

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*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Бажин Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты:

Лавров Владислав Васильевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра теплофизики и информатики в металлургии, профессор;

Ремизова Ольга Александровна

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра автоматизации процессов химической промышленности, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск.

Защита диссертации состоится **26 сентября 2024 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.12 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 2, **аудитория № 1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 26 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА
Наталья Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Воробьёв, 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.-C. 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, № 2022663214).

– 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).

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 поведилось 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 рудотермических 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 по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, 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 (далее – Перечень ВАК), 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В главе 1 проведен анализ существующего состояния производства металлургического кремния и современных систем управления РТП в России и за рубежом, установлены проблемные вопросы контроля параметров технологического процесса и предложены возможные пути их решения, которые связаны с разработкой новых методов оперативной оценки текущих значений параметров и использованием их в системе диагностики нарушений процесса в рамках существующих АСУ ТП.

Во второй главе приведены результаты решения задачи оперативной оценки качества кварцевого сырья и прогнозирования влияния изменений его состава на продукты плавки. Обоснована необходимость применения комплексного решения, сочетающего внедрение системы технического зрения с расширенными расчетами материального баланса плавки. Представлен алгоритм визиометрического анализа изображений срезов кварцита, и показаны результаты его тестирования на образцах кварцевого сырья ООО «РУСАЛ Кремний Урал». Для прогнозирования влияния качества кварцита на объемы пылевых выбросов разработан алгоритм автоматизированного контроля материального баланса, дополненный зависимостями степени восстановления кремнезема от температуры и гранулометрического состава сырья различных месторождения.

В третьей главе приведены результаты исследования газодинамики отходящих газов, расчет температурных профилей ванны РТП, водоохлаждаемого свода и газоходов. Определены зоны с наименьшей турбулентностью в газоотводящем тракте печи для монтажа контрольно-измерительных приборов. Установлена зависимость между содержанием микрокремнезема в отходящих газах и температурой пылегазовой смеси.

В четвертой главе описана структура системы диагностики нарушений, реализованная на базе экспертных знаний и производственных данных, представленных в виде логических правил, дополненная блоками анализа отходящих газов, анализа кварцевого сырья и расчета баланса печи. Предложенная система предназначена для работы в режиме советчика для определения типа и причин нарушений. Приведен перечень нарушений хода технологического процесса; параметры, по которым может быть диагностировано данное нарушение и их весовые коэффициенты; предложения по устранению данных нарушений технологического режима. Определен экономический эффект от внедрения предлагаемого технического решения.

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

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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.

Анализ производственных данных процесса плавления кварцевого сырья для получения технического кремния в РТП показал, что его качество напрямую влияет на эффективность технологического процесса, объемы пылегазовых выбросов и чистоту конечного продукта. Качество руды определяется такими характеристиками, как наличие и содержание вредных примесей, прочность кусков рудной массы, минеральный и структурный составы, влажность и др.

Значительное влияние на эффективность выплавки металлургического кремния оказывает химический состав кварцитов. Одним из наиболее существенных примесных элементов является Fe, избыток которого приводит к недовосстановлению кремнезема. Причиной этого, является снижение температуры размягчения при повышении содержания оксидов железа в кварците (рисунок 1).

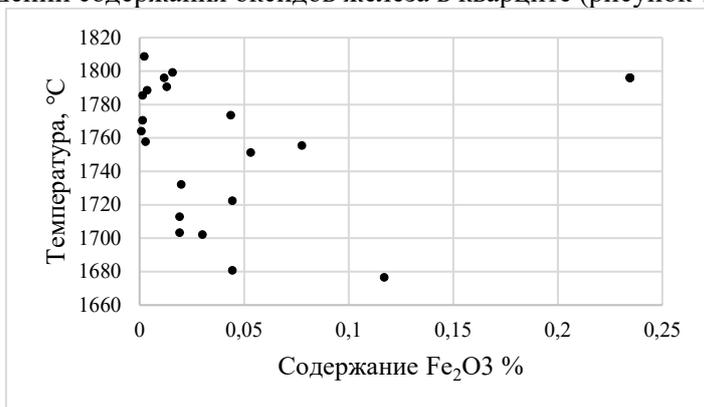


Рисунок 1 – Зависимость температуры размягчения кварцевого сырья от концентрации в нем оксидов железа

Для изучаемого состава сырья целесообразно применение алгоритмов цветовой фильтрации изображений, основанных на регистрации цветовых различий анализируемых объектов. Важным этапом разработки алгоритма является выбор цветовых признаков, которые подходят для сегментации изображений. Применяемый способ позволяет рассматривать только заранее определенные наборы палитр цветов. Для рассматриваемых образцов кварцитов двух месторождений обнаружены доминирующие цвета инородных включений – примеси Fe_2O_3 . При этом используется 2 палитры цветов, в зависимости от месторождения.

Для повышения качества анализа цветового спектра изображения целесообразно использовать комбинированный алгоритм обработки в моделях RGB и HSV. При получении цветных изображений поверхностей кварцитов была определена суммарная площадь минерала и площадь инородных включений (рисунок 2).

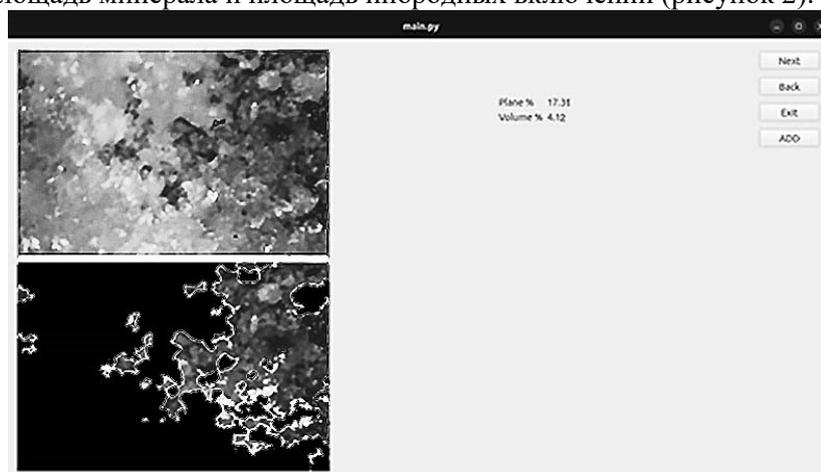


Рисунок 2 – Результат программной обработки изображений

Для перевода полученных значений в объемную долю используется формула 1.

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

где ω - объемная доля примесей в кварците;

P_s - % относительная площадь вкрапления на срезе образца;

M - число обработанных фотографий.

По результатам верификации качества работы системы посредством рентгеноспектрального анализа наблюдается довольно хорошее совпадение между геохимией образцов и визуальными характеристиками (рисунок 3).

Средняя точность оценки содержания оксида железа составляет не менее 88% (исходя из относительной погрешности измерений по двум месторождениям).

Таким образом, полученные значения погрешности измерений являются приемлемыми для оценки качества кварцевого сырья, поскольку не превышают целевое пороговое значение содержания примесей железа в кварцевом сырье, соответствующие 0,35-0,40%.

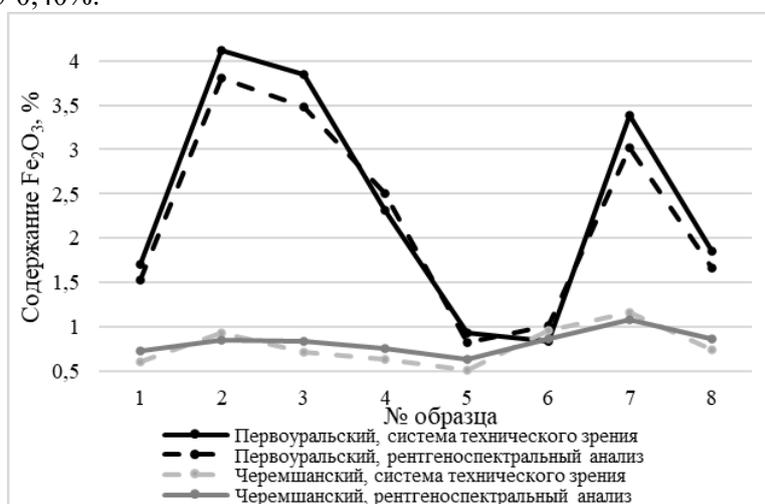


Рисунок 3 – Анализ точности системы технического зрения

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.

Применение разработанного способа позволяет своевременно реагировать на колебания качества кварцевого сырья автоматическим пересчетом шихтовой формулы и управляющим воздействием, таким как ввод дополнительной дозы кварцита с пониженным содержанием железа.

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

Анализ основных отклонений технологического процесса выплавки кремния в РТП показал, что похожие отклонения могут указывать на различные нарушения хода плавки. Таким образом, необходимо отметить, что основной задачей системы диагностики является дифференцирование нарушений технологического хода печи.

В основе предлагаемой методики лежит наличие процедуры формирования регламентированных правил, исходя из анализа взаимосвязей между отклонениями технологических параметров, неисправностями и методами их устранения. Для формирования правил были использованы технологические инструкции, а также статистические данные действующего производства кремния.

Модель объекта исследования представлена в виде системы параметров, определяющих возникновение и развитие нарушений. В общем случае ситуация Y зависит от набора параметров $X = \{X_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, N$), измеряемых количественно и/или оцениваемых качественно (N – число факторов). Оценка ситуации Y может принимать одно из следующих значений: аварийная ситуация, предаварийная ситуация, нормальный ход плавки, случайное отклонение в виде «скачка».

На рисунке 4 представлена структурная схема системы диагностики, в основе которой лежит база правил с соответствующими им логическими выводами.

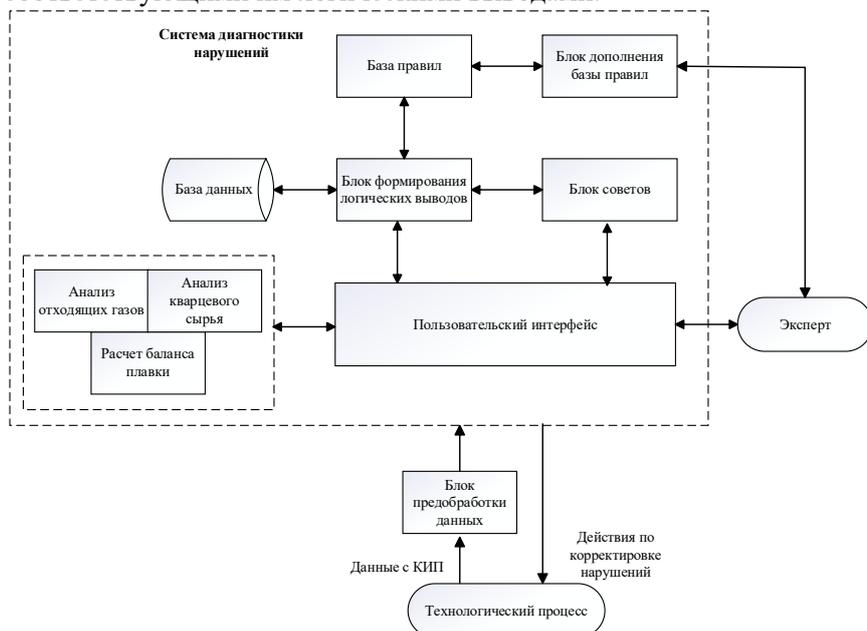


Рисунок 4 – Структурная схема системы диагностики нарушений

При нормальном технологическом режиме плавки в РТП отклонение по абсолютному значению i -го признака ΔX_i , характеризующего номинальные значения работы печи X_i^H (заданные значения нормы) и фактические X_i не должно превышать допустимого значения ΔX_i^{don} , которое является настройкой модели на конкретные условия работы печи, с учетом ее технического состояния, конструктивных и режимных параметров (2):

$$\Delta X_i = X_i^H - X_i \leq \Delta X_i^{don} \quad (2)$$

Если условие (2) выполняется, то значению i -го идентификатора признака P_i присваивается значение «1», в противном случае – значение «0».

Методом экспертных оценок для каждого созданного случая определяется один или несколько признаков X_i и весовые коэффициенты \mathcal{Y}_i для каждого из них в заданном интервале $[0, 1]$.

Можно выделить следующие основные типы нарушений режима выплавки кремния в РТП:

1. Отклонение баланса по углероду во время плавки (недостаток/избыток углерода);
2. Нарушение электродного режима печи (работа на длинных/коротких электродах/перекос напряжения на электродах);
3. Нарушение энергетического режима работы печи (колебания мощности РТП).

Характер и направления связей между технологическими параметрами и нарушениями представлены в виде причинно-следственных связей для диаграммы текущего состояния работы печи в процессе плавки (рисунки 5-7).

Поскольку набор контролируемых параметров на действующих предприятиях недостаточен для автоматизированной диагностики, в систему встроены дополнительные блоки.

Блок «Анализ отходящих газов» характеризует параметры расхода, температуры и состава отходящих газов для оценки полноты протекания физико-химических реакций. Основной функционал блока заключается в определении содержания пылевых выбросов в отходящих газах на основе взаимосвязи с температурой.

Результаты моделирования без верификации на реальном производстве не могут быть использованы для точного определения содержания микрокремнезема в отходящих газах по причине большого количества допущений при создании модели. Однако, модель адекватно предсказывает тенденцию (не противоречит теории ведения процесса) и может быть использована в системе диагностики нарушений хода выплавки кремния в РТП при фиксации изменений температуры на 18-20 °С, что соответствует изменению концентрации микрокремнезема в отходящих газах на 12-15% (рисунки 8, 9).

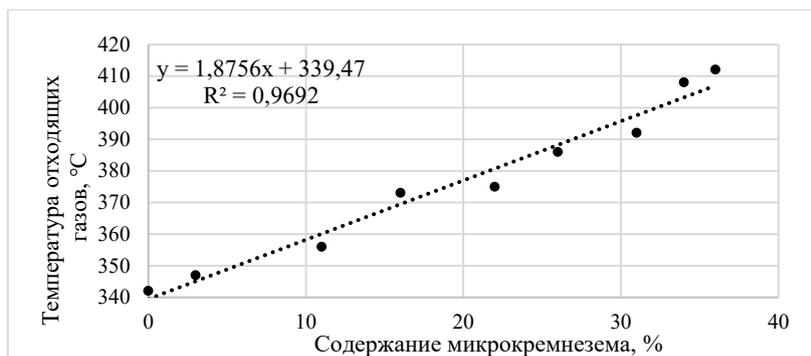


Рисунок 8 – Зависимость температуры отходящих газов от содержания твердых частиц

С целью минимизации влияния турбулентных пульсаций на показания газоаналитического оборудования было проведено исследование температурных и скоростных профилей газоотводящего тракта на базе CFD модели (рисунки 10-12). В результате чего установлено, что наиболее стабильная зона пылегазового потока находится непосредственно за закрытой частью шиберной заслонки. В этой области наблюдается переходный режим с наименьшей скоростью и наименьшим значением критерия Рейнольдса. Так как в этом месте поток испытывает наименьшее влияние турбулентных сил, это позволяет измерять содержание компонентов газовой смеси и оценивать содержание микрокремнезема по скачкам температуры с требуемой точностью.

Блок «Анализ кварцевого сырья» предназначен для оперативной оценки качества кварцевого сырья по одному из наиболее значимых показателей – содержанию примесей железа, представленных преимущественно в виде Fe_2O_3 . В основе блока лежит информация, получаемая от системы технического зрения, позволяющая оператору принять меры по корректировке пропорционального состава шихты. Алгоритм работы системы представлен на рисунке 13.

Чтобы решить проблемы учета расхождения материального баланса плавки и прогноза ее результатов при отсутствии явных

нарушений, в блоке «Расчет баланса плавки» реализована 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 и др. Исходными данными являются: химический состав исходных сырьевых материалов; информация по распределению примесных элементов между фазовыми продуктами; 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 14).

Помимо традиционного расчета, в блоке «Расчет баланса плавки» учитывается также влияние температуры в печи, гранулометрического состава кварцитов на количество образующегося микрокремнезема (в основе расчета лежат уравнения, представленные в таблице 1). При расхождении прогнозных показателей пылевых выбросов, сделанных в блоке «Расчет баланса плавки, с результатами блока «Анализ отходящих газов» система выдает сигнал тревоги и привлекает эксперта для поиска неучтенных нарушений технологического процесса.

По данным статистики ООО «РУСАЛ Кремний Урал» за 6 месяцев по каждой из 6-ти печей по причине нарушений хода технологического процесса, 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, что составляет в среднем 30%.

Диссертационная работа относится к направлению «Энергосберегающие технологии» и выполнена на кафедре АТПП и в Образовательном Центре Цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

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 качества 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 (Т) и содержания в них микрокремнезема (С): $C = 0,4897T - 164,93$;

– 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Gorlenkov, D. V. Analysis of the state of automation of material flow control in silicon production / D. V. Gorlenkov, **O. N. Masko** // Computing, Telecommunications and Control. – 2020. – Vol. 13. – No. 4. – P. 66-77. DOI: 10.18721/JCSTCS.13406

2. 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. –Т. 15. – №1. – С. 51-63. DOI: 10.18721/JCSTCS.15105

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. Мартынов, С. А. Перспективные системы управления энергетическим режимом рудно-термических печей / С. А. Мартынов, **О. Н. Масько**, С. Н. Федоров // Цветные металлы. – 2022. – №4. – С. 87-94. DOI: 10.17580/tsm.2022.04.11

4. 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. – Issue 923. – PP. 1-13. DOI: 10.3390/sym14050923

5. 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. 63-71. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.07

Свидетельства на программы для ЭВМ:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663214 Российская Федерация. Программа расчета материального баланса плавки технического кремния в РТП: №2022661580: заявл. 24.07.2022: опубли. 12.07.2022 / С.А. Мартынов, Е.С. Мартынова, **О.Н. Масько**; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт Петербургский горный университет». – 1 с.: ил. – Текст: непосредственный.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666844 Российская Федерация. Программа для анализа влияния качества сырья и температурного режима РТП на образование микросилики: №2022666131: заявл. 05.09.2022: опубли. 07.09.2022 / В.Ю. Бажин, **О.Н. Масько**, С.А. Мартынов; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт Петербургский горный университет». – 1 с.: ил. – Текст: непосредственный.

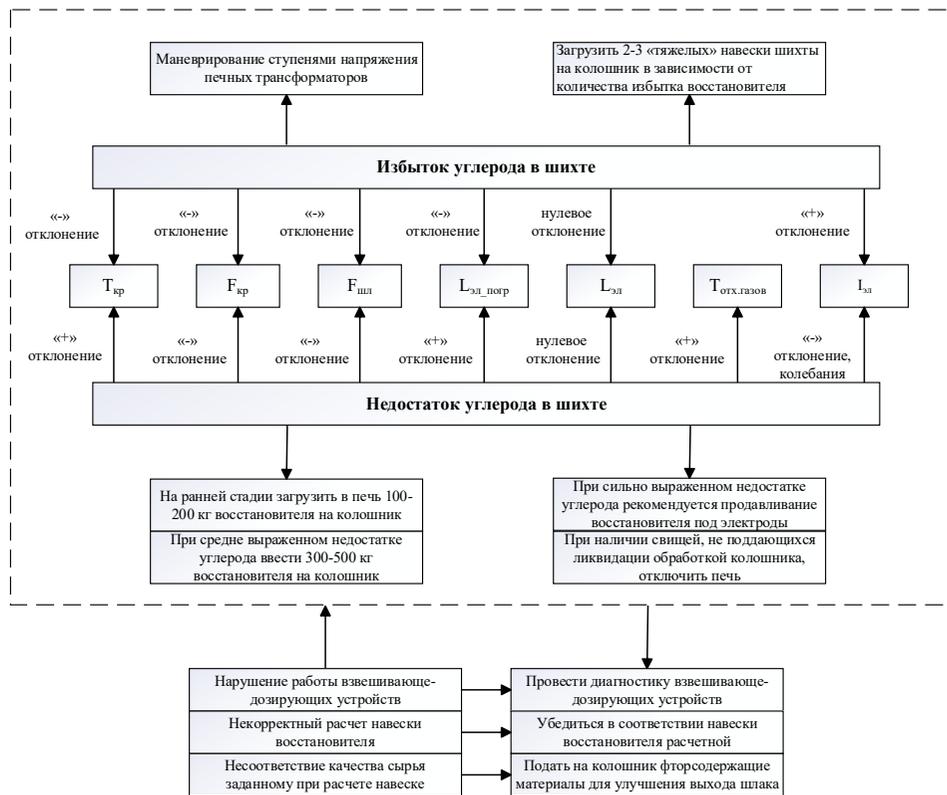


Рисунок 5 – Диаграмма взаимосвязей для нарушений углеродного режима
 $T_{кр}$ – температура расплава кремния на выходе;
 $F_{кр}$ – расход расплава кремния на выходе; $F_{шл}$ – расход шлака на выходе;
 $L_{эл_погр}$ – длина погруженной части электродов;
 $L_{эл}$ – длина электродов; $T_{отх.газов}$ – температура отходящих газов;
 $I_{эл}$ – ток нагрузки на электроды; $U_{лин}$ – напряжение на линии;
 P – мощность; $U_{эл}$ – напряжение на электродах;
 $F_{кр}$ – расход кремния на выходе; $I_{эл}$ – ток нагрузки на электродах.

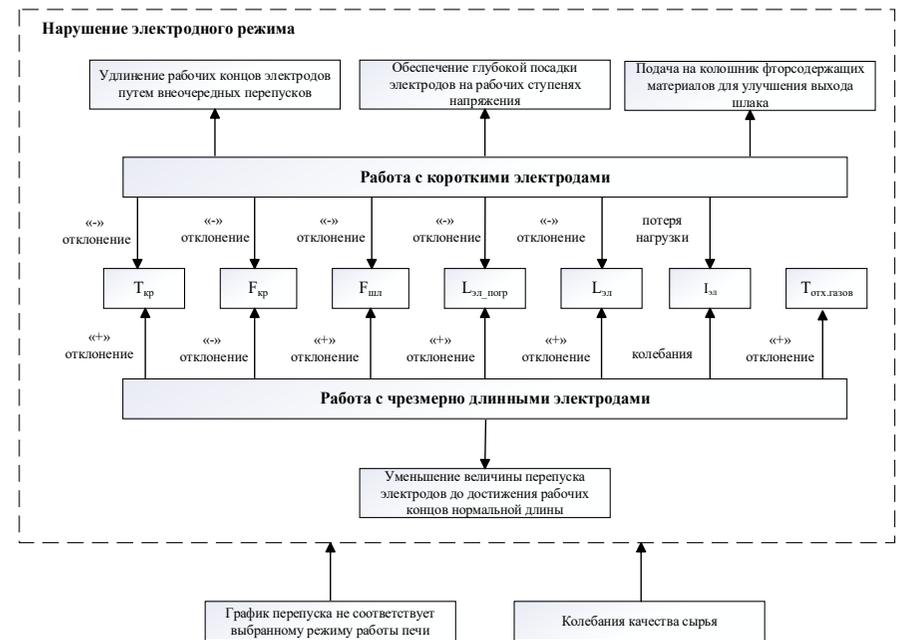


Рисунок 6 – Диаграмма взаимосвязей для нарушений электродного режима



Рисунок 7 – Диаграмма взаимосвязей для нарушений электрического режима

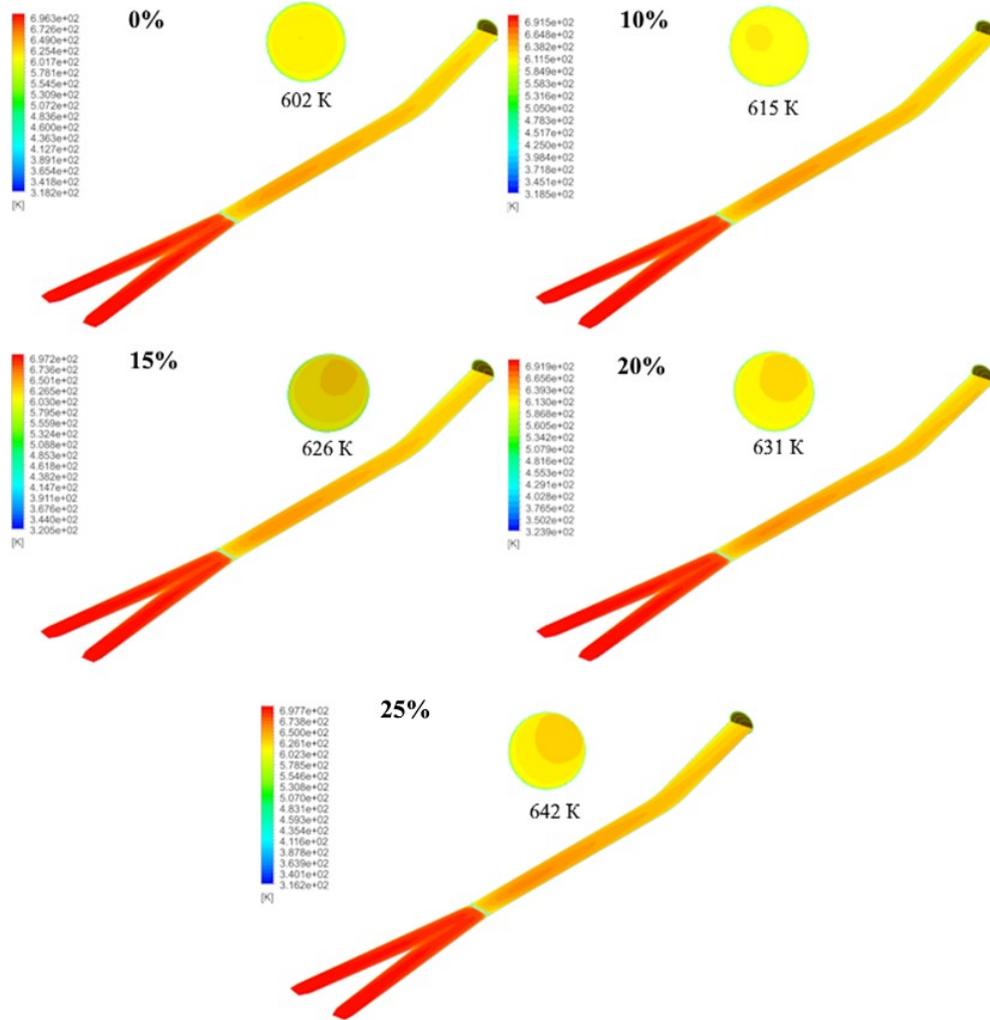


Рисунок 9 – Распределение температурных полей в газоходе при различных концентрациях SiO в отходящих газах от 0 до 25%

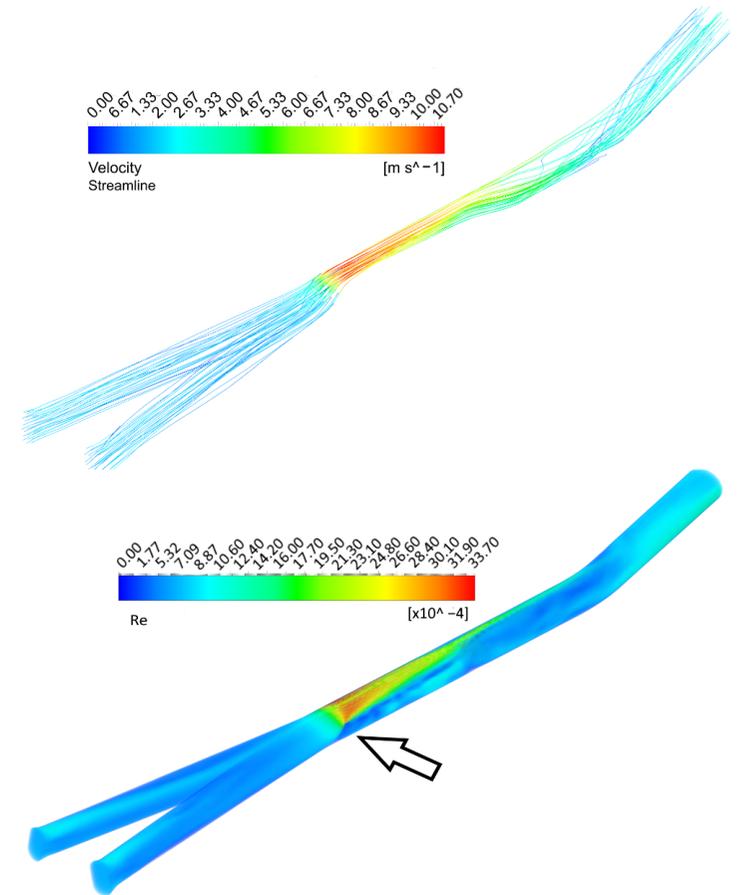


Рисунок 10 – Контуры распределения скорости и Re в газоходах

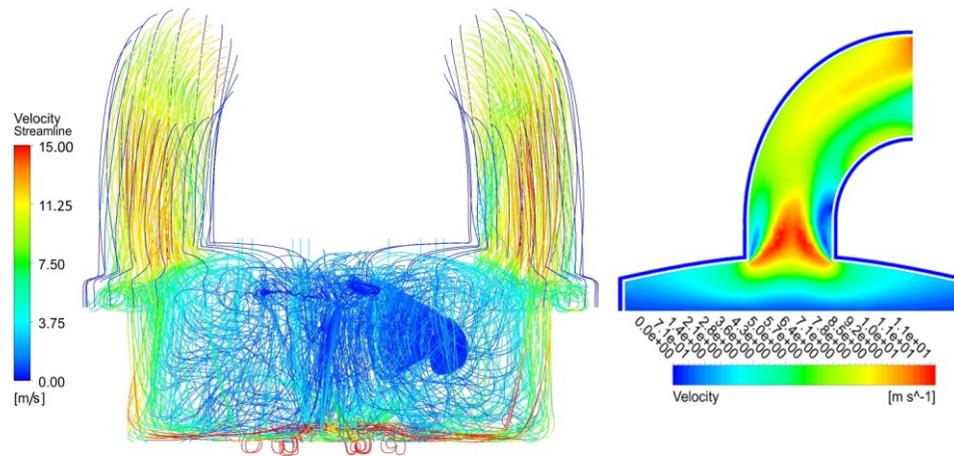


Рисунок 11 – Сечение контура распределения скорости модели ванны и водоохлаждаемого свода РТП

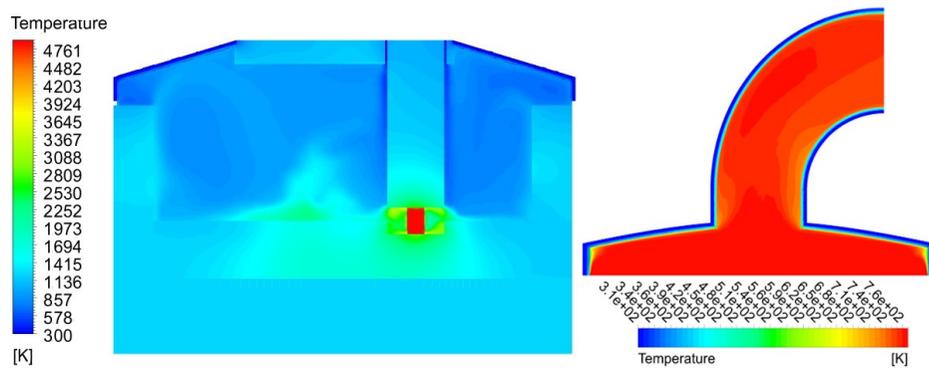


Рисунок 12 – Сечение контура распределения температуры модели ванны и водоохлаждаемого свода РТП

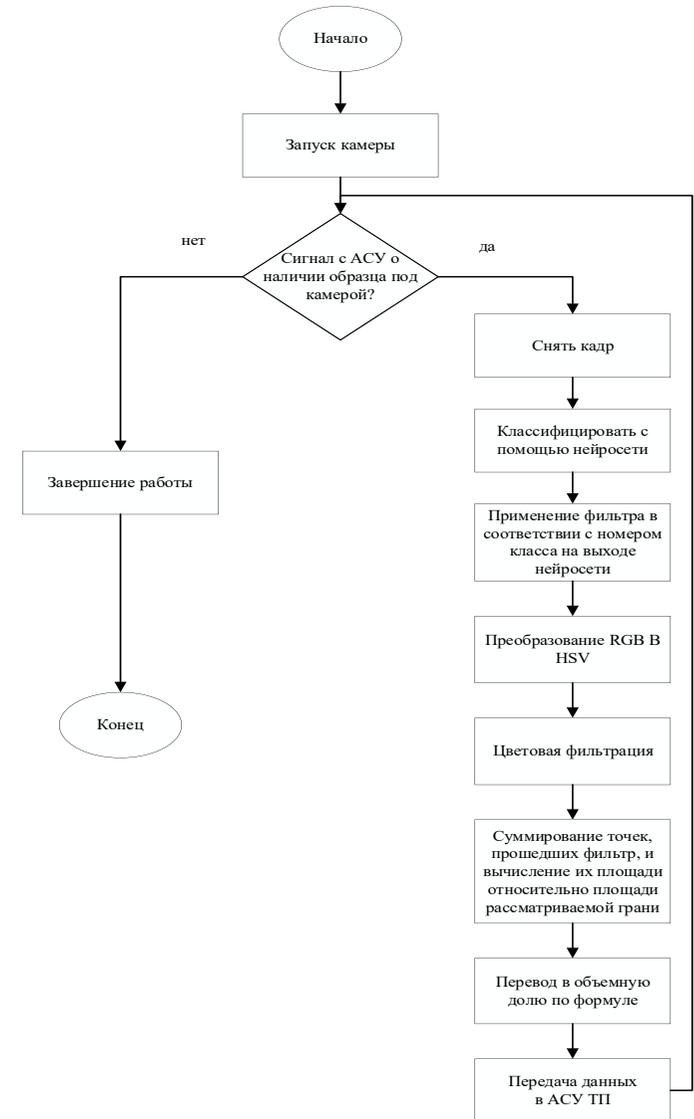


Рисунок 13 – Алгоритм визиометрического анализа образцов кварцита

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 ₃	C _ш
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 TiO	0	0			6 Электродна...	2.5000		
7 P2O5	0	0			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 14 – Результат работы блока расчета баланса плавки

Таблица 1 – Зависимость массы выбросов микрокремнезема от месторождения, фракции и температуры плавки

Месторождение	Фракция	Формула
Первоуральское	10-20 мм	$m_{\text{мк}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (3975,36 - 4,4t + 0,00122t^2))}{100}$
	20-30 мм	$m_{\text{мк}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (3046,98 - 3,4t + 0,00095t^2))}{100}$
	30-40 мм	$m_{\text{мк}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (2393,13 - 2,73t + 0,0008t^2))}{100}$
Антоновское	10-20 мм	$m_{\text{мк}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (2389,855 - 2,72t + 0,00078t^2))}{100}$
	20-30 мм	$m_{\text{мк}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (2783,32 - 3,12t + 0,00087t^2))}{100}$
	30-40 мм	$m_{\text{мк}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (1223,32 - 1,47t + 0,00041t^2))}{100}$
Черемшанское	10-20 мм	$m_{\text{мк}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (3169,72 - 3,52t + 0,00098t^2))}{100}$
	20-30 мм	$m_{\text{мк}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (2758,15 - 4,4t + 0,00087t^2))}{100}$
	30-40 мм	$m_{\text{мк}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (1743,75 - 1,96t + 0,00055t^2))}{100}$
Уватское	10-20 мм	$m_{\text{мк}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (1840,6 - 2,04t + 0,00057t^2))}{100}$
	20-30 мм	$m_{\text{мк}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (894,7 - 1,05t + 0,00031t^2))}{100}$
	30-40 мм	$m_{\text{мк}} = \frac{m_{\text{кварцита}} \cdot (100 - (2797,44 - 3,07t + 0,00084t^2))}{100}$