

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ГУ.12
ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА (ДОКТОРА) НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 26.09.2024 № 8

О присуждении Масько Ольге Николаевне, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Система диагностики нарушений технологического процесса карботермического восстановления кремния в руднотермических печах» по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами принята к защите 17.06.2024, протокол заседания № 4, диссертационным советом ГУ.12 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» Минобрнауки России, 199106, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, приказ ректора Санкт-Петербургского горного университета о создании диссертационного совета от 03.07.2023. № 1025 адм, с изменениями от 24.05.2024 № 780 адм.

Соискатель, Масько Ольга Николаевна, 29.07.1993 года рождения, в 2017 году окончила федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» по направлению подготовки 15.04.04. Автоматизация технологических процессов и производств.

С 01.10.2020 года по настоящее время является аспирантом очной формы обучения кафедры автоматизации технологических процессов и производств федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» Минобрнауки России.

Диссертация выполнена на кафедре автоматизации технологических процессов и производств в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» Минобрнауки России.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор **Бажин Владимир Юрьевич**, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», кафедра металлургии, заведующий кафедрой.

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; дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – **федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»**, г. Иркутск, в своем положительном отзыве, подписанном Елшиным Виктором Владимировичем, доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой автоматизации и управления, Голодковым Юрием Эдуардовичем, кандидатом технических наук, доцентом, доцентом той же кафедры, секретарем заседания, и утвержденном Корняковым Михаилом Викторовичем, доктором технических наук, доцентом, ректором, указала, что полученные Масько Ольгой Николаевной результаты дополняют и расширяют теоретические основы разработки методических подходов к автоматизации технологических процессов карботермического восстановления кремния в руднотермических печах, совершенствуя системы диагностики и контроля. Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанных автором автоматизированных решений на металлургических предприятиях и в научных организациях, занимающихся внедрением и оптимизацией автоматизированных систем управления производственными процессами, что способствует повышению их эффективности и надежности.

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 международную базу данных и систему цитирования Scopus; получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Общий объем – 3,37 печатных листов, в том числе 2,55 печатных листов – соискателя.

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Горленков Д.В. Анализ состояния автоматизации управления материальными потоками в производстве кремния / Д.В. Горленков, **О.Н. Масько** // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2020. – Том 13. – № 4. – С. 66 - 77. DOI: 10.18721/JCSTCS.13406

Соискателем проведен анализ научных источников в области автоматизированных систем управления материальными потоками на производстве кремния. Обоснована необходимость внедрения таких систем для повышения эффективности производства, выявлены узкие места процесса карботермического восстановления кремния в контексте экономии ресурсов. Определена функциональность автоматизированных систем на примерах аналогичных производств, предложен метод контроля выбросов ценных компонентов, что важно для улучшения экологических показателей. Приведены примеры организации систем автоматизации верхнего уровня на крупнейших зарубежных кремниевых предприятиях, таких как Wacker Polysilicon, REC Silicon, Xinte Energy, с рассмотрением их роли и функциональных особенностей в учете и управлении материальными потоками.

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. – Том. 15. – №1. – С.51-63. DOI: 10.18721/JCSTCS.13406 (№ 1225 Перечня ВАК ред. 25.05.2022)

Соискателем проведен цифровой эксперимент, основанный на использовании разработанной модели вычислительной гидродинамики газоотводящего тракта рудотермической печи (РТП) с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent. В ходе эксперимента были смоделированы условия с различными концентрациями твердых частиц в пылегазовой смеси, варьирующимися от 0 до 20%. В результате анализа полученных данных установлена зависимость температуры отходящих из РТП газов от содержания в них микрокремнезема.

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

Соискателем проведено исследование систем управления энергетическим режимом руднотермических печей. Проведен обзор двух статей, 11 патентов и 5 программ для ЭВМ, представляющих наибольшую перспективу для внедрения на производстве. На основе исследования патентных и литературных источников определено наиболее актуальное направление в сфере разработки систем АСУ ТП руднотермическими печами, а именно применение контроля по косвенным параметрам для ключевых характеристик технологического режима печи.

4. Bazhin, V. Monitoring of the behaviour and state of nanoscale particles in a gas cleaning system of an ore-thermal furnace / V. Bazhin., **О. Масько** // Symmetry. – 2022. – Vol. 14. – Issue 923. PP. 1-13. DOI: 10.3390/sym14050923

Бажин В.Ю. Мониторинг поведения и состояния наноразмерных частиц в системе газоочистки руднотермической печи / В.Ю. Бажин, **О.Н. Масько** // Симметрия. – 2022. – Т. 14. – № 923. С. 1-13. DOI: 10.3390/sym14050923

Соискателем проведено исследование по определению стабильных зон в газоходах РТП с помощью математического моделирования. Цели данного исследования были достигнуты с помощью средств вычислительной гидродинамики (CFD). С помощью программы ANSYS Fluent разработана модель водоохлаждаемого свода печи, а также модель, состоящая из стальных газоходов с шиберной заслонкой. Модели основаны на системе уравнений Навье-Стокса, а также методе Эйлера-Лагранжа. В результате моделирования определен переходный режим течения (Re 0-7437) за кривой шиберной заслонкой. Обосновано, что наиболее подходящее место для установки измерительного оборудования находится непосредственно за закрытой частью шиберной заслонки. Данные результаты являются приемлемыми для установки газоаналитического оборудования, поскольку при исходных скоростях газопылевого потока развитие полностью ламинарного течения невозможно.

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

Соискателем модифицированы полученные ранее зависимости массы выпускаемого кремния от химического и гранулометрического состава кварцевого сырья и температуры ведения плавки, на основе чего разработан алгоритм, позволяющий анализировать влияние качества минерального сырья на объем и характер выбросов микрокремнезема.

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: №2022663214: заявл. 24.06.2022: опубл. 12.07.2022 / С.А. Мартынов, Е.С. Мартынова, **О.Н. Масько**; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт Петербургский горный университет». – 1 с.: ил. – Текст: непосредственный.

Соискателем разработан алгоритм расчета материального баланса процесса получения металлургического кремния в руднотермических печах, позволяющий определить: состав восстановителя; количество углерода, необходимого для восстановления оксидов; химический состав готового продукта (металлургического кремния) и др.

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

Соискателем разработан алгоритм анализа влияния качества кварцевого сырья и температурного режима РТП и на образование микрокремнезема. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: сбор данных из АСУ ТП, обработку данных для вывода состава и количества образующегося микрокремнезема в зависимости от ключевых параметров (температуры в печи, гранулометрического и химического составов кварцевого сырья).

Апробация диссертационного исследования проведена на научно-практических мероприятиях с докладами:

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-обогательном 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).

В диссертации Масько Ольги Николаевны отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от:

- заместителя генерального директора по производству ООО «Силарус» **А.Л. Коблика**;
- заместителя начальника отдела проектирования ООО «Сумма технологий», к.т.н. **Пантюшина И.В.**;
- доцента факультета систем управления и робототехники, «Университет ИТМО», к.т.н. **Быстрова С.В.**;
- заведующего кафедрой «Горная электротехника и автоматика» «ДонНТУ», д.т.н. **Маренича К.Н.**;
- заместителя руководителя НИЦ АО «ГК «Русредмет» **Жукова С.В.**;
- заведующего кафедрой металлургии цветных металлов «ИрННТУ», д.т.н. **Немчиновой Н.В.**;
- заведующего кафедрой автоматизации и компьютерных технологий, «Уральский государственный горный университет», к.т.н. **Бочкова В.С.**;
- доцента кафедры пожарной безопасности технологических процессов, «Академия ГПС МЧС России», д.т.н. **Романюк Е.В.**

В отзывах дана положительная оценка диссертационного исследования, отмечена актуальность выбранной темы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования, логическое построение работы с использованием актуальной научной и статистической информации, однако отмечены ряд замечаний:

1. Вызывают вопросы данные, представленные на рисунке 1.2: указанные объемы производства кремния в России за 2023 включают кремний или все же кремний плюс ферросилиций? (**А.Л. Коблик**)
2. Каким образом была выбрана выборка кварцевого сырья для лабораторных исследований? Насколько она репрезентативна для всех возможных видов сырья, используемых в производстве? (**А.Л. Коблик**)
3. Какие математические модели использовались для трехмерного моделирования газоходов и каковы их основные ограничения? (**А.Л. Коблик**)
4. Как была проведена валидация разработанных моделей и алгоритмов? Какие метрики использовались для оценки их точности и надежности? (**А.Л. Коблик**)

5. Некоторые разделы, такие как теоретическая значимость и практическая значимость работы, могли бы быть изложены более кратко и четко, с акцентом на ключевые моменты. **(А.Л. Коблик)**

6. В работе указано, что разработан алгоритм для оценки содержания Fe_2O_3 . Планируется ли расширение алгоритма для оценки других примесей, и как это может повлиять на точность и надежность диагностики? **(И.В. Пантюшин)**

7. В описании моделей гидродинамики не совсем ясно, как именно эти модели используются для реального управления процессом. Можете ли вы предоставить примеры успешного применения этих моделей в производственных условиях? **(И.В. Пантюшин)**

8. Какие дополнительные исследования или разработки требуются для адаптации системы к другим типам руднотермических печей или производственных условий? **(И.В. Пантюшин)**

9. В главе, посвященной материальному балансу, можно было бы более подробно описать методику расчета и коррекции баланса плавки, а также влияние этого на конечный выход продукта. **(И.В. Пантюшин)**

10. Каким образом система диагностики распознает и реагирует на внезапные изменения в качестве сырья и как это отражается на управлении технологическим процессом? **(И.В. Пантюшин)**

11. Каким образом была подобрана выборка кварцевого сырья для лабораторных исследований? Насколько она репрезентативна для всех возможных видов сырья, используемых в производстве? **(С.В. Быстров)**

12. Какие математические модели использовались для трехмерного моделирования газоходов и каковы их основные ограничения? **(С.В. Быстров)**

13. Некоторые разделы, такие как теоретическая значимость и практическая значимость работы, могли бы быть изложены более кратко и четко, с акцентом на ключевые моменты. **(С.В. Быстров)**

14. В формулировке цели работы (стр. 4) не акцентируется научная составляющая исследования, которую можно было бы сформулировать на основе названия диссертационной работы. **(К.Н. Маренич)**

15. Из фразы «... на промышленных архивных данных о ходе технологического процесса выплавки металлургического кремния в печах РТП» (стр. 7) слово «промышленных» следовало бы исключить. **(К.Н. Маренич)**

16. Из графика, представленного на рисунке 1 (стр. 10) не прослеживается зависимость температуры размягчения кварцевого сырья от концентрации в нём окислов железа. Если в исследовании декларируется эта,

полученная автором, зависимость, то должна быть и соответствующая формула. **(К.Н. Маренич)**

17. График, изображённый на рисунке 3 (стр. 12) следовало бы заменить таблицей, поскольку не прослеживается закономерность в распределении по номерам образцов по оси абсцисс. Изменение их очередности приведёт к изменению формы графика. **(К.Н. Маренич)**

18. Могут ли другие примеси, кроме железа, влиять на выбор цветовых признаков для сегментации изображений? **(С.В. Жуков)**

19. При перечислении характеристик кварцевого сырья на учитывается (не упоминается) грансостав сырья, анализируемого с помощью алгоритмов цветовой фильтрации, который вполне может влиять и на качество анализа, и на погрешность измерений. **(С.В. Жуков)**

20. Структурная схема системы диагностики нарушений на стр. 14 полностью придумана автором или дополнена? **(С.В. Жуков)**

21. Стр. 17. Опечатка в слове «количество». **(С.В. Жуков)**

22. Каким образом обеспечивается надежность и точность работы контрольно-измерительных приборов в условиях высокой температуры и запыленности внутри печи? **(Н.В. Немчинова)**

23. Каковы основные показатели точности предложенного алгоритма оперативной оценки качества кварцевого сырья по сравнению с традиционными методами контроля? **(Н.В. Немчинова)**

24. Стоит уделить внимание разработке моделей предиктивного управления, что позволит еще более эффективно прогнозировать и предотвращать возможные нарушения технологического процесса. **(Н.В. Немчинова)**

25. Было бы полезным более детально описать методику проверки точности предложенных алгоритмов и их тестирование на различных производственных данных. Это позволит обеспечить более глубокую проверку надежности предложенных решений и их применимость в различных условиях. **(Н.В. Немчинова)**

26. Какие действия предпринимает система диагностики при выявлении нарушений в режиме работы руднотермической печи? Осуществляется ли автоматическая корректировка параметров или требуется вмешательство оператора? **(С.В. Бочков)**

27. Отсутствует описание структуры предлагаемой системы технического зрения, которое предполагает характеристику применяемых технических средств их моделей. **(С.В. Бочков)**

28. Что имеется ввиду под незакрытой частью шиберной заслонки? **(С.В. Бочков)**

29. Из приведенных данных, а также анализа размерностей неясно как в формуле (1) результат получается в объемных долях, если подставляется параметр в процентах. Кроме этого непонятно, для какой переменной применяется знак суммы и смысл вынесения 753,3 под знак суммы. (Е.В. Романюк)

30. Требуют серьезного теоретического обоснования зависимости, приведенные в таблице 1, согласно которым масса пыли (микрокремнезема) в отходящих газах значительно увеличивается при повышении температуры плавки. Обычно при плавке твердые вещества переходят в жидкое состояние, и при этом пылеобразование снижается. (Е.В. Романюк)

31. Анализ пылегазового потока в выбранной области за шиберной заслонкой не является корректным при проведении анализа пылегазового потока и требует серьезного обоснования. (Е.В. Романюк)

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием исследований и публикаций по теме диссертационной работы и их компетентностью в области диссертационного исследования.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

обоснована и предложена методика оперативного контроля качества кварцевого сырья с применением системы технического зрения для оценки содержания Fe_2O_3 в кварците;

выявлены функциональные зависимости температуры отходящих газов от кинетики образования микрокремнезема, что позволяет осуществлять непрерывную оценку пылевых выбросов;

получены результаты трехмерного математического моделирования температурного поля пылегазовой смеси в газоотводящем тракте РТП, которые позволили определить устойчивые зоны потока отходящих газов для оптимального размещения датчиков контрольно-измерительных приборов (КИП);

разработан и внедрен набор производственных правил для автоматизированной экспертной системы диагностики нарушений технологического процесса, которая позволяет выявлять отклонения в режиме работы печи на основе расширенного набора контролируемых параметров, включая содержание микрокремнезема в отходящих газах, материальный баланс плавки и качество кварцевого сырья.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: изложены современные концепции и методические подходы к автоматизации контроля качества кварцевого сырья и анализа газовых

выбросов в руднотермических печах, а также выявлены особенности управления технологическими процессами, обусловленные спецификой карботермического восстановления кремния и высокой степенью сложности производственных процессов;

раскрыты условия применения и ограничения методических подходов к автоматизированной диагностике и управлению технологическими процессами в металлургии, связанные с противоречиями между необходимостью оперативного контроля и сложностью измерения ключевых параметров в экстремальных условиях руднотермических печей;

изучены причинно-следственные связи между качеством сырья, параметрами технологического процесса и стабильностью конечного продукта, а также выявлены внутренние и внешние факторы, влияющие на эффективность автоматизированных систем контроля и управления в металлургии.

Личный вклад соискателя состоит в постановке цели и формулировке задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной литературы по теме автоматизации и управления технологическими процессами руднотермической плавки; выборе методов и инструментов исследования, включая визиометрический анализ и математическое моделирование; разработке метода оперативной оценки качества кварцевого сырья с применением системы технического зрения на основе алгоритмов цветовой фильтрации и обосновании использования содержания примесей Fe_2O_3 как ключевого параметра оценки качества кварцита; обосновании структуры автоматизированной экспертной системы диагностики карботермического восстановления кремния в РТП и реализации алгоритма диагностики с расширенным списком параметров, включая качество кварцита, содержание микрокремнезема в отходящих газах и расширенный материальный баланс плавки, учитывающий гранулометрический состав, месторождение и температуру плавки.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

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

создана автоматизированная экспертная система диагностики нарушений;

разработаны и внедрены в 2023 году в производственную деятельность АО «СоюзЦМА» (акт о внедрении от 12.04.2023) результаты, ставшие основой для создания анализатора выбросов микрокремнезема, включающие математическую модель восстановления кремния в руднотермических печах

с учетом влияния химического состава сырья и температуры процесса на объемы пылевых выбросов, а также зависимость температуры пылегазовой смеси от концентрации твердых частиц в газоходе, основанную на CFD-модели движения пылегазовой смеси;

обоснована структура системы диагностики карботермического восстановления кремния в РТП и реализован алгоритм диагностики с расширенным списком параметров, включая качество кварцита, содержание микрокремнезема в газах и расширенный материальный баланс плавки, учитывающий гранулометрический состав, месторождение и температуру.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория построена на современных исследованиях в области автоматизации и управления технологическими процессами, включая использование систем технического зрения и математического моделирования для контроля и диагностики технологических процессов. Эти исследования согласуются с опубликованными научными работами по теме диссертации.

идея базируется на анализе практики и обобщении передового опыта в области автоматизации технологических процессов, что позволило предложить новые методы контроля и диагностики технологических параметров;

использованы общенаучные и частно-научные методы сравнения, анализа и синтеза, а также инструменты математического моделирования и статистического анализа для подтверждения выдвинутых гипотез;

установлено соответствие полученных результатов поставленной цели исследования и отсутствие противоречий выводов и рекомендаций соискателя с положениями теоретико-методологической базы по теме диссертации.

В ходе защиты диссертации критических замечаний не было высказано.

Соискатель Масько Ольга Николаевна ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию по обоснованию положений диссертационной работы.

На заседании 26 сентября 2024 года диссертационный совет ГУ.12 принял решение присудить **Масько Ольге Николаевне** ученую степень кандидата технических наук за решение научной задачи снижения длительности технологических простоев оборудования в процессе карботермического восстановления кремния в руднотермических печах, имеющей существенное значение для развития экономики страны, и поддержания технологического суверенитета государства.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 4 доктора наук (по научной специальности рассматриваемой диссертации), участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 14, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председательствующий
заместитель председателя
диссертационного совета



Кульчицкий
Александр Александрович

Ученый секретарь
диссертационного совета

Васильева
Наталья Васильевна

26.09.2024 г.