

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
Федерального государственного
автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский
технологический университет



ИСИС

Филонов М.Р.

«22» сентября 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Пайора Владимира Алексеевича** на тему: «Разработка системы автоматического управления левитационным плавлением металлов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

1. Актуальность темы диссертации

Левитационная плавка металлов представляет собой перспективный способ получения высококачественных сплавов бесконтактным методом, что подтверждается многочисленными исследованиями и практическими разработками в данной области.

В основе данного способа плавки лежит применение вихревых токов, которые создают магнитное поле, взаимодействующее с первичным полем катушки индуктора, что позволяет удерживать металл в подвешенном состоянии. Ключевым преимуществом левитационной плавки является минимизация контакта расплава с окружающей средой, что позволяет достичь высокой чистоты расплава. Широкое внедрение этой технологии плавки в промышленность сдерживается наличием ряда технических проблем, характерных для данного способа плавки: сложностью удержания

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-78 от 09.09.25
АУ УС

расплавляемого металла в процессе электромагнитной левитации, высокими энергозатратами и риском аварийных остановок из-за контакта расплава с поверхностью индуктора.

Основные работы по данной тематике сосредоточены на совершенствовании конструкции индукторов. Вместе с тем современные достижения в области моделирования электромагнитных процессов, бесконтактных измерений и систем управления создали предпосылки для разработки системы автоматической стабилизации положения образца расплавляемого металла в индукторе с целью предотвращения контактов с его поверхностью, рассматриваемой в диссертационной работе. Внедрение данной системы позволит снизить риски аварий и улучшить качество металла, что в свою очередь, будет способствовать расширению применения левитационной плавки в различных отраслях промышленности и развитию технологий получения металлов и сплавов.

Таким образом, актуальность данной работы, как в теоретическом, так и в прикладном аспектах, не вызывает никаких сомнений. Тематика диссертации соответствует приоритетным направлениям развития технологий в рамках специальности 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

2. Научная новизна диссертации

Научная новизна диссертационной работы Пайора В.А. заключается в разработке и обосновании нового метода стабилизации положения образца металла, расплавляемого в магнитном поле во взвешанном состоянии, основанного на применении алгоритмов компьютерного зрения и методов численного моделирования магнитного поля

В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Установлена зависимость коэффициента неоднородности магнитного поля конического индуктора от положения в нем образца нагреваемого металла;
2. Предложен способ и алгоритм управления для системы автоматической стабилизации этого процесса на основе данных численного моделирования и визуального мониторинга положения расплава на основе методов компьютерного зрения;
3. Разработана и верифицирована быстродействующая численная модель распределения электромагнитного поля в коническом индукторе;

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается:

- корректностью использования технологических основ левитационного плавления и теории магнитного поля при постановке научно-технической задачи; в ходе этого процесса проанализировано большое количество теоретических и практических результатов, представленных в трудах российских и зарубежных ученых;
- грамотным теоретическим обоснованием использования методов численного моделирования на базе магнитного поля индуктора;
- корректностью осуществления компьютерных экспериментов, связанных с численным моделированием магнитного поля индуктора, выполненных с использованием специализированного ПО (Gmsh, GetDP и Agros2D).

Система технического зрения для мониторинга положения расплава в индукторе разработана с применением современных методов цифровой обработки изображений. Описан метод, и представлены результаты валидации предложенного алгоритма на программно-синтезированной выборке изображений.

Выводы по результатам работы логически связаны с поставленными задачами и охватывают весь цикл исследования — от постановки проблемы и анализа существующих решений до построения моделей, их верификации и практического применения. Структура диссертации позволяет продемонстрировать методическую завершённость каждого этапа работы. Предложенный метод стабилизации положения расплава в индукторе верифицирован сопоставлением результатов численного моделирования, экспериментальных измерений, что подтверждает высокую степень достоверности научных положений.

4. Научные результаты, их ценность

Научная значимость диссертации Пайора В.А. подтверждается его вкладом в развитие теории и практики управления технологическим процессом плавления металлов в магнитном поле во взвешенном состоянии. В работе предложен и верифицирован на реальных экспериментальных, а также синтезированных данных алгоритм

компьютерного зрения для определения положения расплава в индукторе в режиме реального времени, что позволяет оперативно контролировать процесс и предотвращать контакт расплава с поверхностью индуктора. Построена быстродействующая численная модель электромагнитного поля в индукторе при различных положениях расплава, которая может быть использована для стабилизации его положения. Установлена зависимость выталкивающей силы, действующей на металл в магнитном поле, от его положения в индукторе, а также экспериментально определены численные значения коэффициента, характеризующего выталкивающее действие магнитного поля на металл. Ценность полученных результатов заключается в возможности повышения надёжности и энергоэффективности процесса левитационной плавки, снижения риска аварийных остановок и улучшения качества получаемых металлов и сплавов.

Результаты диссертационного исследования в достаточной мере освещены в 7 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 и в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных рецензируемой научной литературы Scopus. Получено 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

5. Теоретическая и практическая значимость диссертации

- Предложено применение численной модели магнитного поля в составе системы управления левитационной плавки металла для стабилизации положения расплавляемого металла в индукторе;
- Установлена зависимость выталкивающей силы, действующей на металл в магнитном поле, от его положения в индукторе, а также экспериментально определены численные значения коэффициента, характеризующего выталкивающее действие магнитного поля на металл;
- Разработана система автоматической стабилизации расплавляемого образца металла в индукторе на основе данных визуального мониторинга его положения с применением алгоритмов технического зрения;
- Предложен способ нахождения управляющих воздействий на основе метода Нелдера — Мида и быстродействующей численной модели;

– Показана возможность снижения затрат энергии за счет динамического изменения силы тока в индукторе системой стабилизации в зависимости от положения образца в индукторе до 6,8 %;

– Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, реализующей указанную систему технического зрения (свидетельство о госрегистрации № 2023662416),

– Результаты исследований использованы в деятельности компании АО «Моделирование и Цифровые двойники», акт внедрения от 28.03.2025).

–

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Полученные результаты могут быть рекомендованы к промышленному внедрению на предприятиях металлургической и обрабатывающей промышленности, занимающейся получением и обработкой металлов высокой степени чистоты и прецизионных сплавов. Результаты работы уже внедрены в деятельность компании АО «Моделирование и Цифровые двойники», что подтверждено советующим актом от 28.03.2025. Также, разработанные алгоритмы технического зрения и модели магнитного поля могут быть использованы в научных центрах и университетах, занимающихся проблемами получения чистых металлов и их сплавов, автоматизации и численного моделирования технологических процессов, в том числе НИР на базе Санкт-Петербургского горного университета.

7. Замечания и вопросы по диссертации

1. Название диссертационной работы сформулировано слишком широко, с учетом того, что работа посвящена управлению положением левитирующего металла, без учета фазовых переходов и магнитогидродинамических процессы, протекающие в расплаве.
2. Из текста диссертации не до конца понятны причины выбора подхода к стабилизации положения металла с использованием системы управления на основе модели? В чём заключаются ограничения традиционных методов регулирования, которые делают их недостаточными для решения данной задачи?
3. В разделе 3.4 диссертации отсутствует информация, для какой аппаратной платформы были рассчитаны показатели времени

обработки одного кадра? Почему для оценки времени обработки кадра видеопотока выбрано среднее значение, а не максимальное?

4. В работе не до конца раскрыты вопросы моделирования различных условий съёмки изображения образца в индукторе.
5. Не понятно, почему для оценки адекватности работы системы технического зрения выбрана метрика IoU, а не оценка погрешности определения положения образца, которая могла бы иметь большее значение для задачи стабилизации металла в индукторе?
6. В тексте диссертации нет исчерпывающей информации о том, какие уравнения легли в основу моделирования процесса левитационной плавки в программном обеспечении Gmsh.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки, проведенных соискателем исследований в области автоматизации технологического процесса управления левитационной плавкой металлов во взвешенном состоянии.

8. Заключение по диссертации

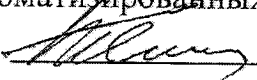
Диссертация Пайора Владимира Алексеевича является законченной научно-квалификационной работой, все защищаемы положения диссертации прошли апробацию на международных конференциях, по теме исследования опубликовано 8 научных трудов, из них в изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (перечень ВАК) – 2, в международных реферативных базах данных и системах цитирования Scopus, Web of Science – 3, получено 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

Диссертация «Система автоматического управления левитационным плавлением металлов», представленная к защите на соискание степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, полностью соответствует 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 императрицы Екатерины II от 20.05.2021 №953 адм., а ее автор – **Пайор Владимир Алексеевич** заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по

специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Отзыв на диссертацию и автореферат диссертации **Пайора Владимира Алексеевича** обсужден и утвержден на заседании кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», протокол № 1 от 2 сентября 2025 года.

Отзыв составлен доктором технических наук, заведующим кафедры автоматизированных систем управления Темкиным Игорем Олеговичем.

Заведующий кафедры автоматизированных систем управления
Доктор технических наук  Темкин И.О.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Почтовый адрес: 119049, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1

Телефон: +7 (495) 955-00-32

Адрес электронной почты: kancela@misis.ru