots + y_n \rho_n \quad (3.5)$$

где y_1, y_2, y_n – объемные доли;

ρ_1, ρ_2, ρ_n – плотности компонентов, кг/м³.

$$\rho_0 \cdot \frac{273}{273+t}, \text{ кг/м}^3 \quad (3.6)$$

Рассчитываем кинематическую вязкость по формуле:

$$\nu = \frac{\mu_{см}}{\rho_{см}} \quad (3.7)$$

В результате расчета необходимых вспомогательных параметров в ANSYS CFD-Post, были получены контуры основных параметров отходящего газа, таких как скорость и кинематическая вязкость. Эти параметры оказывают непосредственное влияние на Re как основной критерий, характеризующий условия течения [104].

Любое препятствие на пути газового потока изменяет динамические характеристики. Поэтому необходимо знать, что происходит до и после того, как поток газа сталкивается с шиберной заслонкой, чтобы оценить любые изменения в поперечном сечении газового тракта. Зная это, мы можем определить управляющие воздействия для системы.

На рисунке 3.7 показаны изменения динамических характеристик газопылевого потока в объеме газохода. Переходный режим потока можно наблюдать в области изменения объема за закрытой частью шиберной заслонки (показана стрелкой) с наименьшим Re . Учитывая начальные условия создания наилучшей среды (ламинарный поток) для проведения измерений из-за высоких скоростей, выявленный здесь переходный режим можно считать соответствующим результатом моделирования.

Скорость потока является наиболее значимым параметром, влияющим на режим течения и Re . Линейная зависимость Re от скорости потока, как показано на рисунке 3.8, позволяет оценить режим течения, используя только профиль объемной скорости для будущих расчетов. Исходя из этого графика, соответствующая скорость должна быть менее 1 м/с для достижения переходного режима Re .

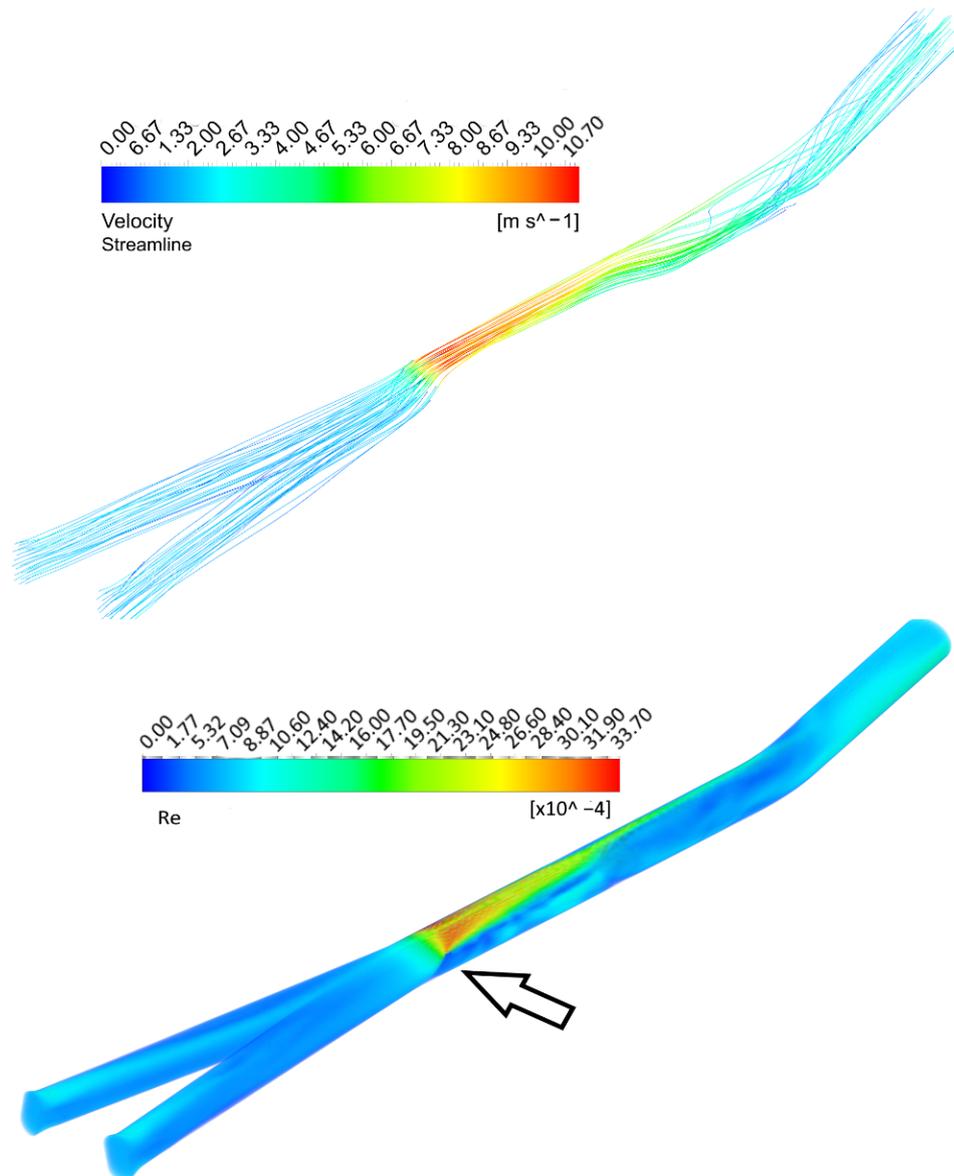


Рисунок 3.7 – Контуры распределения скорости и Re в газоходах

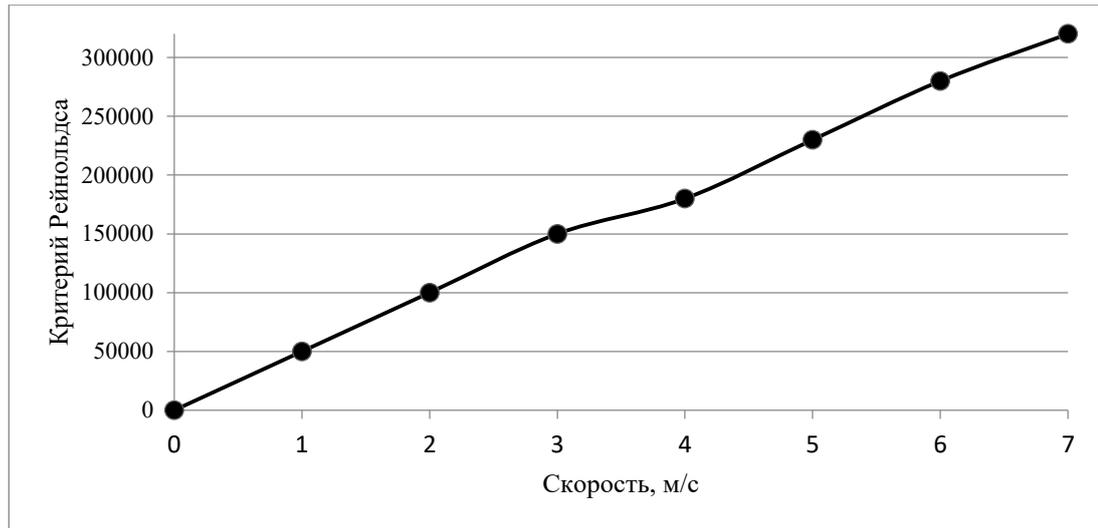


Рисунок 3.8 – График зависимости критерия Рейнольдса от скорости

Гистограмма, приведенная на рисунке 3.9, необходима для подтверждения существования переходного режима и оценки доли его объемного распределения в конкретных конфигурациях. Можно наблюдать небольшую долю переходного потока отходящих газов (красный столбец на гистограмме (0-7437) Re. Эти значения подходят для минимизации турбулентных пульсаций в данном случае.

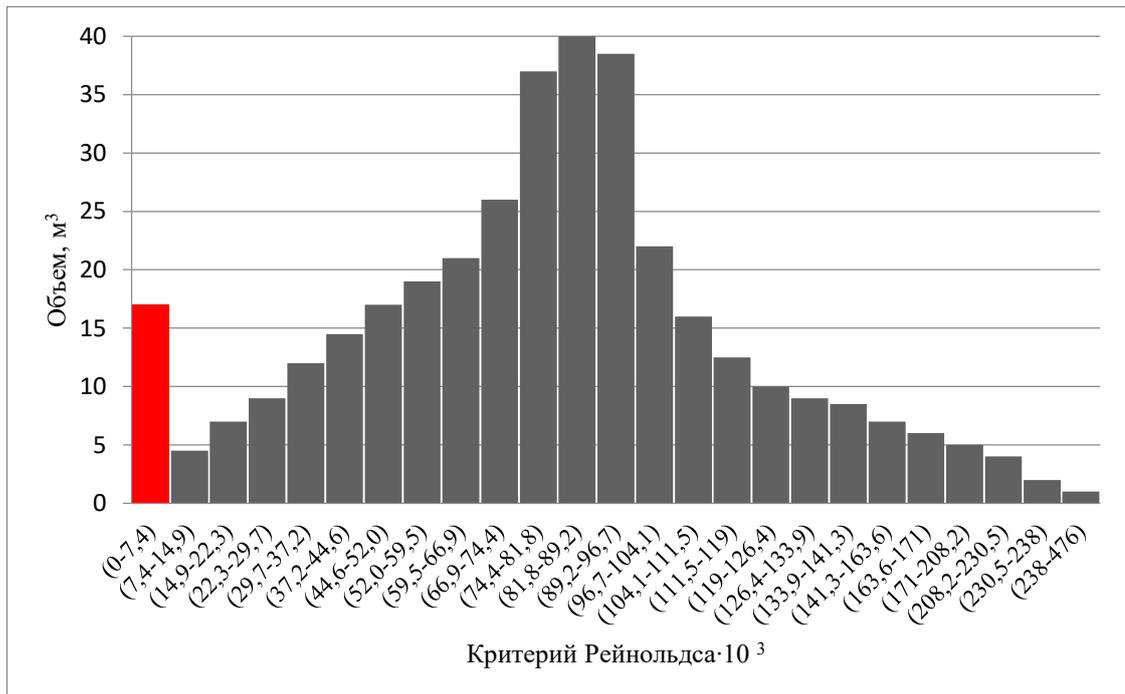


Рисунок 3.9 – Гистограмма, показывающие распределение турбулентности (Re) смеси отходящих газов

Таким образом, несмотря на большое разнообразие моделей турбулентности в ANSYS Fluent, в случаях сильной турбулентности рекомендуется рассматривать переходные режимы течения [38].

3.3.3 CFD модель горения отходящих газов

Прежде чем выбрать подходящую модель для моделирования происходящих химических реакций, будут ли предварительно смешиваться реагенты, количество доступного кислорода относительно необходимого для полного сгорания и скорость, с которой происходит сгорание, необходимо рассмотреть скорость протекания реакций для рассматриваемых условий.

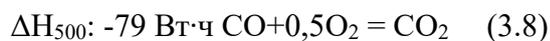
В модели сгорания без премешивания термохимия сводится к единственному параметру – доле компонентов в смеси. Предполагается, что после смешивания компонентов химический состав газов находится в химическом равновесии. Однако, известно, что отходящие газы руднотермической печи обычно не находятся в термодинамическом равновесии из-за высоких скоростей потока и, как следствие, малым временем пребывания в свободном пространстве. Поэтому в качестве наиболее подходящей для выплавки металлургического кремния была выбрана модель вихревой диссипации (EDC) [35, 52, 87].

В модели отслеживаются следующие виды газов: CO, SiO и H₂O из кратера печи, O₂ и N₂ из окружающего воздуха, а также CO₂ и SiO₂, являющиеся продуктами реакций.

Принято допущение, что технологический газ распределяется равномерно по всей поверхности шихты, поскольку при учете выбросов SiO через кратеры, струя может попасть в относительно бедную кислородом область. Для достижения цели эксперимента, а именно определения зависимости температуры от образования SiO₂, целесообразно моделирование условий для более полного окисления SiO и одновременное упрощение модели, поскольку равномерное распределение позволяет SiO оказаться в богатой кислородом области, что приводит к увеличению высокотемпературных зон.

В процессе моделирования рассмотрены 4 комбинации печных газов. Входные данные модели формируются как из параметров действующего кремниевого производства, так и из физических параметров. Рассчитанное распределение скорости, температуры и частиц выглядит корректным с точки зрения физики и ожидаемых результатов. При увеличении объемов SiO, возрастает температура отходящих газов из-за большого тепловыделения в результате сжигания SiO до образования микрокремнезема [32, 79].

В процессе моделирования рассматривались частицы SiO и CO с поверхности шихты, а также O₂ из подсасываемого воздуха. Результирующими продуктами являются CO₂ и SiO₂ с выделением соответствующего количества энергии:



Для элементарных химических реакций скорость реакции пропорциональна некоторой мощности концентраций реагирующих веществ в соответствии с законом действия масс. Однако для более сложных реакций часто используются упрощенные кинетические модели, в которых

мощности могут быть не равны стехиометрическим коэффициентам реагирующих видов и обычно определяются экспериментально. В нашем случае горение SiO и CO с кислородом включает некоторые промежуточные химические реакции, которые не до конца изучены. Тем не менее, поскольку суть процесса заключается в том, что SiO, CO и кислород расходуются, а продукты и тепло выделяются, обе реакции горения хорошо аппроксимируются одностадийными необратимыми процессами, принимая каждую реакцию за реакцию первого порядка для обоих реагентов. Таким образом, скорости реакций, определяются следующим образом:

$$R_1 = K_1(T) C_{SiO} C_{O_2} \quad (3.10)$$

$$R_2 = K_2(T) C_{CO} C_{O_2} \quad (3.11)$$

Коэффициенты $K_i(T)$ определяются в соответствии с уравнением Аррениуса:

$$K_i(T) = A_i \exp(-E_i/RT) \quad (3.12)$$

Где E_i – энергия активации реакции;

A_i – преэкспоненциальный коэффициент;

R – универсальная газовая постоянная;

T – температура системы [34].

В базовом варианте с поверхности шихты поступает только CO, и используется модель вихревой диссипации. Далее последовательно увеличивается содержание SiO в отходящих газах. Состав и массовый расход технологического газа, рассматриваемый при моделировании, приведены в таблице 3.5.

Расход воздуха постоянен $F_{воз} = 10$ кг/с.

Таблица 3.5 – Обзор состава на входе, общего массового расхода отходящего газа и модели горения EDC

CO		SiO		Всего отходящих газов
Массовый расход, кг/с	Массовая доля в отходящих газах	Массовый расход, кг/с	Массовая доля в отходящих газах	Массовый расход, кг/с
5,54	1	0	0	5,54
5,48	0,90	0,61	0,10	6,09
5,41	0,85	0,95	0,15	6,37
5,18	0,80	1,11	0,20	6,48
5,19	0,75	1,73	0,25	6,92

В результате моделирования температурного поля пылегазовой смеси при различных массовых долях SiO от 0 до 0,25 были получены графики распределения температуры и профили скорости газа для определения граничных условий второй модели как области, в которой может быть установлен предполагаемый газоанализатор (рисунок 3.10).

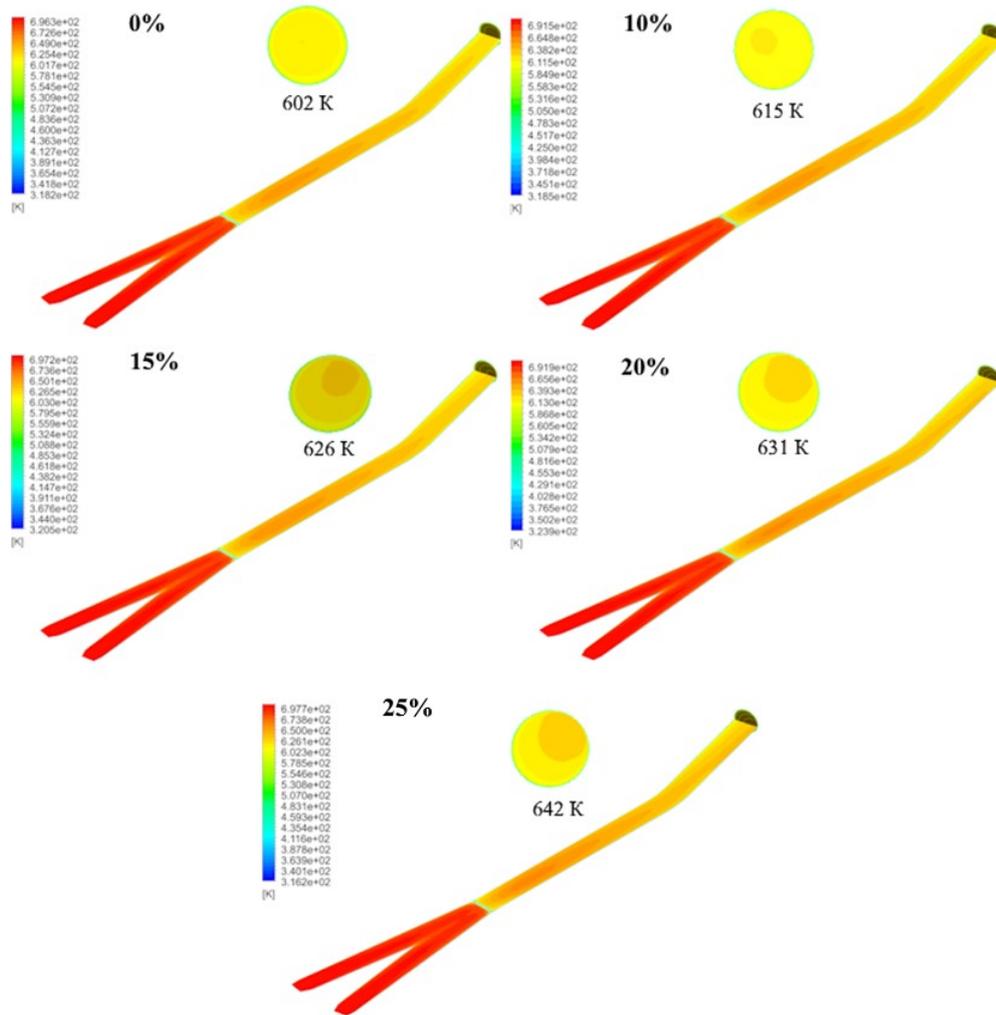


Рисунок 3.10 – Распределение температурных полей в газоходе при различных концентрациях SiO в отходящих газах от 0 до 25%

Потоки отходящих газов имеют схожие характеристики для каждого эксперимента. Основным отличием является более высокая скорость потока при увеличении доли SiO . Это можно легко объяснить увеличением общего массового расхода газа и более высокими температурами вследствие сгорания SiO .

Средняя температура отходящих на входе в газоход без водяного охлаждения составляет 410-420 °C в результате всех 5 экспериментов. Разница температуры между моделируемыми случаями относится к теплоте реакции горения SiO , которая примерно в 2 раза больше, чем для CO . Это также объясняет, почему максимальная температура выше.

Траектория движения твердых частиц микрокремнезема, полученная в результате моделирования представлена на рисунке 3.11.

На основе анализа полученных распределений температурных полей и концентраций микрокремнезема в отходящих газах получена зависимость, позволяющая связать температурные колебания и концентрацию SiO_2 (рисунок 3.12).

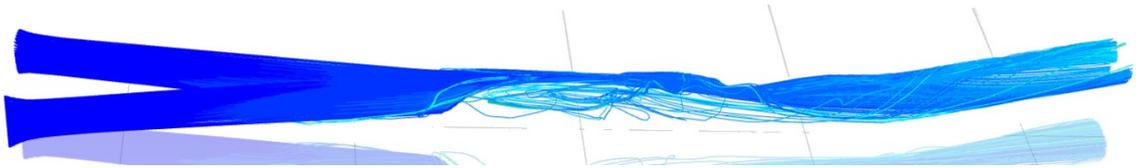


Рисунок 3.11 – Траектория движения образующихся частиц SiO_2 в потоке газа

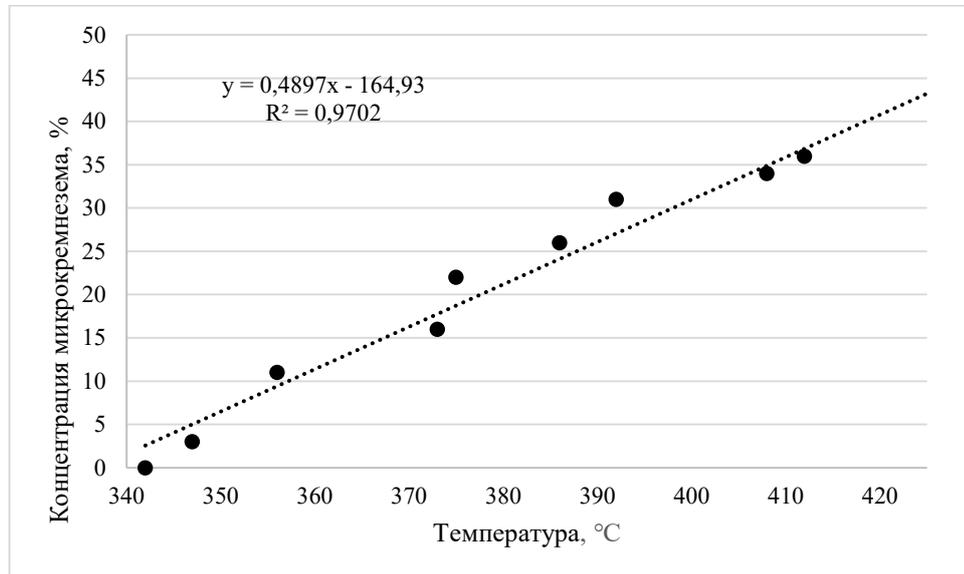


Рисунок 3.12 – Зависимость температуры отходящих газов от концентрации SiO_2 в отходящих газах

Оценка результатов моделирования без физических экспериментов не может предоставить достаточно точные количественные данные по причине применения большого количества допущений при создании модели, а также по причине временных колебаний в измерениях.

Несмотря на то, что предлагаемая методика контроля не позволяет точно определить концентрацию SiO_2 , модель адекватно предсказывают тенденцию. Таким образом, описанные подходы к моделированию не могут быть использованы для точной оценки SiO_2 , но могут быть использованы для определения нарушений нормального хода технологического режима плавки, сопровождающихся резким увеличением концентрации SiO на колошнике и пылевых выбросов SiO_2 , за счет измерения температуры в стабильной зоне газоотводящего тракта печи. Объем отходящего газа рассчитывается по скорости и температуре газа в одном и том же месте стабильной зоны газохода [3].

Выводы к главе 3

В данной главе описаны результаты исследований на основе моделей вычислительной гидродинамики, созданных с помощью программного обеспечения ANSYS Fluent: модель водоохлаждаемого свода печи, а также модель, включающая стальные газоходы с шибберной

заслонкой. В основе моделей лежит система уравнений Навье-Стокса, а также метод Эйлера-Лагранжа для моделирования дискретной фазы.

Первая часть эксперимента заключалась в определении стабильных зон в газоотводящем тракте РТП для более точного контроля состава отходящих газов.

При производстве кремния в РТП, когда объемный расход отходящего газа составлял 250 000 м³/ч (при нормальных условиях), сильная турбулентность развивалась в газоходах, препятствуя адекватному измерению концентраций каждого компонента газовой смеси. Чтобы контролировать скорость на развилке двух газоходов, в одном из них была установлена шиберная заслонка под углом 45°. Это привело к уменьшению скорости на выходе из газохода в 4-5 раз. Непосредственно за закрытой частью заслонки формируется переходный режим течения ($Re < 10000$), что позволяет измерять концентрации компонентов отходящих газов с требуемой точностью и контролировать их по дополнительному параметру.

В современных условиях при производстве кремния из кварцевого сырья в РТП необходимо решать вопросы энергоэффективности с учетом распределения газопылевых потоков. В результате представленного в данной главе моделирования:

- определены контуры основных параметров, определяющих режим течения в линии перекачки отходящего газотранспортной линии, а именно кинематической вязкости и скорости;
- режим течения был определен путем расчета критерия Рейнольдса вдоль линии передачи отработавших газов от РТП до ГОУ;
- установлено, что наиболее подходящее место для установки измерительного оборудования находится непосредственно за закрытой частью раздвижной заслонки. В этой области наблюдается переходный режим течения с наименьшей скоростью и наименьшим значением критерия Рейнольдса. В этом месте поток испытывает наименьшее влияние турбулентных сил, что позволяет измерять концентрации компонентов потока с требуемой точностью.

Вторая часть эксперимента заключалась в определении взаимосвязи концентрации микрокремнезема в отходящих газах и температуры газопылевой смеси.

Важнейшим критерием оценки эффективности производства металлургического кремния в РТП являются объемы пылевых выбросов – микрокремнезема. Непрерывный контроль концентрации твердых частиц в отходящих газах вызывает затруднения ввиду агрессивности среды (высокая температура и критическая запыленность).

С помощью CFD были смоделированы процессы горения, характерные для печи, выпускающей металлургический кремний. Горение SiO моделировалось с использованием упрощающего предположения, что SiO₂ находится в газообразном состоянии (изменение объема

в результате затвердевания не происходит, но энергия, выделяемая в процессе затвердевания, включается в общую энтальпию сгорания).

Именно это наблюдается на производстве при продувке шихты кислородом. Таким образом, качественная тенденция верна в расчетах. Правильная качественная тенденция наблюдается даже без учета кинетических эффектов: большого количества тепла, выделяемого SiO, достаточно, чтобы спровоцировать увеличение NOx. В наших расчетах образование SiO₂ не зависело от того, как пространственно распределялся поток массы SiO через поверхность шихты (равномерно или струйно).

Данные, полученные в ходе моделирования, были использованы в качестве подтверждения гипотезы, описанной выше. Для моделирования была использована сокращенная схема реакции. Сравнение показало, что модель предсказывает характеристики горения, такие как температурное поле и газовый состав основных видов достаточно хорошо.

Модель может быть улучшена путем рассмотрения более реалистичных граничных условий, концепции переходной модели и/или улучшенные схемы реакций.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ НАРУШЕНИЙ ХОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫПЛАВКИ КРЕМНИЯ В РТП

РТП для производства кремния представляет собой сложный многомерный объект управления с большим количеством параметров состояния и управляющих воздействий, и является типичным носителем плохо формализованных проблем. Для производства металлургического кремния актуальна разработка систем управления, обеспечивающих экономию ресурсо- и энергозатрат и безопасность работы.

Решения по управлению РТП принимаются в весьма противоречивых условиях: с одной стороны, желательно учитывать как можно больше факторов, различающихся по значимости и влиянию на качество решения, и данных, с другой – необходимо повышать качество принимаемых решений [15].

Внедрение систем диагностики нарушений технологических процессов позволяет существенно повысить скорость и адекватность выработки управляющих воздействий и повысить эффективность работы систем автоматизированного управления.

Ранняя диагностика предоставляет операторам больше времени для эффективного реагирования и предотвращения аварийных ситуаций. Важным аспектом является возможность системы различать схожие нарушения и давать четкое представление о причинах их возникновения и возможных последствиях [71].

Системы диагностики должны быть устойчивы к помехам и способны адаптироваться к изменениям процесса, чтобы обеспечивать точность в изменяющихся условиях.

Кроме того важно, чтобы система могла распознавать новые, неучтенные в модели сценарии, предоставляя необходимые данные для принятия решений. Это требует гибкости и возможности интерпретировать комплексные данные, особенно в условиях взаимодействия различных типов нарушений, что значительно усложняет процесс моделирования и требует продвинутых аналитических возможностей [105].

Для комплексных пирометаллургических процессов, таких как выплавка кремния в РТП, существуют определенные трудности в разработки систем диагностики. Преимущественно это обуславливается отсутствием оперативной информации о металлургических условиях в печи и недостатком информации на входе и выходе из нее. Таким образом, применение методов, основанных на данных (количественных), не представляется целесообразным. Более подходящими для рассматриваемого случая являются методы, основанные на качественных взаимоотношениях между параметрами. К таким методам относятся экспертные, где входные и выходные переменные системы связываются на основе эмпирического опыта экспертов.

К основному преимуществу экспертных систем (ЭС) для карботермического восстановления кремния в РТП относятся нацеленность на решение математически неформализованных или слабо формализованных задач.

В основе ЭС лежит база знаний, определяющая эффективность диагностики нарушений и пополняемая в процессе работы системы. Знания о процессе могут быть получены из различных источников и представлены в гибких формах, таких как правила «если-то», балансовые и кинетические модели, а также направленные графы. Преимуществом экспертного подхода является гибкость представления знаний [60, 98].

Нарушение хода технологического процесса – это отклонение от нормального режима работы, которое при неблагоприятных условиях может привести к аварийной ситуации и остановке процесса. В предлагаемом подходе задача идентификации нарушений решается с помощью ЭС и базе правил «Если ..., то...».

Предлагаемая методика основана на анализе взаимосвязей между технологическими параметрами, неисправностями и способами их устранения. В качестве источника экспертных знаний для формирования продукционных правил, описывающих упомянутые взаимосвязи, были использованы технологические инструкции и производственные данные процесса карботермического восстановления кремния. Модель технологического процесса представляет собой систему параметров, определяющих возникновение и развитие неисправностей. Ситуация Y в данном случае зависит от набора параметров $X = \{X_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, N$), которые могут быть измерены количественно и/или оценены качественно. Оценка ситуации может быть различной: аварийная ситуация, предаварийная ситуация или нормальный ход процесса [98].

4.1 Определение нарушений и диагностических параметров

На основе технологических инструкций, производственных данных и математического моделирования разрабатывается логическая модель поведения печи. Модель состоит из цепочки «отклонения – нарушение – управление», где «отклонения» – определяют состояния входных параметров системы, «нарушение» определяется выходными параметрами, а «управление» – управляющими воздействиями. Логическое вычислительное устройство, на основе указанных цепочек, устанавливает качественные зависимости сигналов отклонения от нормы выходных параметров и управляющих воздействий, а также определяет последовательность изменения управляющих воздействий для достижения нормы выходных параметров. Этот процесс продолжается до установления всех параметров в нормальное положение. В результате оператору предоставляются советы по использованию управляющих воздействий. Анализируются возможные нарушения процесса и определяются основные узлы технологической цепочки. Также выделяются потенциальные неисправности и диагностические признаки для каждого узла [60].

На основе локализации нарушений и контролируемых параметров выделяются основные типы неисправностей в процессе выплавки кремния.

- Подсистема дозирования шихты – удельный расход шихты по каждому из компонентов (каменный уголь, нефтекокс, древесный уголь, кварцит) на тонну выпущенного из печи кремния.
- Подсистема ГОУ – объемный расход отходящих газов; состав отходящих газов и концентрация каждого определяемого компонента; температура отходящих газов; давление отходящих газов на выходе из печи.
- Подсистема выпуска кремния и шлака из печи – расход расплава на выпуске; расход шлака на выпуске; температура расплава на выпуске.
- Электродный режим – расход электродов; график перепуска электродов.
- Электрический режим – величина тока нагрузки; величина напряжения; величина активной мощности; удельный расход электроэнергии (на тонну выпущенного металла).
- Подсистема охлаждения печи – объем охлаждающей воды; давление в коллекторе водяного охлаждения; температура воды после охлаждения.
- Тепловой режим печи – температура подины; температура стенок печи.

Обобщенно можно выделить следующие типы нарушений нормального режима выплавки кремния в РТП:

1. углеродного баланса плавки (недостаток/избыток углерода);
2. электродного режима (работа на длинных/коротких электродах/перекося напряжения на электродах);
3. электрического режима (колебания мощности РТП) [11].

4.2 Выбор контролируемых параметров

Диагностическая система будет контролировать набор технологических параметров в реальном времени на основе расчетных значений и косвенных методов контроля. Параметры подразделяются на непосредственно контролируемые и контролируемые через косвенные зависимости. Нормы для параметров определяются с учетом нормативных документов и экспертного мнения.

Таким образом, все параметры можно разделить на две группы по типу контроля: а) параметры, контролируемые непосредственно; б) параметры, контролируемые при помощи косвенных зависимостей. Нормы для параметров определяются на основе нормативных документов (технологический регламент, инструкции завода-изготовителя и др.), а также экспертных знаний (таблица 4.1) [81].

Таблица 4.1 – Параметры процесса выплавки металлургического кремния в РТП, контролируемые напрямую [11].

№	Параметр	Единица измерения	Номинальное значение
1. Система дозирования шихты			
1.1	Расход нефтяного кокса	т/сутки	15,58
1.2	Расход древесной щепы	т/сутки	58,42
1.3	Потребление древесного угля	т/сутки	37,81
1.4	Потребление каменного угля	т/сутки	9,42
1.5	Потребление кварцита	т/сутки	137,71
2. Система обработки первичных отходящих газов			
2.1	Объем отходящих газов	Нм ³ /ч	250000
2.2	Температура отходящих газов	С	500
2.3	Концентрация SO ₂	г/Нм ³	0,07
2.4	Концентрация NO	г/Нм ³	0,002
2.5	Концентрация NO ₂	г/Нм ³	0,0045
2.6	Концентрация СО	г/Нм ³	0,15
2.7	Концентрация пыли в отходящих газах	г/Нм ³	6
2.8	Разрежение отходящих газов на входе в газоходы	Па	350
3. Система охлаждения печи			
3.1	Объем охлаждающей воды	м ³ /ч	1000
3.2	Давление	кПа	450
3.3	Температура отходящей воды	С	55-65
4. Выпуск кремния и шлака из печи			
4.1	Расход расплава на выпуске	т/час	2,3
4.2	Расход шлака на выпуске	т/час	0,03
5. Электрический режим печи			
5.1	Линейное напряжение	В	142,9-224
5.2	Ток электрода	кА	40-50
5.3	Напряжение электрода	кВ	9,9-10,0
5.4	Ток высокого напряжения	А	550
5.5	Активная мощность	МВт	19
5.6	Удельный расход электроэнергии (на тонну выпущенного металла)	кВт/т	11628

В качестве дополнительных методов, позволяющих своевременно выявить нарушения хода технологического процесса и их причины, используются система технического зрения для оценки качества кварцевого сырья, а также косвенная оценка выбросов микрокремнезема посредством измерения температуры пылегазовой смеси в стабильной зоне газоотводящего тракта (за шиберной заслонкой).

Контроль длины рабочих концов электродов осуществляется посредством расчета и замеров. Замер рабочего конца электродов производится по указанию старшего мастера, а также при отключении на ремонт, при продолжительном расстройстве печи. Расчет длины рабочего

конца осуществляется на основании предыдущего замера, величине перепуска и съема электроэнергии.

4.3 Анализ причинно-следственных связей

Для определения характера и направления связей между технологическими параметрами и нарушениями построены причинно-следственные диаграммы взаимосвязей.

В соответствии с технологической инструкцией производства технического кремния ООО «Русал Кремний Урал» [11] и экспертными знаниями можно диагностировать 5 основных нарушений хода карботермического восстановления кремния, приводящих к аварийным ситуациям и простоям производства.

4.3.1 Нарушения углеродного режима

Нехватка углерода в расплаве приводит к систематическим проблемам, таким как потеря мелких добавок до загрузки в печь, обугливание на колошнике и отсутствие контроля над составом загружаемого в печь сырья. Состав сырья необходимо систематически контролировать и корректировать с помощью добавок (рисунок 4.1).

Расстройства углеродного режима вызваны использованием низкокачественного восстановителя и нарушением оптимального соотношения C/SiO_2 в шихте. Для обеспечения необходимого соотношения C/SiO_2 имеются строгие требования к качеству загрузки шихты в горн РТП, такие как равномерность, точность дозировки, непрерывность и постоянство состава [99].

Качество восстановителя оказывает существенное влияние на ход плавки и определяется содержанием древесного угля в комплексном составе, исключая древесную щепу, которая не достигает высоких температур из-за выгорания на колошнике. Шихта плохо восстанавливается из-за недостаточной температуры и загрузки в горне. Для улучшения газопроницаемости, фильтрации газов и адсорбции продуктов необходимо увеличивать количество древесного угля в шихте для всех типов печей. Из всех доступных материалов для печей, древесный уголь считается наиболее подходящим благодаря таким его свойствам, как способность восстанавливать и рыхлить шихту, регулировать выброс газов, а также обеспечивать эффективную фильтрацию и адсорбцию летучих веществ [59, 108].

Качество восстановителя определяется его реакционной и адсорбционной способностями, определяющей способность шихты поглощать и возвращать в процесс газообразный SiO на колошнике, препятствуя его уносу с отходящими газами и тем самым уменьшая потери кремния.

Нарушения углеродного режима выплавки кремния зависят также от недостаточной точности смешивания компонентов шихты, ошибок в подготовке к плавке и неконтролируемого

выгорания углерода. Излишек углерода в шихте не влияет на потери монооксида через газы, но может привести к образованию карбида кремния в горне и нарушить процесс плавки. Такие проблемы можно исправить, внося коррективы в состав шихты.

Отсутствие углерода является главной причиной потерь кремния в виде невосстановленного монооксида кремния. В случае отсутствия карбида кремния и углерода в расплаве, остатки оксидов кремния восстанавливаются кремнием на последнем этапе плавления по реакции диспропорционирования ($\text{SiO}_2 + \text{Si} = 2\text{SiO}$).

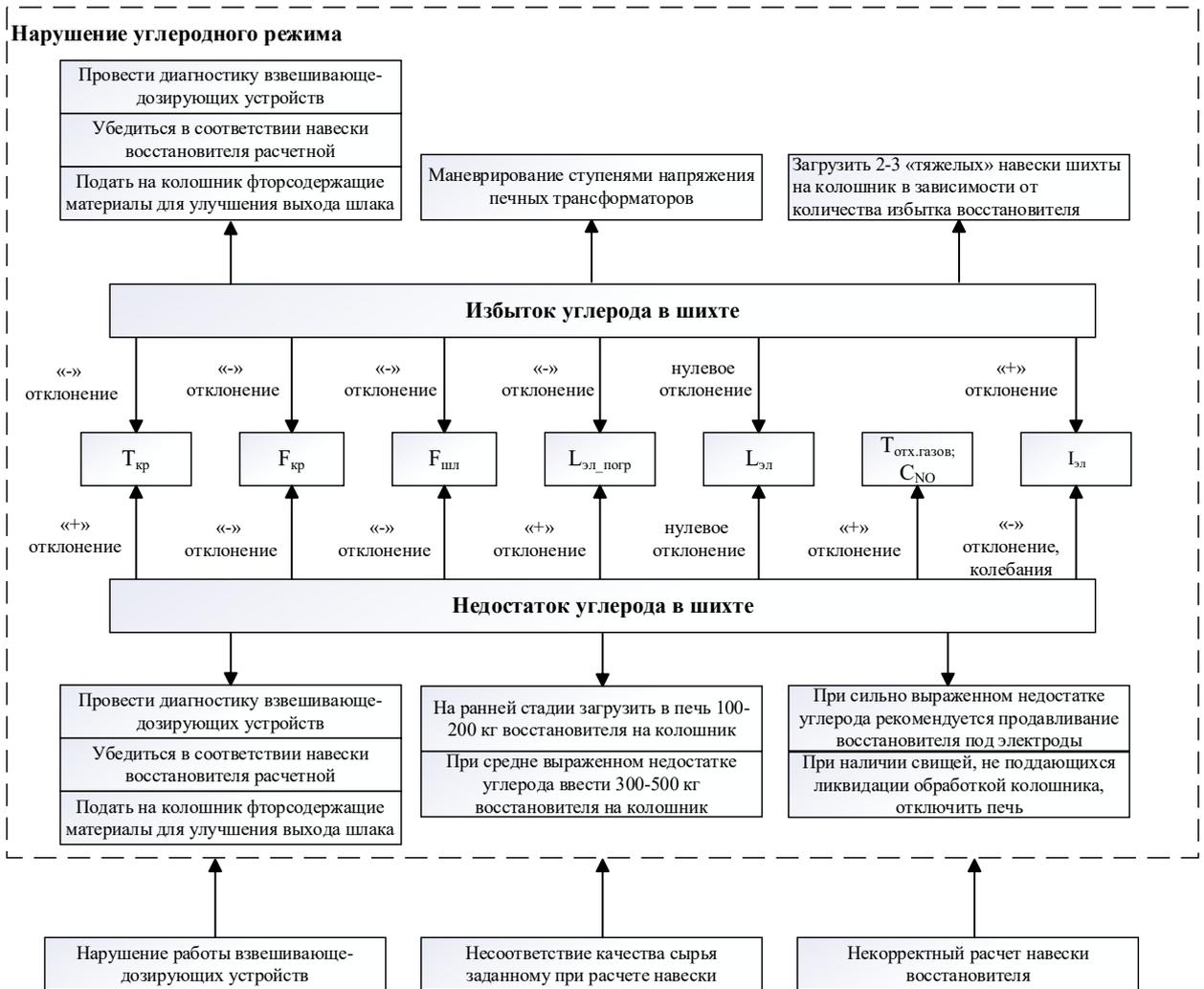


Рисунок 4.1 – Диаграмма взаимосвязей для нарушений углеродного режима.

$T_{кр}$ – температура расплава кремния на выходе из печи; $F_{кр}$ – расход расплава кремния на выходе из печи; $F_{шл}$ – расход шлака на выходе из печи; $L_{эл_погр}$ – длина погруженной части электродов; $L_{эл}$ – длина электродов; $T_{отх.газов}$ – температура отходящих газов; C_{NO} – концентрация NO в отходящих газах; $I_{эл}$ – ток нагрузки на электроды.

4.3.2 Нарушения электродного режима

Основное внимание в исследованиях способов улучшения технологических характеристик процесса выплавки кремния в РТП уделено степени извлечения кремния в готовый продукт, так как это основной фактор, влияющий на энергопотребление, производительность и качество продукта. Также рассмотрено влияние качества восстановителя, температуры, качества загрузки шихты и грансостава кварцита на извлечение кремния. Для анализа влияния температуры на результаты плавки использовались косвенные параметры, такие как электрический режим плавки и отношение силы тока к напряжению электрической дуги [74, 101].

Нарушения электродного режима характеризуются отклонениями длины электродов от допустимых. Причиной этого могут быть несоответствующий выбранному режиму работы график перепуска электродов, а также колебания качества сырья.

Работа печи с короткими электродами по внешним признакам напоминает работу с избытком восстановителя (рисунок 4.2):

- шихта у электродов сходит обвалами;
- слышна работа электрических дуг (характерный гул);
- возможна потеря токовой нагрузки;
- металл выходит из печи холодный и в малом количестве, выход шлака из печи прекращается;
- летка слегка газит.

Работа печи с чрезмерно длинными электродами характеризуется следующими признаками:

- высокая и неравномерная посадка электродов;
- значительные колебания токовой нагрузки, из-за которых возможно автоматическое отключение печи от токовой защиты трансформаторов;
- замедленный сход шихты;
- при верхнем положении электродов (вплоть до достижения верхнего концевого ограничения) шихта под электроды не обваливается и характерный гул работы электрических дуг не слышен;
- выпуск металла из печи затрудняется из-за появления значительного количества сопутствующего шлака [11].

Несвоевременное распознавание чрезмерной длины электродов приводит к закварцеванию печи из-за ошибочного представления об избытке восстановителя в шихте и стремлении обслуживающего персонала посадить электроды путем снижения навески

восстановителя или дачи под электроды «тяжелой» шихты. При попытке посадить электроды они погружаются в шлак, теряется дуговой режим, сход шихты снижается [97].

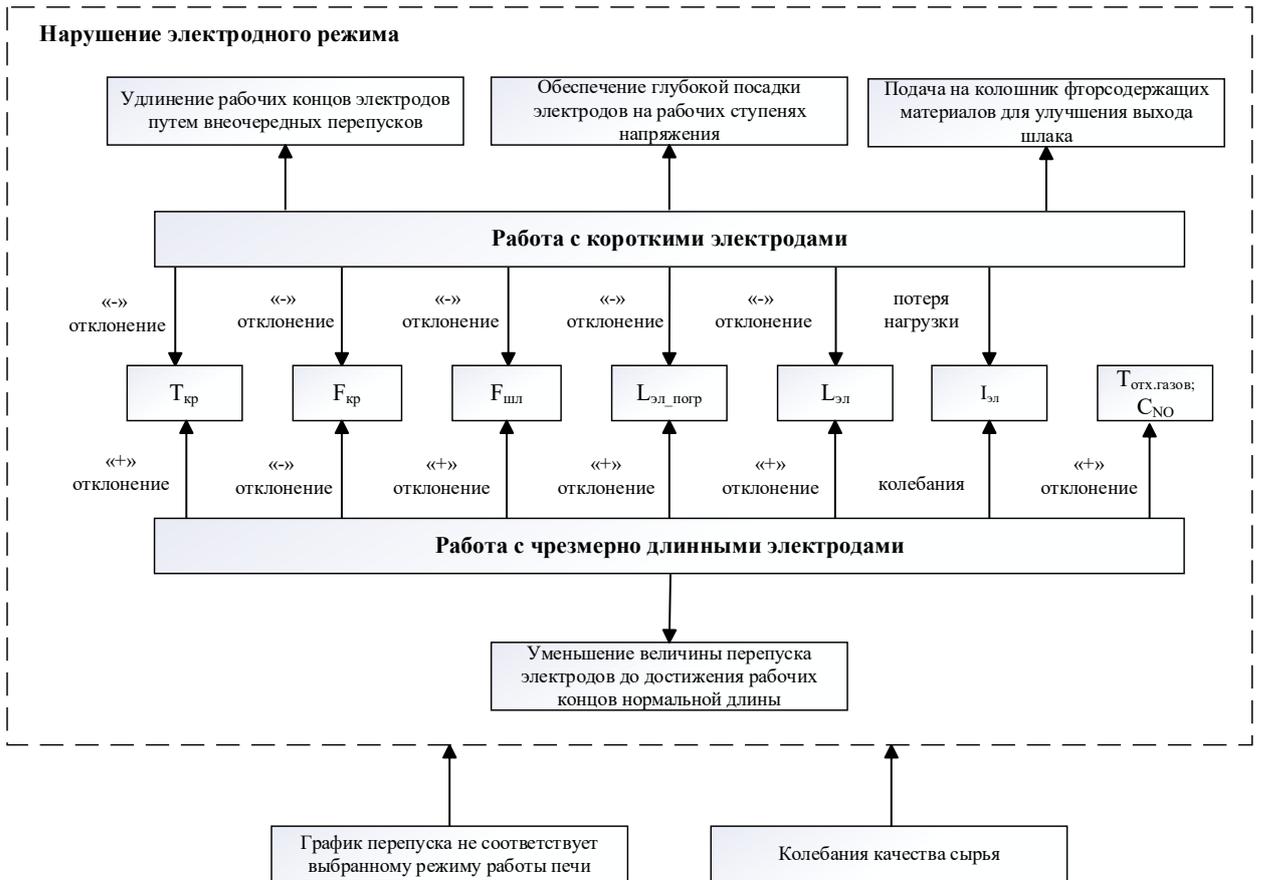


Рисунок 4.2 – Диаграмма взаимосвязей для нарушений электродного режима.

$T_{кр}$ – температура расплава кремния на выходе из печи; $F_{кр}$ – расход расплава кремния на выходе из печи; $F_{шл}$ – расход шлака на выходе из печи; $L_{эл_погр}$ – длина погруженной части электродов; $L_{эл}$ – длина электродов; $I_{эл}$ – ток нагрузки на электроды.

4.3.3 Нарушения электрического режима

Влияние электрического режима РТП на извлечение кремния определяется, прежде всего, температурой в ванне печи. В горне есть два источника выделения тепла: первый для предварительного нагрева и восстановления сырья за счет тепла, выделяемого активным сопротивлением сырья, второй для выделения тепла от электрических дуг. При нарушениях электрического режима температура в ванне может превысить допустимую, что может привести к выкипанию кремния и ухудшению результатов плавки. В противном случае происходит недовосстановление оксидов и их выдувание газами.

Температура при заданной мощности регулируется напряжением электрического тока, который определяется сопротивлением дуги. Оптимальная температура достигается определенным отношением I/U для каждой электропечи, особенно важное значение имеет

напряжение. Таким образом, основным параметром управления режимом является сопротивление дуги [19].

Регулирование электрического режима осложняется по двум причинам: В связи с наличием параллельного электрического шунта у каждого электрода, обусловленного шихтовой проводимостью, часть активной мощности теряется на шунте. Эти потери зависят от качества шихты, равномерности загрузки и температуры в печи; В случае трехэлектродных печей каждый тигль является отдельным, однако они все соединены в единую трехфазную электрическую систему. Изменения в работе одного тигля влияют на два других, что усложняет управление процессом плавки.

В электрическом режиме промышленных печей для выплавки кремния выявлены следующие закономерности:

- при увеличении мощности печей увеличивается длина дуги (L), ее напряжение, сила тока и отношение I/U ;
- для всех печей наблюдается разброс точек в координатах $I/U-P$ в зависимости от отклонения рабочего электрического режима печи от оптимального значения. Присутствуют линии минимума и максимума отношения I/U и фрагменты оптимума;
- при увеличении отношения I/U извлечение увеличивается для всех типов печей, что связано с приближением температурного режима восстановления к оптимальному;
- характер зависимостей $L-U-I/U-P$ объясняется их связью с оптимумом удельной мощности очага тепловыделения электрических дуг;
- практика работы отечественных цехов кремния не учитывает достаточно важный фактор оптимального электрического режима – отношения I/U как параметра улучшения работы печей.

Для управления тепловым режимом печи используются следующие закономерности электрического режима РТП:

- увеличение мощности печей приводит к увеличению параметров дуги - длины, напряжения и силы тока, а также отношения I/U ;
- для всех типов печей наблюдается изменение положений точек на графике $I/U-P$ в зависимости от отклонения электрического режима от оптимального значения;
- увеличение отношения I/U способствует увеличению извлечения для всех типов печей за счет приближения температурного режима к оптимальному [106].

К основным видам нарушений электрического режима можно отнести следующие:

- некритические отклонения режима, обусловленные физико-химическими процессами, происходящими с шихтой и электродами, (изменения дугового промежутка и сопротивления дуги);
- резкие нарушения режима в период расплавления, вызванные обвалами шихты (обрывы дуги и короткие замыкания могут доходить до 5-10 в минуту);
- потеря или значительное снижение напряжения на одном из электродов вызывающее перекос напряжения и снижение общей мощности, обусловленное неравномерной скоростью проплавления колодцев под отдельными электродами из-за разной плотности шихты под дугами.

Из перечисленных нарушений основным, требующим быстрого обнаружения и реагирования, является перекос напряжения (рисунок 4.3).

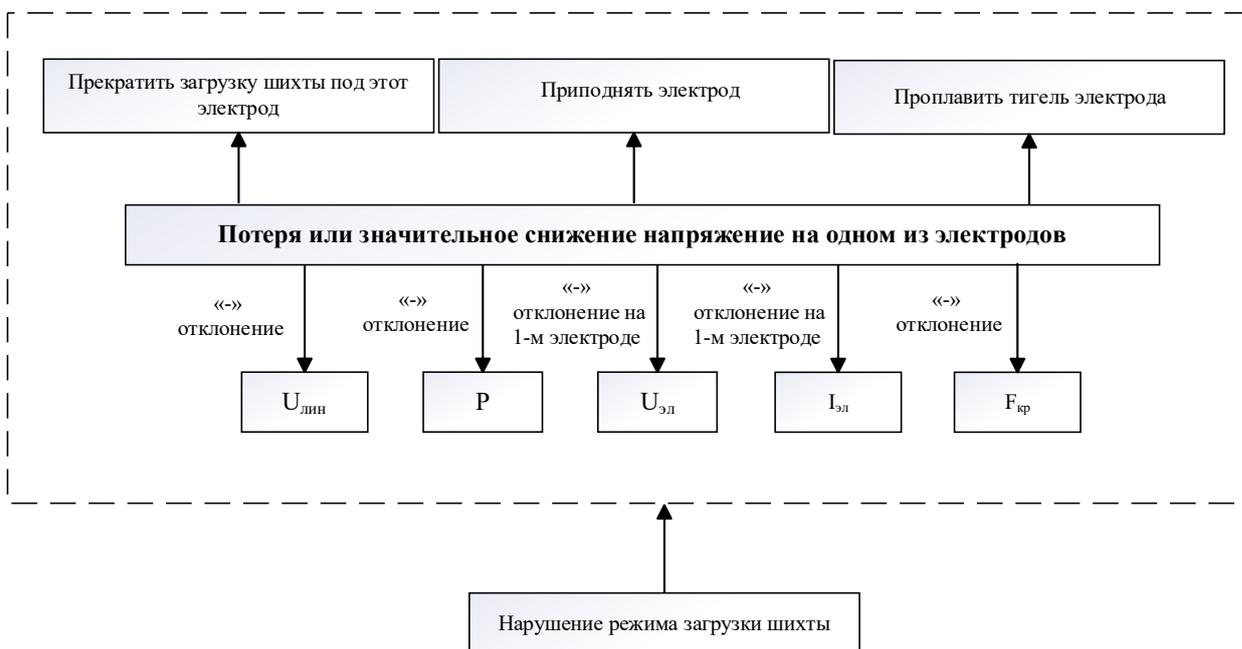


Рисунок 4.3 – Диаграмма взаимосвязей для нарушений электрического режима.

$U_{\text{лин}}$ – напряжение на линии; P – мощность; $U_{\text{эл}}$ – напряжение на электродах; $F_{\text{кр}}$ – расход кремния на выходе; $I_{\text{эл}}$ – ток нагрузки на электродах.

4.3.4 Дополнительные параметры оценки

Важную роль в процессе плавки кремния играет качество кварцевого сырья. Химический и гранулометрический состав оказывает значительное влияние на процесс. Для печей разной мощности рекомендованы разные фракции кварцита. Однако, основным критерием является стабильность качества сырья.

Нарушение требований к качеству кварцевого сырья приводит к нарушению хода плавки, основными признаками которых являются вынос мелких фракций кварцита с отходящими газами, нарушения температурного режима плавки недовосстановлению кремния.

Горячий реакционный газ, содержащий газообразные и твердые продукты плавки, выдувается из горна. Недостаточное восстановление SiO и его вывод газами напрямую влияет на понижение производительности процесса при работе в неподходящих режимах плавки. Этот процесс усиливается реакцией диспропорционирования. При охлаждении SiO в диапазоне температур 1900-1700 °С происходит превращение газообразного монооксида в конденсированные дисперсные продукты Si и SiO₂. Это приводит к снижению эффективности адсорбции SiO и замене ее менее эффективным методом фильтрации через шихту. Плохие свойства фильтрации и адсорбции шихты приводят к ухудшению условий выделения кремния, а перенос дисперсных продуктов реакционными газами ухудшает эффективность процесса [46].

Определение температуры ванны в плавильном процессе играет важную роль, а точное измерение температуры в очаге тепловыделения представляет собой сложную задачу из-за особенностей конструкции печи. Для оценки теплового режима плавки используется контроль параметров электрического режима печи, а именно отношение силы тока к напряжению с учетом активной мощности каждого электрода. Таким образом, можно определить количество выделившегося тепла и его качество – температуру.

4.4 Создание базы правил

В разрабатываемой системе во внимание принимаются основные нарушения хода плавки, не связанные с выходом из строя оборудования. Возможные негативные последствия нарушения работы отдельных узлов процесса обычно известны заранее. Автоматические защитные устройства мониторят технологические параметры (температуру, давление и т. д.) и при достижении предельно допустимых значений срабатывает аварийный сигнал. Для таких ситуаций устанавливается правило: «Если значение параметра i = Критическое, то Ситуация = авария». Формируются правила для предаварийных ситуаций и отклонений от нормы. Некоторые комбинации из списка ситуаций удаляются как повторяющиеся. Полученные значения образуют базис для производственных правил. Экспертами проводится оценка ситуации для каждого правила. Правила, описывающие отклонения от нормы набора идентификационных параметров, отличаются тем, что не все признаки обязательно должны превышать допустимые значения, поскольку значимость каждого параметра определяется весовыми коэффициентами [1, 20].

При нормальной работе разница по модулю между номинальными значениями показателя X_i и фактическими значениями не должна превышать допустимого предела, учитывая условия работы печи и ее состояние:

$$\Delta X_i = X_i^H - X_i \leq \Delta X_i^{don} \quad (4.1)$$

X_i^H – номинальные значения для i -го параметра;

X_i – фактические значения i -го параметра;

ΔX_i^{don} – модель допустимого отклонения значения i -го параметра от нормы.

Если условие (1) выполняется, то значению i -го идентификатора признака P_i присваивается значение «1», в противном случае – значение «0» [10].

Кроме того, система учитывает возможность сложения нескольких малозначимых нарушений, которые в совокупности могут привести к критической ситуации. Поэтому, если сумма значений P_i для определенного набора параметров превышает установленный порог, это также может быть расценено как потенциально опасное состояние, требующее вмешательства оператора или автоматической коррекции.

Эта функция особенно важна в условиях, когда отдельные небольшие отклонения могут не казаться значительными, но их комбинация создает повышенный риск. Система способна анализировать и интерпретировать такие комплексные сценарии, предоставляя оперативные данные для принятия решений [9, 20].

Определение вероятности развития конкретного нарушения для каждой группы признаков осуществляется по следующей формуле:

$$P_i = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \cdots \\ \vdots \\ 0 \cdots \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

где P_i – вероятность для i -го нарушения;

γ_n – весовой коэффициент признака (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Весовые коэффициенты нарушений

Нарушение	Весовой коэффициент
1 Недостаток углерода в шихте	
Температура расплава на выходе	0,30
Расход расплава на выпуске	0,20
Расход шлака на выпуске	0,30
Длина электродов	0,80
Глубина посадки электродов в шихту	0,80
Токовая нагрузка	0,20
Температура отходящих газов	0,70
2 Избыток углерода в шихте	
Температура расплава на выходе	0,30
Расход расплава на выпуске	0,20

Продолжение таблицы 4.2

Нарушение	Весовой коэффициент
Расход шлака на выпуске	0,30
Длина электродов	0,80
Глубина посадки электродов в шихту	0,80
Токовая нагрузка	0,40
3 Короткие электроды	
Температура расплав на выходе	0,30
Расход расплава на выпуске	0,20
Расход шлака на выпуске	0,30
Длина электродов	0,80
Глубина посадки электродов в шихту	0,80
Токовая нагрузка	0,60
Температура отходящих газов	0,70
4 Длинные электроды	
Температура расплава на выходе	0,30
Расход расплава на выпуске	0,20
Расход шлака на выпуске	0,30
Длина электродов	0,80
Глубина посадки электродов в шихту	0,80
Токовая нагрузка	0,60
5 Потеря напряжение на электроде	
Напряжение линии	0,50
Напряжение электродов	0,80
Токовая нагрузка	0,80
Мощность	0,50
Расход расплава на выпуске	0,30

4.5 Функциональные блоки системы диагностики нарушений

Структурная схема системы диагностики включает следующие блоки (рисунок 4.4):

- блок предобработки данных;
- базу данных;
- базу правил;
- блок формирования логических выводов;
- блок дополнения базы правил;
- блок советов;
- вспомогательные блоки для оценки недостающих параметров: анализ отходящих газов, анализ кварцевого сырья, расчет баланса плавки;
- пользовательский интерфейс.

Значимыми аспектами функционала системы диагностики при этом являются:

- интеграция с автоматизированными системами управления на производстве, что обеспечит непрерывный поток данных и упростит внедрение корректирующих действий без задержек;
- процедуры обновления данных и правил включают возможности регулярного обновления базы данных и правил на основе новых данных и аналитических отчетов.

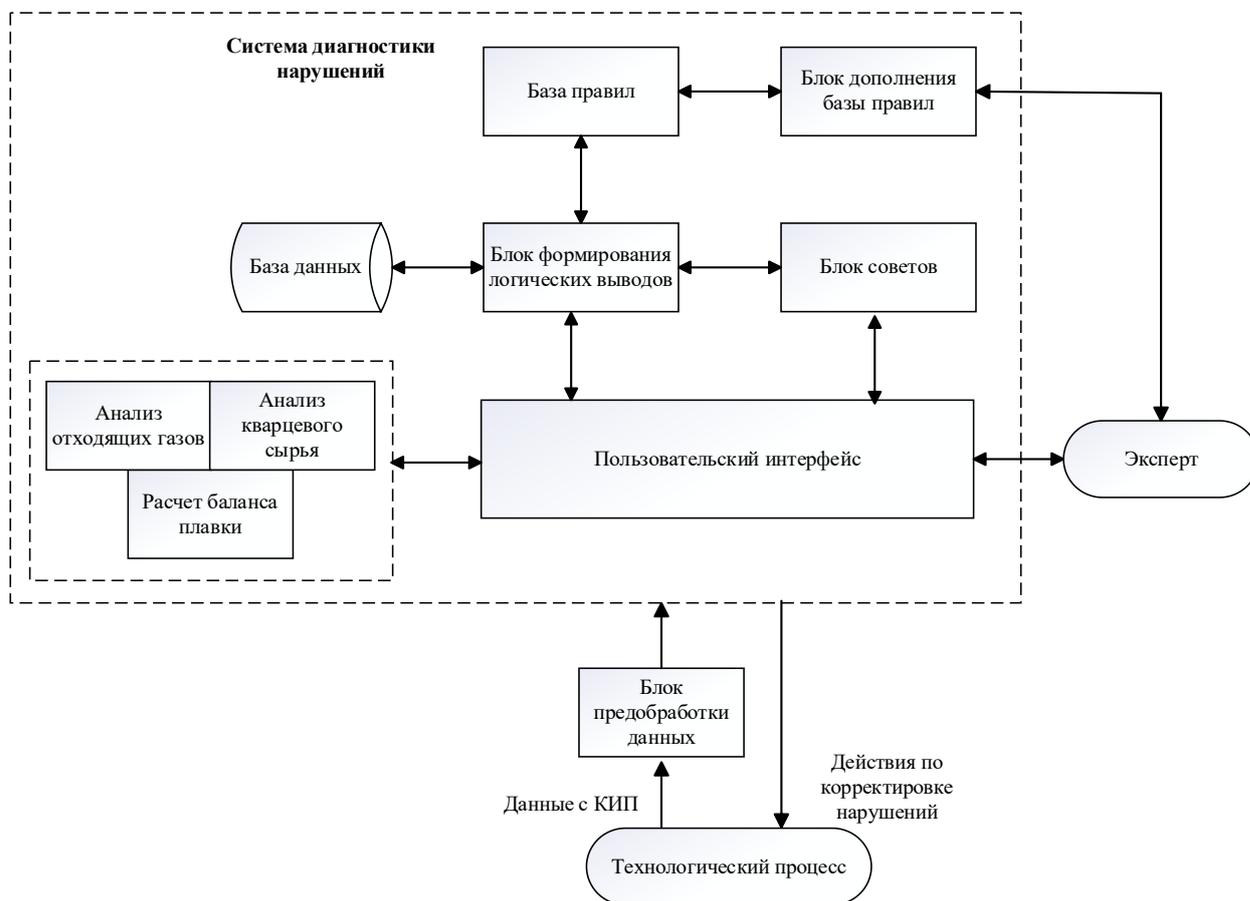


Рисунок 4.4 – Структурная схема системы диагностики нарушений

При разработке системы диагностики нарушений процесса карботермического восстановления кремния необходимо учитывать разнородность поступающей информации. Наличие множеств точек измерений на протяжении технологической цепочки делает необходимым применение предварительного анализа данных и при необходимости повышения их качества для последующего использования в системе диагностики нарушений.

К проблемам низкого качества данных относятся:

- противоречивость информации;
- пропуски данных;
- аномальные значения;
- помехи.

Решение о наличии нарушения принимается, когда значение статистики измеряемой переменной превышает заданное пороговое значение. При этом качество работы обнаружителя нарушений, такие как время обнаружения, количество пропущенных нарушений, и, напротив, число ложных тревог, в значительной степени зависит от выбора самой статистики и установленного порога.

Таким образом, для повышения качества информации в блоке предобработки восстанавливаются пропущенные данные, редактируются аномальные значения, вычитаются помехи, проводится сглаживание.

4.5.1 Анализ отходящих газов

Блок использует параметры расхода, температуры и состава отходящих газов для анализа адекватности физико-химических реакций, протекающих внутри печи. В соответствии с полученной в результате CFD моделирования зависимостью температуры отходящих газов от концентрации в них микрокремнезема производится оценка выбросов микрокремнезема согласно следующему уравнению:

$$C_{\text{отх.газов}} = 0,4897t - 164,93 \quad (4.3)$$

Поскольку, как уже отмечалось ранее, условия моделирования, лежащие в основе полученной зависимости, подвергались серьезным упрощениям и не подвергались проверке промышленными экспериментами, сфера применения уравнения 3 лежит не в точном определении пылевых выбросов, а в оценки их объемов с точки зрения диагностики нарушений технологического процесса [92].

Так, существенным для системы диагностики является изменение температуры пылегазовой смеси на 18-20 °С, что соответствует изменению концентрации микрокремнезема в отходящих газах на 10%.

При расхождении прогнозных показателей пылевых выбросов, сделанных в блоке расчета баланса плавки, система выдает сигнал тревоги и привлекает эксперта для поиска неучтенных нарушений технологического процесса.

Эта диагностика помогает в принятии оперативных мер для корректировки процесса в целях минимизации выбросов и повышения эффективности плавки. Использование данных параметров позволяет не только определить места возможных нарушений в печи, но и прогнозировать возможные изменения в процессе плавки, что крайне важно для поддержания качества и стабильности производства [3].

4.5.2 Анализ качества кварцевого сырья

Блок системы диагностики производит оперативную оценку качества кварцевого сырья по одному из наиболее значимых показателей – содержанию примесей железа, представленных преимущественно в виде Fe_2O_3 .

Система технического зрения проводит анализ изображений срезов образцов кварцита и определяет с достоверностью 85-90% установить содержание железа в кварцевом сырье, а также своевременно дает оператору рекомендации по предотвращению попадания материала низкого качества в печь [31].

В зависимости от значимости отклонения качества сырья, от степени вовлечения партии в производственную цепочку, оператору предлагается:

- исключить кварцит ненадлежащего качества из технологической цепочки;
- усреднить содержание железа в кварцевом сырье до допустимых показателей за счет добавления более чистых марок кварцита (Черемшанского месторождения);
- в дальнейшем провести анализ причин нарушения хода плавки и качества конечного продукта при попадании кварцита несоответствующего качества в РТП.

Визиометрический анализ, проведенный на планшетных устройствах, позволяет оперативно оценивать качество руды прямо на загрузочных конвейерах, что способствует более точному и своевременному управлению плавильным процессом. Такой подход уменьшает временные задержки между отбором и анализом проб, позволяя использовать более сложные процедуры пробоподготовки.

Для достижения максимальной точности в анализе химического состава руды, применяется технология создания срезов образца перед анализом, что обеспечивает сохранение информативности об исходных свойствах руды. Такой метод подготовки проб оптимизирован для выявления детальной информации о массовой доле оксидов железа в кварците

Интеграция визиометрического анализа в системы отбора и подготовки проб является экономичной, так как не требует значительных инвестиций в дополнительное оборудование. Такая схема подготовки проб обеспечивает высокое качество анализа и позволяет получить точные данные для автоматизированного управления процессами.

4.5.3 Расчет материального баланса

Чтобы решить проблему своевременного учета расхождения материального баланса плавки и прогноза результатов плавки при нормальном ходе процесса, разработана математическая модель объекта управления (процесса выплавки кремния в РТП) с помощью ПО Python.

Блок позволяет автоматизировать расчет баланса плавки и определить количество углерода, необходимого для восстановления оксидов, химический состав готового продукта

(технического кремния) и др. Исходными данными являются: химический состав исходных сырьевых материалов (кварца, восстановителя); информация по распределению примесных элементов между фазовыми продуктами (улет, расплав, шлак); расход угольных электродов РТП; молярные и атомные массы оксидов и элементов, электрические параметры работы печи. После расчета выводится итоговое окно материального баланса, представленное в виде таблицы прихода и расхода материалов (рисунок 4.5) [30].

Химический состав кварцита и минеральной части восстановителей												
Материал	Содержание, %											
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	B ₂ O ₃	SO ₂	C _{ив}
Кварцит А	98,6	0,26	0,38	0,03	0,12	0,02	0,02	0,04	0,02	0	0	0
Кварцит В	99,4	0,06	0,14	0,1	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0	0	0
Кварцит С	97,8	0,24	0,35	0,4	0,04	0,02	0,21	0,04	0,03	0	0	0
Древесный уголь	3,5	2,3	1,9	52,3	0,05	4,1	0,15	0,15	7,1	0	0	70
Нефтекокс	14,33	12,03	3,43	2,8	1,37	0,756	0	0	0	0	0	86
Каменный уголь	17,4	9,68	27,9	15,3	0,68	0,91	0	0	0	0,051	0	55
Щепа	17,3	0,483	34,5	0,055	0	0	0	0	0	0	0	10
Электроды	44,87	17,8	31,1	2,53	1,07	0,81	0	0	0	0	9,79	93,33

Оксид	В шлак, кг	В шлак, %	Восстановитель	Масса, кг	Приход	кг	Расход	кг
1 Si	6.6093	69.1177	1 Древесный уголь	57.9269	1 Кварцит	100	Сплав	33.8696
2 SiO2	1.9752	20.6566	2 Нефтекокс	10.8807	2 Древесный ...	57.9269	Шлак	9.5623
3 Fe2O3	0.0023	0.0239	3 Каменный уголь	11.3423	3 Нефтекокс	10.8807	Газы	344.3162
4 Al2O3	0.2269	2.3730	4 Древесная щепа	62.3828	4 Каменный у...	11.3423	Микросилика	13.5308
5 CaO	0.5005	5.2343			5 Щепа	62.3828	Невязка	1.7382
6 TiO2	0	0			6 Электродна...	2.5000		
7 P2O5	0	0	Газы	кг	7 Воздух на г...	157.9844		
8 K2O	0.1215	1.2704	1 Угарный газ	151.0042				
9 Na2O	0.0365	0.3815	2 Летучие	71.6641				
10 MgO	0.0899	0.9403	3 Азот	121.6480				
11 B2O3	2.2271e-04	0.0023						
12 SO3	0	0						
13 Всего	9.5623	100						

Рисунок 4.5 – Результат работы блока расчета баланса плавки

Помимо традиционного расчета материального баланса, блок учитывает также влияние температуры в печи и гранулометрический состав кварцитов, обеспечивая выполнение следующих функций: обработка данных для вывода состава и количества образующейся микрокремнезема в зависимости от значений технологических параметров (температуры в печи, гранулометрического и химического составов кварцевого сырья) в виде таблиц и графических зависимостей (рисунок 4.6).

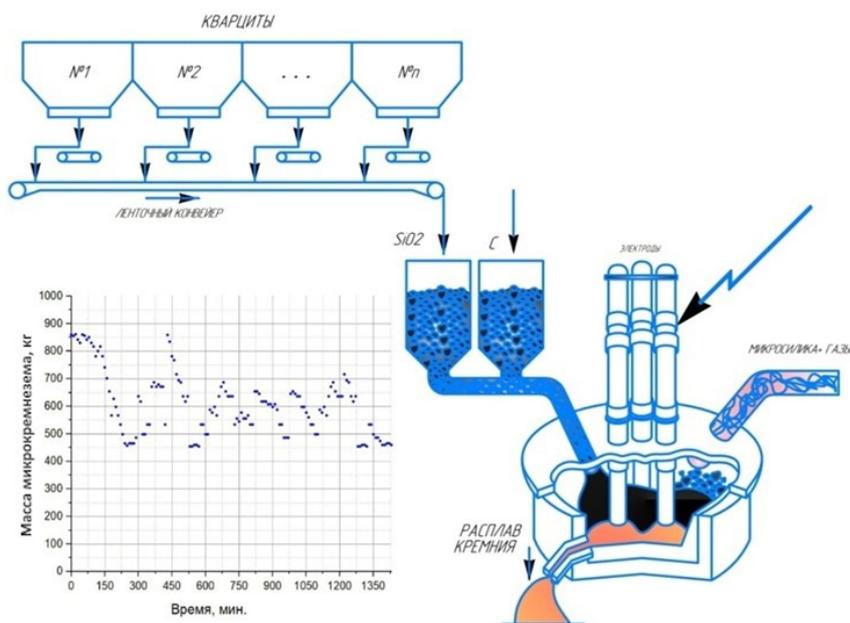


Рисунок 4.6 – Прогнозирование выбросов микрокремнезема в зависимости от качества кварцевого сырья

Расширенный учет материального баланса позволяет заранее оценивать возможные сценарии развития процесса на основе текущих данных о сырье и оперативных изменениях в производственной цепочке. Это делает возможным предотвратить критические отклонения в процессе, своевременно корректируя параметры плавки для достижения оптимальных результатов [4].

4.5.4 Интерфейс

Интерфейс системы представляет собой настольное приложение, однако его можно модифицировать в формат веб-приложения или службы для уведомлений о состоянии печи через мобильные устройства.

Программа работает по следующему алгоритму: сначала из базы данных загружаются номинальные значения параметров для выбранного режима работы, которые используются для выявления нарушений. Затем используется база правил для пересчета и анализа значений признаков и весовых функций. Результат вычислений показывает вероятность наличия или отсутствия соответствующего нарушения в процессе карботермического восстановления и предоставляется пользователю в числовом и графическом виде. На рисунке 4.7 представлено главное окно приложения. В левой части окна отображены кнопки переходов в окна анализа хода углеродного, электродного и электрического режимов плавки, а также блоки материального баланса плавки, анализа качества кварцевого сырья и анализа выбросов микрокремнезема. В центральной части окна отображается основная информация для оператора.

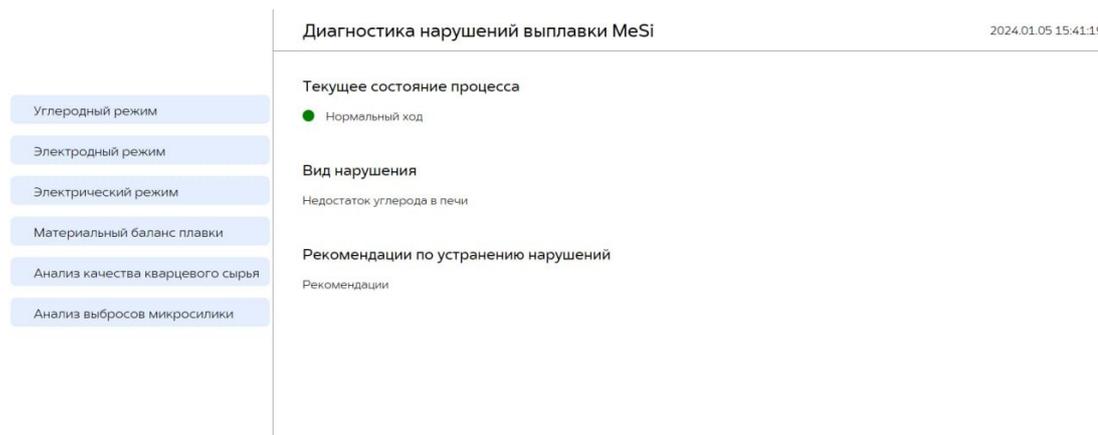


Рисунок 4.7 – Вид интерфейса системы диагностики

4.6 Экономическая эффективность проекта

Для производства металлургического кремния в РТП основные расходуемые ресурсы представлены сырьевыми компонентами (кремнезем, углеродистые восстановители и электроды), а также электрической энергией, необходимой для непосредственного плавления компонентов шихты, а также, для поддержания рабочей температуры и предварительной обработке сырьевых материалов. Себестоимость металлургического кремния, таким образом, определяются ценами на сырьевые компоненты (около 30% причем особенно большая доля расходуется приходится на восстановители) и электроэнергию.

Идеальные условия для достижения максимального выхода качественного кремния при минимальных затратах электроэнергии могут быть достигнуты при наличии высокого качества сырья (химический состав, физические характеристики, уровень влажности, наличие мелких частиц, однородность шихты, проницаемость и пористость и т. д.), надежного оперативного контроля технологических параметров процесса и состояния оборудования, оперативной диагностики нарушений хода технологического процесса и плана их устранения, а также учета материального и энергетического балансов [64].

Все эти вопросы позволят оперативному персоналу достичь эталонных уровней извлечения кремния и тепловой эффективности оборудования. Это отражается на технико-экономических показателях процесса, таких как потребление энергии, расход электродов и сырья.

Чтобы оценить ожидаемую отдачу от проекта автоматизации, необходимо провести предварительный анализ затрат и выгод. Однако, в проектах информационных систем предварительная оценка экономической эффективности затруднена из-за широкого охвата технологического процесса и внедрения нового функционала для отчетности и анализа, что вызывает путаницу с выявлением конкретных причин улучшения технико-экономических показателей производства.

Обычно перечисляются конкретные производственные улучшения, такие как:

- снижение себестоимости выплавки кремния;
- повышение скорости и адекватности принятия решений по управлению процессом карботермического восстановления кремния в РТП;
- прогнозирование работы печи и цеха электротермии при колебаниях качества и состава шихты;
- предоставление инженерно-технологическому персоналу детализированной информации для оценки показателей работы отдельных печей и цеха в целом;
- сокращение времени поиска необходимой информации;
- обеспечение условий для дальнейшего совершенствования и развития системы.

Для оценки эффектов и рентабельности проектов автоматизации необходимо четко определить затраты и пользу. Однако, в случае с проектами информационных систем, экономическая эффективность заранее не может быть определена из-за их основной направленности на улучшение отчетности и анализа, а также помощь в принятии решений. Оценить влияние внедрения системы диагностики производства металлургического кремния приблизительно можно на основе производственных данных.

По данным статистики ООО «РУСАЛ Кремний Урал» за 6 месяцев по каждой из 6-ти печей по причине нарушений хода технологического процесса (рисунок 4.8), суммарное время остановок колеблется в пределах от 6 до 40 часов в месяц. Исходя из этого, при оперативной идентификации и исправлении нарушений за счет внедрения системы диагностики, ожидается снижение длительности технологических простоев печей до 10 часов в месяц и менее.

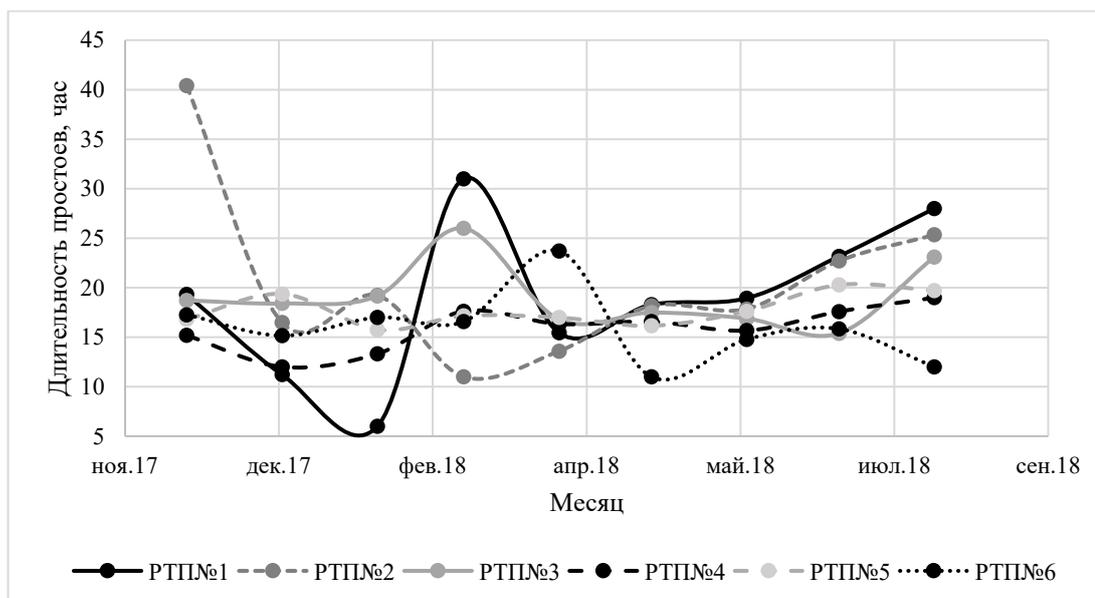


Рисунок 4.8 – Статистика технологических простоев печей ООО «РУСАЛ Кремний Урал»

Аналогично, результаты анализа среднемесячного выхода кремния высших марок за 3,5 года показывают существенный разброс от 1344 тонн до 2011,5 тонн кремния с содержанием Fe менее 0,5% (рисунок 4.9). В результате внедрения системы диагностики ожидается, что при прочих равных условиях производства, выпуск кремния высших марок стабилизируется на уровне более 1700 тонн/месяц.

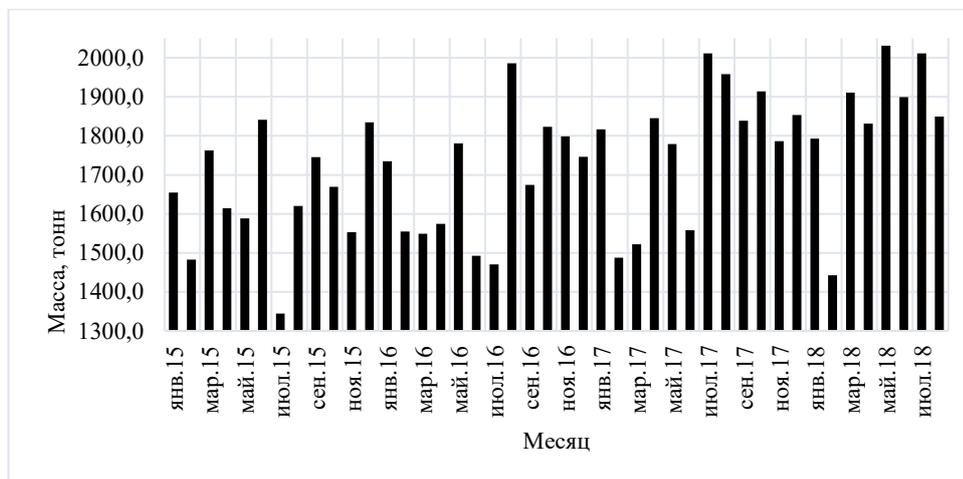


Рисунок 4.9 – Статистика выпуска кремния высших марок ООО «РУСАЛ Кремний Урал»

Планируемая стабилизация производства кремния высших марок более 1700 тонн в месяц после внедрения системы диагностики предполагает несколько важных аспектов:

Помимо отмеченных эффектов на основе анализа действующего производства кремния, оценка результатов внедрения аналогичных систем позволяет ожидать достижение следующих результатов:

- снижение удельного расхода энергоресурсов на производство металлургического кремния на 2%;
- снижение выбросов микрокремнезема за счет своевременного устранения нарушений процесса, сопровождающихся пылевыми выбросами;
- снижение расхода электродов (окисление, осыпаемость, локальное разрушение) за счет улучшения контроля технологического режима плавки на 1%.

За счет изложенных выше эффектов ожидается, что суммарная эффективность процесса повысится на 15-20%.

Что касается экономической эффективности в денежном эквиваленте, отдельно стоит отметить увеличение чистоты конечного продукта за счет контроля примесных элементов. В таблице 3 представлены производственные данные предприятия по производству технического кремния за месяц. Внедрение предлагаемой системы повысит чистоту выпускаемого из печей кремния до 99%, что позволит получить экономическую выгоду до 9 млн. рублей в месяц (таблица 4.3) [4].

Таблица 4.3 – Экономическая эффективность внедрения системы автоматизированного контроля и управления балансом кварцевого сырья

Содержание Si в конечном продукте	Цена тыс. рублей за тонну	Выпущено тонн в месяц до модернизации	Выпущено тонн в месяц после модернизации
99 и более %	165	872	2200
98-99%	160	977	0
98%	150	278	0
97-98%	140	50	0
96-97%	130	93	0
Итого		2270	2200
Стоимость, тыс. рублей		353990	363000

Выводы к главе 4

В современных условиях внедрение системы диагностики нарушений технологического процесса производства металлургического кремния необходимо для решения проблем, связанных с несвоевременной и неверной постановкой «диагноза». Разработанная система позволяет автоматически на базе экспертных знаний, оформленных в виде производционных правил определять тип нарушения режима, а также выдает оператору рекомендации в режиме советчика.

При формировании базы правил использованы производственные данные и накопленный опыт экспертов, проведен анализ основных нарушений с помощью диаграмм взаимосвязей параметров, причин, их вызывающих и действий по их устранению. В результате определено 5 нарушений, принадлежащих к углеродному, электродному и электрическому режимам. Отклонения набора параметров в соответствии с весовыми коэффициентами позволяет системе вынести вердикт о характере нарушения процесса.

Типовой список технологических параметров, контролируемых на действующих производствах, был расширен за счет разработанных методик контроля качества кварцевого сырья и объемов выбросов микрокремнезема. Таким образом, система снабжена дополнительными модулями анализа отходящих газов и качества кварцевого сырья и расчета баланса плавки. Отклонение показателей указанных модулей позволяет выявить непредусмотренные основной частью системы неполадки технологического процесса.

Предлагаемая система диагностики нарушений процесса карботермического восстановления кремния в РТП позволит повысить эффективность процесса на 15-20%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлено решение актуальной научной задачи снижения длительности простоев оборудования карботермического восстановления кремния в РТП. В ходе выполнения работы достигнуты следующие научно-технические результаты:

– На основе анализа систем управления карботермическим восстановлением кремния в РТП определены актуальные проблемы и пути их решения, а именно: для предотвращения аварий и длительных простоев РТП, а также повышения конечного продукта плавки целесообразно внедрение системы диагностики нарушений с расширенным перечнем контролируемых параметров (качества кварцевого сырья, объемов пылевых выбросов);

– Проведено лабораторное исследование зависимости термостойкости кварцевого сырья от содержания примесей для образцов кварцита, отобранных на ООО «Русал Кремний Урал», в результате определено, что примеси железа снижают температуру размягчения кварцита. На основе проведенного эксперимента и анализа существующих научных исследований обоснован выбор Fe_2O_3 в качестве основного параметра для оперативной оценки качества кварцевого сырья;

– Разработан метод оперативной оценки качества кварцевого сырья и алгоритм визиометрического анализа срезов образцов кварцита на предмет содержания примесей железа;

– На основе разработанной модели вычислительной гидродинамики (CFD) ванны РТП, водоохлаждаемого свода и газоотводящего тракта определены устойчивые зоны пылегазового, наиболее пригодные для установки газоаналитического оборудования. Непосредственно за закрытой частью шиберной заслонки формируется переходный режим течения ($Re < 10000$), что позволяет измерять концентрации компонентов отходящих газов с требуемой точностью

– В ходе теоретического и экспериментального исследования разработан способ непрерывной оценки выбросов микрокремнезема на основе полученной в ходе цифрового эксперимента с использованием CFD модели газоотводящего тракта РТП линейной взаимосвязи температуры отходящих газов (T) и содержания в них микрокремнезема (C): $C = 0,4897T - 164,93$;

– Обоснована структура системы диагностики карботермического восстановления кремния в РТП и реализован алгоритм диагностики нарушений хода технологического процесса с расширенным списком оцениваемых параметров, таких как качество кварцевого сырья, содержание микрокремнезема в отходящих газах, а также расширенного материального баланса плавки, учитывающего влияние гранулометрического состава, месторождения и температуры плавки на объемы выбросов микрокремнезема (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666844, № 2022663214).

Направлением дальнейшего развития методов повышения уровня автоматизированного контроля и управления технологическим процессом карботермического восстановления кремния в РТП может быть разработка модели предиктивного управления для прогнозирования возможных нарушений хода плавки и выработки управляющих воздействий для их предотвращения в автоматическом режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абзалов, А.В. Методика анализа предаварийных ситуаций на технологических объектах управления / А.В. Абзалов, Р.Р. Жедунов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – Т. 4. – № 24. – С. 50-58.
2. Бажин, В.Ю. Автоматизированный контроль и управление балансом шихты при производстве металлургического кремния / В.Ю. Бажин, **О.Н. Масько**, С.А. Мартынов // Цветные металлы. – 2023. – № 4. – С. 53-60.
3. Бажин, В.Ю. Оценка влияния концентрации твердых частиц в газоотводящем тракте печи на изменение температуры с помощью модели вычислительной гидродинамики / В.Ю. Бажин, **О.Н. Масько** // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2022. – Vol. 15. – № 1. – Р. 51-63.
4. Бажин, В.Ю. Автоматизированный контроль и управление балансом шихты при производстве металлургического кремния / В.Ю. Бажин, **О.Н. Масько**, С.А. Мартынов // Цветные металлы. – 2023. – № 4. – Р. 53-60.
5. Горшков, В.Ю. Внедрение MES на Аксуском заводе ферросплавов / Горшков В.Ю. // Автоматизация в промышленности. – 2017. – №10. – С. 1-14.
6. Елкин, Д.К. Анализ показателей производства кремния и ферросилиция с учетом генетических особенностей кварцитов / Елкин Д.К. Елкин К.С., Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Сивцов А.В., Кашлев И.М., Карлина А.И. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. – 2020. – №. 43. – С. 85-94.
7. Елкин, К.С. Генетические особенности кварцитов и их влияние на степень газификации кремнезема / К.С. Елкин, А.В. Сивцов, И.Д. Рожихина // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР. – 2020. – С. 306-309.
8. Зобнин Н.Н. Влияние операционных аспектов процесса восстановления оксида кремния на соотношение материального и теплового потоков в рудно-термической печи / Н.Н. Зобнин, С.О. Байсанов, А.С. Байсанов, А.М. Мусин // Вестник ИрГТУ. – 2020. – Т. 24. – № 2. – С. 444-459.
9. Истомина, А.С. Разработка информационно-логистической системы распознавания вида отклонения доменной плавки от нормального режима / А.С. Истомина, Н.А. Спирин, О.П. Онорин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58. – № 8. – С. 607-611.
10. Истомина, А.С. Разработка программного обеспечения для диагностики вида отклонения доменной плавки от нормального режима / А.С. Истомина, Н.А. Спирин, В.В. Лавров, М.А. Бякова // Вестник Томск ГУ. – 2016. – Т. 3. – № 36. – С. 97-102.
11. ИТС11-2019 Производство алюминия. – Москва, 2019. – 247 с.
12. Коренная, К.А. Информационная система крупного промышленного предприятия

по производству ферросплавов / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов // Вестник ЮУрГУ. – 2012. – Т. 23. – С. 50-57.

13. Коренная, К.А. О направления инноваций для крупных промышленных предприятий (на примере ферросплавных производств) / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – С.50-57.

14. Кувыкин, В.И. Повышение эффективности производства при использовании системы согласования материального баланса / В.И. Кувыкин, Е.В. Кувыкина, А.Е. Матвеев, А.Г. Сычев // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – Т. 4. – С. 36-40.

15. Кулаков, С.М. Автоматизированное управление сложными металлургическими агрегатами на основе метода прецедентов / С.М. Кулаков, Р.С. Койнов, М.В. Ляховец, Е.Н. Тараборина // Известия вузов. Черная металлургия. – 2022. – Т. 65. – № 6. – С. 437-446.

16. Морозов, В.В. Автоматическое управление процессами обогащения на основе контроля сортности медно-модибденовых руд / В.В. Морозов, В.М. Авдохин, З. Ганбаатар // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень. – Т.1. – С. 576-585.

17. Немчинова, Н.В. Аналитические исследования сырья и продуктов кремниевого производства / Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин, Ю.В. Сокольникова, Т.Т. Ферферова // Журнал Сибирского федерального университета. – 2017. – Т. 10. – № 1. – С. 37-48.

18. Немчинова, Н.В. Распределение примесей при рудно-термической выплавке кремния / Н.В. Немчинова, А.А. Яковлева, М.С. Леонова // Вестник ИрГТУ. – 2013. – Т. 12. – № 83. – С. 230-236.

19. Николаев А.А. Анализ гармонического состава токов и напряжений дуг в дуговой сталеплавильной печи с использованием математической модели / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, А.С. Денисевич, С.С. Рыжевол // Вестник ЮУрГУ. – 2021. – Т. 21. – № 2. – С. 72-84.

20. Онорин, О.П. Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, А.В. Павлов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2014. – Т. 8. – № 57. – С. 42-47.

21. Патент РФ № 2017611642 Российская Федерация. Система контроля положения электрода в руднотермической печи в процессе получения металлического кремния карботермическим способом; №2016663921; заявл. 19.12.2016; опубл. 07.02.2017 / Бажин В.Ю., Бойков А.В., Мартынов С.А., Никитина Л.Н.; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с.: ил. – Текст: непосредственный.

22. Патент РФ №2008141026 Российская Федерация, МПК F27D 11/10 (2006.01). Способ и система автоматического управления электрическим режимом руднотермической печи; №2008141026/02; заявл. 15.10.2008; опубл. 20.04.2010 / Максимов А.А., Логиновский О.В., Козлов А.С., Зинкевич А.С.; Максимов А.А.. – 4 с.: ил. – Текст: непосредственный.

23. Патент РФ №2035126 Российская Федерация, МПК H05B 7/09 (1995.01). Способ определения внутреннего состояния самообжигающегося электрода; №5060338/07; заявл. 25.08.1992; опубл. 10.05.1995 / Тасбулатов Т.Т., Жилов Г.М., Лифсон М.И., Ажибаев Т.Р., Бержанов Д.С., Галямов Ж.Г., Те А.Ю.; заявитель Джамбульское производственное объединение «Нодфос», Ленинградский государственный научно-исследовательский и проектный институт основной химической промышленности. – 12 с.: ил. – Текст: непосредственный.

24. Патент РФ №2179287 Российская Федерация, МПК F27B 3/28 (2000.00), H05B 7/156 (2000.01). Способ определения положения рабочего конца электрода для расходуемых электродов, используемых в электроплавильных печах; №99126809/02; заявл. 08.03.1999; опубл. 10.02.2002 / Кальграф Хелль, Меркесдаль Гуннар, Тронстад Рангар; заявитель ЭЛКЕМ АСА (NO). – 6 с.: ил. – Текст: непосредственный.

23. Патент РФ №2374337 Российская Федерация, МПК C22B 9/20 (2006.01).

25. Патент РФ №2374337 Российская Федерация, МПК C22B 9/20 (2006.01). Способ контроля межэлектродного промежутка в процессе вакуумной дуговой плавки; №2008112473/02; заявл. 31.03.2008; опубл. 27.11.2009 / Альтман П.С., Гончаров А.Е., Мединец С.В., Шамро П.В., Маковеев Д.В.; Открытое Акционерное Общество «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». – 7 с.: ил. – Текст: непосредственный.

26. Патент РФ №2378390 Российская Федерация, МПК C21C 5/52 (2006.01). Способ для определения свойств содержания дуговой печи; №2008106784/02; заявл. 28.06.2006; опубл. 22.08.2009 / Мачуллат Томас; Сименс Акциенгезелльшафт. – 11 с.: ил. – Текст: непосредственный.

27. Ремизова, О.А. Диагностика потенциально-опасных состояний при управлении технологическими процессами / О.А. Ремизова, И.В. Рудакова, В.В. Сыроквашин, А.Л. Фокин // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2014. – Т. 51. – № 25. – С. 88-94.

28. Хурэлчуун И., Морозов В.В., Николаева Т.С., Круглов В.Н. Применение визиометрического анализа гранулометрического состава руды для автоматизированного управления процессом дробления / Хурэлчуун И., Морозов В.В., Николаева Т.С., Круглов В.Н. // Руды и металлы. – 2019. – Т. 1. – С. 67-73.

29. Aasly, K. Advanced methods to characterize thermal properties of quartz / K. Aasly, T. Malvik, E.H. Myrhaug // *Infacon XI*. – 2007. – P. 381-392.

30. Agnihotri, A. Steady-State Materials and Enthalpy Balance: Applications to Ferroalloy Production and Industrial-Scale Validation / A. Agnihotri, P.K. Singh, R. Mishra, D. Mazumdar // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2019. – Vol. 72. – P. 455-473.

31. Ali, H. Production of metallurgical-grade silicon from egyptian quartz / H. Ali, M.H. El-Sadek, M.B. Morsi // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2018. – Vol. 118. – № 2. – P.143-148.

32. Andersen, V. Measurement and Evaluation of Tapping Gas Energy from the Silicon

Furnace / V. Andersen, H. Gärtner, S. Grådahl et al. // Proceedings of the Silicon for the Chemical & Solar Industry XVI. – 2022. – P. 1-14.

33. Andersen, V. Silica Fume Formation in Different Gas Atmospheres / V. Andersen, K.E. Einarsrud, A. Rasouli, G. Tranell // Applied Chemistry. – 2023. – Vol. 62. – № 10. – P. 4246-4259.

34. Andersen, V. Tapping Gas from the Silicon Submerged Arc Furnace: An Industrial Measurement Campaign / V. Andersen, H. Gaertner, S. Grådahl // Jom. – 2022. – Vol. 74. – № 11. – P. 3980-3989.

35. Andersen, V. Silica Fume Formation in Different Gas Atmospheres / V. Andersen, K.E. Einarsrud, A. Rasouli, G. Tranell // Applied Chemistry. – 2023. – Vol. 62. – № 10. – P. 4246-4259.

36. Bălan, R. Modeling and adaptive control of an electric arc furnace / R. Bălan, O. Hancu, E. Lupu // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). – 2007. – P. 163-168.

37. Bălan, R. Modeling and control of an electric arc furnace / R. Bălan, V. Mătieș, O. Hancu // American Control Conference. – 2003. – P. 3060-3064.

38. Bazhin, V. Monitoring of the Behaviour and State of Nanoscale Particles in a Gas Cleaning System of an Ore-Thermal Furnace / V. Bazhin, O. Masko // Symmetry. – 2022. – Vol. 14. – № 923. – P. 1-13.

39. Benioub, R. Optimization of the raw material input molar ratio on the carbothermal production of solar-grade silicon / R. Benioub, M. Adnane, A. Boucetta, A. Chahtou // Journal of New Technology and Materials. – 2017. – Vol. 277. – № 5619. – P. 1-7.

40. Caggiano, A. Machine learning-based image processing for on-line defect recognition in additive manufacturing / A. Caggiano, J. Zhang, V. Alfieri et al. // CIRP Annals. – 2019. – Vol. 68. – № 1. – P. 451-454.

41. Chigondo, F. From Metallurgical-Grade to Solar-Grade Silicon: An Overview / F. Chigondo // Silicon. – 2018. – Vol. 10. – № 3. – P. 789-798.

42. Desroches, D. Suitability of using a handheld XRF for quality control of quartz in an industrial setting / D. Desroches, L.P. Bédard, S. Lemieux // Minerals Engineering. – 2018. – Vol. 126. – P.36-43.

43. Dietz, M. Estimation and Analysis of the Electric Arc Furnace Model Coefficients / M. Dietz, D. Grabowski, M. Klimas, H.J. Starkloff // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2022. – Vol. 37. – № 6. – P. 4956-4967.

44. Donskoi, E. Advances in optical image analysis textural segmentation in ironmaking / E. Donskoi, A. Poliakov // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10. – № 6242. – P. 1-17.

45. Echterhof, T. Nitrogen oxide formation in the electric arc furnace - Measurement and modeling / T. Echterhof, H. Pfeifer // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. – 2012. – Vol. 43. – № 1. – P. 163-172.

46. Eron'ko, S.P. Design improvement and operation modeling of eaf gas exhaust system of a foundry shop / S.P. Eron'ko, S.M. Gorbatyuk, M.Y. Tkachev, E. V. Oshovskaya // Izvestiya Ferrous

Metallurgy. – 2019. – Vol. 62. – № 1. – P. 34-41.

47. Eronko, S.P. New Engineering Solutions in Creation of Mini-BOF for Metallic Waste Recycling / S.P. Eronko, S.M. Gorbatyuk, E. V. Oshovskaya, B.I. Starodubtsev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 287. – P.012004.

48. Folstad, M.B. Disintegration of Six Different Quartz Types during Heating to 1600 °C / M.B. Folstad, H. Yu, H. Wang, M. Tangstad // Minerals. – 2023. – Vol. 13. – № 132. –P. 1-11.

49. Folstad, M.B. Effect of Different SiO₂ Polymorphs on the Reaction Between SiO₂ and SiC in Si Production / M.B. Folstad, E. Ringdalen, H. Tveit, M. Tangstad // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2021. – Vol. 52. – № 2. – P. 792-803.

50. Folstad, M.B. Investigation of Slag and Condensate from the Charge Top in a FeSi₇₅ Furnace / M.B. Folstad, K.F. Jusnes, M. Tangstad // Minerals, Metals and Materials Series. – 2023. – P. 201-211.

51. Godoy-Rojas, D.F. Attention-Based Deep Recurrent Neural Network to Forecast the Temperature Behavior of an Electric Arc Furnace Side-Wall / D.F. Godoy-Rojas, J.X. Leon-Medina, B. Rueda et al. // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 1418. – P.1-20.

52. Gruber, J.C. Investigation of the influence of the flow in the electric arc region and free burning arc length on the heat and mass transfer in an EAF freeboard / J.C. Gruber, T. Echterhof, H. Pfeifer // 6th International Conference on Modelling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking. – 2015. – P. 1-7.

53. Gruber, J.C. Investigation on the Influence of the Arc Region on Heat and Mass Transport in an EAF Freeboard using Numerical Modeling / J.C. Gruber, T. Echterhof, H. Pfeifer // Steel Research International. – 2016. – Vol. 87. – № 1. – P. 15-28.

54. Hamzehloo, A. Direct numerical simulation of compressible turbulence in a counter-flow channel configuration / A. Hamzehloo, D.J. Lusher, S. Laizet, N.D. Sandham // Physical Review Fluids. – 2021. – Vol. 6. – № 9. – P. 1-21.

55. Hay, T. A Review of Mathematical Process Models for the Electric Arc Furnace Process / T. Hay, V.V. Visuri, M. Aula, T. Echterhof // Steel Research International. – 2021. – Vol. 92. – № 3. – P. 1-22.

56. Honaker, R. Condensation of SiO and CO in Silicon Production—A Literature Review / R. Honaker, X. Yang, A. Chandra et al. // First Global Conference on Extractive Metallurgy. – Springer International Publishing, 2018. – P. 697-716.

57. Jawahery, S. Thermophysical model for online optimization and control of the electric arc furnace / S. Jawahery, V.V. Visuri, S.O. Wasbø et al. // Metals. – 2021. – Vol. 11. – № 1587. – P. 1-26.

58. Ji, X. Large eddy simulation of shock wave/turbulent boundary layer interaction under incipient and fully separated conditions / X. Ji, X. Li, F. Tong, C. Yu // Physics of Fluids. – 2023. – Vol. 35. – P. 46106.

59. Jiang, K. Effect of Carbonaceous Reducers on Carbon Emission during Silicon Production in SAF of 8.5 MVA and 12.5 MVA / K. Jiang, Z. Chen, W. Ma et al. // *Silicon*. – 2022. – Vol. 14. – P. 7123–7133.
60. Jiang, S. Direct identification of model-based fault detection system and its application to the process of lead-zinc Smelting Furnace / S. Jiang, W. Gui, S.X. Ding, Y. Xie // *Chinese Control and Decision Conference*. – 2008. – P. 453-457.
61. Johansen, S.T. Environmental aspects of Ferro-Silicon furnace operations - an investigation of waste gas dynamics / S.T. Johansen, H. Tveit, S. Grådahl et al. // *INFACON VIII*. – 1998. – P. 1-10.
62. Kamfjord, N.E. Energy balance of a 45 MW (ferro-) silicon submerged arc furnace / N.E. Kamfjord, E.H. Myrhaug, H. Tveit, B. Wittgens // *12th International Ferroalloys Congress: Sustainable Future*. – 2010. – P. 729-738.
63. Kamfjord, N.-E. Energy Recovery at Elkem Salten. An Important Step in Emission Reductions and Improved Environmental Standard / N.-E. Kamfjord, H. Delbeck, O. Sør Dahl // *SSRN Electronic Journal*. – 2022. – № June. – P. 14-16.
64. Karabanov, S.M. Approaches to the development of environmentally friendly and resource-saving technology for solar-grade silicon production / S.M. Karabanov, D. V. Suvorov, D.Y. Tarabrin et al. // *MRS Advances*. – 2019. – Vol. 4. – P. 1937-1947.
65. Kero, I. Airborne Emissions from Si/FeSi Production / I. Kero, S. Grådahl, G. Tranell // *Jom*. – 2017. – Vol. 69. – № 2. – P. 365-380.
66. Kero, I.T. Particle Size Distributions of Airborne Particulate Matter in a Ferrosilicon Smelter / I.T. Kero, A. Blom, R.B. Jørgensen // *Infacon XVI*. – 2021. – P. 1-8.
67. Kero, I.T. Technologies with potential for climate neutral silicon production / I.T. Kero, K. Sende Osen, H. Dalaker // *SSRN Electronic Journal*. – 2022. – P.1-12.
68. Kühnen, J. Destabilizing turbulence in pipe flow / J. Kühnen, B. Song, D. Scarselli et al. // *Nature Physics*. – 2018. – Vol. 14. – № 4. – P. 386-390.
69. Legemza, J. New approach in research of quartzes and quartzites for ferroalloys and silicon production / J. Legemza, R. Findorák, B. Bul'ko, J. Briančin // *Metals*. – 2021. – Vol. 11. – № 670. – P. 1-23.
70. Lenhard, R. Numerical modelling of heat flows in the upper blast furnace of the electric arc furnace / R. Lenhard, M. Malcho, P. Ďurčanský, K. Kaduchová // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 157. – P.02025.
71. Li, W. Process fault diagnosis with model- and knowledge-based approaches: Advances and opportunities / W. Li, H. Li, S. Gu, T. Chen // *Control Engineering Practice*. – 2020. – Vol. 105. – № 104637. – P. 1-17.
72. Linnestad, K. A Hybrid Digital Twin for Optimal Si-Production / K. Linnestad, K. Hildal, L.K. Jakobsson et al. // *Silicon for the chemical and solar industry XVI*. – 2022. – P. 14-16.

73. Luckins, E.K. Homogenised model for the electrical current distribution within a submerged arc furnace for silicon production / E.K. Luckins, J.M. Oliver, C.P. Please et al. // *European Journal of Applied Mathematics*. – 2021 – Vol. 33. – № 5. – P. 828-863.
74. Luckins, E.K. Modelling alternating current effects in a submerged arc furnace / E.K. Luckins, J.M. Oliver, C.P. Please et al. // *IMA Journal of Applied Mathematics (Institute of Mathematics and Its Applications)*. – 2022. – Vol. 87. – № 3. – P. 492-520.
75. Mashkovtsev, G.A. On Mineral Resources for Ferroalloy Production / G.A. Mashkovtsev, T. V Bakanova // *KnE Materials Science*. – 2019. – Vol. 5. – № 1. – P.29-45.
76. **Masko, O.** Analysis of the state of automation of material flow control in silicon production / **O. Masko**, D. Gorlenkov // *Information, Control and Measurement Systems*. – 2020. – Vol. 13. – № 4. – P. 66-77.
77. Mombelli, D. Modeling of a Continuous Charging Electric Arc Furnace Metallic Loss Based on the Charge Mix / D. Mombelli, G. Dall'Osto, C. Mapelli et al. // *Steel Research International*. – 2021. – Vol. 92. – № 5. – P. 2000580.
78. Nemchinova, N.V. Formation of Impurity Inclusions in Silicon when Smelting in Ore-Thermal Furnaces / N. V. Nemchinova, V. V. Hoang, A.A. Tyutrin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 969. – № 1. – P. 012038.
79. Odenthal, H.J. Review on Modeling and Simulation of the Electric Arc Furnace (EAF) / H.J. Odenthal, A. Kemminger, F. Krause et al. // *Steel Research International*. – 2018. – Vol. 89. – № 1700098. – P. 1-36.
80. Okada, N. Automated identification of mineral types and grain size using hyperspectral imaging and deep learning for mineral processing / N. Okada, Y. Maekawa, N. Owada et al. // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. – № 9. – P. 1-22.
81. Oliveira, V.D. Diagnostics of Operational excellence in Silicon and Ferrosilicon Plants – a optimization and innovation step towards World Class manufacturing / V.D. De Oliveira, L. Biazutti, R.S. Faria, G. Esteves // *Infacon XV*. – 2018. – P. 25-28.
82. Panjwani, B. Combustion and mechanisms for NO_x formation in ferrosilicon electric arc furnaces / B. Panjwani, J.E. Olsen // *Conference: European Combustion Meeting*. – 2013. – P. 1-6.
83. Pavlov, A.V. Current state of ferroalloys production in Russia and CIS / A.V. Pavlov, D.Y. Ostrovskii, V.V. Aksenova, S.A. Bishenov // *Izvestiya Ferrous Metallurgy*. – 2020. – Vol. 63. – № 8. – P.526-530.
84. Production volume of silicon in Russia from 2010 to 2023 // Statista URL: <https://www.statista.com/statistics/1260898/russia-silicon-production/> (дата обращения: 03.01.2024).
85. Pudack, J. Investigation of a Novel Process for the Production of Silicon via the Selective Condensation of Silicon Monoxide / J. Pudack, J.-P. Mai, G. Raabe // *Silicon for the chemical and solar industry XVI*. – 2022. – P. 14-16.
86. Ravary, B. 2D Modeling of the Combustion and No X Formation in Furnaces Producing

Fesi / B. Ravary, S.T. Johansen // Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO. – 1999. – P. 1-6.

87. Ravary, B. Modelling combustion and thermal NO_x formation in electric arc furnaces for the production of ferro-silicon and silicon-metal / B. Ravary, C. Colomb, S.T. Johansen // Infacon XI. – 2007. – P. 499-506.

88. Ringdalen, E. Quartz-cristobalite transformation and its effect on reactions in si production: Initial studies / E. Ringdalen, D. Adisty, L. Kolbeinsen // TMS Annual Meeting. – 2014. – № 2. – P. 225-236.

89. Ringdalen, E. Softening and melting of SiO₂, an important parameter for reactions with quartz in Si production / E. Ringdalen, M. Tangstad // The 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts (MOLTEN16). – 2016. – Vol. 2016. – P. 43-51.

90. Sævarsdottir, G. Greenhouse Gas Emissions from Silicon Production -Development of Carbon Footprint with Changing Energy Systems / G. Sævarsdottir, H. Kvande, T. Magnusson // Infacon XVI. – 2021. – P. 27-29.

91. Sævarsdottir, G. Reducing the Carbon Footprint: Primary Production of Aluminum and Silicon with Changing Energy Systems / G. Sævarsdottir, T. Magnusson, H. Kvande // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2021. – Vol. 7. – № 3. – P. 1-10.

92. Sandham, N.D. Surface-sampled simulations of turbulent flow at high Reynolds number / N.D. Sandham, R. Johnstone, C.T. Jacobs // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 2017. – Vol. 85. – P. 525-537.

93. Santoro, L. A Novel Method for Evaluation of Ore Minerals Based on Optical Microscopy and Image Analysis: Preliminary Results / L. Santoro, M. Lezzerini, A. Aquino et al. // Minerals. – 2022. – Vol. 12. – № 11. – P. 1-16.

94. Senapati, D. Ferro silicon operation at IMFA - A critical analysis / D. Senapati, V.S. Uma Maheswar, C.R. Ray // Infacon XI. – 2007. – P. 371-380.

95. Silicon prices in the 2018-2023, by type // Statista URL: Average silicon prices in the United States from 2018 to 2023, by type (дата обращения: 03.01.2024).

96. Sivtsov, A. V. Specific Features of the Electric Mode of the Technological Process of Smelting of Commercial Silicon / A. V. Sivtsov, K.S. Elkin, V.A. Pan'kov, A.I. Karlina // Metallurgist. – 2021. – Vol. 64. – № 9-10. – P. 923-930.

97. Sparta, M. Electrical Conditions in Submerged Arc Furnaces: A Web-Based Simulator / M. Sparta, M. Fromreide, V.K. Risinggård, S.A. Halvorsen // SSRN Electronic Journal. – 2022. – P. 14-16.

98. Spirin, N.A. Expert system of diagnostics blast furnace process / N.A. Spirin, I.A. Gurin, A.S. Istomin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 866. – № 012043. – P. 1-7.

99. Surup, G.R. The effect of wood composition and supercritical CO₂ extraction on charcoal

production in ferroalloy industries / G.R. Surup, A.J. Hunt, T. Attard et al. // *Energy*. – 2020. – Vol. 193. – P. 116696.

100. Tangstad, M. Ferrosilicon and silicon technology // *Handbook of ferroalloys*. – Butterworth-Heinemann, 2013. – P. 179-220.

101. Tesfahunegn, Y.A. Effect of electrode shape on the current distribution in submerged arc furnaces for silicon production - A modelling approach / Y.A. Tesfahunegn, T. Magnusson, M. Tangstad, G. Saevarsdottir // *Journal of the Southern African Institute of*.

102. Timoshenko, N. Modelling of electric arc furnace off-gas removal system / N. Timoshenko, A. Semko, S. Timoshenko // *Ironmaking and Steelmaking*. – 2014. – Vol. 41. – № 4. – P.257-261.

103. Tokle, L. Assessment of Quartz Grain Growth and the Application of the Wattmeter to Predict Quartz Recrystallized Grain Sizes / L. Tokle, G. Hirth // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2021. – Vol. 126. – № 7. – P. e2020JB021475.

104. Wang, B. Simulation of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Metallurgical Process / B. Wang, S. Shen, Y. Ruan et al. // *Acta Metall Sin*. – 2020. – Vol. 56. – № 4. – P. 619-632.

105. Wang, G. A generative neural network model for the quality prediction of work in progress products / G. Wang, A. Ledwoch, R.M. Hasani et al. // *Applied Soft Computing Journal*. – 2019. – Vol. 85. – P. 1-36.

106. Wen, J. Exergy Analysis of Silicon Metallurgy in 22.5 MVA Submerged Arc Furnaces / J. Wen, H. Zhang, Z. Chen et al. // *Silicon*. – 2023. – Vol. 15. – № 4. – P. 1897-1912.

107. Yang, J. Optimal charge planning model of steelmaking based on multi-objective evolutionary algorithm / J. Yang, B. Wang, C. Zou et al. // *Metals*. – 2018. – Vol. 8(7). – № 483. – P. 1-12.

108. Zhang, H. Effect of the reactive blend conditions on the thermal properties of waste biomass and soft coal as a reducing agent for silicon production / H. Zhang, Z. Chen, W. Ma, S. Cao // *Renewable Energy*. – 2022. – Vol. 187. – P. 302-319.

109. Zhuchkov, V.I. Slags and Dusts of Ferroalloy Production / V.I. Zhuchkov, O. V. Zayakin, A. V. Sychev // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2020. – № 6. – P. 662-666.

110. Zhuchkov, V.I. The Waste of the Ferroalloy Production in Russia / V.I. Zhuchkov, L.I. Leontiev, A.V. Sychev et al. // *KnE Materials Science*. – 2020. – P. 456-461.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022666844

Программа для анализа влияния качества сырья и температурного режима РТП на образование микросилики

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Бажин Владимир Юрьевич (RU), Масько Ольга Николаевна (RU), Мартынов Сергей Александрович (RU)*

Заявка № 2022666131

Дата поступления 05 сентября 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программы для ЭВМ 07 сентября 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Handwritten signature of Yu.S. Zubov.

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022663214

**Программа расчета материального баланса плавки
технического кремния в РТП**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Мартынов Сергей Александрович (RU), Мартынова
Елизавета Сергеевна (RU), Масько Ольга Николаевна
(RU)*

Заявка № 2022661580

Дата поступления 24 июня 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 12 июля 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Ю.С. Зубов'.

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт о внедрении результатов диссертации



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

«Союзцветметавтоматика им. Топчаева В.П.»

125504, Москва, Дмитровское шоссе, 75.

Тел.: (499) 489-10-85; Факс: (499) 489-14-05.

E-mail: scma@scma.ruАдрес в интернет: <http://www.scma.ru>

ОГРН 1037700048561

Утверждаю



Генеральный директор АО «СоюзЦМА»

А.В. Дёмин

Дата: « 04 » 2023 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации

Масько Ольги Николаевны

соискателя ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Комиссия в составе:

Председатель: генеральный директор АО «СоюзЦМА» – к.т.н., Дёмин А.В.;

Члены комиссии: учёный секретарь НТС, к.т.н. Мальцев Н.Е. зав. сектором АСУ ТП технического отдела Соколов И.В., зав. лабораторией № 22, к.т.н.

Оксенгойт-Грузман Е.А. составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Система диагностики нарушений технологического процесса карботермического восстановления кремния в руднотермических печах» рассмотрены на заседании НТС АО «СоюзЦМА» выписка № 1/23 от 12.04.2023 и внедрены в производственную деятельность, а именно использованы при разработке автоматизированной системы контроля качества рудного сырья и его учета при подборе технологического режима процесса производства ферросплавов в виде:

- математической модели восстановления кремния в РТП с учетом влияния химического состава сырья и температуры процесса на объемы пылевых выбросов;
- экспериментального исследования зависимости температуры пылегазовой смеси от концентрации твердых частиц в газоходе на базе CFD модели движения пылегазовой смеси для последующего использования для создания «программного датчика» контроля выбросов микрокремнезема.

Выписка из протокола заседания Научно-технического совета АО «Союзцветметавтоматика им. Топчаева В.П.» № 1/23 от 12 апреля 2023 г.

Использование указанных результатов позволило:

- разработать автоматизированную систему учета влияния качества кварцевого сырья на объемы и характер выбросов микрокремнезема;
- корректировать на основе оперативного контроля пылевых выбросов технологический режим процесса;
- повысить общую управляемость процессом;
- снизить удельный расход энергоресурсов на производство ферросплавов;
- снизить выбросы микрокремнезема и одновременно повысить его товарную реализацию за счет увеличения содержания в пылегазовых выбросах качественного аморфного диоксида кремния. И, следовательно, рост цены конечных изделий (огнеупоры, присадки, карбид кремния, тампонажные смеси);
- сократить расхода анодов (окисление, осыпаемость, локальное разрушение) за счет улучшения контроля технологического режима плавки.

Председатель комиссии:

Генеральный директор
АО «СоюзЦМА», к.т.н.



Дёмин А.В.

Члены комиссии:

учёный секретарь НТС, к.т.н.



Мальцев Н.Е.

зав. сектором АСУ ТП ТО



Соколов И.В.

зав. лабораторией № 22, к.т.н.



Оксенгойт-
Грузман Е.А.