# Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Пайор Владимир Алексеевич

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛЕВИТАЦИОННЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ МЕТАЛЛОВ

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: к.т.н., доцент Бойков А.В., д.т.н., доцент Кульчицкий А.А.

Санкт-Петербург – 2025

# оглавление

ВВЕДЕНИЕ5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕНННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ МЕТАЛЛОВ ВО ВЗВЕШЕННОМ
СОСТОЯНИИ11
1.1 Анализ технологического процесса левитационного плавления металлов11
1.2 Системы автоматического управления технологическим процессом
левитационного плавления металлов
1.3 Проблема левитационного плавления магнитных материалов
1.4 Задача стабилизации положения расплава в индукторе
1.5 Контроль температуры расплава
1.6 Левитационная кристаллизация расплава
1.7 Численное моделирование процесса левитационного плавления металлов29
1.8 Выводы к главе 1
ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ34
2.1 Выбор и обоснование методов исследования
2.2 Структура системы стабилизации положения на основе численной модели36
2.3 Программа экспериментальных исследований
2.4 Лабораторная установка для исследования процесса плавления металлов во
взвешенном состоянии
2.5.1 Методика исследования влияния положения образца металла на распределение
электромагнитного поля в индукторе
2.5.2 Методика определения положения левитируемого металла в индукторе46
2.5.3 Методика калибровки камеры и расчета координат образца

2.5.4 Методика оценки производительности системы технического зрения
2.5.5 Метрика IoU для оценки качества сегментации положения образца системой
технического зрения
2.5.6 Метод управления на основе численной модели
2.6 Выводы к главе 2
ГЛАВА З ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РАСПЛАВА НА
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ИНДУКТОРЕ66
3.1 Численная модель магнитного поля конического индуктора
3.2 Определение положения расплава в индукторе73
3.3 Оценка точности сегментации образца металла в индукторе
3.4 Оценка производительности алгоритма мониторинга положения образца84
3.5 Выводы к главе 3
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ
ПОЛОЖЕНИЯ МЕТАЛЛА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЧИСЛЕННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ
4.1 Численная модель как компонент системы управления
4.2 Валидация численной модели90
4.3 Стабилизация положения образца металла в индукторе на основе численной
модели
4.4 Оценка экономической эффективности внедрения системы стабилизации
положения расплава
4.5 Выводы к главе 4106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной р	регистрации программы
для ЭВМ	
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения	

### введение

### 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 университет им. Г.И. Носова, Институт химии и химической технологии СО РАН, Ambrell Corporation (США) ALD Vacuum Technologies GmbH (Германия).

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 22-71-0029.

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

**Предмет исследования** – метод автоматического управления положением расплава в индукторе на основе численной модели.

**Цель работы** – снижение амплитуды колебаний, совершаемых материалом в коническом индукторе в состоянии левитации 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 исполни-тельными 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, приложение А);

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, Приложение Б).

### 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, корреляцией 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 (пункты списка литературы  $N_{1} - 5$ , 15 - 17), 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 (Приложение A).

### 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 123 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.

# ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕНННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ МЕТАЛЛОВ ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ

### 1.1 Анализ технологического процесса левитационного плавления металлов

Металлургическая промышленность является одной из базовых отраслей российской экономики. Российская Федерация обладает внушительными запасами железной, медно-никелевой и апатит-нефелиновых руд, и способна в полной мере удовлетворить как внутренний спрос на цветные и черные металлы, так и поддерживать устойчивую экспортную стратегию на внешних рынках. Спрос на металлургическую продукцию уверенно растет протяжении на нескольких десятилетий. Крупнейшими потребителями металлов являются следующие отрасли: строительство, машиностроительная и радиоэлектронная промышленность. Рост спроса на цветные и редкоземельные металлы также провоцирует постепенный переход крупных мировых автомобилестроительных концернов на производство автомобилей с электрическим приводом, создавая повышенный спрос на медь, литий и никель. Перебои в поставках редкоземельных металлов, вызванные пандемией SARS-cov-2 стали одним из факторов, спровоцировавших кризис на рынке полупроводников в 2021 году, что в свою очередь создает дополнительную нагрузку металлургическую промышленность, вынуждая стремительно наращивать на производство редкоземельных металлов для восполнения возникшего дефицита [66].

Помимо превышения спроса над предложением на рынке цветных и черных металлов, важным фактором, оказывающим давление на всю металлургическую промышленность, становится общемировая тенденция к снижению выбросов парниковых газов и уменьшению углеродного следа. Принимаемые меры по регулированию углеродной политики также вносят коррективы в долгосрочную стратегию развития металлургического сектора.

Совокупность вышеперечисленных факторов является движущей силой к внедрению лидирующими металлургическими компаниями новых технологий производства и обработки металлов с учетом возникающих энергетических затрат и воздействий на окружающую среду, обеспечивая при этом стабильные непрерывные поставки продукции в условиях растущего спроса.

Одной из задач металлургической промышленности является получение металлов с высокой степенью чистоты, необходимых для производства высокотехнологичной продукции, такой как электронные компоненты, медицинское оборудование, авиационные и космические материалы. Для достижения высокой чистоты металлов требуются специальные технологии очистки и рафинирования.

Такой технологией является электромагнитная плавка металлов во взвешенном состоянии или левитационная плавка. Левитационная плавка, благодаря отсутствию контакта расплавляемого металла с поверхностью тигля, а в случае плавления в среде инертного газа или вакууме и контакта с атмосферой, позволяет получать металлы высокой чистоты [47].

Из-за высокой энергоемкости технологического процесса и малого объема получаемого расплава сфера применения бесконтактного плавления металлов ограничена высокотехнологичным сектором, в котором требуется сверхчистый металл, производством полупроводников, в частности, монокристаллического кремния, а также для плавки, литья, легирования и рафинирования активных металлов и их сплавов, таких как скандий, иттрий, титан и молибден [37].

Перспективным применением электромагнитной левитационной плавки металлов является способ получения мелкодисперсных и сверх мелкодисперсных гранулированных металлических порошков [85]. Развитие технологий 3D-печати металлом и других аддитивных технологий стимулировало рост спроса на металлические порошки с высокими реологическими характеристиками текучести [41]. Процесс напыления состоит из подачи вертикального стержня в конический индуктор, где конец стержня оплавляется вихревыми токами электромагнитного поля,

что приводит к образованию струи или капли жидкого металла, которые распыляются потоком инертного газа [76]. Так как данный способ позволяет получать порошки с высокой степенью очистки активных и тугоплавких металлов.

Левитационная плавка представляет собой процесс бесконтактного нагрева металлов в электромагнитном поле высокой частоты, что позволяет удерживать металл в подвешенном состоянии. В основе данного метода лежит использование вихревых токов, которые создают магнитное поле, взаимодействующее с первичным полем катушки индуктора. Ключевым преимуществом левитационной плавки является минимизация контакта расплав с окружающей средой, что критически важно для достижения сверхвысокой чистоты расплава [34].

Метод плавки металлов во взвешенном состоянии впервые был предложен Отто Муком (Германия) в 1923 году, однако в практического применения он не получил. Результаты дальнейших исследований, направленных на изучение возможности прикладного применения левитационного плавления металлов, были представлены в 1950-х годах в США [26; 58]. Последующие теоретические исследования явления электромагнитной левитации сопровождались непрерывным совершенствованием самой технологии [64]. Возвращение интереса к методам высокочастотного индукционного нагревания и плавке во взвешенном состоянии связывают с появлением недорогих и надежных высокочастотных источников питания на основе MOSFET транзисторов.

Среди отечественных ученных наиболее значительный вклад в изучение процесса левитационной плавки металлов в магнитном поле внес А.А. Фогель [7]. В его работах рассматривается использование высокочастотного электромагнитного поля для создания условий, при которых жидкий металл удерживается в подвешенном состоянии. Описываются особенности проектирования индукторов, обеспечивающих стабильное удержание расплава. Приведены результаты исследования процессов плавления, кристаллизации и взаимодействия материалов при использовании индукционного метода. Анализируются возможности применения метода

левитационной плавки для производства высококачественных сплавов и других материалов, где требуется высокая чистота.

Ученые Санкт-Петербургского Горного университета также уделяли внимание изучению процессов индукционного нагрева металлов и построения численных моделей процесса плавлении заготовок в магнитном поле. В работах «A combined method of simulation of an electric circuit and field problems in the theory of induction heating» [22] и «Simulation of induction heating of a ferromagnetic plate with a covering inductor» [42] приведены результаты численных экспериментов, выполненных в программных пакетах Ansys Maxwell для процесса индукционного нагрева металлов. исследований области Актуальное состояние научных В технологий электромагнитного нагрева металлов приведено в обзоре «Recent scientific research on electrothermal metallurgical processes» [10].

На данный момент исследована возможность применения дополнительных источников тепла для нагрева заготовки помимо самого индуктора, в том числе лазерного излучения и плазмы.

Изучена возможность внесения легирующих компонентов в левитирующий расплав [102];

Определено оптимальное соотношение между площадью поверхности капли расплава и ее объемом, достаточное для протекания гетерогенных реакций на ее поверхности [108];

Установлены условия достижения сверхвысокой скорости кристаллизации расплава [62];

Удержание металла BO взвешенном состоянии осуществляется электромагнитным полем, создаваемым переменным током в индукторе. Воздействие высокочастотного переменного магнитного поля металл приводит на К возникновению в нем вихревых токов (токов Фуко), которые вытесняют поле из пространства, занимаемого металлом. В результате этого в переменном магнитном поле неферромагнитный проводник ведет себя как диамагнетик в постоянном

магнитном поле. Силовое взаимодействие токов Фуко и магнитного поля выталкивает металл из области с большей плотностью в область с меньшей плотностью поля, называемую потенциальной ямой. Если величина выталкивающей силы достаточно велика (больше или равняется силе тяжести, действующей на образец металла), то металл удерживается во взвешенном состоянии.

Воздействие электромагнитного поля на металл можно описать как сумму воздействий электромагнитной силы (F) и поглощенной металлом мощности ( $p_s$ ), которая идет на его нагревание. Данное условие описывается формулой (1.1):

$$F_s = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\pi \rho f}} P_s, \qquad (1.1)$$

где *F*<sub>s</sub>- электромагнитная силы действующая на единицу поверхности металла, H, *µ* – магнитная проницаемость металла, Г/м,

*р* – электрическое сопротивление металла, Ом,

f - частота электромагнитного поля, Гц,

*P*<sub>s</sub> – мощность, передаваемая металлу, отнесенная к единице его поверхности, Вт.

Для электромагнитного плавления металла во взвешенном состоянии применяют индукторы различных конструкций. На рисунке 1.1 представлен одновитковый индуктор[91].



Рисунок 1.1 – Индуктор для удержания расплава металла (составлено автором)

Наиболее распространенной конструкцией является коническая с противотоком (рисунок 1.2). Коническая геометрия индуктора позволяет создавать так называемую потенциальную яму в электромагнитном поле, которая удерживает расплав.



Рисунок 1.2 – Конический индуктор с противовитком (составлено автором)

Индукционная плавка металлов во взвешенном состоянии имеет два основных преимущества перед керамическими или индукционными печами. Электромагнитная левитация в инертной атмосфере или вакууме полностью исключает загрязнение расплава материалом тигля и приводит к значительному повышению чистоты расплава. Помимо этого того, тепловые расплава металла уменьшаются и ограничиваются излучением, производить обработку ЧТО позволяет электромагнитным полем при чрезвычайно высоких температурах. В настоящее время применение левитационной плавки ограничено максимальной возможно массой расплавляемого металла, так как с увеличением массы расплава существенно возрастает количество энергии, необходимое для удержания металла в подвешенном состоянии [94].

Процесс индукционного нагрева и плавления металлов стационарных условиях хорошо автоматизирован, а существующие алгоритмы управления позволяют

контролировать нагревания скорость заготовки, поддерживать заданную температуру, управлять циклом нагрева и охлаждения, регулировать потребляемую мощность индуктора. Однако в случае нагрева и удержания металла подвешенном задача управления усложняется необходимостью контролировать состоянии положение расплава в пространстве. Помимо этого, при работе с ферромагнитными металлами, при его нагревании до определенной температуры, называемой точкой Кюри у чистых металлов и точка Курнакова у сплавов, он теряет свои магнитные свойства, из-за чего возникает необходимость формировать соответствующее управляющее воздействие на индуктор для удержания расплава в подвешенном состоянии [103]. Это обусловлено сильным влиянием ферримагнитной заготовки на колебательный контур индуктора, сдвигающей его резонансную частоту. Значение температуры в точке Кюри для различных металлов и в точке Курнакова для сплавов были установлены экспериментально, известны И однако В случае С электромагнитным нагревом из-за возникающего у поверхности заготовки скинэффекта металл нагревается неоднородно, что искажает результаты прямых измерений температуры [21]. Таким образом, непосредственное измерение температуры не может являться достаточным для построения контура управления, что в свою очередь создает необходимость в построении численной динамической модели нагревания заготовки [56].

Плавка металла в электрических печах: дуговых и индукционных занимала незначительную долю среди общего числа пирометаллургических процессов. Наиболее часто технологии индукционного нагрева применяются в непрерывных металлургических процессах прокатного производства таких как разливка металла, непрерывная термообработка, сляпав и труб, штамповка сплавов в твердожидком состоянии. Все вышеперечисленные технологические процессы в настоящее время достаточно широко распространены, отложены и стандартизированы как на отечественных, так и на зарубежных металлургических предприятиях.

Основные недостатки методов плавления металлов во взешанном состоянии в металлургии связаны с проблемой удержания расплавляемого металла во процессе электромагнитной левитации. Несмотря на то, что в последние десятилетия было представлено множество исследований, связанных с изучением теоретических основ электромагнитной левитации, и технологическое преимущества левитационной плавки, описанные ранее, массового внедрения данного процесса в промышленности к настоящему времени не произошло.

В России развитие левитации происходило по пути применения левитационных печей на основе двух катушечных и много катушечных индукторов [69]. Это существенно повлияло на развитие теоретических представлений о природе данного процесса. Основная причина использования двух типов индукторов — это разная мощность высокочастотных генераторов, используемых для левитации. Двух катушечные индукторы требуют повышенной мощности (26–100 КВт), тогда как много катушечные индукторы могут работать при меньших мощности (8–15 КВт).

Среди зарубежных исследователей наиболее существенный вклад развитие технологии электромагнитного левитационного плаваниям металлов внесла группа исследователей из Латвийского университета под руководством Sergejs Spitans. В своих исследованиях они приводят результаты численного моделирования левитационного электромагнитного плавления металлов с применением пакетов OpenFoam [14] и Ansys Fluent [98] позволяющих воспроизвести сложные мультифизические процессы, протекающие в заготовке. В рамках данных работ также отражены результаты численной модели отражающих динамику изменения геометрии капли расплава под действием электромагнитного поля индуктора и силы тяжести [82].

Также ими была предложена конструкция нагревательной установки, состоящей из нескольких индукторов. Для предложенной конструкции были также определены оптимальные режимы работы индукторов с учетом их взаимного расположения, с применением методов численного моделирования. Исследования,

проведенные группой под руководством Dr. Sergejs Spitans не ограничились только виртуальным Учеными экспериментом. также была сконструирована апробации предложенной экспериментальная установка ДЛЯ испытания И конструкции индуктора. Результаты эксперимента были опубликованы в 2017 году, и как утверждают исследователи, поведение расплава в магнитном поле: изменение формы капли и ей положение в пространстве в ходе нагревания и плавления практически полностью совпали с эквивалентными характеристиками, полученными в численной модели процесса [80]. По совокупности полученных результатов исследователями, совместно компанией ALD Vaccuum Technologies был представлена технология левитационного плавания и литья больших (до 500 г.) объемов сплава титана - "FastCast" [78]. В отличие от традиционных осесимметричных подходах к плавлению с электромагнитной левитацией, где вес образца значительно ограничен, поскольку требуемые силы Лоренца исчезают на оси симметрии, новое решение основано на применении двух электромагнитных полей с разными частотами, силовые линии которых горизонтальны и взаимно перпендикулярны, чтобы реализовать силу Лоренца в расплавленной шихте также на оси, таким образом, был увеличен предельная допустимая масса расплавляемого образца [106].

Этот метод позволяет правильно измерять поверхностное натяжение и вязкость металлических расплавов. Однако в условиях земного притяжения расплав в естественной геометрии или поднятый электромагнитным полем будет значительно деформирован [27]. Одновременный контроль температуры и левитации ограничен при нормальных гравитационных условиях 1G, поскольку электромагнитное поле, необходимое для подъема образцов, может нагревать образец до значительных температур, даже выше точки плавления. Течения в нагретой деформированной капле расплава в земных условиях плохо контролируются: ему свойственен переход из ламинарного режима в турбулентный, что вызывает необходимость проведения экспериментов в условиях невесомости (микрогравитации). Одна из возможностей достижения условий микрогравитации на короткий промежуток времени (10-20 с.) —

это параболические полеты, например, выполняемые с помощью суборбитального самолёта Airbus A310 или Международной космической станции. Экспериментальные результаты были получены во время полетов на Международную космическую станцию 2016 и 2017 годах с использованием установки TEMPUS EML и опубликованы в статье «EML -An Electromagnetic Levitator for the International Space Station» [72]. Результаты, полученные в ходе данного исследования, задают еще одно направление развития технологией левитационного плавления металлов в условиях невесомости как перспективной технологии для освоения космического пространства.

# 1.2 Системы автоматического управления технологическим процессом

### левитационного плавления металлов

К основным несовершенствам существующего метода левитационного небольшую массу плавания можно отнести расплавляемого металла, не превышающую, нескольких десятков грамм, что В значительной степени ограничивает широкое промышленное применение метода. Несмотря на то, что известны применения левитационного плавления для нанесения тонких покрытий в электронике или производства тонких порошков для аддитивных технологий, для которых масса металла не является критической, невозможность на текущем уровне технологии масштабировать объемы производства с применением левитационного плавки становиться сдерживающим фактором массового распространения данной технологии в мировой и отечественной промышленности.

Увеличение массы расплавляемого образца возможно при использовании комбинации нескольких индукторов в составе установки, как это было представлено в работах группы под руководством Dr. Sergejs Spitans [79]. Однако, увеличение числа индукторов влечет за собой рост затрат электрической энергии на нагрев, расплавление и поддержание расплава в подвешенном состоянии [23]. Помимо этого, комбинирование нескольких кушаке индукторов в составе одной установки приводит к усложнению контроля состояния заготовки и управления генераторами переменного

тока. Также приведенное исследования не учитывает фактор взаимного влияния индукторов друг на друга, приводящее к избыточному нагреванию катушек под действием внешних магнитных полей, создаваемых дополнительными индукторами [74].

Таким образом, проблема масштабирования установок левитационного плавления металлов связана оценкой оптимального расположения каскада индукторов, а также разработки системы автоматизированного управления для минимизации негативного эффекта взаимоиндукции [70]. С точки зрения автоматизации данная проблема на момент составления обзора не рассматривалась и исчерпывающих исследований по озвученной проблематике выявлено не было.

В большинстве рассмотренных в ходе данного обзора работ не было найдено решения задачи охлаждения расплава в подвешенном состоянии. Хотя, наличие данной проблемы было озвучено в ряде работ, посвященных получению новых конструкционных материалов [52], исчерпывающих решений, позволяющие одновременно поддерживать металл в подвешенном состоянии в магнитном поле и одновременно охлаждать его на момент написания данной работы выявлено не было. Практически во всех рассмотренных вариантах установок левитационного плавания, расплав металла для охлаждение выливался в форму, где и происходило его дальнейшее остываний и кристаллизация [53]. Такой подход к охлаждению затрудняет получение чистых металлов, так как материл литьевой формы в той или иной остывающий степени проникает В расплав, становясь источником нежелательных примесей [48].

Известно, что кристаллическая решетка металлов, кристаллизующихся под действием Земной силы тяжести, искажается разработка метода охлаждения расплав и его последующей кристаллизации в подвешенном состоянии позволила бы получать металлы с новыми свойствами [96]. Охлаждением металла печах левитациионной плавки значительно усложняется из-за того, что магнитное поле индукторов, поддерживающее расплав в подвешенном состоянии одновременной с этим,

разогревает его. При этом ослабление величины тока в катушке индуктора, а вместе с ним и электромагнитного поля до значений, при которых прекращается нагрев заготовки физически невозможен [54]. Таким образом, возникает другая задача – подбор такого расположения катушек индукторов и режима из работы, при котором удержание расплава будет возможным без его существенного нагревания.

### 1.3 Проблема левитационного плавления магнитных материалов

Все вышеперечисленные достижения в области левитационного плавления относятся преимущественно к неферромагнитный (цветным) металлами. Левитационная плавка черных металлов имеет значимые перспективы как метод очистки от фосфора и других примесей. Плавление в подвешенном состоянии в инертной газовой среде, сопровождающиеся конвекцией расплава под действием магнитного поля рассматривается как потенциальный потенциальны способ рафинирования металлов [36].

Технология плавления во взвешенном состоянии ферромагнитных металлов и сплавов значительно отличается от левитационной плавки цветных металлов ввиду изменения свойств ферромагнетиков при изменении температуры.

Ферромагнетики способны сохранять намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля при температурах ниже критического значения, характерного для конкретного материала, это температура называется точкой Кюри. При внешних воздействиях, в том числе при нагревании ферромагнетики теряют свои постепенно магнитные свойства, а при достижении точки Кюри практически полностью лишаются их. Данное свойство магнитных материалов создает определённые трудности при их левитационном плавлении в магнитном поле [45].

При внесении образца ферромагнитного материала в поле индуктора, размеры которого сопоставимы с размерами заготовки, индуктивность индуктора начинает резко увеличиваться, что в свою очередь приводит к резкому уменьшению

собственной резонансной частоты колебательного контура и её отставанию от частоты задающего генератора переменного тока.

Выход контура из резонанса с задающим генератором приводит к резкому увеличению сопротивления и сопровождающуюся пропорциональным уменьшением передуваемой от индуктора к заготовке энергии. Растущее сопротивление индуктора приводит к его перегреву и требует дополнительного охлаждение, что совокупности негативно сказывается на энергоэффективности всего процесса.

При нагревании образца металла до точки Кюри его магнитные свойства исчезают, собственная частота колебательного контура возвращается обратно к частоте задающего генератора. Такое изменение намагниченности ферромагнетизма при прохождении точки Кюри в процессе нагревания образца приводит к резкому падению сопротивлений индуктора, что как следствие приводить к повышению силы тока в нем им тока в нем. Несвоевременная реакция оператора установки на повышенное напряжение питания может привести к перегреву и выходу из строя оборудования. А в случае, если печь оборудована автоматической системой контроля, то она должна отслеживать должна отслеживать переход температуры заготовки через точку Кюри и пропорционально уменьшать частоту задающего генератора, поддерживая таким образом его в резонанс с колебательным контуром [28].

Задача контроля прохождения точки Кюри или токи Курнакова актуальна для черной металлургии, так как такие металлы как железо (Fe), никель (Ni), ванадий (Vn), кобальт (Co), некоторые другие редкоземельные металлы: тербий (Tb), гадолиний (Gd) и гольмий (Ho), и их сплавы - обладают ярко выраженными ферромагнитными свойствами, что затрудняет применение технологии левитационного плавания в данной отрасли [30].

# 1.4 Задача стабилизации положения расплава в индукторе

С точки зрения автоматизации левитационной плавка представляет собой сложный многоконтурный процесс. Нахождение оптимальных условий нагревания

заготовки предваряет собой задачу оптимизации по нескольким параметрам: температуре расплава, его положению в пространстве (по двум или трем координатам), температуре индуктора и силе тока в нем.

Колебательные движения металла, удерживаемого в магнитном поле, вызваны электромагнитным взаимодействием металла с полем. Изменение положения металла относительно индуктора при постоянной ЭДС влияет на величину тока, протекающего через индуктор, что вызывает изменение силы, действующей на металл [46].

В особенностей ряде научных трудов, посвященных исследованию взаимодействия высокочастотного электромагнитного поля и жидкого металла при левитации описана группа явлений, связанных с устойчивостью металла в магнитном [33; 91]. Колебание капли, висящей в магнитном поле, не является специфическим свойством жидкого состояния, а обусловлено электромагнитным взаимодействием металла с полем. Изменение положения металла относительно индуктора при постоянной ЭДС влияет на величину тока, протекающего через индуктор, что вызывает изменение силы, действующей на металл. При проведении экспериментов с алюминиевыми шариками в различных средах: воздухе, воде и масле, были обнаружены следующие особенности их поведения:

- Стабильное равновесие относительно оси симметрии более вязкой среде, чем воздух;

- Устойчивые незатухающие колебания с небольшой амплитудой постоянной величины (в воде);

- Нарастающие колебания с амплитудой, превышающей размер индуктора (в воздухе вакууме).

Так же известны исследования, в ходе которых было экспериментально установлено, что характер описанных явлений не зависит от величины тока в индукторе (10–30 A) или от степени сжатия капли расплава магнитным полем. Стабильное положение расплавляемого образца металла в индукторе достигается при

условии, когда центр кривизны поверхности расплава в его устойчивом состоянии находится вне объема расплава [9]. Однако это невозможно, так как при острых углах величина Лапласовского давления искривленной поверхности жидкости стремится к бесконечности. Наличие особой конфигурации в электромагнитном поле потенциальной ямы при относительно большом объеме расплавляемого металла, приводит к сжатию нижней части капли, и капля расплавляемого металла приобретает форму груши (рисунок 1.3, Г).



Рисунок 1.3 – Процесс расплавления металла в магнитном поле индуктора. (A) – Внесение образа в индуктор; (Б) - Нагревание образца в магнитном поле до температуры плавления; (В) – Расплавление металла; (Г) – Изменение формы расплав металла под действием магнитного поля (составлено автором)

Устойчивое поддержание образца металла во взвешенном состоянии достижимо только в неоднородном магнитном поле [23; 49]. Условие удержания расплава металла в магнитном поле может быть сформулировано как равенство силы, выталкивающей металл из магнитного поля и силы тяжести, действующей на образце металла, описывается формулой (1.2):

$$F_{EM} = F_q, \tag{1.2}$$

где *F<sub>EM</sub>* – равнодействующая выталкивающих сил магнитного поля индуктора, действующих на образец металла, H,

*F*<sub>g</sub> – сила тяжести, действующая на образец металла, Н.

Для расплава металла при левитации, характерной особенностью также является интенсивное перемешивание внутри капли. Известны исследования по определению характера движения потоков внутри капли расплава металла, левитирующей в магнитном поле.

Модельное исследование, проведенное с жидким натрием, помещенным в стеклянную колбу, находящуюся в электромагнитном поле, показало наличие турбулентного движения металла внутри колбы. С помощью трубок Пито, а также методами фотографирования измеряли скорости расплава[92]. Было установлено, что основная часть расплава в плавучей колбе движется вверх. Вдоль стенок колбы металл движется вниз с гораздо большей скоростью. Для определения зависимости скорости металла от напряженности магнитного поля колбу фиксировали и измеряли вертикальную составляющую скорости для различных значений тока. Опыты без удержания капли металла в колбе позволили сделать вывод, что перемешивание расплава при левитации в вакууме или инертном газе более интенсивное, чем описанное выше, поскольку скорость металла на поверхности капли не равна нулю [50].

### 1.5 Контроль температуры расплава

Измерение температуры левитирующего металла затруднен ввиду сложных условиями протекания технологического процесса. Высокий уровень электромагнитных помех и наводок, создаваемых индуктором, нестабильное положение образца металла в пространстве не позволяют размещать во внутреннем пространстве индуктора какие-либо чувствительные элементы. Применение контактных методов измерений затруднено или практически не представляется возможным, так как трудно исключить влияние высокочастотного электромагнитного поля на измерение. Таким образом единственным возможным подходом к измерению температуры заготовки или расплава являются бесконтактные методы, такие как пирометры и телевизоры.

Контроль температуры жидкого металла при левитации может осуществляться оптическими, радиационными и цветными пирометрами. Использование первых двух типов пирометра возможно только в отсутствие задымлении или загрязнения смотровых стекол плавильной камеры. Поверхность металла при измерении температуры также не должна оксидный пленок, затрудняющих измерение температуры. Цветные пирометры в свою очередь практически не чувствительны к появлению пленок на стеклах; поэтому они находят особенно применение в аналогичных задачах, хотя и весьма трудны в эксплуатации и техническом обслуживании.

В случае использования яркостного пирометра необходимо сначала измерить излучающую способность металлов на специальной установке, так как принцип их работы построен на определении зависимости излучающую способности раскаленного метала от температуры. Для определения зависимости температуры излучающую способности некоторых тугоплавких металлов в твердом состоянии применима модель абсолютно черного тела. При этом форму образцов следует выбирать таким образом, чтобы они имели наибольшую устойчивость в индукторе, а направление отверстия в абсолютно черном теле было направлено вертикально вверх [63].

Проведение калибровки пирометров по реперам чистых металлов как правило проводится на расплавленных при левитации или в небольшом керамическом тигле. Для этого металла медленно расплавляют, а затем кристаллизуют. Изменением расхода инертного газа подаваемого на каплю направленным потоком сверху или в

медным кристаллизаторе, охлаждаемом жидким азотом. Когда он вступает в контакт с металлом, можно наблюдать фронт кристаллизации и многократно измерять плавления. При использовании температуру пирометров с автоматической регистрацией температур плавления кристаллизации фиксируются И они соответствующими площадками или всплесками [83].

Учитывая все ограничения, связанные применением пирометров с применительно к задаче контроля температуры расплавляемого образца металла в индукторе целесообразно рассмотреть в качестве средства бесконтактного контроля температуры тепловизионные видеокамеры [55]. Основное отличие тепловизоров от пирометров состоит в том, что они содержать каскад (матрицу) чувствительных элементов, формирующих изображение измеряемой поверхности. В отличии от одномерного сигнала - видеоизображение, полученное с тепловизора является более информативным и представляет больший интерес для изучения поверхностных процессов, протекающих в расплаве [68]. А в совокупности с методами технического зрения, может применяться не только для определения температурного распределения на поверхности заготовки, но и для отслеживания положения капли расплава в пространстве [77].

### 1.6 Левитационная кристаллизация расплава

Как было сказано ранее, одной нерешенных научных проблем ИЗ левитационного плавания металлов является охлаждении расплава с последующей его кристаллизацией в подвешенном состоянии. Кристаллическая решетка металла, охлажденного таким образом будет более однородной, что показали исследования, проведённые на МКС в условиях микрогравитации, а также результаты численного моделирования процесса. Таким образом решение проблемы охлаждения расплава в подвешенном состоянии позволит упростить производство металлов, кристаллизованных в условиях сниженной гравитации на Земле [73].

Технически, охлаждение расплава вещества в электромагнитной печи возможно при снижении интенсивность или полном исчезновении электромагнитного поля, индуцирующего в расплаве токи Фуко. Однако при этом, расплав начинает свою устойчивость, ввиду ослабления потенциальной ямы, удерживающей его. Возникающее таким образом противоречие, исключающее возможность левитации проводника без его нагрева, можно разрешить либо изменением конфигурации индуктора, либо отведением тепла во внешнюю среду [101].

Так при левитационном плавлении в среде инертного газа, где заготовка охлаждается потоком холодного инертного газа. Необходимость применения охлажденный инертных газов в свою очередь сказывается на энергоэффективности процесса [95].

Отсюда следует, что задачу управления расходом охладителя и силой тока в индукторе можно свести к функции потери тепла заготовкой от времени, расхода хладагента и силы тока, для нахождения которого, целесообразно применить численное моделирование, и уже на основе результатов моделирования разрабатывать оптимальный алгоритм управления. Применимость численного моделирования для решения поставленной задачи оптимизации усложняется необходимость расчета модели объекта в реальном времени и сложной физикой процесса. Однако автоматизация измерения силы тока в индукторе и температуры расплава позволит снабдить численную модель дополнительными данными и скорректировать ее и снизить количество необходимых расчетов.

### 1.7 Численное моделирование процесса левитационного плавления металлов

Численные модели служат основой для прогнозирования, оптимизации и адаптации систем управления. В задаче управления технологическими процессами численные модели могут быть интегрированы с традиционными методами управления для прогнозирования износа оборудования и предотвращения аварий [87]. Применительно к левитационной плавке металлов в магнитном поле, существует ряд исследований, демонстрирующих успешное применение численного моделирования для изучения физических процессов, протекающих в данном технологическом процессе [89].

Плавка металла в магнитном поле во взвешенном состоянии представляет собой сложный многостадийный процесс. Его можно разделить на три образующих процесса: нагрев металла, расплавление и охлаждение расплава (кристаллизация). В зависимости от конечной цели процесс охлаждения может быть заменен литьем расплава в форму или экструзией [43].

Таким образом наибольшие трудности управления ходом процесса возникают именно при изменении состояния металла, то есть при переходных процессах.

Необходимость применения численной модели в составе системы управления процессом объясняется сложной переходной характеристикой, в особенности в случае с ферромагнитными металлами, резко теряющими свои магнитные свойства при провождении через точку Кюри. В этот момент система управления процессом плавки должна своевременно снизить ток в катушке индуктора и при это удержать в подмешанном состоянии расплав. Преимущество такого подхода, перед численными моделями, не имеющими обратной связи с технологическим процессом, заключается в том, что модель, подкрепляемая актуальными измерениями, является более релевантной и достоверной.

Численные модели успешно применяются в составе систем управления 70-х годов XX века [3]. В автоматизации существуют и успешно применяются в том числе в промышленных решениях регуляторы с модельным блоком. Модельный блок в данном случае представлен упрощенной математической моделью объекта управления и используется для увеличения быстродействия систем управления с большим запаздыванием [86]. Если заменить модельный блок с математической моделью на имитационную модель и подавать на него входное воздействие эквивалентное воздействию, оказываемому на объект управления, то гипотетическая

кривая отклика имитационной модели должна быть эквивалента кривой отклика реального объекта управления при прочих равных условиях.

Цифровой двойник, существующий параллельно с реальным процессом и входящим в состав АСУТП может стать принципиально новым подходом при построении систем управления, систем, базирующихся на цифровом двойнике. Комбинируя информацию, поступающую с датчиков о текущем состоянии объекта и возмущающих воздействиях с цифровой моделью процесса, можно с достаточно высокой точностью предсказать последующие состояния системы (объекта) управления при заданном управляющем воздействии известной величины. Системы данного типа могу использоваться не только для реализации предиктивного управления технологическими процессами, но и инструментом для проведения виртуальных экспериментов [13]. При помощи данного инструмента можно будет в любой момент времени создать копию модели объекта и воспроизвести в ней альтернативный сценарий управления технологическим процессом, не затрагивая при этом уже функционирующее реальное оборудование. Такой подход позволит снизить риск возникновения ошибок при изменении алгоритмов управления в АСУ [100]. В настоящее время для построения цифровых двойников применяются три основных «белого метода: метод ящика», основанный на физико-математическом моделировании процессов с использованием экспертных знаний; метод «черного ящика», который использует нейронную сеть для анализа больших массивов исторических данных и выявления закономерностей; а также гибридный метод, сочетающий преимущества первых двух подходов для повышения точности моделей. Кроме того, важную роль играют технологии интернета вещей (IoT), большие данные

и методы визуализации (AR, VR, 3D-модели), а также специализированные программные продукты и платформы, например AnyLogic [51], Dassault Systemes и Modelica которые обеспечивают создание, тестирование и внедрение цифровых двойников в различных отраслях промышленности [90].

Потенциальный экономический эффект от внедрения системы автоматического управления на основе цифрового двойника будет проявляться в снижении издержек на внеплановое технологическое обслуживание и ремонт оборудования, а также снижением затрат на электроэнергию за счет повышения производительности оборудования. Внедрение цифрового двойника в процесс левитационной плавки цветных металлов в электромагнитном поле позволяет значительно повысить точность управления температурным режимом и положением расплава, что снижает потери металла и улучшает качество продукции. Это ведет к оптимизации энергетических затрат за счет более эффективного контроля процесса нагрева и кристаллизации, а также уменьшению внеплановых простоев оборудования благодаря предиктивному обслуживанию [59].

В дополнение к снижению затрат на обслуживание применение цифрового двойника позволяет проводить отладку АСУ обособленно, без риска создания аварийной ситуации на объекте управления. Возможность среднесрочного и долгосрочного прогнозирования энергетических затрат и энергетической эффективности технологического процесса для последующего планирования стратегии энергосбережения также является существенным фактором в пользу внедрения цифровых двойников в состав АСУ [75].

### 1.8 Выводы к главе 1

В настоящее время плавлением металлов во взвешенном состоянии не имеет широкого применения в промышленности, однако является перспективным способом получения чистых металлов и сплавов. Существует ряд технических проблем, препятствующих масштабированию данного процесса

Высокая энергозатратностью процесса в существенной мере ограничивает массу расплавляемому металла, а также увеличивает себестоимость готового продукта. Существующие АСУ электромагнитной плавкой металлов во взвешенном состоянии преимущественно ориентированы на контроль температуры и скорость

нагревания расплавляемого металла. При этом мониторинг и контроля положения расплава в индукторе не осуществляется, несмотря на тот факт, что контакт расплавляемого металла с поверхностями установки приводит к порче расплавляемого образца и остановке процесса левитационной плавки.

Таким образом, плавление металлов во взвешенном состоянии в настоящее время находится на стадии развития, требующей внедрения новых средств контроля и управления, позволяющих осуществлять стабилизацию положения расплавляемого металла. В связи с этим цель данной диссертационной работы заключается в разработке и научном обосновании методов автоматического управления левитационном плавлением металлов, позволяющих осуществлять стабилизацию положения расплавляемого металла в индукторе в режиме реального времени.

### ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1 Выбор и обоснование методов исследования

Для реализации задач, поставленных в диссертационном исследовании, был разработан комплекс мероприятий, включающий в себя теоретические изыскания, лабораторные эксперименты, численное моделирование и апробацию в условиях, максимально приближённых к реальным, а также разработку новых технических решений для контроля положения расплава в индукторе. С целью обеспечения стабилизации положения расплавляемого металла предлагается применения средств визуального контроля на основе системы технического зрения (СТЗ) и численной модели электромагнитного поля индуктора как компонента САУ. Система технического зрения будет выполнять функцию средства измерения, определяющего текущее положение (отклонение) образца металла относительно заданного значения. Численная модель, в свою очередь необходима для нахождения мгновенного значения величины силы Лоренца, действующей на образец металла на основе данных о положении металла в пространстве и текущей величины силы и частоты тока, подаваемого на индуктор.

Применение бесконтактных методов измерения положения и температуры расплава в металлургических процессах обусловлено рядом факторов.

Во-первых, использование контактных датчиков сопряжено с риском их повреждения вследствие агрессивности среды расплавленных металлов и шлаков. Бесконтактные оптические методы позволяют осуществлять измерения без непосредственного контакта с объектом контроля, что обеспечивает сохранность измерительных устройств. Такие методы как инфракрасная термометрия, обладают высокой точностью измерения температуры расплава и позволяют осуществлять измерения с высокой частотой, что важно для оперативного управления технологическими процессами [61].

Применение численного моделирования магнитного поля является неотъемлемым компонентом при разработке системы управления левитационной плавкой. Это обусловлено рядом факторов. Левитационная плавка металлов характеризуется сложной геометрией индуктора, динамическими характеристиками расплавленного металла, а также наличием нелинейных граничных условий на поверхности расплава [105]. В таких случаях аналитические решения становятся чрезвычайно сложными или вовсе невозможными, что требует применения численных методов. Численное моделирование позволяет учитывать данные нелинейные процессы характерные для электромагнитных полей. Кроме того, для обеспечения надлежащего левитационной плавкой необходима управления оптимизация параметров системы, таких как частота тока, сила тока в индукторе. Численное моделирование предоставляет возможность быстро и эффективно исследовать влияние различных параметров на характеристики магнитного поля и выталкивающих сил, порождаемых им.

Также следует учитывать трехмерность задачи, поскольку левитационная плавка является трехмерным процессом, и для адекватного описания требуются трехмерные численные модели. Численные модели могут быть сопоставлены с экспериментальными данными, что позволяет осуществить верификацию и валидации численной модели, оценить их достоверность и адекватность [71].

Среда, в которой происходит левитационная плавка, характеризуется агрессивностью, что затрудняет прямые измерения свойств магнитного поля [81]. Высокие температуры, наличие расплавленного металла и сложная геометрия делают невозможным использование традиционных измерительных приборов. В таких условиях численное моделирование становится единственным доступным способом получения достоверной информации о магнитном поле, необходимой для обеспечения надлежащего управления процессом.

### 2.2 Структура системы стабилизации положения на основе численной модели

Для решения задачи стабилизации положения расплава в индукторе предлагается внедрение системы автоматического управления на основе численной модели электромагнитного поля индуктора и системы технического зрения для мониторинга положения металла [16]. Структурная схема системы управления на основе численной модели представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Структурная схема системы управления процессом плавки во взвешенном состоянии (составлено автором)

Основой системы является индуктор, генерирующий электромагнитное поле, которое удерживает металл в состоянии левитации, исключая контакт металла с поверхностью тигля и его загрязнение.

Обратная связь с объектом управления представлена с системой бесконтактного Это ключевой мониторинга на основе технического зрения. компонент рассматриваемой системы управления, он выполняет определение текущего положения расплава в индукторе с использованием алгоритмов обработки изображений в реальном времени. Она позволяет отслеживать пространственную локализацию образа, что критично для решения задачи стабилизации расплава и
предотвращения контакта с поверхностью индуктора. Полученные координаты образца передаются в численную модель индуктора, выполненный на основе численной модели напряженности электромагнитного поля, которая воспроизводит распределение электромагнитного поля в индукторе на основе МКЭ. Распределение напряженности электромагнитного поля индуктора, построенное с учетом текущего положения в нем металла используется для расчета значения коэффициента неоднородности поля, действующего на металл. Найденное мгновенное значение коэффициента неоднородности электромагнитного поля в образитого поля передается в блок оптимизации для расчетов управляющих воздействий (чистоты *f* и тока *I* в индукторе) обеспечивающих компенсацию колебаний образца металла.

Пользовательский интерфейс предназначен для визуализации таких параметров коэффициент неоднородности электромагнитного поля и управляющие как воздействия: силу и частоту тока, рассчитываемые в блоке оптимизации методами Нелдера-Мида [84], а также текущих координат образца в индукторе, фиксируемых Интеграция зрения. системой технического системы технического зрения обеспечивает замкнутый контур управления: зафиксированные системой технического зрения координаты расплава передаются качестве входных параметров в численную модель, в которой рассчитывается коэффициент неоднородности магнитного поля, создаваемого индуктором.

#### 2.3 Программа экспериментальных исследований

Программа экспериментальных исследований включает в себя следующие задачи:

- Разработка лабораторного стенда для изучения характера движения и нагревания металла в индукторе при плавлении во взвешенном состоянии;

- Построение и валидации численной модели напряженности электромагнитного поля конического индуктора с противовитком;

- Исследование влияния положения расплава в индукторе на распределение электромагнитного поля индуктора;

- Анализ зависимости коэффициента неоднородности электромагнитного поля *А* от положения расплава в индукторе *z*;

- Разработка алгоритма определения положения расплава в индукторе для системы технического зрения;

- Разработка метода стабилизации положения расплав на основе численной модели и данных о его положении, получаемых при помощи системы технического зрения;

- Оценка эффективности предложенного метода на экспериментальной установке.

# 2.4 Лабораторная установка для исследования процесса плавления металлов во взвешенном состоянии

Лабораторные исследования процесса плавления металлов во взвешенном состоянии проводились на экспериментальном стенде, изображенном на рисунке 2.2. Он состоит из индукционного нагревателя токов высокой частоты (1), медного конического индуктора с противовитком (2), видеокамеры (4) на штативе (5), направленные объективом в межвитковый зазор индуктора, что позволяет визуально фиксировать положение образца (3) в нем.



Рисунок 2.2 – Лабораторный стенд для изучения процесса левитационной плавки металла (составлено автором)

Нагревание образцов алюминия осуществлялось в медном коническом индукторе с противовитком, снабженным водяной системой охлаждения. Индуктор был изготовлен из медной трубки с внешним диаметром 6 мм и толщиной 1 мм, обтянутой кремнеземным шнуром-чулком ШК-6. Вода для охлаждения индуктора подавалась по полипропиленовой трубке погружным электрическим насосом.

Для реализации магнитно-левитационного нагрева алюминиевый образец, предварительно удерживаемый пинцетом с керамическим наконечником вне зоны действия поля, плавно вносился в область межвиткового зазора индуктора. После предварительного позиционирования образца осуществлялось включение питания индуктора на пониженной мощности, генерирующее переменное магнитное поле, индуцирующее в образце вихревые токи. Конструкция конического индуктора приведена на рисунке Рисунок 2.3.



Рисунок 2.3 – Схема конического индуктора с противовитком (составлено автором)

На индуктор подавался переменный ток высокой частоты с индукционного МИКРОША-15-8-ВЧ. Характеристики индукционного нагревателя нагревателя таблице 2.2. Фиксация приведены положения расплавляемого В металла цветной Basler acA640-121gm, осуществлялось с помощью видеокамеры установленной на штативе-треноге на уровне межвиткового зазора индуктора (3). Характеристики камеры представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические характеристики камеры Basler acA640-121gm (паспорт оборудования [25])

Параметр	Значение
Разрешение (MxN, пикселей)	658 x 494
Тип сенсора	Sony ICX618AQA
Размер пикселя (MxN, мкм)	5,6 x 5,6
Частота кадров в секунду	122

Таблица 2.2 – Технические характеристики индукционного нагревателя МИКРОША-

15-8-ВЧ (паспорт оборудования [35])

Параметр	Значение
Напряжение и частота электросети, В/Гц	230/50
Диапазон изменения напряжения электросети, В	170-260
Максимальная потребляемая мощность, ква	8,0
Максимальный потребляемый ток, А	35
Диапазон рабочих частот, КГц	20-60
Напряжение на индукторе с рабочей частотой, В	25-40
Максимальный ток индуктора, А	500
Оптимальная индуктивность индуктора, мкГн	0,3-0,7
Процент нагрузки, ПН%	80%
Масса аппарата, нетто, кг	7,2
Масса брутто, в комплекте, кг	9,0
Габаритные размеры (длина, ширина, высота), мм	315x145x265
Охлаждение аппарата	воздушное
Охлаждение индуктора	водяное
Расход охлаждающей жидкости, м <sup>3</sup> /час	0,3
Давление воды, мПа	0,2-0,6
Тип охлаждающей жидкости	вода, антифриз
Температура эксплуатации, °С	-10 - +40°C

# 2.5.1 Методика исследования влияния положения образца металла на распределение электромагнитного поля в индукторе

Удержание расплавляемого образца металла во взвешенном состоянии возможно только в переменном электромагнитном поле. Действие идеализированного однородного электромагнитного поля на металл состоит из электромагнитной силы (F) и поглощаемой металлом мощности (P), идущей на его нагрев. Аналитически это может быть описано выражением (2.1):

$$F = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\pi \rho f}} P_s S, \qquad (2.1)$$

где S – площадь поверхности металл (м<sup>2</sup>),

 $\rho$  – удельное электрическое сопротивление (Ом · м),

 $\mu_0$  – магнитная проницаемость ваккума (Г/м),

f-частота поля (Гц),

*P*<sub>s</sub> – мощность, передаваемая в металл и отнесенная к единице поверхности.

Мощность (*P<sub>s</sub>*), сообщаемая единице поверхности, выражается формулой (2.2):

$$P_s = \frac{1}{2}\sqrt{\pi\mu\rho f}H^2, \qquad (2.2)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление, Ом · м,

 $\mu$  – магнитная проницаемость металла, Г/м,

Н – амплитуда напряженности магнитного поля на поверхности металла, А/м.

Выражение 2.1 справедливо только для идеализированного поля. В случае взвешенного состояния поле неоднородно, а металл перемещается в нем. Характер воздействия поля на металл может быть учтен введением коэффициента *A*, описывающего конфигурацию магнитного поля, окружающего левитирующий образец металла. Введение коэффициента *A* было предложено А. А. Фогелем для описания геометрической характеристики электромагнитного поля, воздействующего на образец металла. Тогда выражение 2.1 принимает вид, представленный в формуле (2.3).

$$F = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\pi \rho f}} A P_s S, \qquad (2.3)$$

где *S* – площадь поверхности металл, м<sup>2</sup>,

 $\rho$  – удельное электрическое сопротивление, Ом · м,

 $\mu_0$  — магнитная постоянная, равна 4 $\pi \cdot 10^{-7}$ , Г/м,

f- частота поля, Гц,

 $P_{\rm s}$  – мощность, передаваемая в металл и отнесенная к единице поверхности, Вт,

*А* – коэффициент зависящий исключительно от конфигурации поля у поверхности металла, может быть различным в зависимости от таких условий как положение образа относительно индуктора, геометрии образца, и геометрии самого индуктора.

Для левитации образца металла в форме диска над компланарным индуктором поле оказывает давление только с одной стороны, при этом величина коэффициента  $A \approx 1$ . При всестороннем обжатии образца полем значение коэффициента A достигает минимального значения ( $A \rightarrow 0$ ), в том случае, когда образец полностью окружен однородным полем.

Геометрические характеристики электромагнитного поля в индукторе зависят от его положения расплава в индукторе [1]. Безразмерный коэффициент, характеризующий геометрическую составляющую электромагнитного поля, действующего на образец металла может быть выражен через силу Лоренца выражением (2.4):

$$A = \frac{F_L}{\pi r^2 \mu \left(\frac{N}{L}\right)^2 I^2},\tag{2.4}$$

где *А* — коэффициент неоднородности электромагнитного поля, зависящий от геометрической конфигурации поля вокруг образца,

*F<sub>L</sub>* — выталкивающая сила Лоренца, действующая на единицу объема металла, обусловленная взаимодействием индукционных токов в образце с внешним магнитным полем, H,

*I* – сила тока в индукторе, А,

*r* – радиус образца, м,

N – количество витков индуктора, шт.,

*L* – длина проводника индуктора, м,

 $\mu$  – магнитная проницаемость материала образца, Г/м.

Прямое измерение величины силы Лоренца, действующей на образец металла в условиях левитации, не представляется возможным. Однако, сила Лоренца может

быть найдена моделирования напряженности методом численного электромагнитного, действующего на металл. Для построения модели напряженности электромагнитного поля индуктора необходимо знать параметры, задающие конфигурацию геометрию поля: индуктора, силу частоту И тока, магнитопроницаемость среды (воздух или ваккуум) и материала индуктора (медь), а также его электропроводность.

Для построения численной модели напряженности электромагнитного поля индуктора применялось свободно распространяемое программное обеспечение GetDP и Gmesh [31]. Данные программные пакеты представляют собой свободное мультиплатформенное программное обеспечение с открытым исходным кодом для моделирования физических процессов методом конечных элементов (МКЭ). Программный пакет GetDP реализует численное решение систем дифференциальных уравнений в частных производных (теплопередача, электродинамика, механика сплошных сред) методом Бубнова-Галёркина (Gerlkin Method), обеспечивая обработку нелинейных, нестационарных и многомасштабных задач. GetDP тесно интегрирован с Gmsh – популярным инструментом для генерации конечных элементов и визуализации.

Gmsh – специализированное, свободно распространяемое ПО с открытым кодом для выполнения параметрического построения 2D/3D-геометрии, генерации структурированных и адаптивных сеток, включая поддержку высокоуровневого скриптового языка для автоматизации проектирования[32].

Интеграция данных инструментов обеспечивает полный цикл построения численных моделей: в Gmsh выполняется построение расчетной сетки на основе геометрии исследуемого объекта, в GetDP осуществляются расчеты численной модели на основе заданных граничных условий модели и расчетной сетки[38].

В численной модели левитационной плавки металлов в переменном магнитном поле лежит система связанных уравнений из электромагнетизма, теплопередачи, а и

механики сплошной среды для моделирования движения или устойчивости металла в магнитном поле.

Модель основана на уравнениях Максвелла в квазистационарном приближении имеет вид (2.5):

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \vec{A}\right) + i\omega \sigma \vec{A} = \vec{J}_{s}, \tag{2.5}$$

где ⊽ - дифференциальный оператор набла,

 $\vec{A}$  – магнитный векторный потенциал, Тл · м,

*I* – мнимая единица,

 $\mu$  – магнитная проницаемость, Г/м,

 $\sigma$  – электропроводность материала, Ом<sup>-1</sup>,

 $\omega$  – круговая частота, рад/с,

 $\vec{J_s}$  – внешние (заданные) токи на индукторе, А,

Решение уравнения Максвелла выражается формулой (2.6):

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A},\tag{2.6}$$

где  $\vec{B}$  – вектор магнитного поля, Тл.

Индуцированный вихревой ток, возникающий в образце, определяется выражением (2.7):

$$\vec{J}_{\text{Индуц.}} = \sigma(-i\omega\vec{A}), \qquad (2.7)$$

где  $\vec{J}_{Индуц.}$  – индуцированный вихревой ток в металле, А.

Вектор силы Лороенц ( $\vec{F}_{Лоренца}$ ), действующий на образец металла в магнитном поле определяется из выражения (2.8):

$$\vec{F}_{\text{Лоренца}} = \vec{J} \times \vec{B}, \qquad (2.8)$$

где  $\vec{F}_{\text{Лоренца}}$  – сила Лоренца, действующая на металл, Н,

 $\vec{J}_{$ Индуц. – индуцированный вихревой ток в металле, А.

Нагревание металла вызываемое джоулевыми потерями вихревых токов (2.9):

 $\rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} = \nabla \cdot (k\Delta T) + Q_{джоул} + Q_{изл} + Q_{конв},$ (2.9)
Где  $\rho$  – плотность металла,  $\frac{\kappa r}{m^3}$ ,  $c_p$  – теплоемкость металла,  $\frac{\Delta \kappa}{\kappa r \cdot K}$ , k – теплопроводность среды,  $\frac{BT}{\kappa r \cdot K}$ ,  $Q_{джоул}$  – джоулевы потери, Дж,  $Q_{конв}$  – теплообмен с внешней средой (конвекция), Дж,  $Q_{изл}$  – теплообмен с внешней средой (излучение), Дж.

### 2.5.2 Методика определения положения левитируемого металла в индукторе

Для определения и мониторинга пространственного положения образца в процессе плавления был предложен метод, основанный на применении алгоритмов технического зрения, осуществляющей анализ кадров, получаемых с видеокамеры [4]. Реализация алгоритмов распознавания выполнялась с применением открытой библиотеки OpenCV [18].

Задача мониторинга положения расплава, совершающего колебания в индукторе включает в себя несколько этапов обработки видео ряда, таких как сегментация, детектирование контуров расплава и преобразование координат, что позволяет отслеживать положение металла и проводить его анализ в реальном времени.

1. Сегментация расплавляемого металла на изображении методом оптического потока

Оптический поток представляет собой движение объектов на последовательных кадрах видеопотока, и его использование для сегментации расплавляемого металла на видео позволяет эффективно выделить область интереса и оценить динамику изменения положения металла. Это основано на предположении, что движение расплава относительно камеры связано с перемещением пикселей в изображении. Метод оптического потока имеет несколько реализаций. В предложенном алгоритме

был использован метод, предложенный Gunnar Farnback [29]. Метод оптического потока Farnback, является модификацией алгоритма Лукаса-Канаде [8]. Он предназначен для оценки смещения пикселей между кадрами и строится на многоуровневом итеративном подходе.

Исходные изображения преобразуются в пирамиду с уменьшающимся разрешением, где верхние уровни (низкое разрешение) позволяют быстро определить грубые движения, а нижние – уточнить детали контура сегментируемого объекта. На каждом уровне пирамиды вычисления начинаются с анализа локальных окрестностей пикселей: для небольших областей предполагается постоянство оптического потока, задачу. Пространственные и временные градиенты что упрощает яркости вычисляются с помощью сепарабельных фильтров (например, производных Гаусса), что ускоряет обработку [107]. На основе этих градиентов строится система уравнений, решаемая методом взвешенных наименьших квадратов — центральные точки окрестности получают больший вес (например, по гауссову распределению), что снижает влияние шумов. После оценки векторов на текущем уровне пирамиды результаты масштабируются с использованием билинейной интерполяции и передаются на следующий, более детальный уровень, где процесс повторяется с учётом предыдущих приближений. Внутри каждого уровня проводятся итерации для постепенной корректировки векторов, что повышает точность. В итоге метод формирует плотную карту оптического потока, присваивая каждому пикселю вектор перемещения [11]. Для устойчивости к изменениям освещения и артефактам применяется сглаживание градиентов, а сепарабельные фильтры и иерархическая обработка пирамиды обеспечивают баланс между точностью и скоростью. Визуализация векторов оптического потока приведена на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Визуализация векторов оптического потока, полученных методом Farneback (составлено автором)

2. Определение контуров образца металла

После сегментации и выделения подвижных областей изображения методом оптического потока, следующим шагом является детектирование контуров расплавленного металла на изображении для точного выделения его формы и положения. Одним из наиболее распространенных алгоритмов для детектирования контуров является детектор Кэни. Детектор Кэни это алгоритм для обнаружения контуров на изображениях, разработанный Джоном Кэни в 1986 году [19]. Данный метод был создан для улучшения качества выделения краев в изображениях, что является ключевым этапом в различных задачах обработки изображений, таких как распознавание объектов, анализ сцен и компьютерное зрение. Основной идеей алгоритма является нахождение резких изменений интенсивности пикселей, которые указывают на края объектов. Он значительно улучшил результаты по сравнению с предыдущими методами, такими как оператор Собеля, благодаря более точному определению контуров и меньшей чувствительности к шуму.

Алгоритм Кэнии включает несколько этапов, включая предварительную обработку изображения для уменьшения шума, а также вычисление градиентов яркости, что позволяет точно локализовать контуры объектов [24]. В отличие от старых методов, Кэнии использует более сложную технику фильтрации и связывания контуров, что делает его более устойчивым и точным в реальных приложениях. Сегодня этот алгоритм широко применяется в системах компьютерного зрения и является одним из стандартных инструментов для анализа изображений [44].

Алгоритм распознавания контуров Кэнни включает в себя несколько этапов:

1. Размытие по Гауссу. Операция размытия необходима для устранения шумов на исходном изображении перед применением детектора. Степень размытия изображения по Гауссу регулируется величиной, именуемой ядром размытия σ и выражается формулой (2.10).

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{\left(-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}\right)},$$
(2.10)

где *σ* — ядро размытия, определяющее уровень сглаживания изображения, х, у — координаты пикселей изображения.

2. Вычисление градиента. Для определения контуров изображения используется вычисление градиента с помощью операторов Собеля, описываемое выражением (2.11).

$$G_x = \frac{\partial I(x, y)}{\partial x}, \qquad G_y = \frac{\partial I(x, y)}{\partial y},$$
 (2.11)

где G<sub>x</sub> и G<sub>y</sub> — градиенты изображения по x и y, соответственно; *I*(*x*, *y*) — матрица изображения.

Далее рассчитывается величина градиента по формуле (2.12).

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2},$$
 (2.12)

где G<sub>x</sub> и G<sub>y</sub> — градиенты изображения по x и y, соответственно;

Угол ориентации градиента  $\theta$  определяется отношением (2.13).

$$\theta = acrtg\left(\frac{G_{y}}{G_{x}}\right), \tag{2.13}$$

где G<sub>x</sub> и G<sub>y</sub> — градиенты изображения по x и y, соответственно;

3. Применение пороговой фильтрации. Для выделения сильных и слабых контуров применяется метод пороговой фильтрации. При пороговой фильтрации пиксели с градиентом, превышающим верхний порог, считаются контуром, а пиксели, значения которых ниже нижнего порога, отбрасываются. Пиксели между порогами анализируются с учетом их связи с сильными контурами. На последнем этапе проводится соединение оставшихся пикселей в контуры, обеспечивая тем самым четкое выделение контуров расплава.

Метод выделения на изображении области интереса на основе значений пикселей. Полученный детектором Кэнни массив контуров распознанных образов сортируется в порядке убывания длин исходя из допущения что объект с наибольшей длиной контура представляет собой искомый образец. Применение метода оптического потока для сегментации металла исключает из маски стационарные объекты (в том числе индуктор и другие конструктивные элементы стенда) координата образца металла, найденного таким образом, не искажается артефактами.

Для нахождения координаты центр контура, полученный контур, вписывается в выпуклый многоугольник после чего находится центроида данного многоугольника. Координата распознанного образа ( $C_X$ ,  $C_Y$ ) расплава рассчитывается отношением моментов (2.14).

$$C_X = \frac{m_{10}}{m_{00}}; \ C_Y = \frac{m_{01}}{m_{00}},$$
 (2.14)

где  $C_X$  и  $C_Y$  - координаты центра контура, пиксель.

В компьютерном зрении и обработке изображений моменты изображения часто используются для характеристики формы объекта на изображении. Эти моменты фиксируют основные статистические свойства формы, включая площадь объекта, центроид (центр (x, y) -координаты объекта), ориентацию и другими свойства

изображения. Моменты для цифрового изображения рассчитываются по формуле (2.15).

$$m_{pq} = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} (j-i)^{p} (j-j)^{q} I(i,j), \qquad (2.15)$$

где *p* и *q* – порядки центрального момента *m*, соответствующего координатам изображения,

*I*- цифровое бинаризованное изображение с размерностью  $M \times N$ ,

Расстояние между центром контура расплава и центром межвиткового зазора индуктора (области интереса) рассчитывается как эвклидово расстояние между двумя точками по формуле (2.16).

$$d = \sqrt{(x_1^2 - x_2^2) + (y_1^2 - y_2^2)},$$
(2.16)

где d – расстояние между центроидой контура расплава и центром области интереса,  $x_1$ ,  $x_2$  и  $y_1$ ,  $y_2$  – координаты центра области интересов и центра контура соответственно.

Полученное расстояние измеряется в пикселях и не несет существенной ценности для системы управления, его необходимо, перевести в метрическую систему. Для этого необходимо определить величину потенциальной детализации изображения, которую обеспечивает на заданном расстоянии. Эта метрика, в терминах машинного зрения, носит название PPM (Pixel Per Metric). Цифровые изображения разделены на сетки пиксели, каждый из которых содержит цвет для конкретной точки изображения. Коэффициент PPM показывает соотношение количества пикселей изображения одной единицы длины в реальном мире. PPM используется для калибровки и перевод расстояний и размеров, измеренных в пикселях, в реальные физические величины. Значение PPM определяется с помощью эталонных объектов известного размера, которые присутствуют на изображении. Длина эталонного объекта в пикселях делится на его реальный размер, таким образом получается число пикселей на метр.

## 2.5.3 Методика калибровки камеры и расчета координат образца

После определения контура образец металла и нахождения его координаты необходимо выполнить преобразование координат из пиксельных координат изображения в координаты, связанные с реальной геометрией индуктора. Для корректного определения истинных координат образца необходимо произвести калибровку видео камеры, используемой в составе системы технического зрения.

Калибровка – это процесс определения характеристик камеры. Для проведения калибровки необходимо получить расчётные коэффициенты, с помощью которых можно точно определить, как точка в реальном мире связана с каждым пикселем на изображении, снятым на данную камеру. Различают встроенные параметры камеры и объектива и внешние. Такие параметры как оптический центр и фокусное расстояния линзы объектива, коэффициенты искажения называют внутренними. К внешним относят параметры, связанные с ориентацией камеры относительно заданной мировой системы координат.

Ниже перечислены наиболее распространенные методы калибровки камер [93]:

1. Калибровка на основе шаблона. Данный метод подразумевает получение набора из нескольких изображений калибровочного шаблона известных с разных точек съемки;

2. Калибровка на основе геометрических примитивов. Этот метод применим в тех случаях, когда анализируемая сцена содержит в визуально различимые геометрические примитивы, такие как прямые горизонтальные или вертикальные линии и их пересечения;

3. Калибровка с применением методов машинного обучения. Данный метод применяется преимущественно в тех случаях, когда возможности получения дополнительных изображений сцены существенно ограничены либо сцена может претерпевать значительные изменения в процессе съемки.

Так как в поставленной задаче ограничений по условиям получения изображений нет, а большая часть анализируемой сцены статична, то для калибровки камеры достаточно применения метода на основе шаблона.

Метод калибровки камеры на основе калибровочных шаблонов заключается в следующем. На изображениях калибровочных шаблона, полученных с калибруемой камеры, определяют координаты элементов узора. Полученные координаты используется для оценки параметров камеры, которые содержат собственную матрицу камеры и параметры искажений. На рисунке 2.5 представлена схема отражающая взаимосвязь систем координат и параметрических матриц.



Рисунок 2.5 – Взаимосвязь систем координат и параметрических матриц

# (составлено автором)

При калибровке камер широко применяются шаблоны «шахматная доска» (рисунок 2.6, А), содержащие чередующиеся квадраты, что позволяет точно выделять внутренние углы для построения модели камеры. Также используются шаблоны с кругами, где высокая точность определяется интерполяцией центров кругов. Асимметричные шаблоны с кругами (рисунок 2.6, Б) исключают неоднозначность сопоставления обнаруженных точек с шаблоном. Дополнительно применяются идентификаторами ригидные визуальные маркеры С уникальными ДЛЯ автоматизированного обнаружения, например такие как Aruco (Рисунок 2.6, В) [60]. Такие маркеры также способствуют надежному отслеживанию движения и положения камеры в пространстве. Комбинированные шаблоны, объединяющие, например, шахматную доску и круги, позволяют улучшить точность калибровки за счёт кросс-проверки точек. Выбор шаблона определяется требованиями к точности, условиями съемки и спецификой оптической системы.



Рисунок 2.6 – Стандартные калибровочные шаблоны. А – шахматная доска, Б - ассиметричный шаблон с кругами, В – шаблон с ригидными визуальными маркерами Aruco (составлено автором)

На рисунке 2.7 приведена блок-схема алгоритма калибровки камеры на основе шаблона.

Для этого используется аффинное преобразование, которое позволяет изобразить объект (в данном случае, расплав) в системе координат индуктора. Данное аффинное преобразование определяется выражением (2.17).

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} = S \cdot \frac{1}{w} \cdot H \cdot \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix},$$
 (2.17)

где *x<sub>r</sub>* и *y<sub>r</sub>* — координаты объекта в реальном мире (в метрах или другой единице измерения);

*x<sub>p</sub>* и *y<sub>p</sub>*— координаты объекта в пикселях на изображении, полученном с камеры;

S — масштабный коэффициент, который определяет, сколько метров соответствует одному пикселю, и может быть определен на основе известного расстояния и его соответствующего расстояния в пикселях;

*H* — матрица гомографии, описывающая преобразование между пиксельными координатами и реальными координатами, учитывающая перспективные искажения, если объект находится не в плоскости, параллельной камере;

 W — третий компонент векторного результата, полученного в результате умножения матрицы гомографии на вектор пиксельных координат, используемый для нормализации координат, позволяющий получить корректные значения x<sub>r</sub> и y<sub>r</sub>.



Рисунок 2.7 – Блок-схема алгоритма калибровки камеры на основе шаблона (составлено автором)

# 2.5.4 Методика оценки производительности системы технического зрения

Для обеспечения непрерывного мониторинга положения расплавляемого металла важно поддерживать достаточную частоту кадров, которая должна быть достаточной для отслеживания изменений в динамике расплава. Частота кадров зависит от нескольких факторов, таких параметров как амплитуда и скорость движения образца. Исходя из допущения, что скорость образца металла может варьироваться в пределах от нескольких миллиметров до сантиметров в секунду. Для обеспечения достаточной точности определения положения расплава необходимо, чтобы кадры видеопотока обновлялись с такой частотой, которая позволяет отслеживать его перемещение с минимальной ошибкой. Таким образом необходимо оценить время, которое требуется образцу металла, для перемещения на визуально заметное расстояние (например, 1мм). При скорости движения образца металла v в см/с, необходимая частота кадров  $F_{min}$  Может быть оценена по формуле (2.18).

$$f_{min} = \frac{v}{\Delta x'},\tag{2.18}$$

где  $\Delta x$  — минимальное расстояние, которое камера должна зафиксировать для определения положения расплава, например, 1 мм,

*v* – скорость движения образца в индукторе.

Если скорость расплава не превышает 2 см/с, то минимальная частота кадров для точного отслеживания будет определяться формулой (2.19).

$$f_{min} = \frac{2}{0.1} = 20 \frac{\kappa a \mu}{c e \kappa}$$
(2.19)

Таким образом, для надежного мониторинга расплавляемого металла частота кадров должна быть как минимум 20–40 кадров в секунду, а в более динамичных процессах – до 60 кадров в секунду. Так как скорость движения расплава в индукторе по мере нагревания изменяется неравномерно, то для обеспечения достаточной скорости измерений был выбран целевой интервал в 40–60 кадров в секунду. Задача мониторинга положения расплавляемого металла в индукторе на видеопотоке включает в себя важные этапы обработки данных: сегментацию с использованием оптического потока, детектирование контуров с помощью детектора Кэнни и преобразование координат в систему координат индуктора для последующего использования в численной модели напряженности электромагнитного поля индуктора.

# 2.5.5 Метрика IoU для оценки качества сегментации положения образца системой технического зрения

B рамках разработки системы технического зрения для определения пространственного положения образца металла в индукторе при левитационной плавке методом оптического потока, критически важным этапом является оценка объекта (образца) точности сегментации целевого на каждом кадре Олной ИЗ наиболее широко видеопоследовательности. признанных И фундаментальных метрик для количественной оценки качества сегментации бинарных масок является Intersection over Union (IoU) [65].

Метрика IoU оценивает степень совпадения между двумя областями на изображении:

- Предсказанная область (Prediction, P): Бинарная маска, полученная в результате работы алгоритма сегментации на основе оптического потока, где пиксели, отнесенные к образцу металла, имеют значение 1 (или 255), а фон – 0.

- Эталонная область (Ground Truth, GT): Истинная бинарная маска, вручную или иным высокоточным способом размеченная для данного кадра, точно определяющая положение образца.

IoU определяется как отношение площади пересечения (Intersection) предсказанной и эталонной областей к площади их объединения (Union). Данное отношение предаставлено формулой (2.20).

$$IoU(P,GT) = \frac{|P \cap GT|}{|P \cup GT|'},$$
(2.20)

где |P ∩ GT| - количество пикселей, классифицированных как образец и в предсказании, и в эталоне (логическое И),

Р ∪ GT| - общее количество уникальных пикселей, классифицированных как образец либо в предсказании, либо в эталоне, либо в обоих (логическое ИЛИ).

Для каждого кадра видеопоследовательности алгоритм сегментации на основе оптического потока генерирует бинарную маску Р, предсказывающую положение

образца. Эта маска сравнивается с соответствующей эталонной маской GT для того же кадра.

Поскольку оценка ведется на видеопоследовательности, итоговой метрикой качества алгоритма сегментации обычно служит среднее значение IoU по всем кадрам тестового набора. Выбор метрики IoU для оценки качества сегментации положения образца в данной работе является обоснованным и предпочтительным по следующим ключевым причинам:

Непосредственная оценка геометрического соответствия: Основная задача системы – определение точного пространственного положения образца относительно индуктора. IoU напрямую измеряет площадь совпадения между предсказанным и истинным контуром объекта [97]. Это напрямую коррелирует с точностью определения таких критически важных для системы управления параметров, как центр масс образца, его смещение относительно оси индуктора, углы наклона. Метрики, основанные только на точности пиксельной классификации (Accuracy), могут вводить в заблуждение при дисбалансе классов (малая площадь образца на фоне большого фона как в примере с сегментацией металла на фоне индуктора) [20].

Инвариантность к масштабу и смещению: IoU является относительной метрикой, выраженной в долях от 0 до 1. Это делает ее:

Инвариантной к абсолютному размеру объекта: Значение IoU одинаково значимо для кадров, где образец занимает разную площадь (например, при приближении/удалении или изменении ориентации).

Чувствительной к смещениям: небольшое пространственное смещение предсказанного контура относительно истинного, не затрагивающее центр масс, но уменьшающее пересечение и увеличивающее объединение, приведет к заметному снижению IoU. Это критически важно для обнаружения колебаний образца.

Интуитивная интерпретируемость: Значение IoU легко поддается интерпретации. Так 0.85 означает очень хорошее совпадение, 0.5 – приемлемое, но

требующее улучшений, 0.2 – плохое. Это упрощает анализ результатов и сравнение разных версий алгоритма или параметров настройки.

Стандартизация и сопоставимость: IoU является стандартом в задачах семантической и инстанс-сегментации в компьютерном зрении. Ее использование обеспечивает сопоставимость результатов данного исследования с работами других авторов, применяющих различные алгоритмы сегментации (включая основанные на оптическом потоке).

Адекватность для динамических сцен: Алгоритмы сегментации на основе оптического потока используют информацию о движении между кадрами для выделения объекта. IoU, рассчитываемая для каждого кадра независимо, позволяет:

– Оценить устойчивость сегментации во времени. Выявить кадры, где алгоритм дает сбой (например, при быстрых движениях, изменении освещенности от расплава, частичном перекрытии), по резкому падению значения IoU.

 Связать качество оценки оптического потока (насколько точно вычислены векторы движения) с итоговой точностью локализации объекта через качество сегментации.

Для системы управления плавкой наиболее важна область самого образца. IoU фокусируется именно на совпадении этой ключевой области, в отличие от метрик, сильно зависящих от точности фона (который может быть неоднородным из-за резких движений образца в индукторе, бликов). Её способность непосредственно оценивать геометрическое соответствие предсказанной и истинной областей объекта, инвариантность к масштабу, чувствительность к смещениям и применимость для анализа временных рядов делают IoU оптимальным выбором для валидации работы разрабатываемой системы технического зрения в контексте задач точного контроля положения образца при левитационной плавке металлов. Расчет среднего значения IoU по репрезентативной тестовой видеопоследовательности обеспечит объективное и сопоставимое измерение качества сегментации.

Для экспериментального определение IoU метрики предлагается использовать выборку из искусственно сгенерированные синхронизированных пар видеорядов, созданных программно для моделирования движения образца в индукторе [104]. Использование 3D-редакторов, таких как Blender, для их производства, включая видеопоследовательности с контролируемым движением образца в индукторе, представляет собой эффективную методологию ускорения подготовки данных для систем технического зрения. Ключевое преимущество заключается в возможности автоматической генерации абсолютно точных Ground Truth масок методом рендеринга сцены, где образец окрашен в уникальный высококонтрастный цвет с последующей пороговой сегментацией [104]. Этот подход полностью устраняет трудоемкий процесс ручной разметки, обеспечивая точное соответствие между реалистичным изображением и маской.

Такой подход позволяет воспроизвести широкий спектр условий (траектории движения, деформации образца, освещение, артефакты), создавая репрезентативные и масштабируемые наборы данных. Подобные методики генерации синтетических данных с автоматической разметкой успешно применяются в задачах машинного обучения для компьютерного зрения, таких как детектирование дефектов металла, подтверждая их валидность и эффективность для обучения и оценки алгоритмов в условиях дефицита реальных размеченных данных[15].

# 2.5.6 Метод управления на основе численной модели

В системе плавления металла во взвешенном состоянии управляемыми параметрами являются сила и частота тока в индукторе. Данные параметры определяют конфигурацию электромагнитного поля, создаваемого индуктором. Для поддержания расплавляемого образца металла в состоянии устойчивой левитации и одновременного нагревания металла необходимо поддерживать такие значения I и f при которых поле индуктора будет создавать достаточную выталкивающую силу, действующую на образце металла в индукторе, чтобы уравновешивать силу тяжести,

но при этом не выталкивать металл за пределы индуктора. Традиционные методы управления, такие как ПИД-регуляторы имеют ряд ограничений, связанных с нелинейной зависимостью F(z, f, I) и перекрестными связями между управляющими воздействиями [99].

Предлагаемая методика управления основывается на непосредственном использовании численной модели электромагнитного поля индуктора в контуре управления. Ключевым компонентом описанной стратегии является алгоритм оптимизации, работающий с ресурсоемкой численной моделью. Суть подхода заключается в использовании детерминированная hp-FEM-модели [12], решающей уравнения Максвелла (в квазистационарном приближении) для заданной геометрии индуктора, образца, свойств материалов и граничных условий. На вход модели подаются управляющие параметры: I (тока), f (частота), текущее положение образца металла z, свойства материала [67]. Модель рассчитывает пространственное распределение вектора магнитной индукции, электродинамической силы  $F_{EM}$ , действующей на образец, интегрируемой по его объему V. Модель используется внутри алгоритма оптимизации для поиска таких значений управляющих параметров (I, f), которые обеспечивают:

– баланс сил  $F_{EM} \approx F_g$  в целевой точке  $z_0$ ,

- устойчивость равновесия по z,

– выполнение технологических ограничений.

Оптимизатор, использующий численную модель как "черный ящик", вычисляющий целевую функцию и ограничения, находит оптимальные *I*<sub>opt</sub>, *f*<sub>opt</sub>. Найденные значения подаются на силовые преобразователи, управляющие индуктором. В качестве оптимизатора был выбран симплекс-метод Нелдера-Мида.

Алгоритм Нелдера-Мида не требует сложных математических операций (типа обращения матриц или точного линейного поиска), что облегчает его встраивание в систему управления и снижает вычислительную нагрузку на контроллере помимо вызовов модели. Хотя метод Нелдера-Мида не гарантирует нахождения глобального

минимума для невыпуклых задач (а задача управления левитацией явно невыпуклая), он эффективен для нахождения локальных минимумов и улучшения текущего состояния системы [39]. В контексте управления часто достаточно найти локально оптимальные *I*, *f*, обеспечивающие баланс сил и устойчивость вблизи текущего положения *z*.

Алгоритм метода 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 2.21.

$$F(X_1) \le F(X_2) \le \dots \le F(X_{n+1}), \tag{2.21}$$

где X<sub>1</sub> становится вершиной с наилучшим значением функции  $F(X_{лучш.})$ , а X<sub>n+1</sub> - вершиной с наихудшим значением  $F(X_{худ.})$ .

В двумерном случае (n=2), соответствующем управлению током и частотой, симплекс представляет собой треугольник, где X<sub>2</sub> является промежуточной вершиной. Далее вычисляется центр тяжести всех вершин, исключая худшую по формуле 2.22.

$$X_0 = n_1 \sum_{i=1}^{i} n_{X_i} \tag{2.22}$$

Следующей операцией является отражение худшей вершины относительно центра тяжести по формуле 2.23.

$$X_e = X_0 = \alpha (X_0 - X_{xyg}),$$
 (2.23)

где  $\alpha$  – коэффициент отражения, стандартное значение  $\alpha = 1$ 

В случае успешного отражения ( $F(X_{xyd}) \le F(X_r) < F(X_{лучш})$ ) точка  $X_{xyd}$  заменяется на  $X_r$ . Если отражение дает существенное улучшение  $F_r < F_{лучш}$ , выполняется операция расширения 2.24.

$$X_e = X_0 = \gamma (X_r - X_0), \qquad (2.24)$$

где  $\gamma$  – коэффициент расширения,  $\gamma > 1$ .

Оптимизатор на основе алгоритма Нелдера — Мида был реализован на языке Python. Блок-схем алгоритма представлена на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Блок-схем алгоритма Нелдера — Мида (составлено автором)

Как было сказано ранее, непосредственное измерение выталкивающей силы, действующей на образец металла в магнитном поле в условиях плавки во взвешенном состоянии, не представляется возможным. Для установления значения коэффициента неоднородности электромагнитного поля предлагается использовать упрощенную численную модель напряженности электромагнитного поля, рассчитываемую непосредственно в ходе технологического процесса.

Для построения упрощенной численной модели использовалось открытое программное обеспечение Argros 2D [40]. Agros 2D позволяет моделировать различные физические процесс и явления, в том числе электромагнетизм. В основе Agros 2D используется решатель Hermes (Higher-order modular finite element system) реализующий адаптивный метод конечный элементов hp-FEM [88]. Адаптивная вариация МКЭ позволяет осуществлять расчеты значительно быстрее, чем при использовании классического МКЭ, что являлось ключевым фактором при выборе численного метода для данной задачи, где численная модель рассматривается как компонент систему управления. Также стоит отметить, что Agros 2D имеет

программный интерфейс (API), позволяющий задавать параметры модели, запускать расчеты и обрабатывать результаты программным путем, что позволяет автоматизировать процесс запуска расчетов численной модели при проведении серии экспериментов, а также интегрировать его в состав системы управления током индуктора в качестве модельного блока.

При построении упрощенной численной модели, для обеспечения скорости выполнения расчетов были выполнены следующие допущения:

– Рассматривался двумерный случай (срез) распределения напряженности электромагнитного поля. Исходя из поставленной задачи минимизации колебаний, совершаемых образцом в заданной плоскости, расчет распределения напряженности поля по всему объему индуктора является избыточным.

 – Рассматривалась только половина конуса индуктора. Данное допущение принято исходя из симметричности конструкции конического индуктора с противовитком.

Данные допущения позволяют построить численную модель обладающую одновременно высокой производительностью и адекватностью, достаточной для нахождения величины коэффициентов неоднородности магнитного поля на основе данных о положении расплава в нем в режиме реального времени.

Предложенная методика управления положением металла в индукторе левитационной установки на основе симплекс-метода Нелдера-Мида, интегрированного с численной моделью электромагнитного поля, представляет собой мощный подход для решения сложной задачи стабилизации нелинейной, многопараметрической системы в экстремальных условиях.

## 2.6 Выводы к главе 2

В главе 2 разработана методическая база для проведения экспериментальных исследований. Обоснован выбор бесконтактного мониторинга положения расплава на основе технического зрения. Описаны применяемые в исследовании методы

численного моделирования (GetDP/Gmsh, Agros 2D), выбор которых мотивирован необходимостью анализа нелинейных процессов взаимодействия поля с расплавляемым металлом.

Предложена структура САУ с тремя ключевыми модулями:

– Система технического зрения (OpenCV) с алгоритмами Farneback и Кэнни для отслеживания положения расплава.

– Упрощенная 2D hp-FEM модель (Agros 2D) для расчета коэффициента неоднородности поля (A) и силы Лоренца.

– Блок оптимизации (симплекс-метод Нелдера-Мида) для генерации управляющих сигналов (*I*, *f*).

Разработана программа исследований с этапами: валидация модели, создание алгоритмов СТЗ, оценка производительности. Описан лабораторный стенд на базе индуктора конического типа, нагревателя МИКРОША-15-8-ВЧ и камеры Basler aca640-120gc. Детализированы методики: калибровка камеры (шаблон «шахматная доска»), оценка IoU для сегментации, расчет РРМ для перевода координат. Таким образом, представленная методика создает основу для экспериментальной апробации системы стабилизации в условиях, приближенных к реальным технологическим процессам.

# ГЛАВА З ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РАСПЛАВА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ИНДУКТОРЕ

## 3.1 Численная модель магнитного поля конического индуктора

Для исследования влияния геометрических характеристик электромагнитного поля, создаваемого индуктором, была проведена серия экспериментов с численной моделью напряженности магнитного поля индуктора, методика которых описана в главе 2. Для оценки влияния распределения электромагнитного поля индуктора на величину выталкивающей силы электромагнитного поля, действующей на образец металла в индукторе, была построена численная модель магнитного поля создаваемого коническим индуктора с противовитком на основе метода конечных элементов.

Геометрия конического индуктора, используемая в численной модели, была выполнена в масштабе 1:1 к индуктору, используемому в лабораторном стенде. На рисунке 3.1 представлена схема конического индуктора.

Выбор материала образца и его массы также определялся параметрами экспериментального оборудования. Необходимым условием для верификации результатов численного моделирования было обеспечение возможности достижения состояния левитации образца металла при заданных параметрах виртуального эксперимента. Таким образом в качестве материала образа был выбран алюминий благодаря низкой плотность 2,69 (г/см<sup>3</sup>) и относительно высокой электропроводности, что позволяет воспроизвести состояние левитации нагреваемого образца в физическом эксперименте.



Рисунок 3.1 – Схема сечения катушки конического индуктора с противовитком

(составлено автором)

- Высотка катушки индуктора (H) – 400 мм,

- Диаметр трубки (d) – 6 мм,

- Радиус нижнего витка (r) – 10 мм,

- Радиус верхнего витка (R) – 15 мм,

- Высота противовиткового зазора (h) – 2 мм.

На рисунке 3.2 приведена трехмерная модель индуктора, построенная в программном пакете Gmesh.



Рисунок 3.2 – Геометрия конического индуктора противовитком, выполненная в Gmesh (составлено автором)

Граничные условия, заданные для численного эксперимента и интервалы варьирования параметров приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Граничные условия численного эксперимента (составлено автором)

Параметр	Значение
Частота тока, Гц	50000
Тока в индукторе, А	470
Масса образца, г	0.7
Электропроводность меди (трубка), См*см	$6\cdot 10^7$
Электропроводность алюминия (образец), См*см	$3\cdot 10^7$

Расчетная сетка конического индуктора представлена на рисунке 3.3.





В ходе эксперимента с численной моделью по исследованию влияния положения расплавляемого образца металла на характер распределения магнитного поля в индукторе варьировались положение и размеры образцов алюминия в индукторе при неизменной частоте и силе тока. Образцы алюминия с различной массой сдвигались по вертикали, вниз от противовитка индуктора к его основанию с фиксированным шагом равным 1 мм (рисунок 3.1). Для каждой итерации расчетов определялось значение силы Лоренца, действующей на образец в заданной координате.

На рисунках 3.4—3.7 приведены распределения силы Лоренца, действующей на образцы алюминия различной массы при смещении по вертикали внутри конического индуктора. Красной линией на графиках обозначена сила тяжести, действующая на образец советующего размера.



Рисунок 3.4 – График распределения силы Лоренца, действующий на образец алюминия с радиусом 5 мм (составлено автором)



Рисунок 3.5 – График распределения силы Лоренца, действующий на образец алюминия с радиусом 4 мм (составлено автором)



Рисунок 3.6 – График распределения силы Лоренца, действующий на образец алюминия с радиусом 3 мм (составлено автором)

Из диаграмм распределения силы Лоренца от положения образцов 1–3 в индукторе видно, что по мере уменьшения радиусов образцов их зона левитации опускается по вертикали, ближе к конусу индуктора.



Рисунок 3.7 – График распределения силы Лоренца, действующий на образец алюминия с радиусом 2 мм

Как видно из графика на рисунке 3.7, величина силы Лоренца, действующая на образец металла с радиусом 2 мм при любом положении образца в индукторе по оси Z не достигает величины силы тяжести действующий на образец алюминия данного размера. Несмотря на то, что масса образца 4 меньше масс образцов 1-3, из-за малого радиусами образца 4 его поверхность находится слишком далеко от поверхностей витков катушки индуктора, из-за чего магнитное поле индуктора, действующее на образец не создает достаточной силы для удержания его во взвешенном состоянии.

На основе найденных в ходе эксперимента с численной моделью индуктора значений сил Лоренца были рассчитаны значения коэффициента неоднородности магнитного поля, окружающего расплавляемые образцы металла. На рисунке 3.8 представленные графики изменения значения коэффициента *A* от положения для образцов алюминия различных размеров.



Рисунок 3.8 – Графики зависимости значений коэффициента А от положения в индукторе по вертикали для образцов алюминия разного радиуса (составлено автором)

На основе графиков, представленных на рисунке 3.8 можно сделать следующий вывод: зависимость коэффициента *А* от положения образцов в индукторе варьируется
для образцов с разными радиусами (*r*). С увеличением радиуса образца максимальные значения коэффициента *A*, достигаются в более низких областях индуктора, что объясняется изменением распределения неоднородности электромагнитного поля в зависимости от размера образца. Координаты образца металла, в которых коэффициент *A* достигает наибольших значений на графике, соответствуют областям с наибольшей неоднородностью магнитного поля индуктора.

Для определения зависимости силы Лоренца, действующей на металл от частоты тока в индукторе, была проведена серия экспериментов с численной моделью, в ходе которых, положение образца в индукторе оставалось неизменным и при этом варьировалась частота тока, подаваемого в индуктор. Полученные зависимости приведены на рисунке 3.9.





Рисунок 3.9 – Графики зависимостей силы Лоренца от частоты тока в индукторе для образцов различных радиусов (составлено автором)

## 3.2 Определение положения расплава в индукторе

В ходе лабораторных испытаний бескостного способа мониторинга положения расплава в индукторе на основе технического зрения, методика которого описана в

главе 2, осуществлялась регистрации колебания, совершаемых расплавляемым образцом алюминия в индукторе. Получаемые кадры видеоряда (Рисунок 3.) обрабатывались методом оптического потока.



Рисунок 3.10 – Пример исходного изображения конического индуктора с образом металла внутри (составлено автором)

Калибровка камеры осуществлялась на основе калибровочного шаблона тип «шахматная доска» описанного ранее в главе 2. Для калибровки камеры был подготовлен черно-белый шаблон и закреплен на твердой поверхности. Затем была выполнена серия из 16 снимков шаблона с различных ракурсов. Примеры снимков калибровочного шаблона представлены на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Снимки калибровочных шаблонов полученные в процессе калибровки (составлено автором)

На основе вышеописанных методик подтверждённых экспериментально разработан программный пакет «Программа для автоматического определения положения образца металла в коническом индукторе» (свидетельство № 2023662416, приложение А). В основе разработанного ПО лежит алгоритм сегментации видеопотока и контурного анализа [17].

Предложенный алгоритм определения положения образца металла в индукторе непрерывно получает кадры с видеокамеры [6]. При получении каждого кадра он преобразуется в оттенки серого после чего, для пары кадров (текущего и предыдущего) рассчитывается вектор оптического потока на основе изображения в оттенках серого. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3.12.



Рисунок 3.12 – Блок-схема алгоритма определения положения образца в индукторе для системы технического зрения (составлено автором)

На рисунке 3.13 приведены кадры, иллюстрирующие работу предложенного алгоритма сегментации образца металла в индукторе. Найденные системой технического зрения координаты центра распознанного контура образа, пересчитанные в координаты относительно центра межвиткового зазора, передаются в блок численного моделирования.



Рисунок 3.13 – Визуализация процесса выделения контура образца в индукторе (составлено автором)

образца

(А) Исходное изображение образца, находящегося внутри индуктора. Красной линией обозначен контур, выделенный методом обнаружения границ Кэнни, а зеленая точка соответствует центроиде контура, принимаемой за координату образца.

(Б) Маска сегментации, полученная на основе метода оптического потока, демонстрирует область, соответствующую объекту интереса (образцу металла).

(В) Контур, выделенный методом Кэнни, подтверждает корректность сегментации и обеспечивает точное определение границ образца, используемых для нахождения его текущей координаты в индукторе.

На рисунке 3.14 предоставлен график вертикальных колебаний образа металла в коническом индукторе, полученный системой технического зрения на экспериментальном стенде.



Рисунок 3.14 – График колебаний, совершаемых образом алюминия в индукторе полученный при помощи алгоритма (составлено автором)

## 3.3 Оценка точности сегментации образца металла в индукторе

Количественная оценка точности алгоритма сегментации положения образца металла в индукторе, основанного на оптическом потоке, осуществлялась с использованием метрики Intersection over Union (IoU), описанной в главе 2.

Эксперимент по оценке качества сегментации состоял из следующих этапов:

1. Генерация синтетических видеоданных

В ПО Blender были подготовлены идентичные 3D-сцены левитационной установки с параметризуемыми образцами металла (диаметр и положение в индукторе).

Для тестирования алгоритма сегментации на основе 3D-сцен было подготовлено 2 набора синхронизированных набора видео движений образца металла в индукторе в различных условиях съемки.

Первый набор состоял из реалистичных видео с физически корректными материалами (металл, индуктор), освещением, тенями и эффектами плавки для тестирования алгоритма.

В торой набор состоял из идентичных сцен подготовленных с применением Ground Truth рендеринга, где образец окрашен в уникальный высококонтрастный цвет (чистый зеленый, RGB(0, 255, 0)), а фон и индуктор – в контрастные цвета (черный/красный). Такой подход позволил в дальнейшем выполнить автоматическую сегментацию по цвету и подготовить GT маски для расчета метрики IoU.

Для формирования репрезентативной валидационной выборки была соблюдена вариативность сцен, описывающих движения образца в индукторе. Параметризованы ключевые факторы:

– Типы движения образца: линейный дрейф колебаний.

- Скорости движения (низкая, средняя, высокая).

- Условия освещения (яркость, контраст, блики).

– Уровень шума на изображении (имитация сенсора камеры).

2. Подготовка валидационной выборки GT масок.

Автоматическое построение GT масок осуществлялось методом цветовой сегментации. Для каждого кадра видео из GT рендеринга применяется пороговая обработка в цветовом пространстве HSV с последующей бинаризацией. Сегментированные маски были дополнительно очищены от шумов.

3. Применение алгоритма сегментации на основе оптического потока.

На вход алгоритма подвались кадры 3D-сцен из валидационной выборки с реалистичным рендерингом. Алгоритм выделял движущийся объект (образец металла) и на основе полученного контура была построена предсказанная бинарная маска (P mask) для каждого кадра.

4. Расчет значений метрики IoU.

– Для каждого кадра і:

о Загружается GT маска и предсказанная маска Рі.

 $\circ$  Рассчитывается  $IoU_i$ 

– Выполняется усреднение значений метрики IoU для всей выборки и отдельных сценариев:

 $\circ \overline{IoU} = \sum IoU_i$  для всех кадров.

 $\odot \overline{IoU_{cueh}i} = \overline{IoU_i}$ для кадров, принадлежащих конкретному сценарию движения/условий.

Размер и состав тестовой выборки определялся условиями статистической значимости и покрытия вариативности. Объем выборки включал 1000 кадров, что обеспечивает её репрезентативность для расчета среднего значения (*IoU*) с приемлемой доверительной областью. Для адекватного отражения всех критических режимов работы системы левитационной плавки были подготовлены сцены, отражающие следующие условия:

– Типы движения (60%). Каждый тип – на разных скоростях (низкая/средняя/высокая):

о линейный дрейф (200 кадров),

о вращение (200 кадров)

о колебания (200 кадров).

– Изменение формы (20%). 200 кадров с имитацией деформации образца.

– Сложные условия (20%): 200 кадров с вариациями:

о Яркие блики, низкая освещенность (100 кадров).

о Шум: Имитация сенсорного шума разного уровня (50 кадров).

о Артефакты рендеринга: размытое изображение (50 кадров).

Примеры кадров 3D-сцен из валидационной выборки приведены на рисунке 3.15.



Рисунок 3.15 – Кадры из валидационной выборки, демонстрирующие различные сценарии искажений. А- неискаженное изображение, Б – яркие блики на изображении (засветка кадра), В – деформация образца, Г – маска сегментации (составлено автором)

Результаты экспериментальной оценки метрики IoU на валидационной выборке приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты экспериментальной оценки метрики IoU для предложенного алгоритма сегментации расплава в индукторе (составлено автором)

Сценарий	Подсценарий	Кол-во кадров	Средний IoU ( <i>IoU</i> )	Диапазон IoU	Основные причины ошибок (при низком IoU)
Стабильное положение	-	100	0.98	[0.96, 1.00]	Незначительный шум на границах
Линейный дрейф (X/Y)	Низкая скорость	100	0.92	[0.88, 0.96]	Размытие контура
	Средняя скорость	100	0.87	[0.82, 0.92]	Увеличение ошибки потока на границах.
	Высокая скорость	100	0.75	[0.68, 0.82]	Размытие, частичная потеря границ
Вращение (ось Z)	Низкая угл. скорость	100	0.90	[0.86, 0.94]	Искажение контура
	Средняя угл. скорость	100	0.83	[0.78, 0.88]	Искажение углов.
	Высокая угл. скорость	100	0.70	[0.62, 0.77]	Серьезные искажения, потеря частей контура
Колебания	Малая амплитуда	100	0.91	[0.87, 0.95]	-
	Большая амплитуда	100	0.80	[0.74, 0.86]	Запаздывание алгоритма, "двоение" контура
Изменение формы	Деформация	100	0.85	[0.80, 0.90]	Быстрон изменение контура

Продолжение таблицы 3.2

Сценарий	Подсценарий	Кол-во кадров	Средний IoU ( <i>ĪoŪ</i> )	Диапазон IoU	Основные причины ошибок (при низком IoU)
Сложные условия	Яркие блики	50	0.65	[0.55, 0.75]	Ошибки потока на бликах, ложное выделение артефактов
	Низкая освещенность	50	0.72	[0.65, 0.80]	Увеличение шума, потеря деталей контура
	Сенсорный шум	50	0.82	[0.76, 0.88]	Шумовые выбросы, искажающие контур
	Легкие артефакты	50	0.78	[0.70, 0.85]	Ложное выделение артефактов.
Среднее значение ( <i>IoU</i> )		1000	0.82	[0.55, 1.00]	-

Алгоритм демонстрирует высокую точность сегментации ( $\overline{IoU} > 0.95$ ) при отсутствии движения и артефактов, подтверждая корректность базовой реализации. Чувствительность предложенного алгоритма к скорости движения выражается незначительным снижением  $\overline{IoU}$  при высокой скорости линейного движения (0.75) и вращения (0.70), что указывает на ограничения метода оптического потока в условиях быстрых перемещений и размытия изображения. При это алгоритм демонстрирует

устойчивость к умеренным деформациям, *IoU* = 0.85 при изменении формы показывает приемлемую, но не идеальную адаптацию алгоритма к динамике процесса плавки.

В сложных условиях съемки, таких как резкое падение точности при ярких бликах ( $\overline{IoU} = 0.65$ ) и низкой освещенности ( $\overline{IoU} = 0.72$ ) наблюдается уязвимость алгоритма к изменениям освещения. Однако данный фактор компенсируется установкой осветительного оборудования.

Общая адекватность предложенного алгоритма сегментации подтверждается средним значение  $\overline{IoU} = 0.82$  по разнородной выборке, что свидетельствует о работоспособности метода сегментации на основе оптического потока для решения задачи позиционирования образца в широком диапазоне условий.

## 3.4 Оценка производительности алгоритма мониторинга положения образца

Для установления возможности применения предложенного алгоритма обработки видеопотока в составе системы управления в режиме реального времени была проведена оценка его производительности. Характеристика, отражающая скорость обработки алгоритмом видеопотока определялась на основе метрики FPS (Frames Per Second, кадров в секунду), которая отражает количество кадров, обрабатываемых алгоритмом за единицу времени. Также, для более детальной оценки была определена величина задержки при обработке одного кадра, определяемая как среднее время обработки одного кадров в единицу времени. Для оценки данной характеристики был проведен эксперимент, в ходе которого на экспериментальном стенде была отснята тестовая видеозапись процесса плавки металла в магнитном поле. На диаграмме, представленной на рисунке 3.16, отображены интервалы времени, затраченного на обработку каждого кадра видео эксперимента.



Рисунок 3.16 – Диаграмма скорости обработки кадров предложенным алгоритмом системы технического зрения (продолжительность видео 10 с)

Среднее значение продолжительности обработки одного кадра составило 10.2 мс, а значение FPS. Всплески на диаграмме, характеризующиеся наиболее заметным увеличением продолжительность обработки одного кадра, соответствуют фазам наиболее активного движения образца металла в индукторе. При этом стоить отметить, что максимальна возможная скорость обработки видеопотока определяется оборудования, техническими характеристиками на котором она будет осуществляться. Так на ЭВМ с многоядерными процессорами производительность СТЗ будет выше благодаря обработке видео в многопоточном режиме. Таким образом, на основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что предложенный в работе алгоритм системы технического зрения позволяет определять положения образца расплавляемого металла в индукторе с частотой от 40 до 60 кадров в секунду, что позволяет сделать вывод о возможности его применения в составе САУ процессом правки металлов во взвешенном состоянии.

## 3.5 Выводы к главе 3

В ходе экспериментальных исследований с численной моделью по определению влияния положения расплава на характер распределения электромагнитного поля в индукторе:

 Установлены зависимости между положением образца и коэффициентом неоднородности магнитного поля;

Определены условия достижения состояния левитации образца алюминия
 в индукторе при заданных параметрах частоты и силы тока;

– Предложен и экспериментально апробирован метод бесконтактного мониторинга положения расплава на основе алгоритма технического зрения;

– Проведена экспериментальная оценка быстродействия алгоритма и точности сегментации образца в индукторе с применением метрики IoU.

– Предложенный алгоритм определения положения расплавляемого образца на основе компьютерного зрения (свидетельство о регистрации ЭВМ № 2023662416), позволяет определять координату расплавленного образца с частотой (40–60 кадров в секунду), что свидетельствует о возможности применения данного метода в системах управления реального времени.

## ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТАЛЛА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

## 4.1 Численная модель как компонент системы управления

Задача стабилизации положения образца расплавляемого металла в индукторе заключается в удержании его в устойчивом состоянии, предотвращая смещение под воздействием электромагнитных сил и гравитации. Для этого регулируются параметры магнитного поля и применяются системы обратной связи. Эффективность определяется устойчивостью положения металла, минимизацией отклонения положения металла относительно его исходного положения.

Для нахождения величин управляющих воздействий, сообщаемых индуктору необходимо иметь представление о характере распределения магнитного поля вокруг нагреваемого образца. Данная характеристика описывается коэффициентом А. Как было установлено в главе 3, коэффициент неоднородности может быть найден методом численного моделирования магнитного поля индуктора. Однако, модель, рассмотренная ранее, не позволяет выполнять необходимые расчеты в режиме реального времени, что исключает возможность ее применения в составе САУ.

Для оперативного расчета распределения магнитного поля индуктора была построена упрощенная численная модель конического индуктора, отражающая двумерный представления объекта управления (срез вертикальной плоскости индуктора).

На рисунке 4.1 в приведена геометрия и расчётная сетка, использующаяся в составе упрощенной численной модели.



Рисунок 4.1 – Геометрия индуктора и расчётная сетка для МКЭ

Параметры упрощенной численной модели приведены на таблице 4.1. Таблица 4.1 – Параметры упрощенной численной модели (составлено автором)

Параметр	Значение
Частота тока, кГц	50
Сила тока в индукторе, А	470
Масса образца, г	0.7
Электропроводность меди (трубка), См/м	6x10 <sup>7</sup>
Электропроводность алюминия (образец), См/м	3x10 <sup>7</sup>

Метод управления на основе численной модели, предложенный в главе 2, предполагает выполнение расчета характеристик магнитного поля индуктора, который должен осуществляться непосредственно во время протекания процесса плавки металла. Для реализации данного условия численная модель должна соответствовать критерию экономичности. Экономичность численной модели – это характеристика, отражающая эффективность использования вычислительных

ресурсов при ее применении, в частности, затраты машинной памяти и времени вычислений. С точки зрения оценки возможности применения численной модели в составе системы управления наибольшее значение именно время вычисления модели. Оно определяется промежуток необходимый для построения геометрии с учетом текущего положения образца металла в индукторе, генерации расчетной сетки, расчета численных значений напряженности поля индуктора и нахождения численного значения коэффициента неоднородности поля.

Временная характеристика экономичности численной модели  $T_{M.O6iii}$ , определяется по формуле (4.1).  $T_{M.O6iii}$ , не является постоянной величиной, она изменяется в зависимости от размеров и положения образца в индукторе. При каждом распознавании системой технического зрения, описанной в главе 2, в модель передаются новые координаты положения расплава в индукторе, по которым перестраивается геометрия и расчетная сетка численной модели. Для обновленной модели производится расчет напряженности магнитного поля и определяется значение силы Лоренца и коэффициента А.

$$T_{\text{M.Obij.}} = t_{\Gamma eo.} + t_{\text{Cer.}} + t_{\text{Pac.}} + t_{\text{Kos}\phi.}, \tag{4.1}$$

где  $t_{\Gamma eo.}$ -время построения геометрии, мс,

 $t_{\text{Сет.}}$ - время построения расчетной сетки, мс,

 $t_{\text{Pac.}}$ -время вычисления модели, мс,

 $t_{\text{Коэф.}}$ - время расчета коэффициента A, мс.

Метрика временной экономичности численной модели был рассчитана для выборки из 15 экспериментов при различных положениях образца металла в индукторе. Средние значения для каждого этапа расчета при ведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Средние значения продолжительности различных этапов расчета модели (составлено автором)

Метрика (среднее значение)	Значение, мс
$\overline{t}_{\Gamma eo.}$ время построения геометрии	3.27
$\overline{t}_{Cer.}$ время построения расчетной сетки	12.16

Метрика (среднее значение)	Значение, мс
$\overline{t}_{Pac.}$ время вычисления модели	27,6
$\overline{t}_{{ m Ko}_{ m O}\phi_{ m A}}$ время расчета коэффициента	0.23
<u>Т</u> <sub>м.общ.</sub>	43,26

Среднее значения  $T_{M.O6im}$ , для выполнения одного расчета составило **43,26 мс** что позволяет сделать выводы о возможности применения численной модели в составе системы управления. На рисунке 4.2 приведено распределение магнитного поля в зависимости от положения образца алюминия в индукторе.



Рисунок 4.1 – Распределение напряженности электромагнитного поля в индукторе для различных положений образца алюминия, полученные в упрощенной модели (составлено автором)

Как видно из рисунков 4.2, по мере уменьшения расстояния между витками поле концентрируется у поверхности образца.

## 4.2 Валидация численной модели

Для оценки возможности применения предложенной численной модели в составе системы управления процессом левитационной плавки была проведена экспериментальная валидация с применением системы технического зрения.

Валидация численной модели магнитного поля индуктора является критическим этапом для обеспечения достоверности прогнозов выталкивающей силы

(силы Лоренца) и последующего моделирования динамики образца металла [57]. Метод основан на сопоставлении косвенных наблюдаемых – траектории движения образца, полученных экспериментально и рассчитанных на основе модели. Если модель корректно описывает электромагнитные силы, то динамика образца, рассчитанная через решение уравнения движения под действием этих сил и гравитации, должна соответствовать экспериментальным наблюдениям. В условиях левитации прямое измерение электромагнитных сил технически невозможно из-за высоких температур и электромагнитных помех. Единственной наблюдаемой величиной, интегрирующей действие всех сил, является положение образца. Согласно фундаментальным принципам механики, совпадение траекторий движения при идентичных начальных условиях доказывает адекватность модели сил. Уравнение движения образца в вертикальной плоскости выражается формулой (4.2).

$$m\frac{d^{2}r}{dt^{2}} = F_{L}(r, I, f) + mg, \qquad (4.2)$$

где *т* – масса образца, кг,

g – ускорение сводного падения, м/с<sup>2</sup>,

I – ток индуктора, А,

f – частота, Гц,

*F*<sub>L</sub>- выталкивающая сила, действующая на образец, Н.

Валидация выполняется через сопоставление кинематических характеристик движения образца, полученных независимыми методами: экспериментальным, путем фиксации положения образа с использование системы технического зрения (СТЗ) и расчетным (интегрирование уравнения с модельной  $F_L$ ). Эксперимент по валидации модели осуществлялся на стенде (рисунок 2.2), описанном в главе 2.

Для фиксации фактического положения расплава использовалась видеокамера, установленная в фиксированной позиции относительно индуктора.

Система технического зрения, описанная в главе 3, с частотой 60 Гц записывает координаты центра масс образца металла в системе координат индуктора.

Сглаживание фиксируемых СТЗ колебаний образца осуществлялось экспоненциальным фильтром.

Положение образца металла в индукторе определялось численно по формуле (4.3). При этом для каждого  $\vec{r}$  в численной модели выполняется расчет  $F_L$ .

$$\overrightarrow{r_{MOA}}(t) = \int_0^t \int_0^\tau \frac{1}{m} \left[ \overrightarrow{F_L}(\vec{r}, I_0, f_0) + m\vec{g} - k\vec{v} \right] d\tau dt, \qquad (4.3)$$

где *т* – масса образца металла, кг,

 $\overrightarrow{F_L}$  – выталкивающая сила, действующая на образец, Н,

 $\vec{g}$ - ускорение свободного падения, м,

*k* – коэффициент демпфирования,

 $\vec{v}$  – скорость движения образца,  $\frac{M}{c}$ .

Серия экспериментов состояла из 10 запусков для каждого режима (*I*, *f*) с варьированием радиуса (*r*) образца металла в диапазоне 3–6 мм.

На рисунке 4.3 представлено графическое сопоставление фаз и амплитуд колебаний образца металла в индукторе, полученных численно и экспериментально.



Рисунок 4.3 – Графическое сопоставление вертикальных колебаний, полученных в ходе численного моделирования и физического эксперимента (составлено автором)

Количественная оценка валидности результатов численного моделирования определялась следующими метриками:

Относительная ошибка амплитуды: относительная ошибка модельных и экспериментальных амплитуд колебания образца определялись по формуле (4.4).

$$\sigma A = \left| \frac{A_{\text{мод}} - A_{\text{эксп}}}{A_{\text{эксп}}} \right| \times 100\%, \tag{4.4}$$

где А<sub>эксп</sub> – амплитуда установившихся колебаний полученная экспериментально, м, А<sub>мод</sub> – амплитуда установившихся колебаний, рассчитанная в численной модели, м.

Среднеквадратическая ошибка по координатам (RMSE) определяется выражением (4.5).

$$RMSE_{z} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (z_{\text{мод}}(t_{i}) - z_{\text{эксп}}(t_{i}))^{2}},$$
(4.5)

где  $z_{\text{мод}}(t_i)$ - модельное значение координаты в момент времени *i*, м,

 $z_{
m эксп}(t_i)$ - экспериментальное значение координаты образца в момент времени *i*, м, N – количество зафиксированных координат, шт.

Критерий Пирсона: оценка корреляции между расчетным значением положения образца ( $z_{\text{мод}}$ ) и полученным экспериментально ( $z_{\text{эксп}}$ ) определялась по формуле (4.6).

$$R = \frac{\sum (z_{\text{мод}} - \bar{z}_{\text{мод}})(z_{\text{эксп}} - \bar{z}_{z_{\text{эксп}}})}{\sqrt{\sum (z_{\text{мод}} - \bar{z}_{\text{мод}})^2 (z_{\text{эксп}} - \bar{z}_{z_{\text{эксп}}})^2}},$$
(4.6)

где *z*<sub>мод</sub>модельное значение координаты образца, мм,

 $z_{
m эксп}$ - экспериментальное значение координаты образца, мм.

Рассчитанные по формулам 4.4 - 4.6 метрики приведены в таблице 4.3

Таблица 4.3 – Количественная оценка валидности результатов численного моделирования (составлено автором)

Метрика	Среднее значение для валидационной выборки
<i>σA</i> , %	7.2
$RMSE_z$ , мм	0.38
R	0,97

Предложенная методика валидации численной модели устанавливает соответствие между численной моделью магнитного поля и физическим процессом левитации через анализ динамики образца. Количественные критерии (RMSE, R, δA) обеспечивают объективность оценки. Полученные результаты подтверждают точность модели в рабочем диапазоне параметров: ошибка позиционирования <8%, что допустимо для задач управления стабилизацией.

# 4.3 Стабилизация положения образца металла в индукторе на основе численной модели

Для поддержания положения и стабилизации металлического образца в состоянии левитации необходимо реализовать систему управления с обратной связью, регулирующую ток *I* и частоту ω на основе измерений положения *z* металла [2].

Для оценки эффективности рассматриваемого метода управления был проведен физический эксперимент по стабилизации положения расплавляемого образца алюминия в электромагнитном поле во взвешенном состоянии. Фотография экспериментального стенда представлена на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Экспериментальный стенд для оценки системы стабилизации положения металла в индукторе (составлено автором)

В рамках данного эксперимента осуществлялось нагревание образцов алюминия с радиусами 3, 4, 5 мм в переменном электромагнитном поле в коническом индукторе. Было проведено 2 серии экспериментов: с системой стабилизации положения расплава и без нее. В ход эксперимента текущее положение образца металла в индукторе фиксировалось системой технического зрения [5]. Полученные СТЗ координаты образца передавались для построения численной модели магнитного поля индуктора с учетом текущей координаты образца в нем.

Для оценки эффективности системы стабилизации во время каждого эксперимента дополнительно фиксировались колебания образцов относительно центра межвиткового зазора. Колебания фиксировались также при помощи системы технического зрения, при этом в качестве координаты образца рассматривалась центроида выделенного алгоритмом контура образца металла. На рисунках 4.5–4.8 приведены графики колебаний образцов с радиусами от 3 до 6 мм на протяжении первых 10 секунд эксперимента.



Рисунок 4.5 – Графики колебаний, совершаемых образом алюминия с радиусом 3 мм (составлено автором)



Рисунок 4.6 – Графики колебаний, совершаемых образом алюминия с радиусом 4 мм



Рисунок 4.7 – Графики колебаний, совершаемых образом алюминия с радиусом 5 мм (составлено автором)





Для полученных амплитуд колебаний образца металла в индукторе был рассчитан коэффициент затухания колебаний (4.7).

$$\gamma = \frac{\delta}{T},\tag{4.7}$$

где Т – период колебаний, с,

δ – усредненный логарифмический декремент колебаний, формула 4.8.

$$\delta = \frac{1}{N+1} \sum_{n=1}^{N-1} \ln(\frac{A_n}{A_{n+1}}), \tag{4.8}$$

где N – количество колебаний за время T, c,

*A<sub>n</sub>* – амплитуды пиков колебаний образца в индукторе, мм.

Рассчитанные по результатам эксперимента значения коэффициента затухания в свободном режиме и с системой стабилизации для образцов с радиусом (r) 3–6 мм приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Значения коэффициента затухания для образцов радиусом (r) 3–6 мм (составлено автором)

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

Полученные обосновывают целесообразность результаты внедрения предложенной адаптивной системы управления на базе симплекс-оптимизации и численного моделирования для повышения надежности, точности И энергоэффективности промышленных установок бестигельной левитационной плавки металлов.

# 4.4 Оценка экономической эффективности внедрения системы стабилизации положения расплава

Внедрение разработанной системы автоматической стабилизации положения расплава при левитационной плавке металлов направлено на устранение ключевого технологического риска – контакта расплава с индуктором. Данное событие носит аварийный характер, приводя к немедленной остановке процесса, повреждению оборудования (индуктора) и безвозвратной потере дорогостоящего образца расплава. Оценка экономической эффективности системы фокусируется на количественном определении предотвращаемых ею потерь, сопоставленных с затратами на ее разработку, внедрение и эксплуатацию.

Для оценки экономического эффекта предлагается использовать методику расчета предотвращенных потерь (убытков), вызванных аварийными остановками технологического процесса из-за контакта расплава с индуктором. Эта методика выбрана по следующим мотивированным причинам:

Прямая связь с основным эффектом: Основной результат внедрения системы – предотвращение конкретных, идентифицируемых аварийных событий (контакт металла с индуктором). Методика напрямую оценивает экономические последствия этих событий. Учитывает как прямые материальные потери (образец, индуктор), так и косвенные потери, связанные с простоем оборудования и персонала.

Оценка технико-экономической эффективности системы. Расчет предполагает, что внедренная система стабилизации полностью исключает аварии, вызванные неконтролируемым контактом расплава с индуктором. Методика расчета техникоэкономической эффективности фокусируется на эффекте предотвращения аварий.

Расчет годовых предотвращенных потерь вычисляется по формуле (4.9).

$$P_a = N_a \times \left(S_{\text{ofp}} + S_{\text{инд}} + S_{\text{пр}}\right),\tag{4.9}$$

где N<sub>a</sub> – частота аварий, раз/год,

 $S_{\text{обр}}$ – стоимость утерянного образца, руб.,

 $S_{\rm инд}$ – затраты на ремонт индуктора, руб.,

Годовой экономический эффект был рассчитан по формуле (4.10).

$$\Theta_{\rm rog} = P_a - \left(3_{\rm {}_{\rm {}SKC\Pi}} + \frac{K_{\rm {}CMCT}}{T_{\rm {}CJ}}\right),\tag{4.10}$$

где *N<sub>a</sub>* – частота аварий, раз/год,

К<sub>сист</sub>- капитальные затраты на разработку и внедрение САУ, руб.,

З<sub>эксп</sub>– эксплуатационные затраты, руб.,

Т<sub>сл</sub>- срок службы САУ, лет.

Срок окупаемости внедрения системы САУ определяется формулой 4.11.

$$PBP = \frac{K_{\text{сист}}}{\Im_{\text{год}} - \frac{K_{\text{сист}}}{T_{\text{сл}}}},$$
(4.11)

где К<sub>сист</sub>- капитальные затраты на разработку и внедрение САУ, руб.,

Т<sub>сл</sub>- срок службы САУ, лет,

Э<sub>год</sub> – годовой экономический эффект, руб.

Эффективность капитала рассчитывается по формуле (4.12) при расчете экономического эффекта предлагаемой системы автоматического управления.

$$E = \frac{\vartheta_{\rm rog}}{K_{\rm cucr}},\tag{4.12}$$

где Э<sub>год</sub> – годовой экономический эффект, руб.

К<sub>сист</sub>- капитальные затраты на разработку и внедрение САУ, руб.,

Рассчитанные значения экономических показателей, достигаемых при внедрении системы управления приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Сводная таблица экономических показателей внедрения САУ (составлено автором)

Параметр	Титан	Алюминий
Годовые потенциальные потери без САУ, руб.	1192000	1168840
Годовая экономия, руб.	654857	631697
Срок окупаемости, лет	2.5	2.8
Эффективность капитала	0.26	0.25

Для дополнительной оценки потенциального экономического эффекта от внедрения системы управления в технологический процесс левитационной плавки был проведен сравнительный анализ энергозатрат при левитационной плавке металла с учетом электромагнитных и тепловых потерь. Расчет энергопотребления требует учета активных и реактивных потерь, геометрии индуктора, частоты тока и свойств материалов.

Активная мощность определяется омическими потерями в индукторе определяется выражением (4.13).

$$P = I^2 R_{2}, \tag{4.13}$$

где I - действующее значение силы тока, А,

 $R_{3}$  - эффективное сопротивление индуктора (Ом), учитывающее скин-эффект.

Величина эффективного сопротивления конического индуктора определяется его геометрией (выражение 4.14).

$$R_{\mathfrak{Z}} = \frac{\rho \cdot L_{\Pi \mathsf{pob}}}{\delta \cdot S_{\Pi \mathsf{ob}}},\tag{4.14}$$

где  $\rho$ - удельное сопротивление материала индуктора, Ом·м,

 $\delta$  - глубина скин слоя, м,

 $S_{\Pi \text{ob}}$ - площадь поверхности скин-слоя индуктора, м<sup>2</sup>.

Длина проводника  $L_{Пров}$  может быть найдена через геометрические параметры конуса индуктора по формуле (4.15):

$$L_{\Pi \text{pob}} = N \cdot \sqrt{h^2 + (r_2 - r_1)^2}, \qquad (4.15)$$

где *N*— число витков, шт,

*h* — высота конуса индуктора, м,

*r*<sub>1</sub>, *r*<sub>2</sub>— минимальный и максимальный радиусы конуса индуктора, м,

Площадь поверхности индуктора  $S_{\Pi OB}$  Определяется выражением (4.16).

$$S_{\Pi OB} = 2\pi r_{Cp} \cdot \delta, \qquad (4.16)$$

где  $r_{Cp}$  – средний радиус витков катушки индуктора (м),

 $\delta$  - глубина скин слоя, м.

Средний радиус витков индуктора, который определяется из выражения (4.17).

$$r_{\rm Cp} = \frac{r_1 - r_2}{2},\tag{4.17}$$

На высоких частотах (*f*) ток распределяется в поверхностном слое проводника. Глубина скин-слоя (δ) для материала индуктора (меди) определяется по формуле (4.18).

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r'}},\tag{4.18}$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление материала индуктора (Ом·м),  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \Gamma/M$  (магнитная постоянная),

 $\mu_r$ — относительная магнитная проницаемость материала (для меди  $\mu_r \approx 1$ ),

Реактивная мощность *Q*, обусловлена индуктивностью катушки и может рассчитываться по формуле (4.19).

$$Q = I^2 \cdot X_L, \tag{4.19}$$

где  $X_L$ - индуктивное сопротивление (Ом),

I - действующее значение силы тока (А).

Индуктивное сопротивление индуктора  $X_L$  зависит от частоты тока f (ГЦ) и индуктивности индуктора L (Гн) и определяется выражением (4.20).

103

$$X_L = 2\pi f L, \tag{4.20}$$

где *L* – индуктивность индуктора, Гн,

*f*-частота тока, Гц.

Индуктивность катушки конического индуктора с учетом ее геометрии аппроксимируется формулой (4.21).

$$L = \frac{\mu_0 N^2 \cdot h}{2\pi} \cdot \operatorname{Ln} \frac{r_2}{r_1},\tag{4.21}$$

где *N*— число витков,

*h*— высота конуса индуктора, м,

 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м (магнитная постоянная),

*r*<sub>1</sub>, *r*<sub>2</sub>— минимальный и максимальный радиусы конуса индуктора, v.

Полная мощность конического индуктора определяется выражением (4.22).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2},\tag{4.22}$$

где *S* – полная мощность, подаваемая на индуктор, Вт.

Также для оценки коэффициента полезного действия установки левитационной плавки при нагревании необходимо определить долю энергии сообщаемую непосредственно нагреваемому образца. Количество энергии, перешедшей в тепловую, можно рассчитать по формуле (4.23):

$$Q_{0\mathrm{f}\mathrm{p}} = cm\Delta t_{0\mathrm{f}\mathrm{p}},\tag{4.23}$$

где *с* – теплоёмкость нагреваемого металла, Дж/(кг·°С),

т – масса нагреваемого металла, кг,

 $\Delta t_{0 \text{ бр.}} = t_{0 \text{ бр.}2} - t_{0 \text{ бр.}1}$ - приращение температуры нагреваемого образца, К.

Для оценки влияния предложенного метода управления током и частотой индуктора на энергопотребление установки левитационной плавки был проведен эксперимент, в ходе которого осуществлялось нагревание двух образцов алюминия с одинаковой массой до температуры плавления (для алюминия 660 °C). В ходе эксперимента фиксировалась мгновенные значения таких параметров процесса левитационной плавки как: сила тока I(A), частота тока в индукторе  $f(\Gamma q)$ , а также температура нагреваемого образцов t(°C). Температура образца металла в индукторе фиксировалась при помощи тепловизора установленного перпендикулярно горизонтальной плоскости противовитка индуктора.

На основе параметров процесса, полученных экспериментально по формулам 4.13 – 4.23 было найден общее количество энергии, сообщенное индуктору, и доля энергии, перешедшая в тепловую энергию металла в ходе экспериментов. Полученные значения позволяют рассчитать разницу энергозатрат и оценить потенциальных экономический эффект от включения в технологический процесс предложенной системы управления.

На рисунке 4.9 представлены графики изменения силы тока, частоты тока в индукторе и расходуемой энергии.



Рисунок 4.9 – Графики динамики изменения полной мощности индуктора, мгновенной мощности и изменения частоты и силы тока в индукторе (составлено

## автором)

Удельная энергия на единицу массы расплавляемого металла можно оценить по формуле (4.24).

$$n = \frac{E}{m},\tag{4.24}$$

где *n* – удельная энергия на единицу массы металла Дж/кг,

*m* – масса расплавляемого образца, кг,

Е – общая энергия, сообщенная индуктору, Дж.

На основе полученных в ходе эксперимента значений силы и частоты тока, а также температуры металла было рассчитано суммарное потребление электроэнергии установкой левитационной плавкой для двух режимов работы. А на основе данных об температуре образца была определена доля энергии, сообщенная металлу и перешедшая в тепловую. В таблице 4.6 представлены усредненные значения энергетических характеристик левитационной плавки: режиме стабилизации расход энергии снизился в среднем на 6,8 % или 82,8 Дж для образцов массой ≈ 2г.

Таблица 4.6 – Усредненные значения энергетических характеристик левитационной плавки (составлено автором)

Режим плавки	Общая энергия, Е <sub>общ</sub> , Дж	Тепловая энергия образца, Q, Дж
Свободный	1214,4	1025.2
режим		
Стабилизация	1131,6	1017.5

Таким образом внедрение системы стабилизации положения расплава в индукторе позволяет снизить затраты энергии на нагревание и удержание металла в состоянии левитации. Снижение затрат энергии за счет динамического изменения силы тока в индукторе системой стабилизации в зависимости от положения образца в индукторе составило 6,8 %. Из этого следует, что внедрение САУ на основе численной модели в технологический процесс левитационной плавки экономически целесообразно даже для относительно дешевых металлов (алюминий), но максимальная эффективность достигается при работе с высоколегированными и тугоплавкими сплавами (титан, молибден).

Для производства титана инвестиции окупаются в течение 2.5 лет с последующей годовой экономией >650 тыс. руб., что подтверждает экономическую целесообразность внедрения предложенной САУ. При этом наиболее существенную роль играем непосредственно предотвращение контактов металла с поверхностью, ведущее к утрате образца. Снижение затрат энергии, наблюдаемое в случае стабилизации образца путем регулирования тока индуктора не вносит значительный вклад в экономичность технологического процесса.

## 4.5 Выводы к главе 4

В ходе лабораторный испытаний, направленных на решение задачи стабилизации положения расплавляемого образца металла в индукторе на основе результатов численной модели магнитного поля индуктора, были получены следующие результаты: - Обосновано применение численной модели для определения значения коэффициента неоднородности магнитного поля индуктора и силы Лоренца, действующей на металл;

- Построена упрощённая численная модель магнитного поля конического индуктора, выполнена экспериментальная валидация предложенной модели;

- Разработан программный комплекс, позволяющий в режиме реального времени осуществлять стабилизацию положения расплавляемого образца металла в индукторе на основе данных о положении образца и численной модели магнитного поля индуктора.

Ожидаемый экономический эффект выражается в снижении числа аварийных остановов технологического процесса плавления во взешанном состоянии из-за контактов металла с индуктором. Для титановых производств инвестиции окупаются в течение 2.5 лет с последующей годовой экономией >650 тыс. руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационной работы проведено изучение процесса плавания металлов в магнитном поле во взвешенном состоянии, в ходе которого были а 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;

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 выталкивающей 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 применения 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 позволившая уменьшить амплитуду колебаний металла.
Ожидаемый экономический эффект выражается в снижении числа аварийных остановов технологического процесса плавления во взвешенном состоянии из-за контактов металла с индуктором.

На основании проведённого 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 каскада индукторов и минимизировать негативный эффект взаимоиндукции, а также разработать алгоритмы, которые будут учитывать взаимодействие между несколькими индукторами и обеспечивать стабильное положение расплава в каждом из 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. 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.

Нечаевский, А.В. История развития компьютерного имитационного моделирования / Нечаевский А.В. // Системный анализ в науке и образовании. – 2013.
 – Т. 2. – С. 103-117.

4. **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.

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

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

7. Фогель, А.А. Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии. Т. 11 / Фогель А.А.; ред. А.Н. Шамова. – 2. – Ленинград : Машиностроение, 1989. 8. Al-Qudah, S. Large Displacement Detection Using Improved Lucas–Kanade Optical Flow / S. Al-Qudah, M. Yang // Sensors. – 2023. – T. 23. – № 6.

9. Ataşlar-Ayyıldız, B. Control and robust stabilization at unstable equilibrium by fractional controller for magnetic levitation systems / B. Ataşlar-Ayyıldız, O. Karahan, S. Yılmaz // Fractal and Fractional. – 2021. – T. 5. –  $\mathbb{N}$  3.

Baake, E. Recent scientific research on electrothermal metallurgical processes / E.
 Baake, V. A. Shpenst // Journal of Mining Institute. – 2019. – T. 240. – C. 660-668.

11. Baker, S. A database and evaluation methodology for optical flow / S. Baker, D. Scharstein, J. P. Lewis [и др.] // International Journal of Computer Vision. – 2011. – T. 92. –  $N_{0}$  1.

12. Banjai, L. Exponential convergence of hp FEM for spectral fractional diffusion in polygons / L. Banjai, J. M. Melenk, C. Schwab // Numerische Mathematik. – 2023. – T. 153. – № 1.

13. Beloglazov, I. I. The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry / I. I. Beloglazov, P. A. Petrov, V. Y. Bazhin // Eurasian Mining. -2020. - T. 2020. - N 2. - C. 50-54.

14. Bohacek, J. A GPU solver for symmetric positive-definite matrices vs. traditional codes / J. Bohacek, A. Kharicha, A. Ludwig  $[\mu \ \text{дp.}]$  // Computers and Mathematics with Applications. – 2019. – T. 78. – No 9. – C. 2933-2943.

15. Boikov, A. Synthetic data generation for steel defect detection and classification using deep learning / A. Boikov, **V. Payor**, R. Savelev, A. Kolesnikov // Symmetry. – 2021. – T. 13. –  $N_{2}$  7.

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

17. 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.  $-2023. - T. 2023. - N_{\text{O}} 4.$ 

18. Bradski, G. The OpenCV Library / G. Bradski // Dr. Dobb's Journal of Software Tools. – 2000.

19. Canny, J. A Computational Approach to Edge Detection / J. Canny // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – T. PAMI-8. –  $\mathbb{N}_{2}$  6.

20. Cheng, B. Boundary IoU: Improving object-centric image segmentation evaluation / B. Cheng, R. Girshick, P. Dollár [и др.] // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2021.

21. Chmilenko, F. V. Manifestation of the «striped heating» effect in numerical simulation of induction heating of ferromagnetic bodies near the Curie point / F. V. Chmilenko, I. I. Rastvorova, M. R. Yermekova // Journal of Physics: Conference Series. –  $2021. - T. 1753. - N_{\rm P} 1$ .

22. Demidovich, V. B. A combined method of simulation of an electric circuit and field problems in the theory of induction heating / V. B. Demidovich, I. I. Rastvorova // Russian Electrical Engineering.  $-2014. - T. 85. - N \ge 8. - C. 536-540.$ 

23. Demidovich, V. B. A combined method of simulation of an electric circuit and field problems in the theory of induction heating / V. B. Demidovich, I. I. Rastvorova // Russian Electrical Engineering.  $-2014. - T. 85. - N_{\odot} 8. - C. 536-540.$ 

24. Ding, L. Canny Edge Detector / L. Ding, A. Goshtasby // Pattern Recognition. – 2001. – T. 34. – № 3.

25.docs.baslerweb.com: докуменатция Basler. – URL: https://docs.baslerweb.com/aca640-121gm#specifications (дата обращения: 02.07.2025). – Текст : электронный.

26. Donald, M Wroughton. Magnetic levitation and heating of conductive materials / Donald M Wroughton, Okress Ernest Carl. – US, 1954.

27. Easter, S. Numerical modelling of liquid droplet dynamics in microgravity / S. Easter, V. Bojarevics, K. Pericleous // Journal of Physics: Conference Series. – 2011. – T. 327.

28. Easter, S. Numerical modelling of liquid droplet dynamics in microgravity / S.
Easter, V. Bojarevics, K. Pericleous // Journal of Physics: Conference Series. – 2011. – T. 327.

29. Farnebäck, G. Two-frame motion estimation based on polynomial expansion / G. Farnebäck // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2003. – T. 2749.

30. Gao, X. Application of levitation melting to the separation of oxide inclusions from nitrides and carbides in Ni-based superalloy / X. Gao, L. Zhang, X. Qu [и др.] // Metallurgical Research and Technology. – 2020. – T. 117. – № 2.

31. Geuzaine, C. GetDP: a general finite-element solver for the de Rham complex / C. Geuzaine // PAMM.  $-2007. - T. 7. - N_{\odot} 1.$ 

32. Geuzaine, C. Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities / C. Geuzaine, J. F. Remacle // International Journal for Numerical Methods in Engineering.  $-2009. - T. 79. - N_{2} 11.$ 

33. Glebovsky, V. Electromagnetic Levitation of Metal Melts / V. Glebovsky // Magnetic Materials and Magnetic Levitation. – 2021.

34. Golak, S. Numerical model of large-scale levitation melting process / S. Golak, B. Panic // Archives of Metallurgy and Materials.  $-2019. - T. 64. - N_{2} 2. - C. 627-632.$ 

35. https://nashaelektronika.ru: документация нагревателя Микроша. – URL: https://nashaelektronika.ru/indukcionnye-nagrevateli/indukcionnyj-kuznechnyj-nagrevatelmikrosha-15-8-vch (дата обращения: 02.07.2025). – Текст : электронный.

36. Jiang, Q. Kinetic aspects of phosphorus removal from electromagnetically levitated 600 MPa steel droplets / Q. Jiang, G. Zhang, Y. Yang  $[\mu \ \text{дp.}]$  // Metals. – 2021. – T. 11. – No 9. – C. 1-13.

37. Jiang, Q. Dephosphorization of Metallurgical-Grade Silicon by Electromagnetic Levitation. T. 52 / Q. Jiang, G. Zhang, Y. Yang, A. McLean. – 2021.

38. Johnen, A. Efficient Computation of the Minimum of Shape Quality Measures on Curvilinear Finite Elements / A. Johnen, C. Geuzaine, T. Toulorge, J. F. Remacle // Procedia Engineering. – 2016. – T. 163.

39. Karad, S. G. Fractional order controller based maximum power point tracking controller for wind turbine system / S. G. Karad, R. Thakur // International Journal of Electronics. -2022. -T. 109.  $-N_{2}$  5.

40. Karban, P. Numerical solution of coupled problems using code Agros2D / P. Karban, F. Mach, P. Kůs [и др.] // Computing. – 2013. – Т. 95.

41. Kassym, K. Atomization processes of metal powders for 3D printing / K. Kassym,
A. Perveen // Materials Today: Proceedings. – 2019. – T. 26. – № xxxx. – C. 1727-1733.

42. Khorshev, A. Simulation of induction heating of a ferromagnetic plate with a covering inductor / A. Khorshev, A. Bondar, O. Streltsova [ $\mu$  др.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – T. 2032. – No 1. – C. 012025.

43. Kinev, E. S. Universal MHD device for automation of casting control of aluminum / E. S. Kinev, A. A. Tyapin, E. A. Golovenko [и др.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Т. 919.

44. Lee, J. Energy Efficient Canny Edge Detector for Advanced Mobile Vision Applications / J. Lee, H. Tang, J. Park // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology.  $-2018. - T. 28. - N_{\rm P} 4.$ 

45. Levshin, G. E. Magnetization of ferromagnetic charge at induction heating / G. E. Levshin // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2022. – T. 65. – № 2.

46. Lewis, J. C. The stabilization of liquid metal during levitation melting / J. C. Lewis, H. R. J. Neumayer, R. G. Ward // Journal of Scientific Instruments. – 1962. – T. 39. –  $N_{2}$  11.

47. Li, B. New technology of melting refractory metals-vacuum levitation melting / B. Li, S. Zhang, S. Yuan, G. Chen // Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Nonferrous Alloys. -2016. - T. 36. - N = 4.

48. Lohöfer, G. Heat balance in levitation melting: Sample cooling by forced gas convection in Argon / G. Lohöfer, S. Schneider // High Temperatures - High Pressures. –  $2016. - T. 45. - N_{2} 4.$ 

49. Lohöfer, G. Heat balance in levitation melting: Sample cooling by forced gas convection in Helium / G. Lohöfer, S. Schneider // High Temperatures - High Pressures. –  $2015. - T. 44. - N_{\rm P} 6.$ 

50. Lohöfer, G. Heat balance in levitation melting: Sample cooling by forced gas convection in Helium / G. Lohöfer, S. Schneider // High Temperatures - High Pressures. –  $2015. - T. 44. - N_{2} 6.$ 

51. Makarov, V. L. Developing digital twins for production enterprises / V. L. Makarov, A. R. Bakhtizin, G. L. Beklaryan // Business Informatics. – 2019. – T. 13. – № 4

52. Miłkowska-piszczek, K. Control and design of the steel continuous casting process based on advanced numerical models / K. Miłkowska-piszczek, J. Falkus // Metals. – 2018. – T.  $8. - N_{2} 8$ .

53. Mun, J. Operating Thermal Characteristics of REBCO Magnet for Maglev Train Using Detachable Cooling System / J. Mun, C. Lee, K. Kim [и др.] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2019. – T. 29. – № 5.

54. Nagase, T. Solidification microstructures of the ingots obtained by arc melting and cold crucible levitation melting in TiNbTaZr medium-entropy alloy and TiNbTaZrX (X = V, Mo, W) high-entropy alloys / T. Nagase, K. Mizuuchi, T. Nakano // Entropy. – 2019. – T. 21. –  $N_{2}$  5.

55. Nordine, P. C. Properties of high-temperature melts using levitation / P. C. Nordine, J. K. R. Weber, J. G. Abadie // Pure and Applied Chemistry.  $-2000. - T. 72. - N_{\rm P} 11. - C. 2127-2136.$ 

56. Nycz, B. Influence of selected model parameters on the electromagnetic levitation melting efficiency / B. Nycz, L. Malinski, R. Przylucki // Applied Sciences (Switzerland). –  $2021. - T. 11. - N_{2} 9.$ 

57. Nycz, B. A Simulation Model for the Inductor of Electromagnetic Levitation Melting and Its Validation / B. Nycz, R. Przyłucki, Ł. Maliński, S. Golak // Materials. – 2023. – T. 16. – № 13.

58. Okress, E. C. Electromagnetic levitation of solid and molten metals / E. C. Okress, D. M. Wroughton, G. Comenetz [и др.] // Journal of Applied Physics. – 1952. – T. 23. –  $N_{2}$  5.

59. Onile, A. E. Uses of the digital twins concept for energy services, intelligent recommendation systems, and demand side management: A review. T. 7 / A. E. Onile, R. Machlev, E. Petlenkov, [и др.]. – 2021.

60. Oščádal, P. Improved pose estimation of aruco tags using a novel 3d placement strategy. T. 20 / P. Oščádal, D. Heczko, A. Vysocký, [и др.]. – 2020.

61. Oskolkov, A. Indirect temperature measurement in high frequency heating systems / A. Oskolkov, I. Bezukladnikov, D. Trushnikov // Sensors.  $-2021. - T. 21. - N_{2} 7.$ 

62. Palacz, M. Experimental Analysis of the Aluminium Melting Process in Industrial Cold Crucible Furnaces / M. Palacz, B. Melka, B. Wecki [и др.] // Metals and Materials International. – 2020. – T. 26. – № 5. – С. 695-707.

63. Pan, D. Temperature Measurement and Compensation Method of Blast Furnace Molten Iron Based on Infrared Computer Vision / D. Pan, Z. Jiang, Z. Chen [и др.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2019. – Т. 68. – № 10.

64. Peifer, W. A. Levitation melting ...... A Survey of the State-of-the-Art / W. A. Peifer // JOM.  $-1965. - T. 17. - N_{2} 5.$ 

65. Peng, H. A Systematic IoU-Related Method: Beyond Simplified Regression for Better Localization / H. Peng, S. Yu // IEEE Transactions on Image Processing. – 2021. – T. 30.

66. Rajput, H. A shock like no other: coronavirus rattles commodity markets. T. 23 / H. Rajput, R. Changotra, P. Rajput, [и др.]. – 2021.

67. Rosinová, D. Comparison of nonlinear and linear controllers for magnetic levitation system / D. Rosinová, M. Hypiusová // Applied Sciences (Switzerland). – 2021. – T. 11. – № 17.

68. Saleem, S. Visible spectrum and infra-red image matching: A new method / S. Saleem, A. Bais // Applied Sciences (Switzerland).  $-2020. - T. 10. - N_{2} 3.$ 

69. Sanz-Serrano, F. Power Distribution in Coupled Multiple-Coil Inductors for Induction Heating Appliances / F. Sanz-Serrano, C. Sagues, S. Llorente // IEEE Transactions on Industry Applications.  $-2016. - T. 52. - N_{\odot} 3.$ 

70. Sanz-Serrano, F. Power Distribution in Coupled Multiple-Coil Inductors for Induction Heating Appliances / F. Sanz-Serrano, C. Sagues, S. Llorente // IEEE Transactions on Industry Applications.  $-2016. - T. 52. - N_{2} 3.$ 

71. Sassonker, I. Electro-mechanical modeling of electromagnetic levitation melting system driven by a series resonant inverter with experimental validation / I. Sassonker, A. Kuperman // Energy Conversion and Management. – 2020. – T. 208.

72. Seidel, A. EML - An electromagnetic levitator for the International Space Station / A. Seidel, W. Soellner, C. Stenzel // Journal of Physics: Conference Series.  $-2011. - T. 327. - N_{\rm P} 1. - C. 1-14.$ 

73. Seidel, A. EML - An electromagnetic levitator for the International Space Station / A. Seidel, W. Soellner, C. Stenzel // Journal of Physics: Conference Series.  $-2011. - T. 327. - N_{\rm P} 1. - C. 1-14.$ 

74. Sergeant, P. Magnetic shielding of levitation melting devices / P. Sergeant, D.
Hectors, L. Dupré, K. Van Reusel // IEEE Transactions on Magnetics. – 2010. – T. 46.

75. Shabalov, M. Y. The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration in the energy sector / M. Y. Shabalov, Y. L. Zhukovskiy, A. D. Buldysko [и др.] // Energy Reports. – 2021. – Т. 7. – С. 2664-2680.

76. Sharma, G. K. On the suitability of induction heating system for metal additive manufacturing / G. K. Sharma, P. Pant, P. K. Jain [и др.] // Proceedings of the Institution of

Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2021. – T. 235. – № 1-2.

77. Shi, B. H. Effect of Temperature on Dephosphorization of Ferrosilicon using Electromagnetic Levitation Technology under Vacuum / B. H. Shi, G. F. Zhang, P. Yan [и др.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Institute of Physics Publishing, 2018. – T. 423.

78. Spitans, S. Numerical simulation of electromagnetic levitation in a cold crucible furnace / S. Spitans, E. Baake, A. Jakovičs, H. Franz // Magnetohydrodynamics. – 2015. – T. 51. – № 3. – C. 567-578.

79. Spitans, S. Investment Castings with Unique Levitation Melting Technology FastCast / S. Spitans, C. Bauer, E. Baake. – 2021. – № November.

80. Spitans, S. Large-scale levitation melting and casting of titanium alloys / S. Spitans, H. Franz, E. Baake, A. Jakovičs // Magnetohydrodynamics. – 2017. – T. 53. – № 4. – C. 633-641.

81. Spitans, S. Large-scale levitation melting and casting of titanium alloys / S.
Spitans, H. Franz, E. Baake, A. Jakovičs // Magnetohydrodynamics. – 2017. – T. 53. – № 4.
– C. 633-641.

82. Spitans, S. Numerical Modeling and Optimization of Electrode Induction Melting for Inert Gas Atomization (EIGA) / S. Spitans, H. Franz, E. Baake // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. – 2020. – T.  $51. - N_{2} 5. - C. 1918-1927.$ 

83. Sun, B. Development of a pyrometer that measures the true temperature field of the two-dimensional array / B. Sun, X. Sun, M. Luan  $[\mu \ \text{дp.}]$  // Applied Sciences (Switzerland). – 2020. – T. 10. – No 8.

84. Therneau, T. M. Generalized Linear Models (2nd ed.). / T. M. Therneau, P. McCullagh, J. A. Nelder // Journal of the American Statistical Association. – 1993. – T. 88.
– № 422.

85. Torresani, E. Influence of gravity on sintering of 3D-printed powder components / E. Torresani, R. M. German, R. Huff, E. A. Olevsky // Journal of the American Ceramic Society. – 2022. – T. 105. – № 1. – C. 131-146.

86. Turgaeva, A. A. BLOCK-MODULE MODEL OF AUDITING THE EFFICIENCY OF THE INTERNAL CONTROL SYSTEM / A. A. Turgaeva // Vestnik of Kazan State Agrarian University.  $-2021. - T. 16. - N_{\rm P} 1.$ 

87. Vasilyeva, N. Big data as a tool for building a predictive model of mill roll wear / N. Vasilyeva, E. Fedorova, A. Kolesnikov // Symmetry.  $-2021. - T. 13. - N_{\odot} 5.$ 

88. Vejchodský, T. Modular hp-FEM system HERMES and its application to Maxwell's equations / T. Vejchodský, P. Šolín, M. Zítka // Mathematics and Computers in Simulation. – 2007. – T. 76. –  $N_{2}$  1-3.

89. Venčels, J. Simulation of 3D MHD with free surface using open-source EOFlibrary: Levitating liquid metal in an alternating electromagnetic field / J. Venčels, A. Jakovičs, V. Geža // Magnetohydrodynamics. – 2017. – T. 53. –  $\mathbb{N}$  4. – C. 643-652.

90. Vöth, S. Potential of Modelica for the creation of digital twins / S. Vöth, M. Vasilyeva // Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. – 2021.

91. Vuzens, AP. The use of physical modeling to study the soaring of liquid metal over parallel coils. / Vuzens AP // Magnetic Hydrodynamics.  $-1971. - N_{\odot} 3. - C. 19-22.$ 

92. Wang, S. Oscillations and Size Control of Titanium Droplet for Electromagnetic Levitation Melting / S. Wang, H. Li, D. Yuan [и др.] // IEEE Transactions on Magnetics. – 2018. – Т. 54. – № 3.

93. Wang, Y. M. A camera calibration technique based on OpenCV / Y. M. Wang, Y. Li, J. B. Zheng // Proceedings - 3rd International Conference on Information Sciences and Interaction Sciences, ICIS 2010. – 2010.

94. Witteveen, J. P. 3D modeling of electromagnetic levitation coils / J. P. Witteveen, R. van Gastel, A. van Houselt, H. J. W. Zandvliet // Current Applied Physics. – 2021. – T. 32. – № January. – C. 45-49.

95. Witteveen, J. P. Containerless metal single-crystal growth via electromagnetic levitation / J. P. Witteveen, M. A. B. Vrielink, R. van Gastel [ $\mu$  др.] // Review of Scientific Instruments. – 2021. – T. 92. – Nº 10.

96. Wu, P. Electromagnetic levitation of silicon and silicon-iron alloy droplets / P.
Wu, Y. Yang, M. Barati, A. McLean // High Temperature Materials and Processes. – 2014.
- T. 33. – № 5.

97. Wu, S. IoU-aware single-stage object detector for accurate localization / S. Wu,
X. Li, X. Wang // Image and Vision Computing. – 2020. – T. 97.

98. Yadav, A. Simulation of Melting Process of a Phase Change Material (PCM) using ANSYS (Fluent) / A. Yadav, S. Soni // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2017. – № February.

99. Yadav, S. Optimized PID controller for magnetic levitation system / S. Yadav, S.
K. Verma, S. K. Nagar // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – T. 49. – № 1. – C. 778-782

100. Yan, Z. Robust Infrared Superpixel Image Separation Model for Small Target Detection / Z. Yan, Y. Xin, L. Liu [ $\mu$  др.] // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2021. – T. 14.

101. Yang, H. Gravity on Crystallization of Lysozyme: Slower or Faster? / H. Yang, L. Huang, F. Zhang [и др.] // Crystal Growth and Design. – 2019. – T. 19. – № 12.

102. Yu, J. Unique Role of Refractory Ta Alloying in Enhancing the Figure of Merit of NbFeSb Thermoelectric Materials / J. Yu, C. Fu, Y. Liu [и др.] // Advanced Energy Materials. – 2018. – T. 8. – № 1.

103. Yumuk, E. Application of fractional order PI controllers on a magnetic levitation system / E. Yumuk, M. Güzelkaya, I. Eksin // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences.  $-2021. - T. 29. - N_{\odot} 1.$ 

104. Zdziebko, P. Synthetic image generation using the finite element method and blender graphics program for modeling of vision-based measurement systems / P. Zdziebko, K. Holak // Sensors.  $-2021. - T. 21. - N_{\text{P}} 18.$ 

105. Zhang, G. F. Mathematical Modeling on Levitating Forces of Droplets with Electromagnetic Levitation / G. F. Zhang, X. L. Wang, B. H. Shi [и др.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Т. 423.

106. Zhang, X. MagTable: A tabletop system for 6-DOF large range and completely contactless operation using magnetic levitation / X. Zhang, C. Trakarnchaiyo, H. Zhang, M. B. Khamesee // Mechatronics. – 2021. – T. 77. – № October 2020. – C. 102600.

107. Zhang, Y. Infrared and Visible Image Fusion with Hybrid Image Filtering / Y. Zhang, D. Li, W. Zhu // Mathematical Problems in Engineering. – 2020. – T. 2020.

108. Zhu, X. R. Calculation of the free surface shape in the electromagnetic processing of liquid metals / X. R. Zhu, R. A. Harding, J. Campbell // Applied Mathematical Modelling.  $-1997. - T. 21. - N_{2} 4.$ 

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

# Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Акт внедрения

АО «МЦД» Россия, 125167. т. Мосияа, ул. Викторенко: д. 5. стр. 1. этаж 11. помещ. 11.01 Тел.: +7. (495) 644-06-08. фанс +7. (455) 644-06-09 ИНН 7720666171, КГПГ 771401001, ОГРН 1097746511334 OKITO 62743131



### AKT

## о внедрении материалов диссертационного исследования Пайора Владимира Алексеевича в АО «МЦД».

Данным актом подтверждаем, что результаты диссертации на тему «Разработка системы автоматического управления левитационным плавлением металлов», а именно численная модель распределения электромагнитного поля в индукторе установки левитационной плавки металла при различных положениях расплава в индукторе показала себя, как удобный инструмент в расчетах процессов плавления металлов индукционным способом, применяемый в практике АО «Моделирование и Цифровые двойники». Данная методика позволяет более точно определить конфигурацию электромагнитного поля, форму и положение расплава в индукторе, энергозатраты на удержание расплава в состоянии левитации.

Описанная методика была разработана Пайором В.А. в рамках подготовки его диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

С учетом положительных результатов опробования, данная методика рекомендована К внедрению и систематическому использованию в исследовательской работе АО «МЦД».



## 123