

На правах рукописи



**КУЧИНСКИЙ МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ**

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ  
ЖИДКОЙ СЕРДЦЕВИНЫ СЛИТКОВ  
В МНОГОРУЧЬЕВОМ ЛИТЕЙНОМ КОМПЛЕКСЕ**

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

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

Красноярск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель: **Первухин Михаил Викторович**,  
доктор технических наук, доцент, кафедра  
«Электротехника», профессор кафедры.

Официальные оппоненты: **Кувалдин Александр Борисович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный исследовательский  
университет «МЭИ», кафедра Электроснабжения  
промышленных предприятий и  
электротехнологий, профессор кафедры  
(г. Москва);

**Перевалов Юрий Юрьевич**,  
кандидат технических наук, Федеральное  
государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Санкт-  
Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ» им.  
В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра  
Электротехнологической и преобразовательной  
техники, доцент кафедры (г. Санкт-Петербург).

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Уральский федеральный  
университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург).

Защита диссертации состоится «15» сентября 2022 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.173.04 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» июля 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, к.т.н., доц.



Максим Александрович Дыбко

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Алюминий и его сплавы по объемам производства и потребления прочно занимают второе место после стали, причем сферы их использования постоянно расширяются. Бурное развитие применения алюминиевых сплавов обусловлено их уникальными свойствами: высокая прочность, в сочетании с малой плотностью, коррозионную стойкость, способность к формообразованию литьем, давлением и др. Основную часть всего объема производства алюминиевых сплавов занимают деформируемые сплавы.

Решающим фактором успешного развития промышленности деформируемых алюминиевых сплавов является качество слитков, которое во многом определяется условиями их кристаллизации. Одним из распространенных и эффективных способов управления условиями кристаллизации слитка является принудительное перемешивание жидкой сердцевины кристаллизующегося слитка. Процесс осуществляется с помощью индукторов специальной конструкции – электромагнитных перемешивателей (ЭМП), обеспечивающих бесконтактное электромагнитное силовое воздействие на жидкую сердцевину слитка изменяя тепловое состояние в области фронта кристаллизации, а также механическое воздействие на него. ЭМП является сложным технологическим оборудованием, разработка конструкции и режимов работы которого требует глубокого понимания электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов, протекающих в жидкой фазе слитка и их взаимного влияния друг на друга.

Учитывая сложный характер протекающих в кристаллизующемся слитке процессов, предпочтение при их исследовании отдается методам математического и физического моделирования. Сегодня, благодаря развитию математического аппарата и возможностей вычислительной техники, появилась возможность строить математические модели исследуемых процессов, учитывающие большинство факторов, влияющих на поведение системы, тем самым повысить адекватность реальному объекту. А совокупность данных полученных с использованием физического и математического моделирования позволит разработать технологическое оборудование и режимы его работы, позволяющие эффективно управлять условиями кристаллизации алюминиевого слитка.

### **Степень разработанности темы исследования**

Основами теории электромагнитного перемешивания и изучением вопросов его влияния на качество и структуру слитка занимались Ю. А. Самойлович, В. И. Добаткин, А. Б. Капуста, В. И. Елагин, Ф. Н. Сарапулов, В. Н. Тимофеев, Р. М. Христинич, С. П. Тимофеев и многие другие ученые. В их работах исследовались плоские и цилиндрические индукторы применительно к крупногабаритным слиткам прямоугольного и круглого сечения, отливаемых в одноручьевые литейные машины. Были определены методы расчета для анализа их электромагнитных параметров и силовых характеристик воздействия на жидкую сердцевину слитка. Среди

зарубежных ученых известны работы исследователей из Польши (Т. Wróbel, D. Szajnar), Германии (К. Eckert, В. Willers), Италии (С. Mapelli, А. Gruttadauria, М. Peroni).

#### **Объект исследования**

Технология электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины алюминиевых слитков, отливаемых в многоручьевую литейную машину.

#### **Предмет исследования**

Электромагнитные, тепловые и гидродинамические процессы в системе «индуктор-слиток» при литье в кристаллизатор скольжения с электромагнитным перемешиванием.

**Цель работы:** Разработка электротехнологии перемешивания жидкой сердцевины алюминиевых слитков в многоручьевой литейной машине, обеспеченной созданием цилиндрического индуктора и режимами его работы.

#### **Задачи исследования:**

1. Анализ электротехнологий и устройств электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины алюминиевых слитков в кристаллизаторах скольжения, обоснование выбора конструкции индуктора для многоручьевой литейной машины.

2. Разработка сопряженных математических моделей для расчета электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в системе «индуктор-слиток» установки электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины алюминиевого слитка.

3. Исследование влияния конструкции и режимов работы цилиндрического индуктора на тепловые и гидродинамические процессы, обеспечивающие требуемый профиль скоростей движения металла в жидкой сердцевине кристаллизующегося слитка.

4. Разработка методики экспериментального исследования гидродинамических процессов в жидкой сердцевине слитка на основе созданной физической модели цилиндрического индуктора для перемешивания жидкой сердцевины слитка

5. Сравнение результатов физического и математического моделирования с целью верификации данных, полученных расчетными методами.

#### **Методы исследований**

Математическое моделирование электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в системе «индуктор-слиток» установки электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка осуществлялось численными методами с использованием пакета прикладных программ ANSYS Maxwell, ANSYS Fluent и ANSYS CFX.

Экспериментальные исследования проведены на физической модели с использованием моделирующего низкотемпературного сплава на основе галлия (галлий - 67%, индий - 20,5%, олово 12,5%) с использованием ультразвукового доплеровского измерителя скорости течений.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Для многоручьевой литейной машины наиболее приемлемым вариантом является двухфазный цилиндрический индуктор.
2. Наиболее эффективным режимом воздействия, обеспечивающим получение мелкодисперсной структуры цилиндрического слитка, является режим электромагнитного перемешивания при частотном диапазоне  $f=5-10$  Гц с вращающимся магнитным полем.
3. Разработанная математическая модель позволяет оценить влияние электромагнитных и конструктивных параметров индуктора на тепловые и гидродинамические процессы в жидкой сердцевине кристаллизующегося слитка.

### **Научная новизна:**

1. Построены математические модели для совместного анализа тепловых, электромагнитных и гидродинамических процессов в системе «индуктор-слиток», учитывающие фазовые состояния кристаллизующегося слитка и магнитогидродинамические процессы, протекающие в области жидкой сердцевины.
2. Установлены новые закономерности изменения фазовых состояний кристаллизующегося слитка, а именно:
  - наибольшее влияние на изменение формы фронта кристаллизации оказывает скорость вытягивания слитка;
  - конструкция индуктора с пятью зубцами имеет наилучшие показатели по создаваемым интегральным усилиям в слитке;
  - режим питания индуктора в частотном диапазоне  $f=5-10$  Гц при использовании схемы с вращающимся магнитным полем обеспечивает равномерное перемешивание жидкой сердцевины слитка вдоль всего фронта кристаллизации.
3. Впервые предложена и опробована методика ультразвукового исследования поля скоростей в жидкой сердцевине слитка с использованием физической модели электромагнитного перемешивания.

### **Практическая значимость:**

1. Предложена конструкция цилиндрического индуктора, позволяющего за счет изменения схемы подключения обмоток и параметров питающей сети формировать в жидкой фазе кристаллизующегося слитка потоки металла, охватывающие до 90 % поверхности фронта кристаллизации при средней скорости циркуляции от 0,1 до 0,5 м/с.
2. Предложенная конструкция обладает компактными габаритными размерами, что позволяет использовать ее в многоручьевых литейных комплексах.
3. Разработана установка и комплекс технических решений для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины кристаллизующегося слитка, защищенных патентом на изобретение № 2743437.
4. Разработана методика экспериментального исследования гидродинамических процессов в жидком металле на основе моделирующих сплавов.

## **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на: VII Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» (г. Новосибирск, 2015 г.); VIII Международном конгрессе «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 2016); IX Международном конгрессе «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 2017), XI Международном конгрессе «Цветные металлы и минералы», (г. Красноярск, 2019), III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Борисовские чтения», (г. Красноярск, 2021).

## **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликованы 13 печатных работ, в том числе 3 публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 публикации в изданиях, включенных в базу Scopus / Web of Science, получен 1 патент на изобретение в РФ, 7 публикаций в прочих рецензируемых изданиях.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 104 библиографических ссылок, 2 приложений. Текст работы изложен на 106 страницах, содержит 50 рисунков и 6 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены объект и предмет исследования, указаны цель и задачи исследования, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, отражены вопросы апробации и достоверность научных результатов.

**В первой главе** проведен обзор литературных источников, посвященных электромагнитному воздействию на жидкую сердцевину кристаллизующегося слитка. Проанализированы различные способы и технологическое оборудование для электромагнитного перемешивания.

Приводится обоснование разработки компактного ЭМП, предназначенного для применения в многоручьевых литейных комплексах с ограниченным пространством для размещения, обладающего высокой эффективностью воздействия на жидкую сердцевину слитка.

Учитывая сложный характер протекающих в кристаллизующемся слитке процессов, предпочтение при их исследовании отдается методам математического и физического моделирования.

Анализ способов управления условиями кристаллизации алюминиевых слитков показал, что одним из распространенных и эффективных способов, наряду с модифицированием с применением лигатур, является принудительное перемешивание жидкой сердцевины кристаллизующегося слитка. Технологический эффект достигается за счет механического воздействия потока расплава на фронт кристаллизации и выравнивания

температурного поля в объеме жидкой сердцевины. Для этого необходимо поддержание высокой скорости течений вдоль всего фронта кристаллизации слитка, в том числе и в донных областях жидкой сердцевины. Создаваемые течения повышают интенсивность процесса кристаллизации за счет усиления теплопередачи в области электромагнитного воздействия. В результате происходит снижение перепада температур в жидкой сердцевине слитка, устранение неоднородностей в химическом составе.

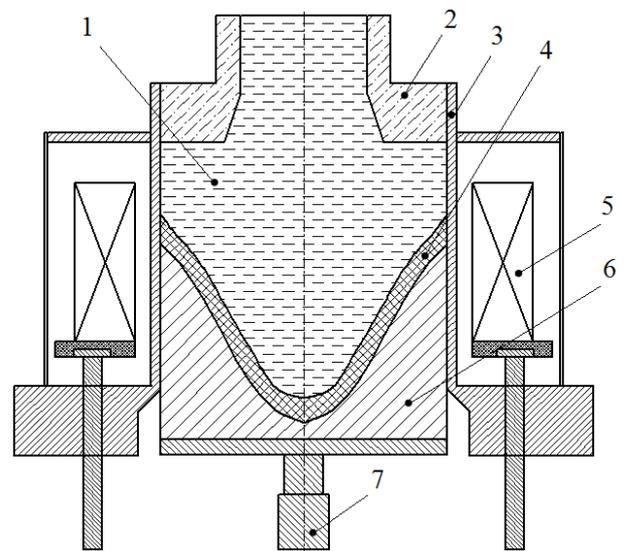
Применение ЭМП обеспечивает бесконтактное электромагнитное силовое воздействие на жидкую сердцевину слитка, изменяя тепловое состояние в области фронта кристаллизации, и механическое воздействие на фронт кристаллизации, в результате которого подавляется формирование разветвленной дендритной структуры, происходит уменьшение дендритного параметра, подавляются диффузионные процессы на границе раздела твердой и жидкой фазы. Обломки дендритов выносятся в объем жидкой сердцевины, создавая новые очаги кристаллизации. Совокупность этих факторов позволяет повысить качество слитка, и получать слитки с мелкодисперсной структурой и улучшенными физико-механическими свойствами, что благоприятно сказывается при последующих технологических операциях пластической деформации слитка.

Помимо крупногабаритных слитков, большой объем высоколегированных алюминиевых сплавов отливается в многоручьевые кристаллизаторы.

На рисунке 1, а показана многоручьевая литейная машина для производства алюминиевых слитков. Она представляет собой гидравлическую платформу в которой установлены кристаллизаторы от 6 до 64 штук. На этой же платформе располагается система желобов, распределяющая поток металла из миксера по отдельным кристаллизаторам. Охлаждение кристаллизатора осуществляется водой, протекающей внутри стола.

Применение технологии электромагнитного перемешивания для многоручьевых кристаллизаторов требует проведения дополнительных исследований в связи с особенностями: широкой номенклатурой диаметров отливаемых слитков (от 100 до 200 мм), диапазоном скоростей литья (от 75 до 250 мм/мин), ограниченностью пространства в области гильзы кристаллизатора где необходимо устанавливать индуктор.

На рисунке 1, б представлен вариант размещения ЭМП в области гильзы многоручьевого кристаллизатора. Процесс литья осуществляется следующим образом. Жидкий металл 1 непрерывно подается в кристаллизатор 3 через тепловую насадку 2. Индуктор 5 воздействует на расплав, в результате чего жидкая сердцевина слитка перемешивается электромагнитными силами, создаваемыми вращающимся, либо бегущим магнитным полем. Под действием охлаждающей воды жидкометаллическая масса начинает затвердевать, образуя фронт кристаллизации 4. Затвердевший слиток 6 вытягивается вниз с помощью затравки 7.



а  
 б  
 Рисунок 1 – Многоручьевой литейный комплекс (а) и эскиз кристаллизатора – ЭМП (б)

На рисунке 2 представлен общий вид предложенной конструкции ЭМП, состоящего из магнитопровода 1 и катушек 2, с возможными схемами соединения обмоток. В качестве питания используется двухфазная схема подключения, обеспечивающая фазовый сдвиг равный 90 электрических градусов, между соединенными попарно катушками. Катушки A1 и A2 подключены к одной фазе, по которой протекает ток  $i_1$ , создавая магнитный поток  $\Phi$ . Катушки B1 и B2 подключены к другой фазе, по которой протекает ток  $i_2$ , создавая магнитный поток  $\Phi$ . Для создания вращающегося магнитного поля используются схемы №1 и №3, при этом результирующие магнитные потоки направлены под углом 90 градусов друг другу, создавая круговое движение в области жидкой сердцевины. Для создания бегущего магнитного поля используются схемы №2 и №4, при этом результирующие магнитные потоки направлены в одну сторону, создавая поступательное движение в области жидкой сердцевины вдоль вертикальной оси.

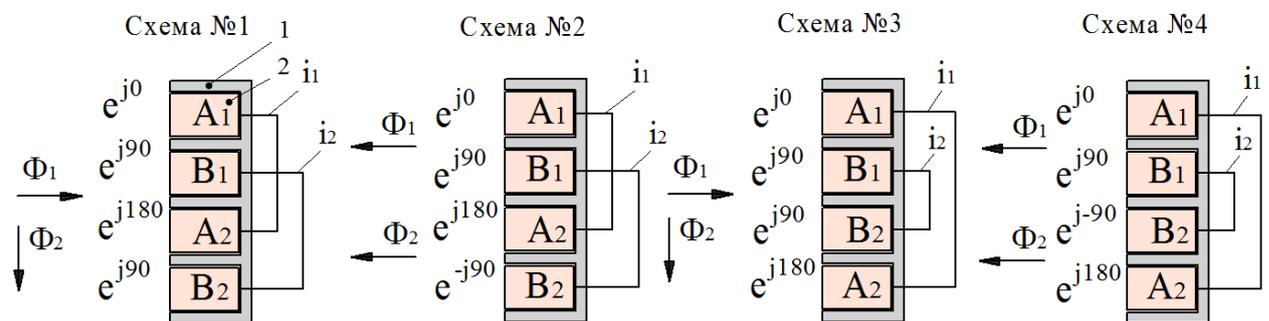


Рисунок 2 – Конструкция ЭМП и электрические схемы подключения катушек

Для исследования технологических процессов, протекающих при электромагнитном перемешивании жидкой сердцевины слитка, необходимо определить конструктивные и энергетические параметры индуктора. Исходя из обзора и анализа методов математического моделирования, сделан выбор в

пользу программных пакетов ANSYS Maxwell, ANSYS Fluent и ANSYS CFX. Экспериментальные исследования осуществляются с помощью физической модели цилиндрического индуктора, позволяющей проводить анализ гидродинамических процессов, происходящих в жидкой сердцевине слитка. Для этого используется низкотемпературный эвтектический сплав и ультразвуковой измеритель поля скоростей.

**Вторая глава** посвящена постановке задачи математического моделирования и построению математических моделей системы «индуктор-слиток» ЭМП.

Система уравнений, описывающих связанные электромагнитные, гидродинамические и тепловые процессы, протекающие в системе «индуктор-слиток» включает в себя уравнение магнитного векторного потенциала (1), уравнение непрерывности (2), уравнение неразрывности (3), уравнения движения (4) и энергии (5):

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{A}} = -\mu_a \dot{\boldsymbol{\delta}} \quad (1)$$

$$\nabla \dot{\boldsymbol{\delta}} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_0 \mathbf{v})}{\partial t} + (\rho_0 \mathbf{v} \cdot \nabla) \times \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \bar{\boldsymbol{\tau}} + \rho(T) \mathbf{g} + \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{\text{mush}} |\mathbf{v} - \mathbf{v}_{\text{выт}}| + \mathbf{f}_{\text{эм}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_0 H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{v} H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q_{\text{эм}} \quad (5)$$

где  $\dot{\mathbf{A}}$  – векторный потенциал;  $\dot{\boldsymbol{\delta}}$  – вектор плотности полного тока;  $\nabla$  – оператор Лапласа;  $\mathbf{v}$  – вектор скорости (м/с);  $\rho_0$  – плотность расплава при базовой температуре (кг/м<sup>3</sup>);  $t$  – время (с);  $p$  – давление (Па);  $\bar{\boldsymbol{\tau}}$  – тензор вязких напряжений;  $\mathbf{g}$  – вектор ускорения свободного падения (м/с<sup>2</sup>);  $\beta$  – доля жидкой фазы;  $\varepsilon$  – малое число предотвращающее деление на 0;  $A_{\text{mush}}$  – постоянная скорости фазного перехода (кг/(м<sup>3</sup>с));  $\mathbf{v}_{\text{выт}}$  – скорость вытягивания;  $\mathbf{f}_{\text{эм}}$  – вектор силы Лоренца;  $H$  – удельная энтальпия (Дж/кг);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К));  $T$  – температура (К).

Для учета свободных конвективных течений используется приближение Бусинеска–Обербека:

$$\rho(T) = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)) \quad (6)$$

Для предварительной оценки физических процессов был выполнен расчет и анализ критериев подобия:

– магнитное число Рейнольдса  $Re_m < 0,2$  – электромагнитную задачу можно решать без учета влияния поля скоростей в металле;

– число Рейнольдса  $Re > 40000$  – режим течений турбулентный, требуется использование моделей турбулентности;

– число Гартмана  $Na > 100$  – электромагнитное поле оказывает существенное влияние на движение расплава.

Для анализа электромагнитных процессов в системе «индуктор-слиток» проводится расчёт гармонической электромагнитной задачи в двухмерной осесимметричной постановке в программном пакете ANSYS Maxwell. В качестве исходных данных для электромагнитного расчета

задаются геометрические размеры элементов конструкции ЭМП, слитка, физические свойства сред, электрические параметры питающей схемы. Геометрия математической модели для электромагнитного расчета представлена на рисунке 3, а. Модель включает в себя магнитопровод 3, катушки 4, жидкую область слитка 1 и твердую область слитка 5. На рисунке 3, б представлена расчетная сетка конечных элементов модели, состоящая из 31686 тетраэдральных элементов.

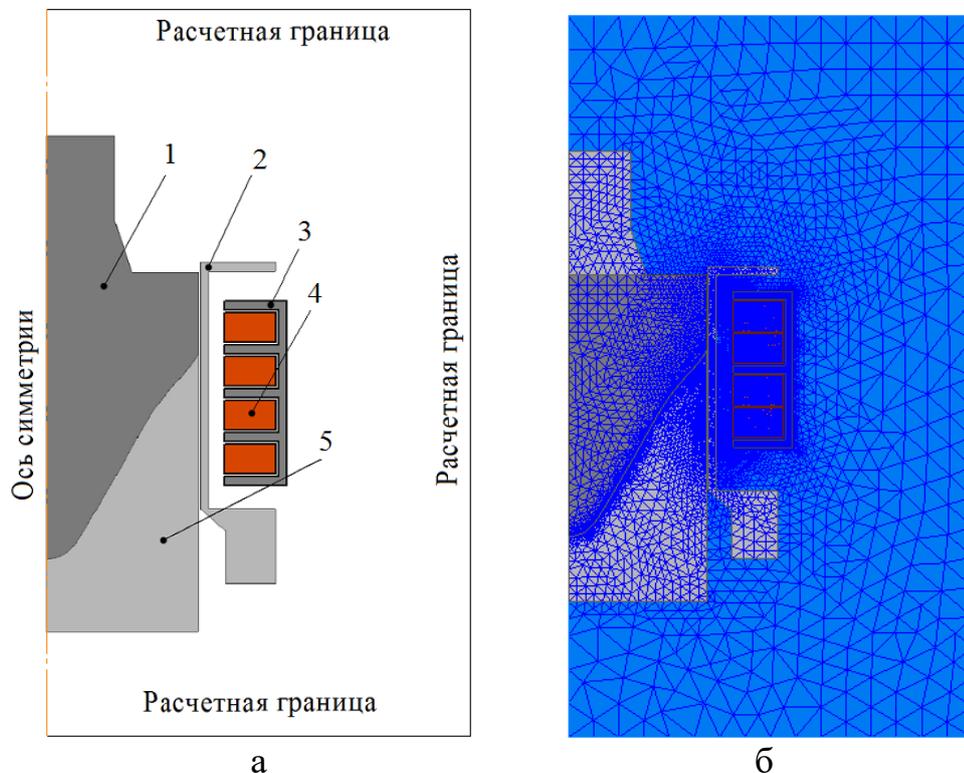


Рисунок 3 – Геометрия математической модели (а) и расчетная сетка (б)

При создании математической модели для электромагнитного расчета приняты следующие допущения:

1. Решается гармоническая электромагнитная задача с синусоидальными токами.
2. Геометрия жидкой сердцевины определяется исходя из данных теплового расчета.
3. Значения магнитной проницаемости магнитопровода задаются согласно кривой намагничивания для электротехнической стали.

Система уравнений Максвелла, описывающих электромагнитные процессы в слитке, в комплексной форме имеет вид:

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{A}} = -\mu_a \dot{\mathbf{\delta}} \quad (7)$$

$$\nabla \dot{\mathbf{\delta}} = 0 \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{\delta}} = -j\gamma\omega \dot{\mathbf{A}} \quad (9)$$

где  $\gamma$  - удельная электрическая проводимость, См/м;  $\omega = 2\pi f$  - циклическая частота электромагнитного поля.

Считая, что расчетную область окружает среда с идеальными магнитными свойствами ( $\mu = \infty$ ), на границах расчетной области будут выполняться условия:

– для касательной составляющей векторного потенциала:

$$\frac{\partial \dot{A}_\tau}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

– для нормальной составляющей векторного потенциала:

$$\dot{A}_n = 0 \quad (11)$$

Исследование процесса кристаллизации слитка в электромагнитном поле проводится путем анализа нестационарных тепловых и магнитогидродинамических процессов в двухмерной постановке в программном пакете ANSYS Fluent. Электродинамические силы импортируются из электромагнитного расчета. Турбулентное течение описывается с помощью модели турбулентности k-ε. При осреднении Рейнольдса скорость раскладывается на усредненную во времени и пульсационную составляющую. С учетом этого, в уравнении движения появляется дополнительная составляющая тензора вязких напряжений, тензор напряжений Рейнольдса. Турбулентная вязкость, входящая в тензор напряжений Рейнольдса имеет вид:

$$\mu_t = \rho_0 C \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

где C – эмпирическая постоянная; k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций; ε – удельная скорость диссипации.

Для границ, соответствующих стенкам жидкого объема, выполняется условие прилипания ( $\mathbf{v}=0$ ). Теплообмен стенок с окружающей средой происходит по закону Ньютона–Рихмана:

$$-\lambda |\nabla T| = \alpha (T - T_{\text{окр}}) \quad (13)$$

где α – коэффициент теплоотдачи (Вт/(м<sup>2</sup>·К)); T<sub>окр</sub> – температура окружающей среды (К).

На входных и выходных границах, все величины за исключением давления, удовлетворяют условию Неймана:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

где Φ – множество всех величин, используемых при решении задачи.

Для давления на входных и выходных границах выполняется условие Дирихле, имитирующее условие бесконечного удаления стенок:

$$p = 0 \quad (15)$$

Для решения тепло-гидродинамической задачи задаются следующие исходные данные:

1. Скорость вытягивания слитка находится в диапазоне от 100 до 150 мм/мин.
2. Начальная температура расплава T<sub>01</sub>, подающегося в кристаллизатор, составляет 700 °С, начальная температура затравки T<sub>02</sub> = 27 °С.
3. В качестве материала слитка задаются физические свойства чистого алюминия.

4. Расчетная область включает три зоны охлаждения с коэффициентами теплоотдачи  $\alpha_1=2$  кВт/м<sup>2</sup>К,  $\alpha_2=0,5$  кВт/м<sup>2</sup>К и  $\alpha_3=40$  кВт/м<sup>2</sup>К.

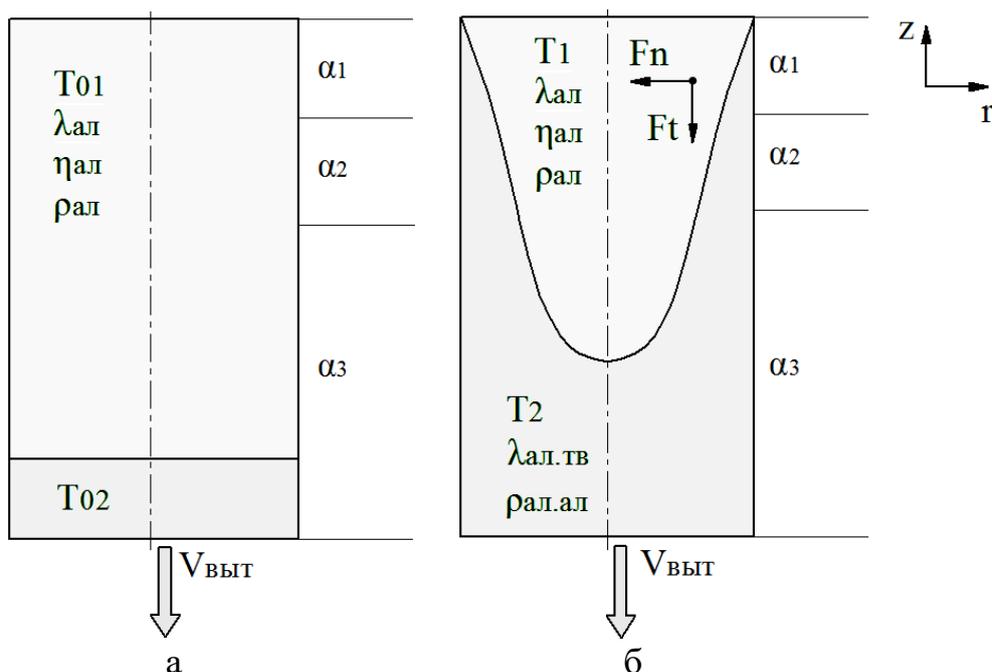


Рисунок 4 – Расчетная модель для решения тепло-гидродинамической задачи в момент времени  $t=0$  (а) и  $t= \infty$  (б)

При построении расчетной модели приняты допущения:

1. Слиток имеет бесконечно большие размеры в направлении продольной оси  $z$ .
2. Слиток и его жидкая фаза имеют правильную цилиндрическую форму.

Математическая модель позволяет оценить влияние электромагнитных и конструктивных параметров перемешивателя на тепловые и магнитогидродинамические процессы в жидкой фазе кристаллизующегося слитка. Адекватность построенных математических моделей оценивалась на основании тестовых расчетов и их сравнении с результатами физического эксперимента и результатов, полученных другими авторами.

**В третьей главе** проводится анализ сопряженных электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в жидкой сердцевине слитка, оценка их влияния друг на друга при различных конструктивных и электромагнитных параметрах перемешивателя.

На первом этапе проводится расчёт процесса кристаллизации слитка с целью определения формы жидкой сердцевины слитка. На рисунке 5 представлено распределение границ фронта кристаллизации при различных режимах литья. Наибольшее влияние на изменение формы фронта кристаллизации оказывает скорость вытягивания слитка. С увеличением скорости литья прямо пропорционально возрастает глубина жидкой сердцевины. При увеличении скорости литья со 100 до 150 мм/мин глубина лунки возрастает с 60 до 120 мм. С целью возможности повышения производительности литейного комплекса, для дальнейших исследований была выбрана форма лунки, полученная при скорости литья 150 мм/мин.

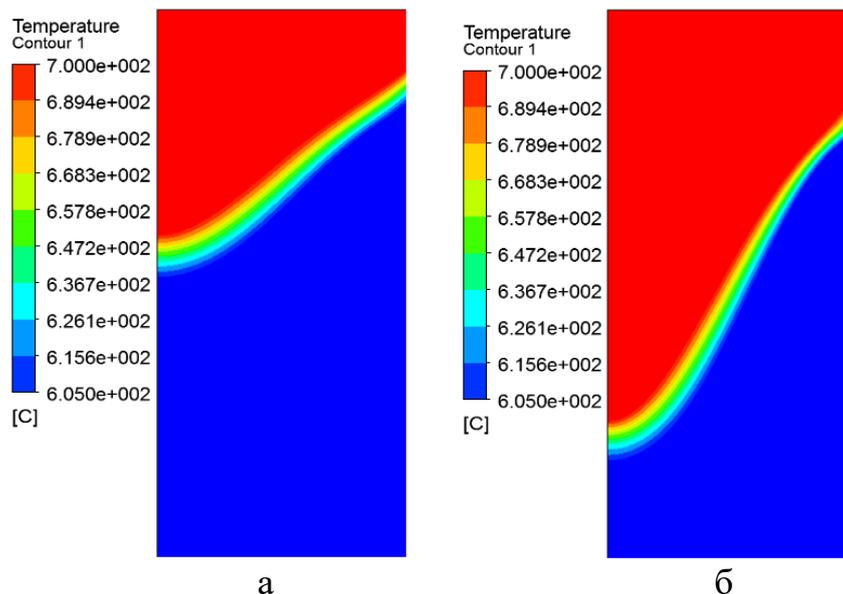


Рисунок 5 – Распределение границ фронта кристаллизации слитка при скоростях литья: а) 100 мм/мин; б) 150/мм/мин

Для определения геометрических параметров системы «индуктор-слиток» были рассмотрены три варианта конструкции цилиндрического индуктора с различной компоновкой зубцов магнитопровода (рисунок 6).

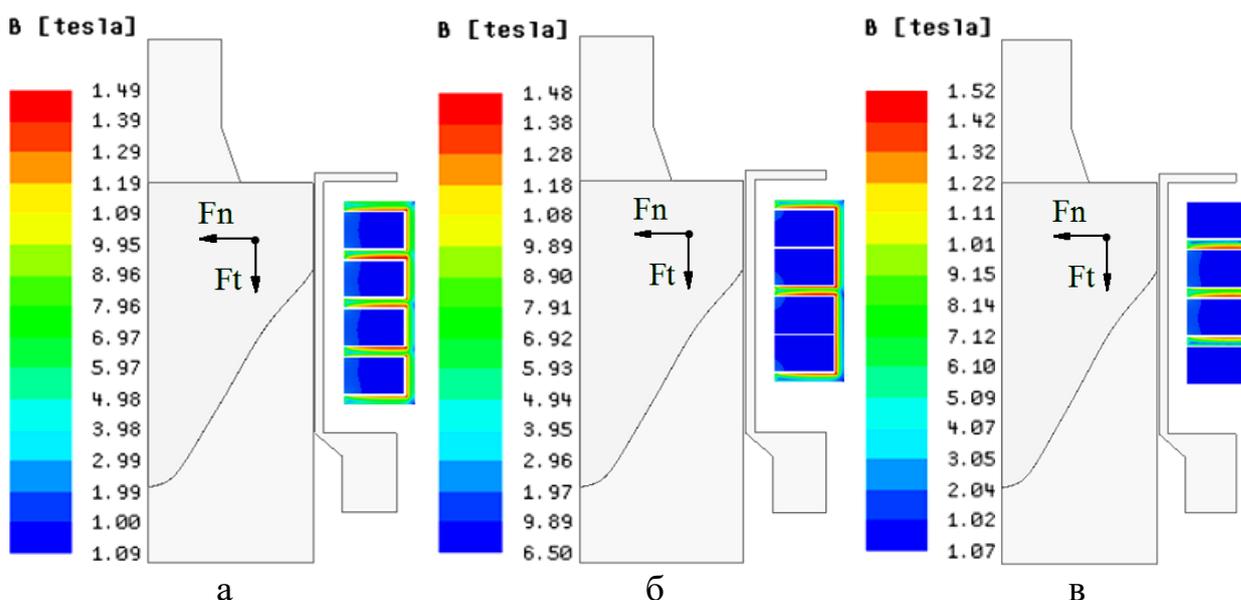


Рисунок 6 – Варианты конструкций индуктора и распределение магнитной индукции в магнитопроводе

Показатели эффективности оценивались по возникающим в области слитка тангенциальными и нормальными составляющими интегральных усилий. Кроме этого оценивалась степень насыщения магнитопровода. Оценочные показатели эффективности приведены в таблице 1.

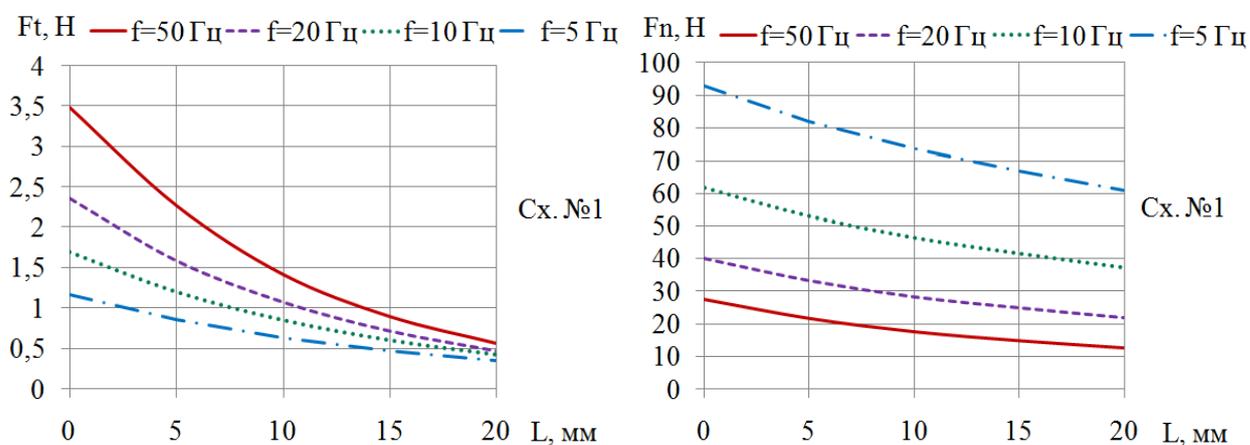
Исходя из энергетических и эксплуатационных характеристик рассмотренных конструкций, для дальнейших исследований был выбран вариант конструкции №1, сохранив первоначальную компоновку с пятью зубцами.

Таблица 1 – Оценочные показатели эффективности

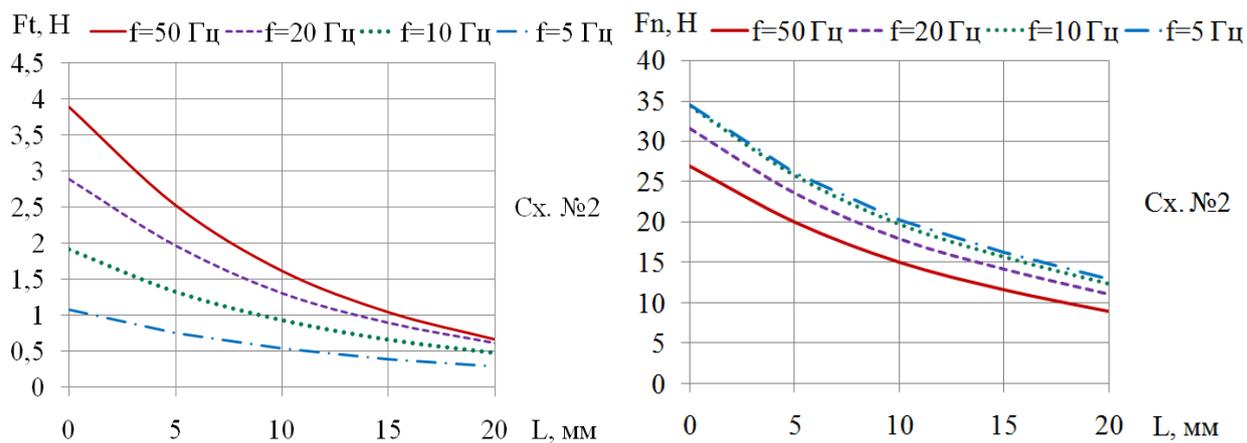
Вариант конструкции	1	2	3
$F_t$ , Н	1,5	0,4	1,2
$F_n$ , Н	18	12	16
$B$ , Тл	1,49	1,48	1,52

Для оценки эффективности используемых схем подключения обмоток проведен анализ тангенциальных и нормальных составляющих интегральных усилий, возникающих в области жидкой сердцевины слитка.

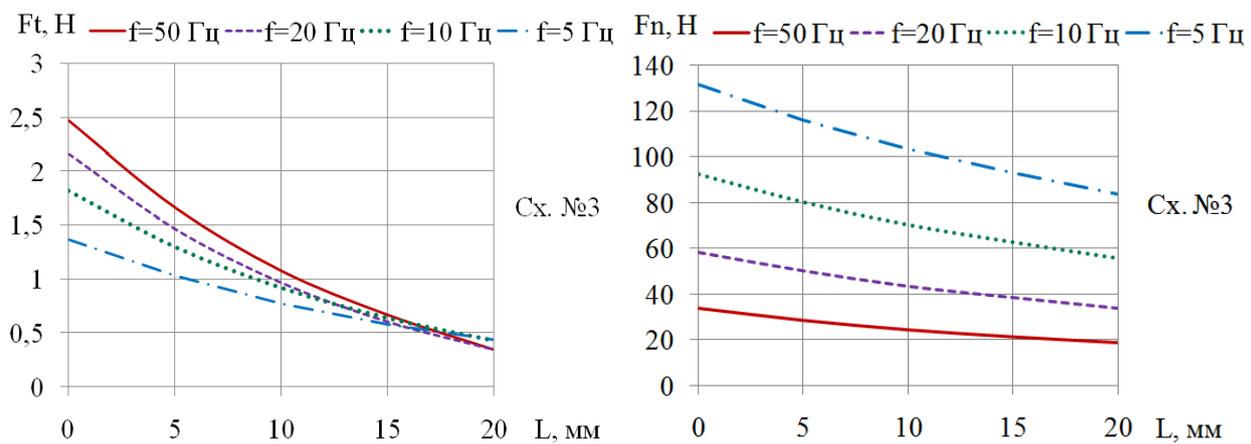
На рисунке 7 представлены тангенциальные и нормальные составляющие интегральных усилий при различных рабочих зазорах между индуктором и слитком в диапазоне частот от 5 до 50 Гц и максимальной силе тока в обмотке  $I=8$  А.



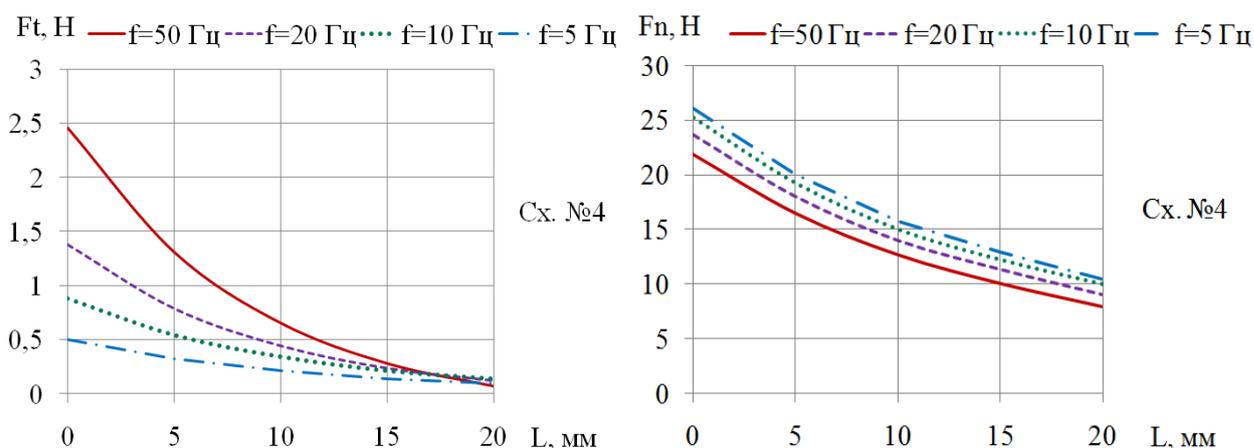
а



б



В



Г

Рисунок 7 – Распределение интегральных усилий в области жидкой фазы слитка при различных режимах работы: схема №1 (а), схема №2 (б), схема №3 (в), схема №4 (г)

Наибольшие тангенциальные усилия возникают при использовании схемы №1, создающей вращающееся магнитное поле, и схемы №2, создающей бегущее магнитное поле.

Схемы № 3 и №4 обеспечивают наименьшие тангенциальные усилия, их применение при дальнейших исследованиях не является рациональным.

На рисунке 8 приведены зависимости распределения скоростей вдоль фронта кристаллизации при различных схемах подключения и частотных режимах работы.

Наиболее равномерное распределение скоростей вдоль всего фронта обеспечивает электрическая схема №1 с вращающимся магнитным полем при пониженных частотах  $f=5$  и  $f=10$  Гц.

Электрическая схема №2 с бегущим магнитным полем создает менее интенсивное течение в центральной и донной области фронта кристаллизации, обеспечивая эффективное воздействие лишь в верхней части жидкой сердцевины слитка.

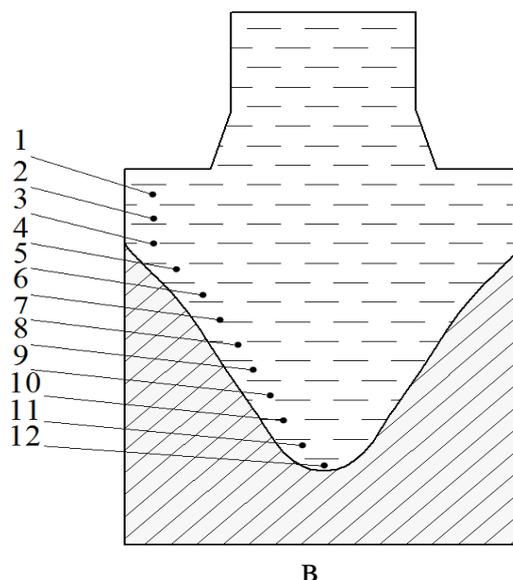
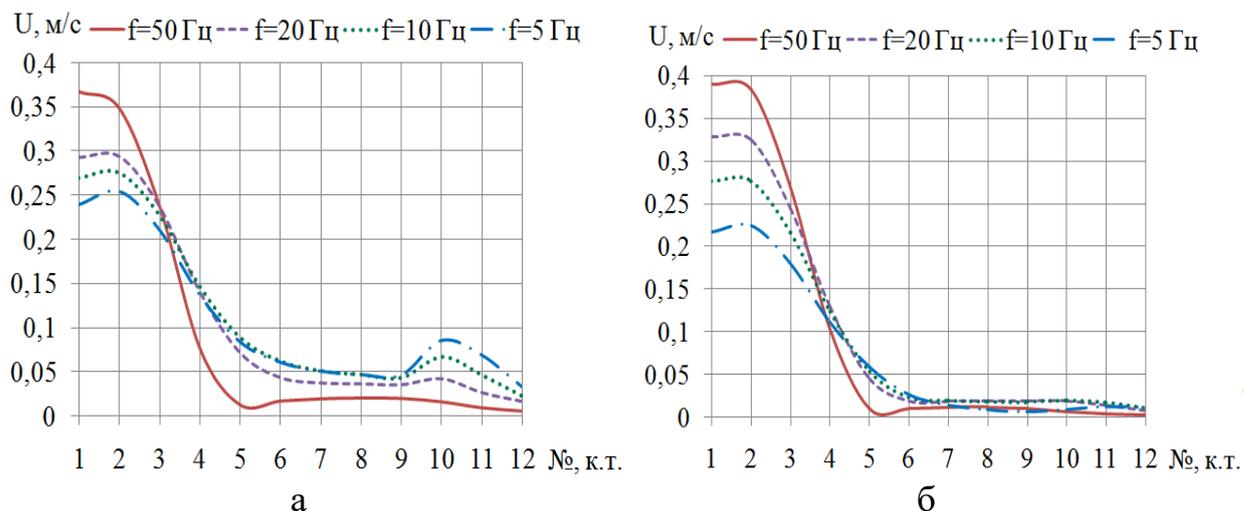


Рисунок 8 – Распределение поля скоростей вдоль фронта кристаллизации при различных частотных режимах, используя схему №1 (а), схему №2 (б), и расположение контрольных измерительных точек (в)

На рисунке 9 представлены картины распределения поля скоростей в различных частотных диапазонах при достижении установившегося режима, используя схемы №1 и №2.

Попеременное использование данных схем является актуальным в зависимости от изменений параметров литья.

При скорости литья  $V=150$  мм/мин, когда глубина лунки составляет  $h=120$  мм, предпочтительнее использовать схему №1 с частотой питания  $f=5$  Гц. Данный режим обеспечивает равномерное перемешивание жидкой сердцевины слитка вдоль всего фронта кристаллизации.

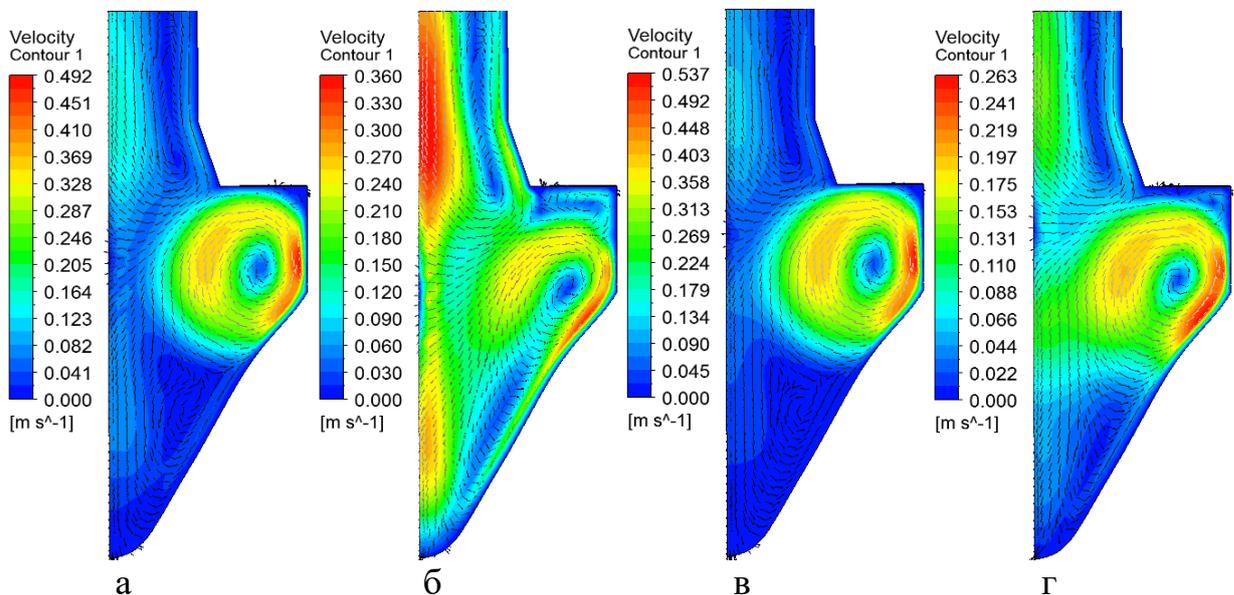


Рисунок 9 – Распределение поля скоростей в жидкой фазе слитка для различных режимов работы: а)  $f=50$  Гц, сх.№1; б)  $f=5$  Гц, сх.№1; в)  $f=50$  Гц, сх.№2; г)  $f=5$  Гц, сх.№2

**В четвертой главе** рассматриваются результаты экспериментальных исследований на физической модели. Для оценки данных гидродинамического расчета проведены экспериментальные исследования с применением эвтектического сплава на основе галлия. С помощью ультразвукового доплеровского измерителя скорости Signal Processing DOP 4000 проводятся замеры вертикальных составляющих меридиональных течений в расплаве с целью установления закономерности интенсивности перемешивания от параметров электромагнитного воздействия.

При проведении экспериментов была разработана методика следующих последовательных операций:

1. Определяется глубина погружения датчика в расплав галлия 10 мм;
2. Делается оценка мертвой зоны измерений, составляющая 10 мм, суммарно с глубиной погружения датчика – 20 мм;
3. Определяется вертикальная составляющая скорости расплава галлия, средняя по времени в нескольких точках на вертикальной оси Z; точки измерения скорости выбираются;
4. Осуществляется обработка массива данных мгновенных скоростей за выбранный временной интервал для контрольных точек, расположенных на вертикальной оси каждого датчика (результат обработки – среднее значение скорости за выбранный интервал времени);
5. Математическое моделирование гидродинамических процессов в жидкой сердцевине слитка для верификации с экспериментальными данными проводится для расплава галлия, что позволяет не вводить критерии подобия для исследуемых моделей.

Схема расположения измерительных датчиков представлена на рисунке 10, а, где 1, 2, 3 – установленные датчики, 4 – жидкая сердцевина слитка, 5 – твердая фаза слитка. На рисунке 10, б представлен общий вид физической модели с установленными измерительными датчиками.

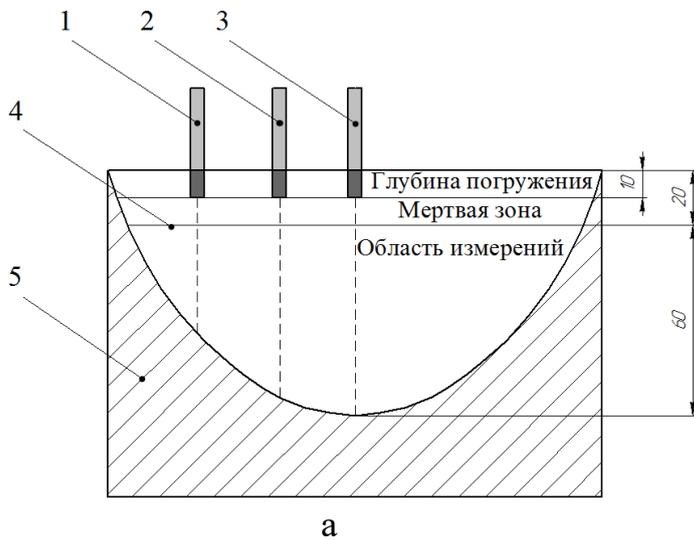


Рисунок 10 – Схема расположения датчиков при проведении измерений (а) и физическая модель с установленными датчиками (б)

На рисунке 11 представлены графики распределения осредненных значений вертикальных составляющих меридиональных течений в области измерительных точек, полученных в результате математического моделирования и экспериментальных исследований. Во всех трех точках измерений наблюдается достаточно высокое совпадение расчетных и экспериментальных данных. Разница результатов, полученных с помощью ультразвуковых измерений, не превышает 15% от расчетных данных.

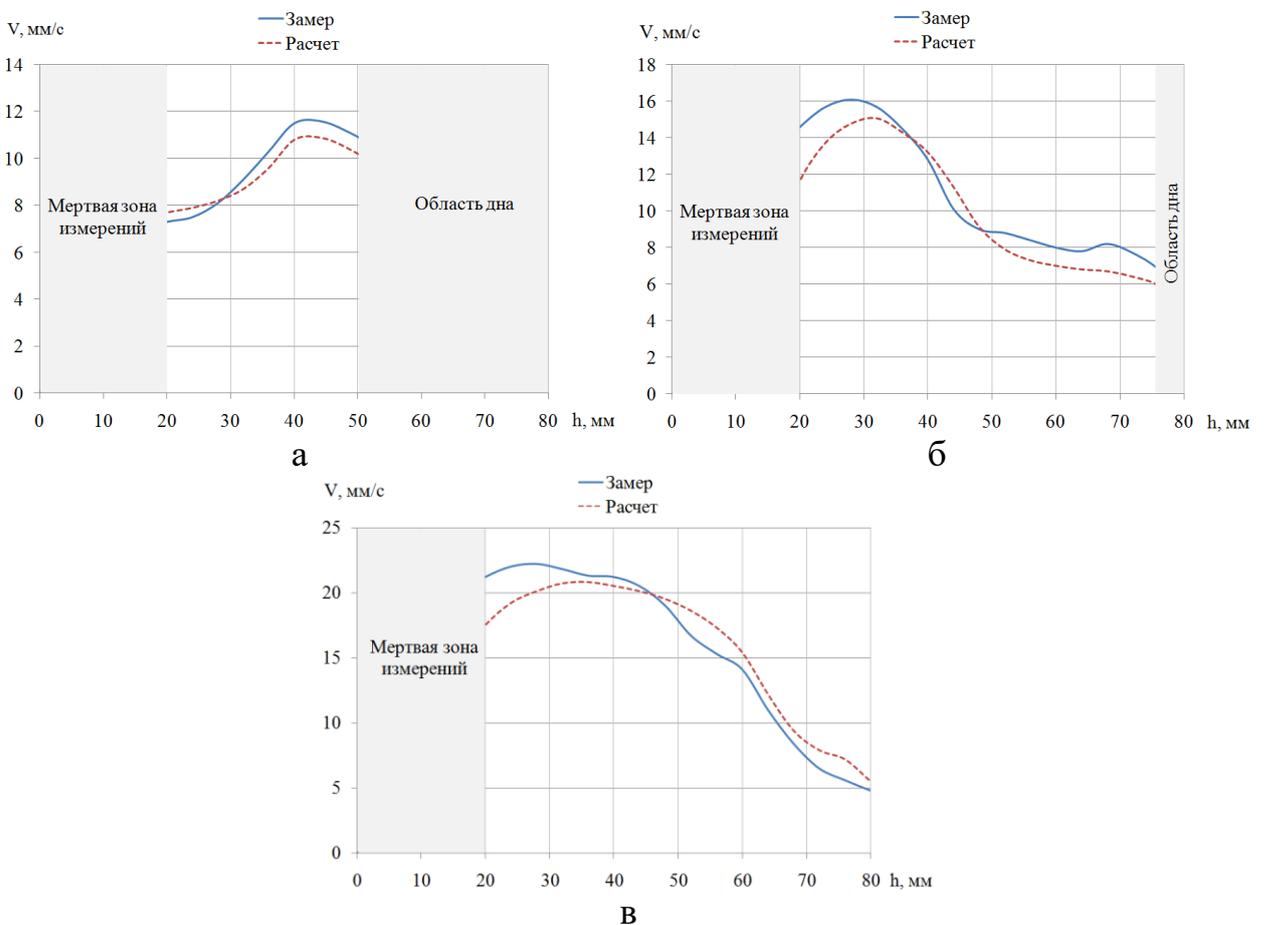


Рисунок 11 – Распределение вертикальных составляющих меридиональных течений в области датчика №1 (а), датчика №2 (б), датчика №3 (в)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ технологий и устройств для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины алюминиевых слитков в кристаллизаторах скольжения показал, что для многоручьевого литейной машины наиболее приемлемым вариантом является двухфазный цилиндрический индуктор. Предложенная конструкция электромагнитного перемешивателя обладает компактными геометрическими размерами, что позволяет использовать ее в многоручьевых литейных комплексах.

2. Разработаны сопряженные математические модели системы «индуктор-слиток», предназначенные для расчета связанных электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов с учетом фазового перехода «жидкая фаза – твердая фаза». Комплекс моделей позволяет учитывать влияние режима работы электромагнитного перемешивателя на процесс формирования алюминиевого слитка.

3. В результате расчетов, проведенных на математических моделях, определены геометрические и энергетические параметры двухфазного индуктора, проведен расчет режимов его работы и оценено влияние на гидродинамические процессы в жидкой сердцевине слитка, форму фронта кристаллизации. Полученные данные позволили выработать рекомендации по корректировке технологических параметров литья. За счет изменения схемы подключения обмоток и параметров питающей сети, в жидкой сердцевине кристаллизующегося слитка формируются потоки металла, охватывающие до 90 % поверхности фронта кристаллизации при средней скорости циркуляции от 0,1 до 0,5 м/с. Наиболее эффективным является режим электромагнитного перемешивания при частотном диапазоне  $f=5-10$  Гц, используя схему с вращающимся магнитным полем.

4. Разработана и опробована методика ультразвукового исследования поля скоростей в жидкой сердцевине слитка с использованием физической модели цилиндрического индуктора.

5. Сравнение результатов физического и математического моделирования показало их удовлетворительную сходимость (10-15%), что позволяет говорить о корректности подходов, принятых при проведении исследований.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Численное моделирование воздействия электромагнитного поля на жидкую сердцевину алюминиевого слитка при кристаллизации. / **М.Ю. Кучинский**, М.В. Первухин, Э.Р. Винтер, С.П. Тимофеев. - Промышленная энергетика. – 2022. - №2. – С. 18-23.

2. Исследование технологических режимов электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины кристаллизующегося алюминиевого слитка / **М.Ю. Кучинский**, М.В. Первухин, Э.Р. Винтер, С.П. Тимофеев. - Вопросы электротехнологии. – 2021. - № 4. – С. 13-22.

3. Исследование тепловых процессов в миксере сопротивления для разлива алюминиевых сплавов / М.В. Первухин, **М.Ю. Кучинский**, В.Н. Тимофеев. – Журнал Электromеталлургия, Изд-во «Наука и технологии», 2015, №10, С. 13-19.

**Публикации в изданиях, включённых в Scopus / Web of Science:**

4. Numerical Analysis of the Non-Stationary Thermal State of the Tool in the Combined Casting and Extrusion of Non-Ferrous Metals / A.P. Skuratov, N.P. Popiyakova, A.S. Potapenko, Y.V. Gorokhov, **M.Y. Kuchinskii**, S.V. Belyaev, D.S. Voroshilov, I.L. Konstantinov, A.V. Ivlev, D.N. Bozhko // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 117 (2021), pp. 295–303.

5. Mathematical modelling and verification of mhd processes at stirring the liquid phase of the solidifying ingot / **M. Kuchinskii**, M. Khatsayuk, V. Timofeev, M. Pervukhin, S. Timofeev // Magnetohydrodynamics, Vol. 55 (2019), No. 4, pp. 415–425.

**Публикации в прочих изданиях:**

6. Исследование МГД-перемешивателя жидкой фазы кристаллизующегося алюминиевого слитка / М.В. Первухин, **М.Ю. Кучинский**, С.П. Тимофеев // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Борисовские чтения», г. Красноярск, 2021, С. 42-46.

7. Исследование электромагнитного воздействия на жидкую сердцевину алюминиевых слитков при непрерывном литье в кристаллизатор скольжения / М.В. Первухин, **М.Ю. Кучинский**, С.П. Тимофеев // Журнал СФУ. Техника и технологии, г. Красноярск, 2019, 12(8), С. 952-961.

8. Математическое и физическое моделирование МГД– перемешивателя жидкой фазы кристаллизующегося алюминиевого слитка / М.Ю. Хацаюк, М.В. Первухин, **М.Ю. Кучинский**, С.П. Тимофеев // Сборник докладов 11 межд. конгресса «Цветные металлы и минералы», г. Красноярск, 2019, С. 442–448.

9. Разработка электромагнитного перемешивателя для непрерывного литья алюминиевых слитков / В.Н. Тимофеев, М.В. Первухин, **М.Ю. Кучинский** // Сборник докладов девятого международного конгресса «Цветные металлы и минералы», г. Красноярск, 2017, С. 697–702.

10. О выплавке в индукционной тигельной печи хромовой бронзы для электродов контактной сварки / С.Л. Бусыгин, А.М. Токмин, М.В. Первухин, В.С. Казаков, **М.Ю. Кучинский** // Журнал Металлургия машиностроения, Изд-во «Литейное производство», 2016, №1, С. 7-9.

11. Research Characteristics Of Aluminum Alloy Obtained By The Method Of Rapid Crystallization In Electromagnetic Field / M. Pervukhin, **M. Kuchinskii** // Applied Mechanics and Materials, TTP, Switzerland, Vol. 792, (2015), pp 174-179.

12. Исследование характеристик алюминиевого сплава, полученного методом быстрой кристаллизации в электромагнитном поле / М.В. Первухин, **М.Ю. Кучинский** // ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ. ЭНЕРГЕТИКА: сборник научных трудов VII Международной научной конференции молодых ученых. Новосибирск, 2015, С. 95-98.

**Патент на изобретение в РФ**

13. Патент на изобретение № 2743437 – Устройство для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка в кристаллизаторе / С.П. Тимофеев, **М.Ю. Кучинский**, М.В. Первухин, В.Н. Тимофеев. Заявл. 30.04.2020, зарег. 18.02.2021.

Отпечатано в типографии библиотечно-издательского комплекса

Сибирского федерального университета

660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а, Тел. (391) 206-56-99

Формат 60 x 84/16. Объем 1 п.л., тираж 100 экз.

Заказ №3328. Подписано в печать 05.07.2022 г.