

На правах рукописи

Пайор Владимир Алексеевич



**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ ЛЕВИТАЦИОННЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ
МЕТАЛЛОВ**

*Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствам*

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

Санкт-Петербург – 2025

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

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Бойков Алексей Викторович

доктор технических наук, доцент

Кульчицкий Александр Александрович

Официальные оппоненты:

Шишляков Владислав Федорович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», институт киберфизических систем, директор;

Дударенко Наталия Александровна

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», факультет систем управления и робототехники, доцент;

Ведущая организация - федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва.

Защита диссертации состоится **17 сентября 2025 г. в 13:00** 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 17 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА
Наталия Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Плавка металлов во взвешенном состоянии является перспективным способом получения высококачественных сплавов бесконтактным методом. Исследуемый метод позволяет предотвратить контакты с поверхностью индуктора и обеспечивает равномерное нагревание металла. Для эффективной реализации процесса левитационной плавки необходимо осуществление контроля технологических параметров: сила и частота тока, подаваемого на индуктор, и температура расплавляемого металла.

Анализ существующих систем управления плавлением металлов во взвешенном состоянии показал, что непосредственно контролируется только температура нагреваемого металла и частота тока в индукторе. При этом основные проблемы плавления металлов во взвешенном состоянии связаны с возникновением нежелательных контактов расплавляемого металла с тиглем, приводящих к аварийному прерыванию технологического процесса.

Для поддержания образца расплавляемого металла в индукторе в стабильном состоянии необходимо осуществлять оперативный контроль его положения. Таким образом, разработка системы автоматического управления положением расплавляемого образца в индукторе для предотвращения его контактов с поверхностью индуктора и уменьшения энергозатрат на удержание металла в состоянии левитации является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в изучение и развитие процесса левитационной плавки внесли следующие ученые: Фогель А.А., Кухтецкий С.В., Ячиков И.М. и Демидович В.Б. Известны зарубежные авторы, занимающиеся научными и прикладными задачами, связанными с проблемой электромагнитной плавки металлов во взвешенном состоянии: *S.Spitans*, *E.Baake*, *B.Zering* и *L.Panaje*. Решением научных задач связанных с индукционным удержанием металлов и их плавкой во взвешенном состоянии занимались такие научные организации как: Магнитогорский государственный технический университетим. Г.И. Носова, Институт химии и химической

технологии СО РАН, *Ambrell Corporation* (США) *ALD Vacuum Technologies GmbH* (Германия).

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 22–71-0029.

Объект исследования – система автоматического управления плавлением металлов во взвешенном состоянии.

Предмет исследования – метод автоматической стабилизации положения металла в индукторе на основе численной модели.

Цель работы – снижение амплитуды колебаний, совершаемых материалом в коническом индукторе для предотвращения его контактов с поверхностью индуктора.

Идея – для снижения амплитуды вертикальных колебаний, совершаемых нагреваемым металлом в магнитном поле конического индуктора необходимо разработать систему управления, использующую данные о положении образца и численную модель для расчета управляющих воздействий.

Цель работы подразумевает решение следующих задач:

1. Провести анализ существующих систем автоматического и автоматизированного управления процессом левитационного плавления металлов, литературный и патентный поиск научно-технических решений;
2. Построить численную модель для определения взаимного влияния положения расплава и напряженности электромагнитного поля с целью оценки влияния на энергетическую эффективность нагревания металла в магнитном поле;
3. Разработать алгоритм компьютерного зрения для определения положения расплава в индукторе в режиме реального времени;
4. Разработать алгоритм управления и схему системы автоматического управления напряженностью электромагнитного поля в индукторе на основе численной модели.

Научная новизна работы:

- Установлена зависимость выталкивающей силы, действующей на металл в магнитном поле, от его положения в коническом индукторе;
- Экспериментально определены численные значения коэффициента, характеризующего выталкивающее действие магнитного поля на металл;

- Обосновано применение технического зрения и разработано алгоритмическое обеспечение для подсистемы оперативного мониторинга положения расплава в индукторе;

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» по пунктам:

П. 2. «Автоматизация контроля и испытаний»;

П. 8. «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников»;

П. 12. «Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана программа для автоматического определения положения образца металла в коническом индукторе (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №22-71-00029 от 07.06.2023);

2. Предложен способ стабилизации положения металла в индукторе на основе данных численного моделирования магнитного поля индуктора и текущего положения металла в режиме реального времени;

3. Построена быстродействующая численная модель электромагнитного поля в индукторе установки левитационной плавки металла при различных положениях расплава в индукторе для использования в составе системы стабилизации его положения (акт внедрения АО «МЦД» от 26.03.2025).

Методология и методы исследования. Работа выполнена с применением методов научного обобщения и анализа патентов и литературных источников.

Исследование зависимости геометрической конфигурации электромагнитного поля от положения расплава и тока индуктора осуществлялось с применением методов численного моделирования

с применением программных пакетов *Agros2D*, *Gmesh* и *GetDP* реализующих метод конечных элементов (далее – МКЭ).

Разработка алгоритма системы технического зрения базировалась на физических основах геометрической оптики и теории цифровой обработки сигналов и осуществлялась с применением библиотеки *OpenCV* на языке программирования *Python*. Также была проведена экспериментальная оценка скорости работы алгоритма распознавания образца металла в индукторе.

Определение величин управляющих воздействий осуществлялось на основе численной модели магнитного поля индуктора путем оптимизации методом Нелдера-Мида.

Экспериментальные исследования выполнялись на разработанном лабораторном стенде на базе Образовательного Центра Цифровых Технологий (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Применение алгоритма определения положения расплава в индукторе системой технического зрения для расчета управляющих воздействий в режиме реального времени при левитационной плавке позволяет обрабатывать изображения с частотой от 40 до 60 кадров в секунду.

2. Применение численной модели магнитного поля индуктора в составе системы управления левитационным плавлением металлов позволяет уменьшить амплитуду колебаний металла за счет регулирования частоты и силы тока в индукторе.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием стандартных методов математического и численного моделирования, сходимостью моделируемых и экспериментальных зависимостей, результатами отладки системы технического зрения на экспериментальном стенде.

Апробация результатов. проведена на 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных. За последние 3 года принято участие в 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных:

XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (май 2022 года, г. Санкт-Петербург),

XI форумов вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства (декабрь 2022 года, г. Минск),

XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка 2023» (февраль 2023 года, г. Москва),

XXVIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР – 2023» (май 2023 года, г. Томск),

XX Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (декабрь 2024 года, Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в постановке цели, формулировке задач и методики задач научного исследования; проведении научного анализа литературных источников; проведении лабораторных исследований; разработке алгоритмов и реализации программного обеспечения системы автоматического управления; научном обобщении полученных результатов исследований и подготовке публикаций.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени 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, на соискание ученой степени доктора наук, в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

Структура работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, словаря терминов, списка литературы, включающего 108 **наименований**. Диссертация изложена на 126 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков и 10 таблиц.

Благодарности

Автор глубоко признателен научным руководителям - кандидату технических наук Бойкову Алексею Викторовичу и доктору технических наук Кульчицкому Александру Александровичу, а также директору Образовательного Центра Цифровых Технологий Горного Университета доктору технических наук Жуковскому Юрию Леонидовичу - за всестороннюю поддержку в научной работе, включая помощь в планировании и реализации экспериментальных исследований, плодотворное обсуждение полученных результатов и содействие в подготовке публикаций для диссертационного исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ существующих проблем управления технологическим процессом плавления металлов во взвешенном состоянии. Приведены результаты литературного и патентного поиска по определению степени проработанности обозначенной научной проблемы.

Во второй главе рассмотрены методы оперативного контроля положения расплава в индукторе в режиме реального времени, приведено обоснование применения системы технического зрения (СТЗ) для мониторинга положения металла в индукторе. Представлено описание метода стабилизации положения расплава в индукторе на основе численной модели электромагнитного поля и данных о текущем положении расплава металла.

В третьей главе представлены результаты исследования зависимости коэффициента неоднородности электромагнитного поля от положения расплава в индукторе, полученные в ходе экспериментов с численной моделью напряженности электромагнитного поля индуктора, построенной на основе метода конечных элементов.

Обоснован выбор метода мониторинга положения и характера движения образца металла в индукторе бесконтактным методом и предложен алгоритм системы технического зрения для определе-

ния положения образца металла в индукторе. Приведены результаты оценки быстродействия алгоритма и точности сегментации образца. Дана оценка возможности применения алгоритма технического зрения в составе системы автоматического управления процессом плавки металла во взвешенном состоянии в режиме реального времени.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований по построению и верификации упрощённой численной модели электромагнитного поля индуктора для применения в составе системы управления. Предложен метод автоматической стабилизации положения расплава в индукторе на основе данных численного моделирования электромагнитного поля индуктора, бесконтактного мониторинга положения расплава СТЗ и оптимизации величин управляющих воздействий алгоритмом Нелдера-Мида. Приведена оценка потенциального экономического эффекта от внедрения предложенной системы управления за счет предотвращения потерь, вызванных аварийными остановками технологического процесса из-за контакта расплава с индуктором.

В заключении сформулированы выводы по результатам представленных в работе теоретических и экспериментальных исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Применение алгоритма определения положения расплава в индукторе системой технического зрения для расчета управляющих воздействий в режиме реального времени при левитационной плавке позволяет обрабатывать изображения с частотой от 40 до 60 кадров в секунду.

Взаимодействие высокочастотного магнитного поля с металлом приводит к возникновению в нем вихревых токов, которые вытесняют поле из пространства, занимаемого металлом. Силовое взаимодействие вихревых токов и магнитного поля выталкивает металл из зоны с большей плотностью поля в область с меньшей плотностью, называемую потенциальной ямой.

Удержание металла во взвешенном состоянии возможно только в неоднородном магнитном поле. При этом состоянии леви-

тации образца металла в магнитном поле индуктора достигается при соблюдении равенства силы тяжести и силы Лоренца, действующей на металл.

Данное условие может быть представлено выражением (1):

$$mg = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\pi \rho f}} A P_s S, \quad (1)$$

где m – масса металла, г,

g – ускорение свободного падения, м/с²,

μ – магнитная проницаемость среды, Н/А²,

ρ – электрическое сопротивление металла, Ом,

f – частота электромагнитного поля, Гц,

P_s – мощность, передаваемая металлу, отнесенная к единице его поверхности, Дж,

S – площадь поверхности металла, м²,

A – безразмерный коэффициент, характеризующий неоднородность магнитного поля у поверхности металла.

Для исследования зависимости величины коэффициента неоднородности электромагнитного поля A от положения расплава в индукторе построена численная модель электромагнитного поля индуктора методом конечных элементов (МКЭ) в программных пакетах Gmsh и GetDP. Схема конического индуктора приведена на рисунке 1. На рисунке 2 представлена расчетная сетка конического индуктора, выполненного в Gmsh.

В результате серии численных экспериментов была установлена зависимость коэффициента неоднородности магнитного поля (A) от изменения положения в индукторе образцов алюминия различных размеров.

Коэффициент A рассчитывался из полученного значения силы Лоренца по формуле (2).

$$A = \frac{F_L}{\pi r^2 \mu \left(\frac{N}{L}\right)^2 I^2}, \quad (2)$$

где A – коэффициент неоднородности электромагнитного поля, зависящий от геометрической конфигурации поля вокруг образца,

F_L – выталкивающая сила Лоренца, действующая на единицу объема металла, обусловленная взаимодействием индукционных токов в образце с внешним магнитным полем, Н,

I – сила тока в индукторе, А,

r – радиус образца, м,

N – количество витков индуктора, шт,

L – длина проводника индуктора, м,

μ – магнитная проницаемость материала образца, Г/м.;

На рисунке 3 представлены графики изменения значения коэффициента A от положения в индукторе для образцов алюминия различных размеров.

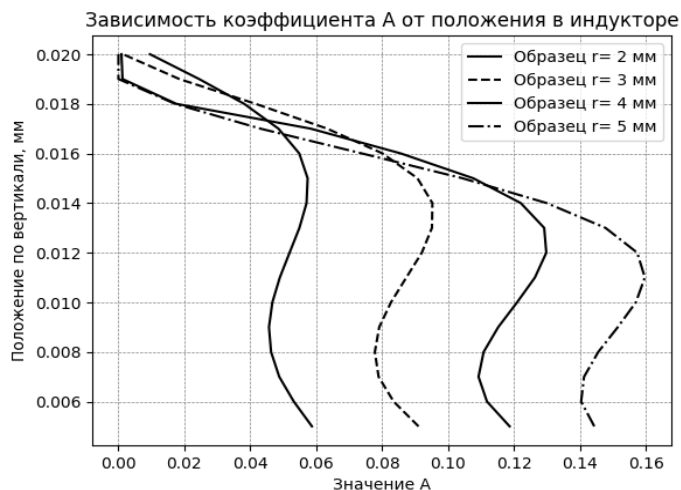


Рисунок 3 – Графики зависимости значений коэффициента A от положения в индукторе по вертикали для образцов алюминия разных размеров

Анализ существующих систем плавления металлов во взвешенном состоянии показал, что для обеспечения стабильного протекания процесса необходимо исключить возможные контакты расплавленного металла с поверхностью индуктора для предотвращения загрязнения образца. В существующих установках оперативный контроль положения расплава не осуществляется.

Для определения положения в индукторе образца металла в индукторе в процессе плавления предложен метод, основанный на применении алгоритмов технического зрения, осуществляющей анализ видеопотока, получаемого с видеокамеры. Последовательность обработки кадра состоит из следующих этапов: захвата и предварительной обработки видеопотока, сегментации и детектирования объектов, на этом этапе выполняется сегментацию образца металла в кадре и анализ его контура для определения его центроиды. Блок-схема алгоритма определения положения образца металла в индукторе представлена на рисунке 4.

Для сегментации расплава на видео применяется метод оптического потока, основанный на допущении, что пиксели, соответствующие одному и тому же физическому объекту, будут иметь схожие значения интенсивности между кадрами. Определение положение расплавляемого образца металла осуществлялось методом контурного анализа полученной маски сегментации с применением детектора Кэнни для нахождения контура расплава. Пример маски сегментации образца, полученной методом оптического потока, а также контура распознанного образца приведены на рисунке 5. Предложенный алгоритм для системы технического зрения был реализован на языке программирования Python с применением библиотеки OpenCV (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2023662416).

Оценка производительности и точности сегментации образца металла алгоритмом системы технического зрения проводилась на экспериментальном стенде (рисунок 6).

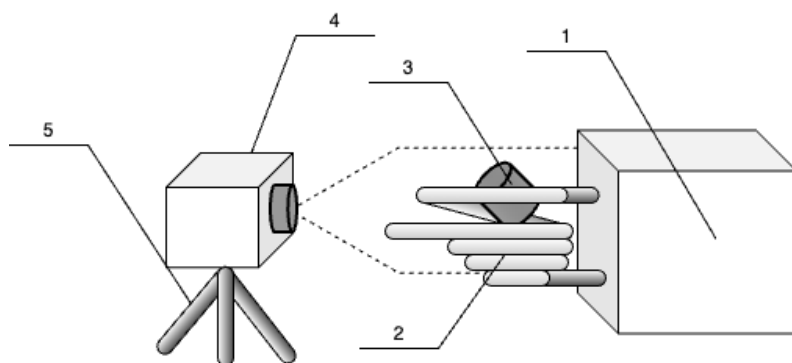


Рисунок 6 – Схема экспериментального стенда. 1 – Индукционный нагреватель ТВЧ; 2 – индуктор; 3 – образец алюминия; 4 – камера; 5 – штатив

Для оценки возможности применения предложенного алгоритма в составе системы управления был проведён эксперимент по измерению средней скорости обработки одного кадра. В качестве времени обработки кадра фиксировался промежуток от момента получения кадра с камеры до определения координаты в индукторе.

В ходе серии экспериментов было установлено среднее время обработки одного кадра системой технического зрения в многопоточном режиме составило 16,67 мс, что позволяет обрабатывать видеопоток с частотой 60 кадров в секунду. Точность сегментации образца алгоритмом системы технического зрения оценивалась на основе метрики IoU на выборке кадров воспроизводящий различные искажения образца и сцены (блики, изменение формы образца, недостаточное освещение). Общая адекватность предложенного алгоритма сегментации подтверждается средним значением $\overline{IoU} = 0.82$ по разнородной выборке, что свидетельствует о работоспособности метода сегментации на основе оптического потока для решения задачи позиционирования образца в широком диапазоне условий.

2. Применение численной модели магнитного поля индуктора в составе системы управления левитационным плавлением металлов позволяет уменьшить амплитуду колебаний металла за счет регулирования частоты и силы тока в индукторе.

В результате исследования существующих систем управления (СУ) плавлением металлов во взвешенном состоянии было выявлено, что для обеспечения стабильного положения образца в конструкции индуктора применяется противовиток и сообщается избыточная мощность. Такой подход приводит к колебаниям левитирующего образца при внесении материала в индуктор.

Таким образом, задача стабилизации положения расплава в коническом индукторе может быть сформулирована как задача нахождения пары значений частоты (f) и силы тока (I) при которых металл будет удерживаться электромагнитным полем в состоянии равновесия, условием которого является равенство равнодействующих выталкивающей силы магнитного поля и силы тяжести, действующей на металл.

Предложенная система управления состоит из 3 ключевых модулей:

- Система технического зрения с предложенным алгоритмом для отслеживания положения расплава по вертикали.

- Упрощенная 2D hp-FEM модель, решающая уравнения Максвелла в квазистационарном приближении для расчета для расчета равнодействующей выталкивающих сил магнитного поля.

- Блок оптимизации для генерации управляющих сигналов.

На рисунке 7 представлена структурная схема системы управления левитационной плавкой на основе численной модели.

Для реализации управления в реальном времени была построена упрощенная двумерная численная модель в программном пакете Agros2D, среднее время одного расчета составило 43,26 мс.

Получаемые координаты образца передаются в упрощенную двумерную численную модель электромагнитного поля индуктора в качестве исходных параметров для перестроения расчетной сетки для расчета равнодействующей выталкивающих сил магнитного поля.

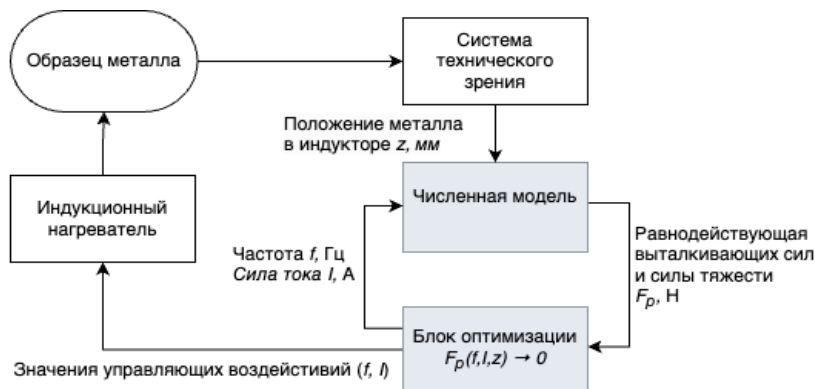


Рисунок 7 – Структурная схема системы управления процессом плавки во взвешенном состоянии

Распределение электромагнитного поля в индукторе для различных положений образца алюминия представлено на рисунке 8. На рисунке 9 представлена диаграмма распределения равнодействующей выталкивающих сил магнитного поля, действующей на образец алюминия с радиусом 5 мм в зависимости от его положения в индукторе. Красной линией на диаграмме обозначено значение, соответствующее силе тяжести, действующей на образец. Участки, на которых равнодействующая выталкивающих сил магнитного поля приближается к величине силы тяжести, образует область устойчивой левитации образца металла.

Нахождение оптимальных значений силы и частоты тока для каждого конкретного положения образца в индукторе осуществлялось методом оптимизации Нелдера-Мида. Данный алгоритм реализуется итерационно. На каждом шаге выполняются последовательные операции с вершинами симплекса. Первоначально производится сортировка вершин симплекса по значениям целевой функции. Для этого вершины упорядочиваются таким образом чтобы выполнялось условие, описываемое выражением (3).

$$F(X_1) \leq F(X_2) \leq \dots \leq F(X_n + 1), \quad (3)$$

где X_1 становится вершиной с наилучшим значением функции $F(X_{\text{лучш.}})$, а X_{n+1} - вершиной с наихудшим значением $F(X_{\text{худ.}})$.

В двумерном случае ($n=2$), соответствующем управлению током и частотой, симплекс представляет собой треугольник, где X_2 является промежуточной вершиной. В процедуре оптимизации учитываются следующие ограничения (4).

$$I_{max} \leq 500 \text{ А}; f_{max} \leq 60000 \text{ Гц}, \quad (4)$$

где I_{max} – максимальный ток индуктора, А,

f_{max} – максимальная частота ток индуктора, Гц,

Так же в блоке оптимизации устанавливается ограничение числа итераций N_{max} . Блок оптимизации на основе алгоритма Нелдера - Мида был реализован на языке Python.

Верификация предложенного метода стабилизации положения расплава в магнитном поле индуктора на основе численной модели и данных визуального мониторинга осуществлялась лабораторном стенде. Эксперимент состоял из двух серий опытов, в которых при помощи системы технического зрения фиксировались изменения положения расплава в индукторе относительно межвиткового зазора.

В рамках эксперимента были рассмотрены два режима работы установки левитационной плавки: с активной системой стабилизации положения расплава и без нее. Из графиков на рисунке 10 видно, что при активной системе стабилизации положения в индукторе, амплитуда колебаний, совершаемых металлом, сокращается и его положение стабилизируется в зоне устойчивой левитации.

Для полученных амплитуд колебаний образца металла в индукторе был рассчитан коэффициент затухания колебаний по формуле (5)

$$\gamma = \frac{\delta}{T}, \quad (5)$$

где T – период колебаний, с,

δ – усредненный логарифмический декремент колебаний.

Рассчитанные по результатам эксперимента значения коэффициента затухания в свободном режиме и с системой стабилизации для образцов с радиусом (r) 3–5 мм приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения коэффициента затухания для образцов радиусом (r) 3–5 мм

γ	r=3	r=4	r=5	r=6
Свободный режим	0.052	0.056	0.061	0.071
Стабилизация	0.17	0.27	0.34	0.42

Доказанная способность системы к эффективному демпфированию колебаний образца обосновывает внедрение разработанной адаптивной системы управления с целью повышения стабильности работы промышленных установок левитационной плавки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационной работы проведено изучение процесса плавления металлов в магнитном поле во взвешенном состоянии, в ходе которого были выявлены актуальные проблемы управления положением расплавляемого металла в индукторе. Для снижения числа аварийных остановов, вызванных контактом расплавляемого металла с поверхностью индуктора и повышения энергоэффективности процесса плавления целесообразно внедрение системы оперативного мониторинга и контроля положения металла в индукторе;

1. На основе анализа существующих установок левитационного плавления металлов в электромагнитном поле были выявлены актуальные проблемы управления положением расплавляемого металла в индукторе. Для снижения числа аварийных остановов, вызванных контактом расплавляемого металла с поверхностью индуктора и повышения энергоэффективности процесса плавления целесообразно внедрение системы оперативного мониторинга и контроля положения металла в индукторе;

2. В результате исследования воздействия электромагнитного поля конического индуктора при различных конфигурациях (частоты и силы тока) на образцы алюминия различных размеров. В ходе численных экспериментов с использованием МКЭ модели электромагнитного поля установлена зависимость величины вытал-

кивающей силы, действующей на металл от его положения образца металла в индукторе;

3. Предложен метод оперативного мониторинга положения расплава в индукторе на основе анализа видеопотока с применением алгоритма компьютерного зрения, позволяющего определять положение расплава с частотой до 60 кадров/сек, что делает его пригодным для применения в составе системы управления;

4. Разработан алгоритм управления магнитным полем индуктора на основе численной модели и данных о текущем положении расплавляемого образца металла в индукторе. Предложена схема системы автоматической стабилизации положения металла на основе численной модели и алгоритма оптимизации Нелдера-Мида позволяющая уменьшить амплитуду колебаний металла.

Ожидаемый экономический эффект выражается в снижении числа аварийных остановов технологического процесса плавки во взвешенном состоянии из-за контактов металла с индуктором.

На основании проведенного исследования можно рекомендовать адаптировать разработанную систему автоматического управления левитационным плавлением металлов для многоиндукторных плавильных установок, что позволит повысить производительность и эффективность процесса плавки. Для этого необходимо решить проблему оптимального расположения расплава в каскаде индукторов и минимизировать негативный эффект взаимной индукции, а также разработать алгоритмы, которые будут учитывать взаимодействие между несколькими индукторами и обеспечивать стабильное положение расплава в них. Перспективным направлением является создание комплексной системы управления, которая сможет координировать работу всех индукторов в установке, обеспечивая равномерный нагрев и стабильное удержание металла во взвешенном состоянии.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. Кульчицкий, А. А. Численная модель как компонент системы управления электромагнитной плавкой металлов во взвешенном состоянии / А. А. Кульчицкий, Л. А. Русинов, М. Ю. Шестопалов, **В. А. Пайор** // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2024. – Т. 70. – № 96. – С. 100-103.

2. Кульчицкий, А. А. Анализ влияния неоднородности электромагнитного поля на удерживание расплава при левитационной плавке / А. А. Кульчицкий, **В. А. Пайор** // Современные наукоемкие технологии. – 2025. – № 2. – С. 60-64;

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

3. Boikov, A. Synthetic data generation for steel defect detection and classification using deep learning / A. Boikov, **V. Payor**, R. Savelev, A. Kolesnikov // Symmetry. – 2021. – Т. 13. – № 7.

4. Boikov, A. The Present Issues of Control Automation for Levitation Metal Melting. Т. 14 / A. Boikov, **V. Payor**. – 2022.

5. Boykov, A. V. Machine vision system for monitoring the process of levitation melting of non-ferrous metals / A. V. Boykov, **V. A. Payor** // Tsvetnye Metally. – 2023. – Т. 2023. – № 4.

Публикации в прочих изданиях

6. **Пайор, В. А.** Методика определения положения металла во взвешенном состоянии в высокочастотном индукторе / В. А. Пайор, А. В. Бойков // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2023. – С. 127-130.

7. **Пайор, В. А.** Система технического зрения для контроля левитационной плавки / Пайор В.А. // XI Форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства : сборник материалов, г. Минск, 12-16 декабря 2022 г. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 208-210.

Свидетельства на программы для ЭВМ:

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662416 Российская Федерация. Программа для автоматического определения положения образца металла в конечном индукторе. Заявка № 2023661512: заявл. 05.06.2023: опубл. 07.06.2023 / А. В. Бойков, **В. А. Пайор**; заявитель Санкт-Петербургский горный университет.— 1 с.

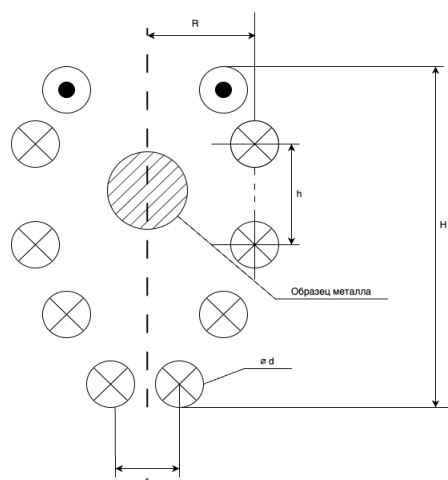


Рисунок 1 – Схема конического индуктора с противовитком
 h – высота межвиткового зазора
 d – внешний диаметр сечения проводника индуктора
 H – высота катушки индуктора
 R – верхнего витка (основания) индуктора
 r – нижнего витка индуктора

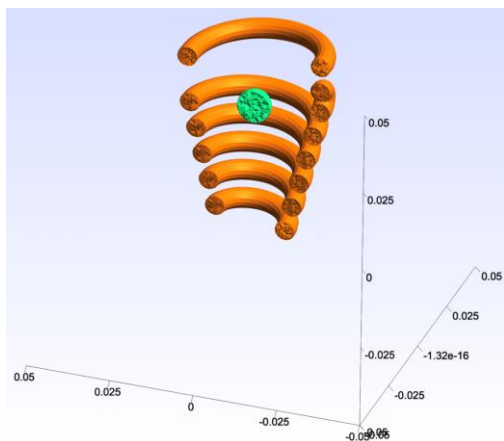


Рисунок 2 – Расчетная сетка конического индуктора, сгенерированная в Gmesh

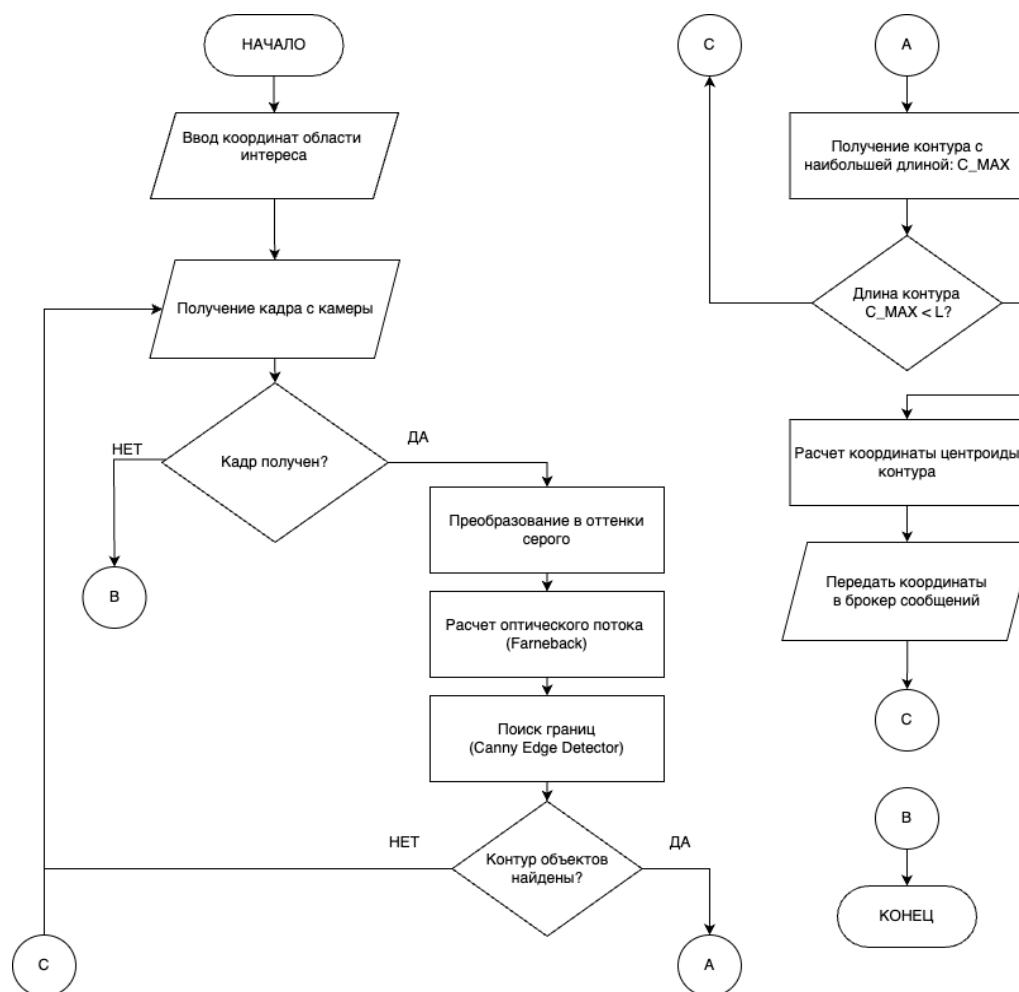


Рисунок 4 - Блок-схема алгоритма определения положения образца металла в индукторе

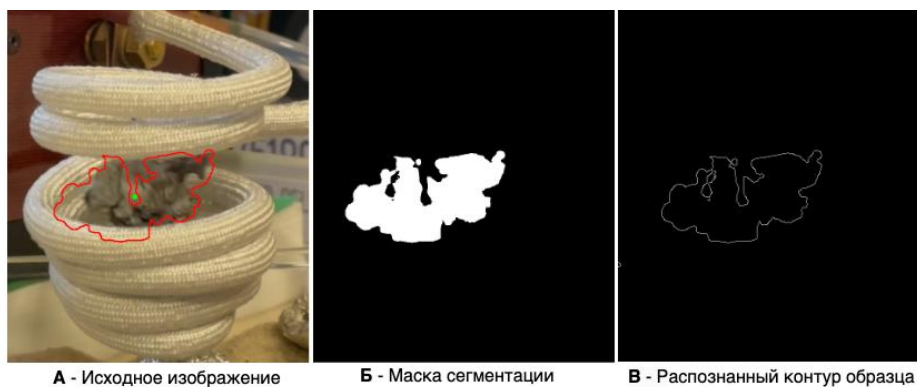


Рисунок 5 - Результаты распознавания образца металла в индукторе системы технического зрения

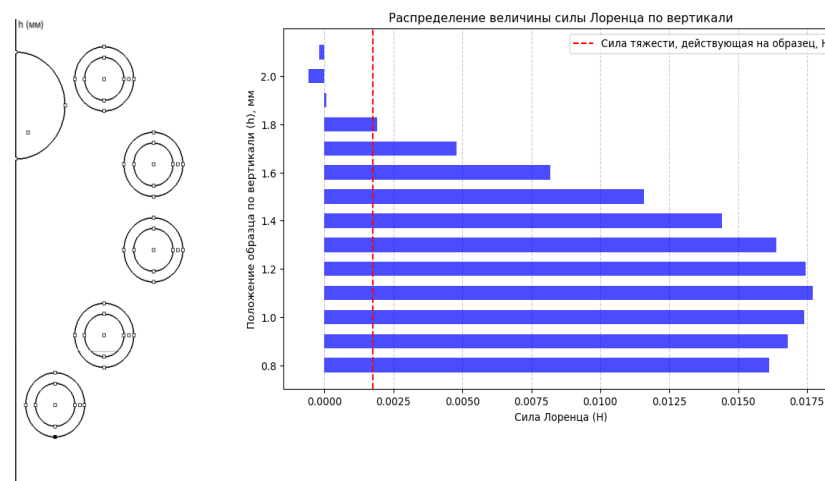


Рисунок 9 – Диаграмма распределения равнодействующей выталкивающих сил магнитного поля, действующей на образец алюминия с радиусом 5 мм в зависимости от его положения в индукторе

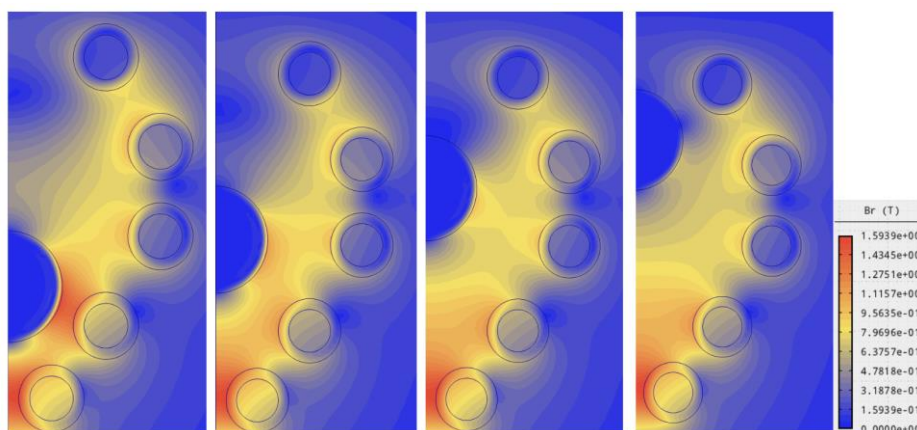


Рисунок 8 – Распределение напряженности электромагнитного поля в индукторе для различных положений образца алюминия

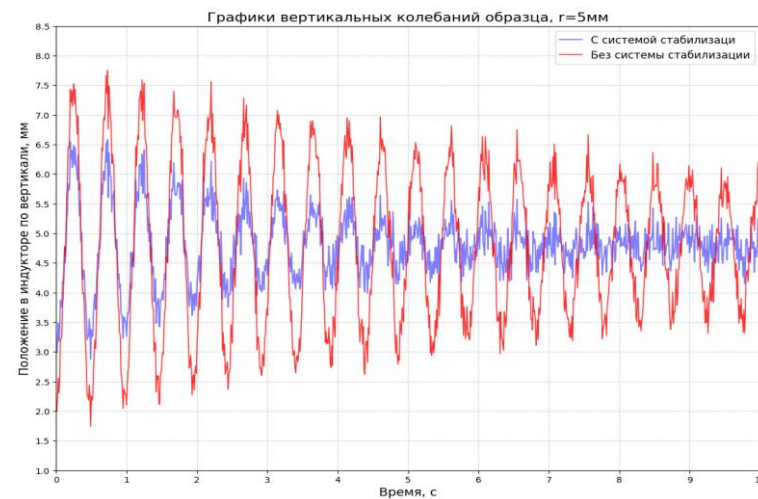


Рисунок 10 - Графики колебаний, совершаемых образцом алюминия с радиусом 5 м