

## **О Т З Ы В**

**официального оппонента, кандидата технических наук, доцента Ремизовой Ольги Александровны на диссертацию Масько Ольги Николаевны на тему «Система диагностики нарушений технологического процесса карботермического восстановления кремния в руднотермических печах», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами**

### **1. Актуальность темы диссертации**

Актуальность темы исследования заключается в необходимости повышения уровня автоматизации и усовершенствования методов управления процессом карботермического восстановления кремния в руднотермических печах (РТП), что связано высокой значимостью металлургического кремния для различных отраслей промышленности и растущих требований к качеству продукции и эффективности производства. Современные системы управления недостаточно адаптированы для оперативного контроля многих критически важных параметров, что ведет к увеличению простоев оборудования, снижению качества конечного продукта и экономических показателей предприятий. Также, в условиях высоких температур и агрессивных сред руднотермических печей ручной контроль становится неэффективным и небезопасным, что повышает риск аварийных ситуаций и увеличивает экологические риски из-за выбросов микрокремнезема и других вредных веществ.

Особую значимость приобретает задача оперативного контроля качества кварцевого сырья, поскольку используемые в настоящее время методы рентгеноспектрального анализа обладают значительными задержками и не позволяют вовремя корректировать процесс. Это приводит к тому, что изменения в составе сырья не учитываются оперативно, что снижает эффективность плавки и увеличивает риск технологических простоев. Более того, высокая степень ручного вмешательства в процесс управления снижает его предсказуемость и усложняет выполнение ключевых задач по поддержанию стабильности производства.

Для того чтобы оставаться конкурентоспособными, предприятиям необходимо минимизировать технологические простои и максимально автоматизировать контроль над критическими параметрами, такими как качество сырья, температура в печах и состав отходящих газов. Традиционные методы контроля, включающие ручные измерения и запаздывающий анализ проб, уже не соответствуют современным стандартам эффективности. В условиях динамичного производства перспективным является разработка и внедрение автоматизированных систем диагностики, которые позволят оперативно реагировать на изменения в процессе, обеспечивая стабильность технологического цикла, снижение затрат и повышение качества выпускаемой продукции.

### **2. Научная новизна диссертации**

Научная новизна исследования заключается в разработке и научном обосновании новых подходов к диагностике и управлению технологическим процессом карботермического

восстановления кремния в руднотермических печах. Ключевые элементы новизны состоят в следующем:

- Разработана система технического зрения, обеспечивающая автоматизированный контроль качества кварцевого сырья с высокой точностью за счет алгоритмов цветовой фильтрации изображений. Данный метод впервые предложен для оценки содержания оксидов железа ( $Fe_2O_3$ ) в кварците непосредственно в рамках технологического процесса.
- Создана трехмерная модель вычислительной гидродинамики (CFD), которая позволила детально моделировать газодинамические процессы в руднотермических печах и определить стабильные зоны для размещения контрольно-измерительных приборов.
- Установлены новые зависимости между температурой отходящих газов и образованием микрокремнезема, что позволяет рассматривать эти параметры как взаимосвязанные для оценки и прогнозирования пылевых выбросов в процессе плавки.
- Разработана автоматизированная экспертная система диагностики, интегрирующая контроль качества сырья, материальный баланс плавки и состав отходящих газов. Впервые предложен системный подход к диагностике нарушений технологического процесса на основе анализа расширенного набора параметров.

### **3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Обоснованность и достоверность научных положений, сформулированных в диссертации, подтверждаются комплексным подходом, который включает в себя как теоретические, так и экспериментальные исследования. В основе теоретической части работы лежит анализ существующих научных исследований, включая исследования кинетики процессов, происходящих в ванне печи, что обеспечивает обоснованный выбор методов для решения поставленных задач. Использование фундаментальных научных принципов в сочетании с проверенными подходами позволило разработать адекватные модели и алгоритмы, соответствующие специфике технологического процесса карботермического восстановления кремния.

Экспериментальные данные, полученные в ходе лабораторных исследований и промышленных испытаний, полностью согласуются с теоретическими моделями, что дополнительно подтверждает их достоверность. Оценка качества кварцевого сырья и контроль температуры на различных стадиях процесса проводились с использованием современных методов анализа, что обеспечило высокую точность измерений. Применение математических моделей, созданных на основе вычислительной гидродинамики (CFD), позволило детально исследовать процессы, происходящие в печах, и определить оптимальные зоны размещения контрольно-измерительных приборов.

Лабораторная верификация данных, полученных с помощью системы технического зрения, показала высокую корреляцию предложенного метода с рентгеноспектральным анализом (погрешность 11-13%), что свидетельствует о высокой надежности и точности разработанных алгоритмов. Эти результаты подтверждают способность системы технического

зрения обеспечивать точный и оперативный мониторинг сырья в реальных производственных условиях.

Тестирование системы диагностики проводилось на промышленных данных. Результаты испытаний подтвердили способность системы своевременно выявлять отклонения в технологическом процессе карботермического восстановления кремния в РТП.

#### **4. Научные результаты, их ценность**

Научная ценность результатов исследования заключается в расширении возможностей оперативного контроля и диагностики технологического процесса карботермического восстановления кремния, что может служить также основой для более глубокого изучения сложных процессов, происходящих в руднотермических печах.

Дополнительно, научная ценность заключается в междисциплинарном подходе, который использован при разработке системы диагностики. Комбинация методов технического зрения, математического моделирования и анализа промышленных данных позволяет не только выявлять отклонения в режиме работы печей, но и своевременно принимать корректирующие меры, что значительно улучшает стабильность и предсказуемость технологического процесса.

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 2-х 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 международную базу данных и систему цитирования Scopus; получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

##### **1. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации**

Практическая значимость результатов исследования заключается в следующем:

- разработанная система диагностики нарушений технологического процесса карботермического восстановления кремния позволяет выявлять отклонения в режиме работы руднотермических печей за счет анализа расширенного набора технологических параметров, что позволяет сократить длительность технологических простоев в среднем на 30%;
- система технического зрения, разработанная в рамках работы, позволяет оперативно оценивать качество кварцевого сырья, что позволяет корректировать шихтовую формулу до попадания сырья в печь;
- результаты моделирования температурного поля в газоотводящем тракте печи и выявление устойчивых зон потока отходящих газов обеспечили оптимальное размещение контрольно-измерительных приборов, что повышает точность контроля параметров пылегазовой смеси;
- разработанные решения внедрены на АО «Союзцветметавтоматика им. Топчаева В.П.», что подтверждает их практическую значимость и востребованность в реальных производственных условиях.

## **2. Рекомендации по использованию результатов работы**

Результаты диссертации соответствуют ряду стратегий научно-технологического развития Российской Федерации, что подчеркивает их важность для индустрии. В частности, работа поддерживает цели, указанные в Указе Президента РФ от 28 февраля 2024 г. № 145. Согласно данному указу, приоритетами научно-технологического развития России являются внедрение передовых технологий, таких как высокопроизводительные вычислительные системы и интеллектуальные производственные решения. Разработанные в диссертации методы автоматизации и системы диагностики полностью отвечают этим приоритетам, так как они обеспечивают более точное управление технологическими процессами и минимизацию производственных рисков.

Рекомендации по использованию результатов исследования включают их применение в первую очередь на предприятиях металлургической промышленности, где осуществляется производство кремния и ферросплавов (ООО «РУСАЛ Кремний Урал», ЗАО «Кремний» и др.).

Результаты исследования могут быть также полезны компании ООО «Эвоматикс», которая специализируется на разработке комплексных решений для автоматизации технологических процессов в металлургии.

## **3. Замечания и вопросы по работе**

1. В диссертации не указано, как был организован процесс сбора данных для обучения CNN в системе технического зрения. Сколько данных было использовано для обучения и тестирования системы?

2. В диссертации не уточняется, как система технического зрения адаптируется к различным видам кварцитов, которые могут иметь разные оптические характеристики. Как происходит калибровка системы для работы с разными типами кварцевого сырья, и требуется ли перенастройка при смене поставщиков сырья?

3. На странице 94 приведена информация о работе системы в условиях изменяющейся температуры и качества сырья, однако не указано, как система реагирует на резкие изменения параметров. Каковы действия системы при резком изменении температуры или состава сырья, и предусмотрен ли алгоритм для быстрого реагирования на такие изменения?

4. В разделе, где рассматриваются результаты анализа микрокремнезема (с. 92), не указано, каким образом система реагирует на превышение допустимых норм выбросов. Какие конкретные действия предпринимает система при выявлении превышения концентрации микрокремнезема, и предусмотрено ли автоматическое информирование оператора о подобных инцидентах?

5. На странице 68 описывается применение системы технического зрения для оценки качества кварцита, однако не указано, как она справляется с загрязнениями на поверхности материала. Каким образом система технического зрения обрабатывает изображения в условиях загрязнений или других внешних факторов, которые могут ухудшать качество снимков, и как это влияет на точность оценки?

6. Также имеются замечания редакционного характера: на странице 6 встречается опечатка «Phyton» вместо правильного написания «Python»; в некоторых местах отсутствуют нумерация или ссылки на рисунки, упомянутые в тексте (например, на странице 74).

Высказанные замечания не оказывают существенного влияния на научную и практическую ценность проделанной работы.

Исследование полностью соответствует критериям актуальности, научной новизны, практической значимости. Результаты исследования нашли отражение в публикациях, что подтверждает их ценность. Работа включает все необходимые разделы, соответствующие требованиям кандидатской диссертации, и имеет завершённый вид. Стиль изложения характеризуется хорошей технической грамотностью, а оформление выполнено на высоком уровне.

#### 4. Заключение по работе

Диссертация «Система диагностики нарушений технологического процесса карботермического восстановления кремния в руднотермических печах», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор **Масько Ольга Николаевна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

#### Официальный оппонент:

Кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры автоматизации процессов  
химической промышленности,  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный  
технологический институт (технический университет)»

**Ремизова Ольга Александровна**

12.09.24

Тел.: +7 921-993-39-41, e-mail: remizova-oa@yandex.ru

Подпись Ремизовой Ольги Александровны заверяю:  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный технологический  
институт (технический университет)»

Адрес: 190013, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, 24-26/49

Официальный сайт в сети Интернет: <https://technolog.edu.ru/>

Контактный телефон: +7 (812) 494-93-39

Адрес электронной почты: [office@technolog.edu.ru](mailto:office@technolog.edu.ru)

Зав. Нагаевская Анна  
Курков соавтор  
Иванов