

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи



Кучинский Михаил Юрьевич

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

Специальность 05.09.10 – «Электротехнология»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, доцент  
Первухин Михаил Викторович

Красноярск – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1 ОБЗОР И АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОЙ СЕРДЦЕВИНЫ СЛИТКА ПРИ ЛИТЬЕ В КРИСТАЛЛИЗАТОР СКОЛЬЖЕНИЯ.....	10
1.1 Основы применения электромагнитного перемешивания в технологических процессах литья .....	10
1.2 Обзор технологий, используемых для повышения качества слитков из алюминиевых сплавов.....	15
1.3 Обзор технологических устройств, используемых для электромагнитного воздействия на жидкую сердцевину слитка.....	23
1.4 Методы математического моделирования электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов при электромагнитном перемешивании .....	34
1.5 Постановка задачи исследования .....	37
Выводы по главе 1 .....	38
ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ ЖИДКОЙ СЕРДЦЕВИНЫ СЛИТКА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ .....	40
2.1 Математическая модель электромагнитных процессов .....	40
2.1.1 Описание модели и основные допущения .....	40
2.1.2 Расчетная модель.....	44
2.2 Математическая модель тепло-гидродинамических процессов .....	47
2.2.1 Описание модели и основные допущения .....	47
2.2.2 Расчетная модель.....	50
Выводы по главе 2.....	53
ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ.....	54
3.1 Анализ результатов теплового расчета .....	54
3.1 Анализ результатов электромагнитного расчета.....	57
3.3 Анализ результатов гидродинамического расчета .....	71

Выводы по главе 3.....	78
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	79
4.1 Постановка проведения эксперимента.....	79
4.2 Верификация результатов математического и физического моделирования .....	80
Выводы по главе 4.....	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	90
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	92
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	93
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акты внедрения результатов диссертационной работы	104
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на изобретение.....	106

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность научной работы.** Алюминий и его сплавы по объемам производства и потребления прочно занимают второе место после стали, причем сферы их использования постоянно расширяются. Бурное развитие производства алюминиевых сплавов обусловлено их уникальными свойствами: высокая прочность в сочетании с малой плотностью, коррозионная 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).

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. ЭМП является

сложным технологическим оборудованием, разработка конструкции и режимов работы которого требует глубокого понимания электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов, протекающих в жидкой сердцевине слитка и их взаимного влияния друг на друга.

**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).

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.

**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 исследования.** 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 работ, в том числе 3 публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 публикации в изданиях, включенных в базы Scopus и Web of Science, 1 патент РФ на изобретение, 7 публикаций в прочих изданиях.

#### **Структура и объем.**

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.

# **ГЛАВА 1 ОБЗОР И АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОЙ СЕРДЦЕВИНЫ СЛИТКА ПРИ ЛИТЬЕ В КРИСТАЛЛИЗАТОР СКОЛЬЖЕНИЯ**

## **1.1 Основы применения электромагнитного перемешивания в технологических процессах литья**

ЭМП приобрели большое значение в литейном производстве. Перемешивание жидкого металла под воздействием электромагнитного поля при литье в кристаллизатор скольжения дает возможность повысить качество продукции производства, получить однородную мелкозернистую кристаллическую структуру, добиться равномерного химического состава по объему слитка [1, 2, 5]. Существенное влияние на эти свойства оказывает перемешивание жидкой сердцевины слитков в процессе кристаллизации [3, 6]. Несмотря на достаточно продолжительный период использования ЭМП в литейном производстве, единых рекомендаций для получения слитков и заготовок с различным сечением и физическими свойствами до сегодняшнего времени нет [10, 12].

Помимо крупногабаритных слитков большой объем высоколегированных алюминиевых сплавов отливается в многоручьевые кристаллизаторы. На рисунке 1.1, а показан многоручьевой кристаллизатор для литья алюминиевых слитков [25]. Кристаллизатор 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.

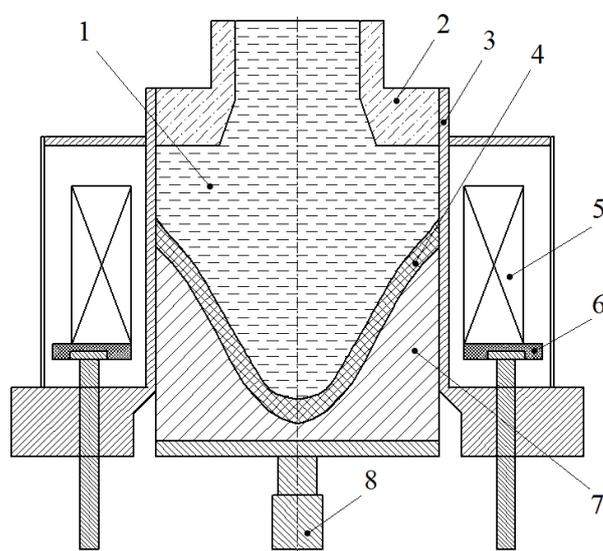
Применение технологии электромагнитного перемешивания для многоручьевых кристаллизаторов требует проведения дополнительных

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. 1.1, б представлен вариант размещения ЭМП в области гильзы многоручьевого кристаллизатора [25]. В процессе литья жидкий металл 1 непрерывно подается в кристаллизатор 3 через тепловую насадку 2. Индуктор 5 воздействует на расплав в результате наведения в нем вихревых токов. Жидкая сердцевина слитка перемешивается электромагнитными силами, создающими вращающееся, либо бегущее магнитное поле. Под действием охлаждающей воды жидкометаллическая масса начинает затвердевать, образуя фронт кристаллизации 4. Твердая зона слитка 7 вытягивается вниз с помощью затравки 8. Подъемный механизм 6 позволяет перемещать индуктор относительно слитка по высоте для наиболее эффективного воздействия на жидкую сердцевину.



а



б

Рисунок 1.1 – Многоручьевого литейный комплекс (а) и проект расположения ЭМП в кристаллизаторе (б)

За период проводимых исследований выявлены определенные требования, соблюдение которых необходимо для получения мелкозернистой структуры слитка [9, 13, 16]. Важным условием является сохранение высокой температуры в расплаве до момента кристаллизации при поддержании в нем интенсивных магнитогидродинамических течений [4, 7, 8]. Обеспечение средней скорости циркуляции потоков металла в диапазоне от 0,1 до 0,6 м/с в области жидкой сердцевины слитка является качественным показателем интенсивности гидродинамических течений [2, 31, 44]. Кроме того, необходимо поддержание высокой скорости течений вдоль всего фронта кристаллизации слитка, в том числе и в донных областях жидкой лунки. 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 [34, 40, 41].

Эффективность электромагнитного перемешивания в значительной степени зависит от конструкции индуктора и его взаимного расположения с кристаллизатором. Существенную роль играют энергетические параметры системы питания индуктора, такие как частота питающей сети, сила тока, тип электрической схемы подключения, оказывающие влияние на интенсивность электромагнитного воздействия и глубину проникновения магнитного поля в металл [14, 19]. В зависимости от используемого сплава и назначения литейной машины существуют различные способы размещения электромагнитного перемешивателя относительно кристаллизатора, общие схемы которых представлены на рисунке 1.1, где 1 – жидкий металл, 2 – кристаллизатор, 3 – индуктор, 4 – твердая зона слитка.

Наиболее распространенным вариантом размещения электромагнитного перемешивателя при литье сплавов из цветных металлов является расположение с внешней стороны кристаллизатора или внутри его корпуса (рисунок 1.2, а, б) [10]. При данном размещении область воздействия на расплав будет максимально возможной, но при этом электромагнитное

поле значительно ослабляется стенками кристаллизатора. Для того, чтобы уменьшить экранирование электромагнитного поля, корпус кристаллизатора изготавливается из немагнитной стали, либо специальных медных или алюминиевых сплавов.

Расположение перемешивателя под кристаллизатором (рисунок 1.2, г), обычно используется при литье сплавов из черных металлов, которым свойственно образование глубокой жидкой лунки. Для цветных металлов и сплавов данный способ не представляется возможным.

В отдельных случаях применяется расположение перемешивателя над мениском металла (рисунок 1.2, в). В результате электромагнитное поле проникает только в верхние слои жидкой фазы. Поэтому возможность использования данной конструкции эффективна только для легких сплавов, у которых жидкая лунка имеет небольшую глубину. Однако, при таком способе воздействия возможно повреждение окисной пленки и ее попадание в расплав, что является главным недостатком.

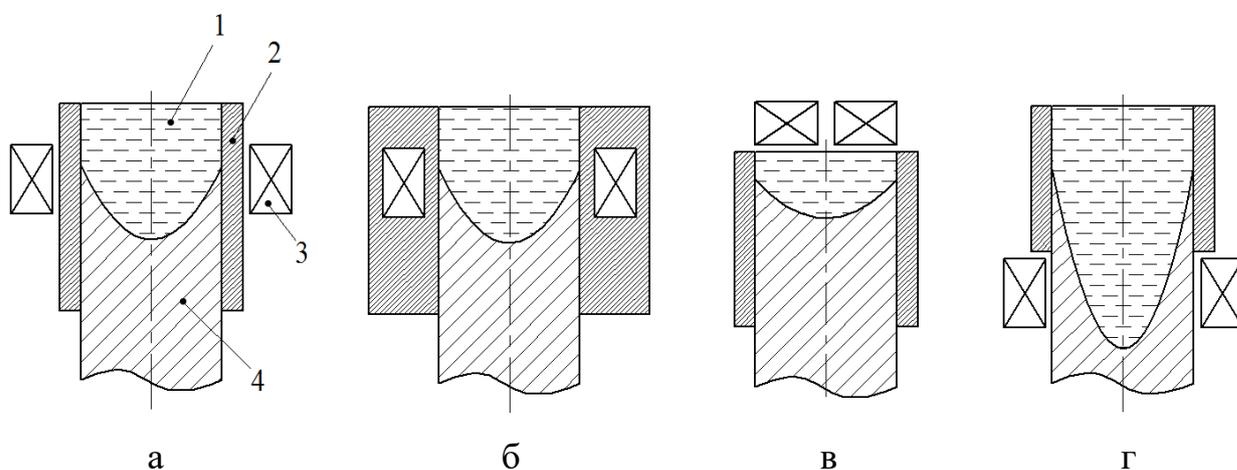


Рисунок 1.2 – Расположение индуктора относительно кристаллизатора:  
а) за кристаллизатором; б) внутри кристаллизатора; в) над мениском; г) под кристаллизатором

На рисунке 1.3 представлена схема формирования слитка в кристаллизаторе, оснащённом ЭМП. Процесс кристаллизации

осуществляется при формировании жидкой зоны с заданной высотой, имеющей в поперечном сечении форму слитка. В кристаллизатор 1 начинает подаваться жидкий металл 2. Индуктор, состоящий из катушек 3 и магнитопровода 4, оказывает воздействие на расплав в результате наведения вихревых токов. Область жидкой сердцевины слитка перемешивается электромагнитными силами, создающими вращающееся или бегущее магнитное поле. Для подачи воды на боковую поверхность слитка используется охладитель 5. Под действием охлаждающей воды жидкометаллическая масса непрерывно затвердевает. Граница перехода между твердой и жидкой фазами образует фронт кристаллизации 6. Затвердевшая зона слитка 7 вытягивается вниз [78].

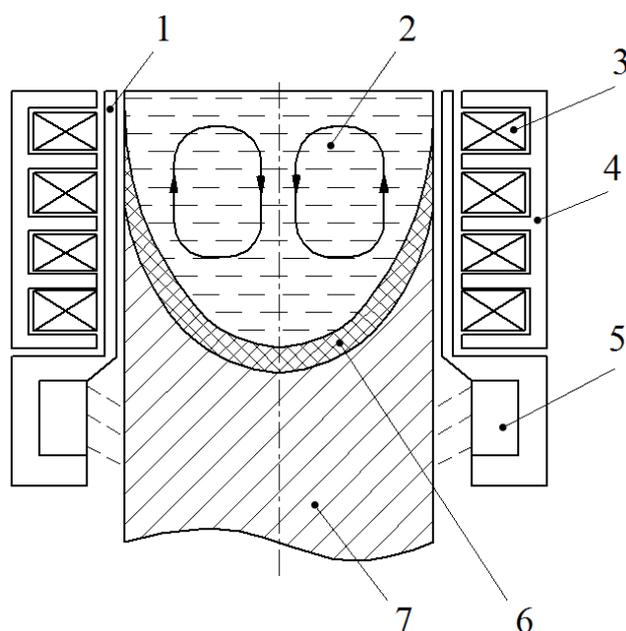


Рисунок 1.3 – Схема формирования слитка в кристаллизаторе скольжения, оснащённом ЭМП

В настоящее время электромагнитное перемешивание жидкой сердцевины слитка используется в основном на литейных комплексах, предназначенных для получения одиночных крупногабаритных слитков.

Оснащение многоручьевых литейных комплексов электромагнитными перемешивателями является перспективным, но в большинстве случаев достижение требуемых параметров электромагнитного поля осложняется ограниченными геометрическими размерами перемешивателя. Для этого необходима разработка индуктора специальной конструкции, обладающей компактными габаритами, позволяющими установить её на многоручьевом литейном комплексе. При этом индуктор должен обладать приемлемыми энергетическими характеристиками, обеспечивающими эффективное воздействие на жидкую сердцевину кристаллизующегося слитка.

## **1.2 Обзор технологий, используемых для повышения качества слитков из алюминиевых сплавов**

В металлургической промышленности существует множество способов повышения качества сплавов из цветных металлов. Особенностью приготовления алюминиевых сплавов является их интенсивное насыщение окислами, твердыми и газообразными неметаллическими включениями в процессе плавки. В результате загрязнения ухудшаются физические свойства получаемых слитков, снижается эксплуатационная эффективность изготовленных из них изделий. Различные технологии рафинирования расплава на стадии приготовления позволяют избавиться от инородных включений, повысить его чистоту. К ним относятся рафинирование продувкой газами, вакуумная обработка, обработка флюсами, фильтрация, использование специальных модифицирующих добавок, а также комбинация этих методов [16, 56].

Помимо получения высокой чистоты сплава, ключевой целью является равномерное растворение легирующих компонентов, добавляемых в чистый алюминий. Для этой цели используются различные виды физических воздействий на расплавленный металл. К данным методам относятся

механическое, вибрационное, ультразвуковое и электромагнитное перемешивание [60,79].

Известны различные конструкции механических перемешивателей, вступающих в непосредственный контакт с расплавом [27]. Общая схема состоит из механизма вращения вала 1, к которой крепятся лопасти 2, погруженные в жидкий металл (рисунок 1.4).

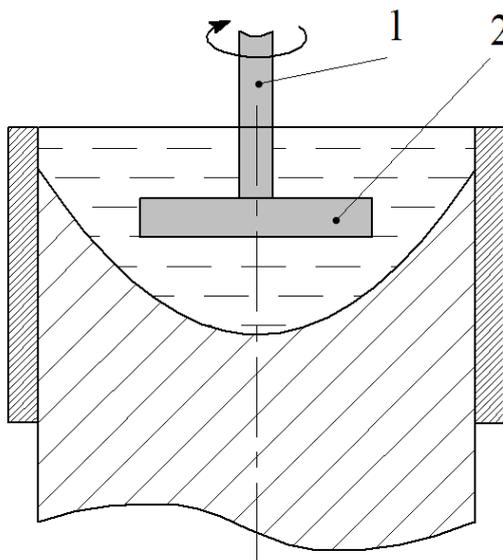


Рисунок 1.4 – Схема механического перемешивания расплава

Использование данного метода имеет определенные эксплуатационные сложности. Перемешивающие лопасти должны быть изготовлены из дорогостоящих жаростойких материалов, способных длительное время находиться в агрессивной среде жидкого алюминия. Кроме того, продолжительное воздействие механического перемешивания вызывает насыщение расплава газами, требуя дополнительное использование устройств дегазации. Возможности регулирования траектории движения металла ограничены параметрами диапазона скоростей вращения устройства. Наиболее существенное улучшение кристаллической структуры и физико-механических свойств получаемых сплавов наблюдается при литье слитков диаметром больше 600 мм [57]. Поэтому использование механических

перемешивателей рационально только для получения слитков с большим диаметром. При этом выход годного металла зачастую снижается из-за возможности попадания частей окисной пленки в слиток. Вследствие этого механическое перемешивание жидкой сердцевины не получило широкого распространения.

Метод вибрационной обработки. Виброимпульсное воздействие обеспечивает измельчение структуры слитка, изменяет форму и глубину фронта кристаллизации, а также способствует улучшению показателей физико-механических свойств. В результате вибрационного воздействия происходит достижение технологических результатов за счет различных физических процессов: создания волн на поверхности жидкого металла, кавитационных эффектов, развития гидродинамических течений и формирования зон с направленным перемешиванием жидкой сердцевины [27]. Вибрационная обработка может осуществляться различными вариантами конструкции излучателей. Метод передачи вибрационных импульсов определяется в зависимости от назначения технологического объекта, а также задачами, которые решаются в процессе перемешивания. В большинстве случаев вибрационные импульсы передаются в расплав через стенки литейной формы, либо вводятся непосредственно в жидкий металл при помощи специальных устройств. Значительную роль играет тип ориентации колебаний в расплаве, их амплитуда может быть направлена в вертикальной и горизонтальной плоскостях, или перемещаться по кругу в горизонтальной плоскости. Кроме того важным фактором является интенсивность производимых колебаний в расплаве и их частота. Схема вибрационной установки представлена на рисунке 1.5. Конструкция включает в себя изложницу 1, заполненную расплавом 2, вибромотор 3, вибропару 4, поддон 5. По результатам проведенных исследований [60], наибольшей эффективностью для измельчения структуры обладает горизонтально-круговая вибрация.

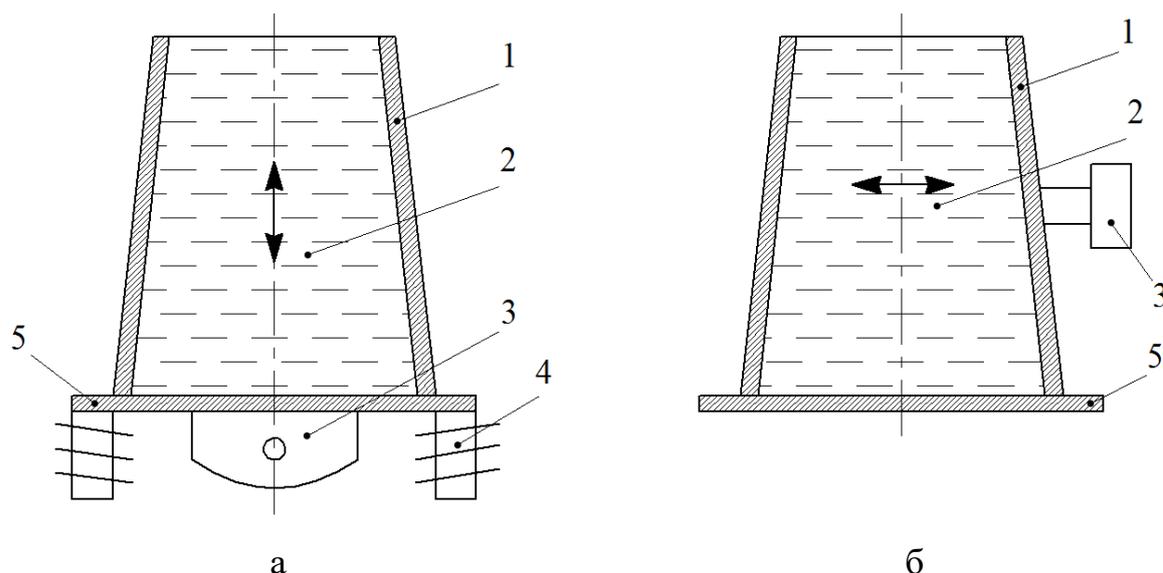


Рисунок 1.5 – Схема вибрационной установки для обработки расплава в вертикальной (а) и горизонтально-круговой плоскостях (б)

Метод ультразвуковой обработки. Акустические и ультразвуковые методы воздействия на жидкую сердцевину слитка в процессе кристаллизации получили достаточно обширное применение в металлургии. Схема установки литья, оснащенной ультразвуковым излучателем, представлена на рисунке 1.6. Расплавленный металл поступает в кристаллизатор 3, воздействие на жидкую сердцевину слитка 2 осуществляется ультразвуковым излучателем 1. Ультразвуковое перемешивание достаточно интенсивно влияет на протекание тепло-гидродинамических процессов в жидком металле. Основные технологические эффекты, достигаемые при данной обработке, возникают за счёт эффекта интенсивного развития процессов кавитации [58, 68]. Мощные колебания, создаваемые в жидкой сердцевине слитка, способствуют формированию зародышей газовых пузырьков, удаляющих газовые примеси из расплава.

Применение ультразвукового воздействия для крупногабаритных слитков большой массы не оказывает требуемого технологического эффекта. Данный факт объясняется тем, что эффект ультразвуковой обработки

расплава проявляется в достаточно ограниченном объеме. Поэтому использование ультразвуковой обработки целесообразно только для получения слитков малых размеров. Основным недостатком ультразвуковой установки является быстрое разрушение волноводов, которые изготавливаются из дорогостоящих тугоплавких металлов.

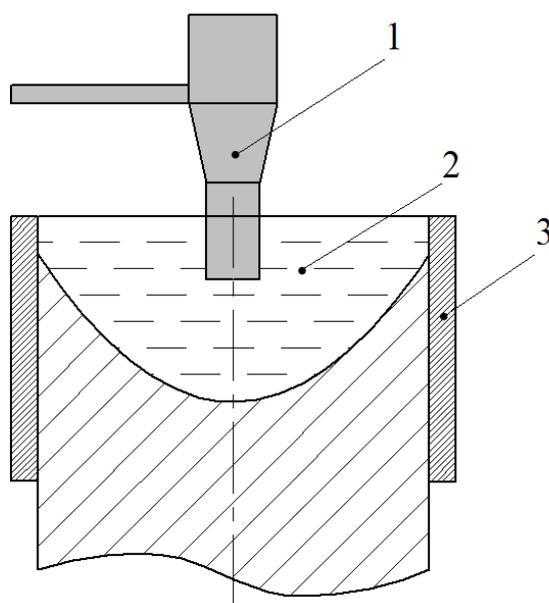


Рисунок 1.6 – Схема установки литья, оснащенной ультразвуковым излучателем

Рассмотренные методы динамических воздействий и их комбинации, обеспечивают благоприятные эффекты, позволяющие кардинально повысить качество слитков и заготовок. В особенности стоит отметить повышенную эффективность динамических воздействий, которая происходит в случае совмещения вибрационных импульсов с регламентированным принудительным перемешиванием. При этом сфера применения динамических воздействий при производстве алюминиевых сплавов достаточно узкоспециализированная, и не предполагает массового внедрения на существующие литейные комплексы.

Газоимпульсная обработка. Газоимпульсное перемешивание представляет собой эффективный способ воздействия на затвердевающий расплав. В ходе осуществляемого процесса происходит периодическое вакуумное всасывание металла, после чего осуществляется выталкивание его через огнеупорную трубку в область расплава. Общая схема газоимпульсной обработки расплава представлена на рисунке 1.7. В начальный момент открывается вакуумный клапан и жидкий металл 2 из кристаллизатора 3 начинает затекать внутрь трубы 1. Когда высота металла в трубе достигает требуемого уровня, вакуумный клапан перекрывается и открывается клапан для подачи давления. После выталкивания столба металла с высокой скоростью происходит развитие вихревых течений, интенсивно перемешивающих жидкий металл. В процессе газоимпульсной обработки происходит периодическое повторение указанных операций, осуществляющихся в течение всего периода литья. Исследования макроструктуры непрерывно литых заготовок показали снижение дефектов макроструктуры, значительное измельчение зерна, равномерное распределение плотности по всему сечению, без усадочной пористости и рыхлости. За счёт пульсационного перемешивания происходит создание вынужденных конвективных потоков в жидкой сердцевине слитка, перемещение которых может осуществляться вдоль всего фронта кристаллизации [60]. Главным недостатком пульсационной обработки является неравномерное распределение газового потока по сечению колонны с вытаскиваемым металлом, что приводит к искривленному распределению скоростей металла и нарушению горизонтального положения мениска. Кроме того, избыточная интенсивность перемешивания разрушает переходную твердожидкую фазу.

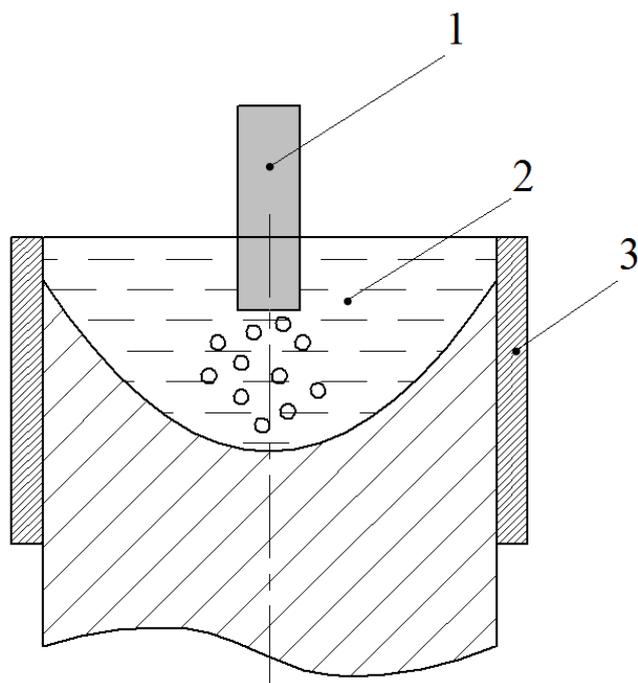


Рисунок 1.7 – Схема газоимпульсной обработки расплава

Электромагнитное перемешивание по сравнению с методами, рассмотренными в обзоре, обладает комплексным воздействием на жидкую сердцевину слитка, дает возможность регулировать траекторию гидродинамических течений в широком диапазоне скоростей, повышая интенсивность процесса кристаллизации [26, 33, 62]. Необходимым условием перемешивания является наличие неразрывной окисной пленки на поверхности расплава. Для наиболее эффективного перемешивания жидкой сердцевины слитка ЭМП следует размещать как можно ближе к кристаллизатору с целью уменьшения рабочего зазора между кристаллизующимся слитком и индуктором. Использование ЭМП позволяет создавать гидродинамические течения в металле различной конфигурации, изменяя их интенсивность и траекторию движения, в зависимости от параметров питающей электрической схемы и частоты воздействия тока [8, 73].

Проведено большое количество испытаний, подтверждающих эффективность применения электромагнитного воздействия на жидкую

сердцевину слитка в процессе кристаллизации [22, 35, 38]. При детальном анализе структуры слитков, отливаемых без перемешивания жидкой сердцевины, наблюдается наличие крупных, неоднородных включений. В случае воздействия на расплавленный металл электромагнитным полем происходит измельчение структуры, устранение неоднородностей химического состава. Однородность полученных образцов по химическому составу и кристаллической структуре способствует выравниванию физико-химических свойств, что положительно влияет на деформируемость материала при дальнейшей обработке и на свойства полуфабрикатов [44, 48].

Качественные характеристики получаемых слитков зависят от таких технологических параметров, как скорость литья, расход воды для охлаждения слитков, интенсивность силового воздействия электромагнитного поля на жидкий металл. Энергетические характеристики ЭМП определяются конструкцией индуктора, электрическими схемами подключения обмоток, частотой и силой тока в катушках. В некоторых случаях высокую эффективность перемешивания обеспечивает двухчастотный режим питания индуктора, когда одна пара катушек подключена к току высокой частоты, другая пара работает на низкой частоте. Данный технологический режим позволяет с высокой степенью интенсивности оказывать электромагнитное воздействие как на глубинные области жидкой сердцевины, так и на область, расположенную вдоль фронта кристаллизации [81, 84]. В целом, процесс производства слитков из специальных алюминиевых сплавов с повышенными физико-механическими свойствами, удовлетворяющими современным промышленным требованиям, достаточно сложен и требует предельно точного соблюдения всех технологических условий производства.

### **1.3 Обзор технологических устройств, используемых для электромагнитного воздействия на жидкую сердцевину слитка**

Множество исследований, проведенных в последние годы [17, 18, 20], подтверждают существенное измельчение микроструктуры алюминиевых сплавов при помощи электромагнитного перемешивания. Для этого были разработаны и успешно испытаны перспективные конструкции специальных перемешивающих устройств, используемых при литье алюминиевых сплавов. Имеются публикации, посвященные совместному исследованию электромагнитных и гидродинамических процессов в жидкой сердцевине при помощи математического и физического моделирования. Полученные слитки обладают повышенными механическими свойствами по сравнению с образцами, отлитыми без применения электромагнитного поля. Технологии электромагнитного воздействия, рассматриваемые в работах [21, 22, 32], позволяют достичь повышения качества получаемых слитков, улучшая их физико-химические свойства.

В работе [31] рассматривается установка горизонтального литья, разработанная китайскими учеными из Далянского Технического Университета. Основными элементами технологической схемы являются: разливочный ковш 4, печь 5, кольцевая пластина 3, через которую подаются расплав 1 и расплав 2, электромагнитный перемешиватель 6, графитовая литейная форма 8, система охлаждения 7, вторичная система охлаждения 9, сформировавшийся слиток 10, устройство вытягивания слитка 11 (рисунок 1.8). Индукционные катушки, подключенные к трехфазной электрической схеме с фазовым сдвигом 60 градусов, создают вращающееся магнитное поле. Максимальная сила тока в катушках достигает 80 А. Для исследований выбраны алюминиевые сплавы марок АА3003 и АА4045. Получение экспериментальных отливок происходило при скорости вытягивания слитка 120 мм/мин. Использование данной системы позволяет достичь равномерного распределения температурного поля по всей области жидкой

сердцевины слитка. В ходе испытаний данного комплекса были получены образцы, отвечающие высоким требованиям по химическому составу и характеру макроструктуры (рисунок 1.9).

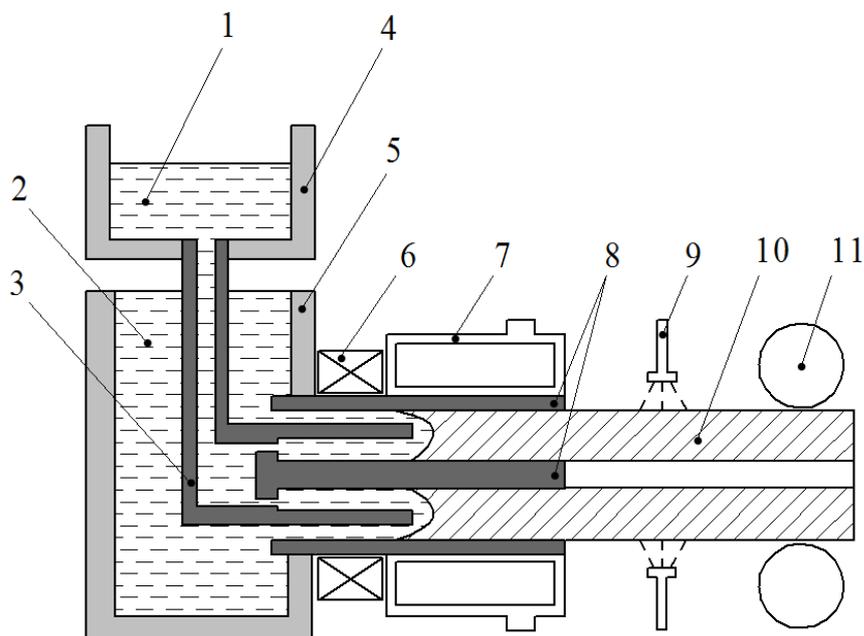


Рисунок 1.8 – Конструкция установки для горизонтального непрерывного литья

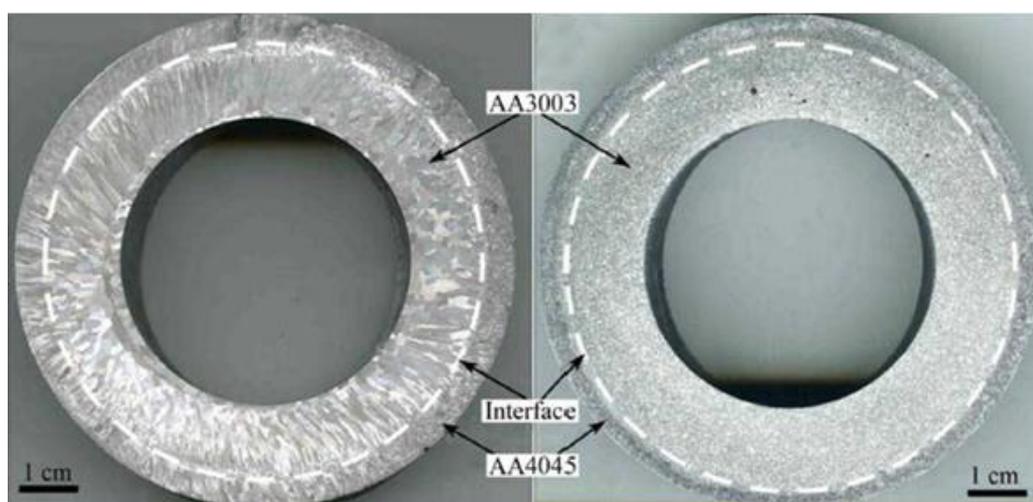


Рисунок 1.9 – Характеристики макроструктуры полученных образцов

В публикации китайских ученых из Национального инженерного научного центра цветных металлов рассмотрен метод электромагнитного воздействия на жидкую сердцевину, заключающийся в использовании пар катушек, работающих на частоте до 1 кГц, и катушек, подключенных к току промышленной частоты [34]. В результате происходит наложение высокочастотного и низкочастотного электромагнитных полей, создается комбинированное поле. Данная схема подключения позволяет повысить интенсивность перемешивания жидкой сердцевины слитка за счет различной глубины проникновения поля в металл. Принципиальная схема установки изображена на рисунке 1.10. Высокочастотные катушки 3 и низкочастотные катушки 4 установлены за стенками медной гильзы 2, имеющей внутренний диаметр 70мм и внешний диаметр 90мм. Верхние высокочастотные катушки создают мощные электромагнитные силы, ослабляющие трение между затвердевающей зоной и стенкой кристаллизатора. Нижние катушки, работающие на промышленной частоте, создают вращающееся электромагнитное поле, осуществляя перемешивание жидкой сердцевины в процессе кристаллизации. Жидкий металл 1 подается в кристаллизатор, охлаждение отливаемого слитка 6 осуществляется с помощью охладителя 5.

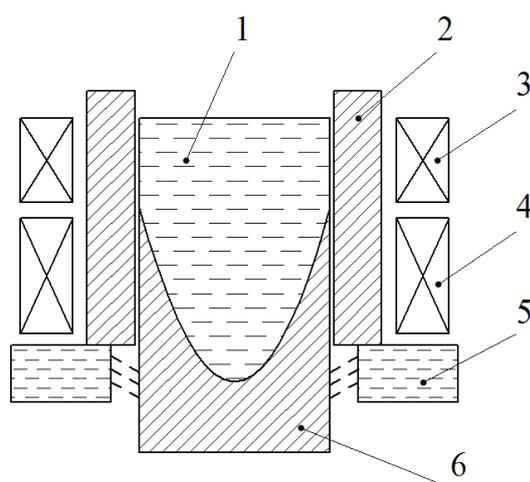
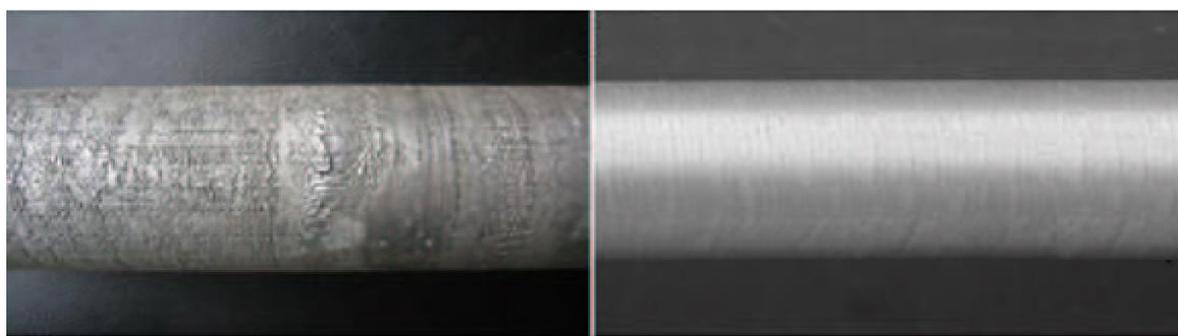


Рисунок 1.10 – Конструкция установки, использующая комбинированное электромагнитное поле

Использование комбинированного электромагнитного поля позволяет повысить качество внешней поверхности слитков, улучшить их физико-химические свойства (рисунок 1.11).



а

б

Рисунок 1.11 – Внешний вид поверхности слитков, полученных без электромагнитного перемешивания (а), с перемешиванием (б)

Аналогичная двухчастотная схема подключения катушек электромагнитного перемешивателя применена учеными из Корейского института промышленных технологий [55]. Литейный комплекс состоит из плавильной печи емкостью 50 кг, разливочного лотка, кристаллизатора, пояса охлаждения, двух пар индукционных катушек. На рисунке 1.12 представлена схема установки литья. Кристаллизатор представляет собой симметричную изогнутую на три части литейную форму, с толщиной стенки 10 мм. Форма имеет для охлаждения 18 щелей шириной 0,3 мм. Диапазон расхода воды регулируется от 15 до 40 л/мин, скорость вытягивания слитка составляет 100 мм/мин. Рядом с кристаллизатором расположены две пары катушек, работающих на частоте 10–30 кГц, и на частоте 0–20 Гц. Данная схема подключения позволяет получить интенсивное перемешивание слоёв жидкого металла при различной глубине проникновения поля. Использование комбинированного электромагнитного поля позволяет эффективно перемешивать жидкую часть слитка. Проведенные

эксперименты подтверждают положительное влияние электромагнитного воздействия на качество слитков.

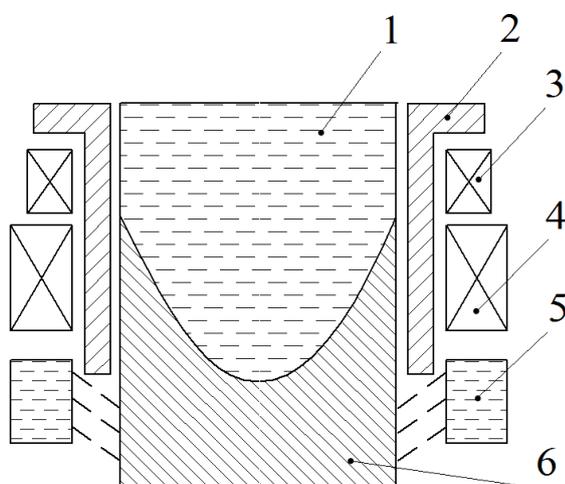


Рисунок 1.12 – Схема установки литья, использующая комбинированное электромагнитное поле: 1 – расплав; 2 – стенка кристаллизатора; 3 – высокочастотная катушка; 4 – низкочастотная катушка; 5 – охладитель; 6 – слиток

В публикации ученых из Уральского федерального университета [23] рассматривается полунепрерывная отливка слитков круглого сечения диаметром 200 мм из сплава БрБ-2 на литейной установке, оснащенной индукционной каналной печью, кристаллизатором скольжения с индукционной магнетогидродинамической машиной ИМГДМ-ПЗ, предназначенной для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка. Электромагнитный перемешиватель представляет собой конструкцию, состоящую из шести магнитопроводов, объединенных кольцевыми катушками (рисунок 1.13, а). Катушки создают бегущее магнитное поле, питаются от трехфазной сети промышленной частоты с линейным напряжением 160 В, током 167 А, потребляя активную мощность 10,3 кВт.

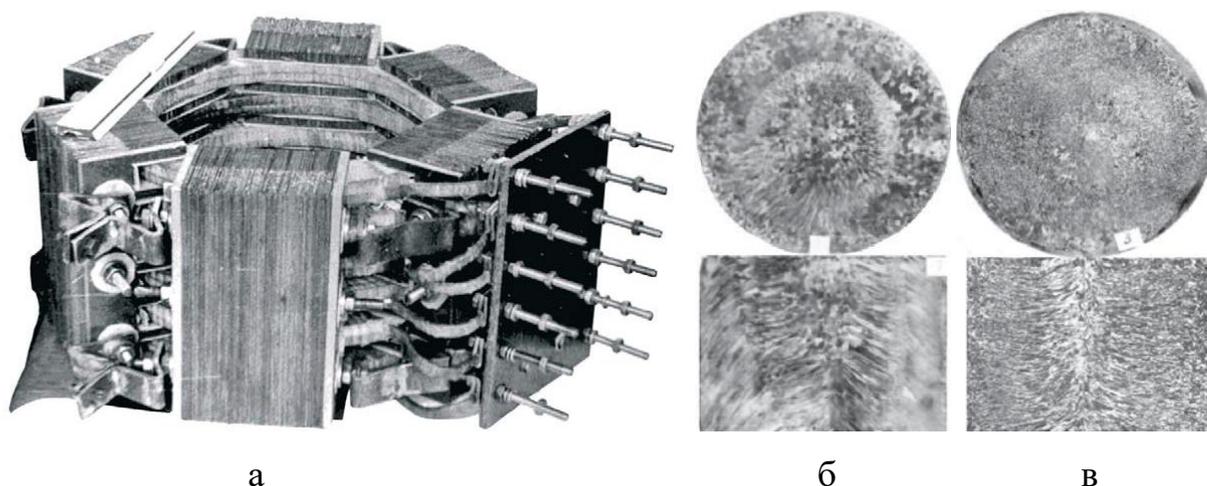


Рисунок 1.13 – Конструкция электромагнитного перемешивателя (а), макроструктуры слитков, полученных без применения ЭМП (б), с применением ЭМП (в)

Корпус кристаллизатора выполнен из нержавеющей немагнитной стали с толщиной стенки 2 мм. Медная хромированная гильза кристаллизатора имеет толщину стенки 10 мм с зазором для водоохлаждения 15 мм. Охлаждение осуществляется через верхний водоподвод. Проведение экспериментальных отливок при скорости вытягивания 5,2 м/ч показало, что воздействие электромагнитного поля позволяет добиться значительного измельчения структуры, улучшая физико-механические свойства полученных слитков (рисунок 1.13, б, в).

Значительных успехов в исследованиях по электромагнитному воздействию на кристаллизующиеся алюминиевые сплавы достигли польские ученые из Силезского Технического Университета. В публикации [28] Т. Wróbel и J. Szajnar предложена установка горизонтального непрерывного литья, оснащенная электромагнитным перемешивателем (рисунок 1.14). В состав литейного комплекса входят индукционная печь емкостью 60 кг, кристаллизатор с водяным охлаждением, диапазон расхода которого составляет от 0,1 до 10 м<sup>3</sup>/мин, система обратного охлаждения, система непрерывного вытягивания и отрезания слитка, реализующая движение в заданное время со скоростью от 100 до 200 мм/мин.

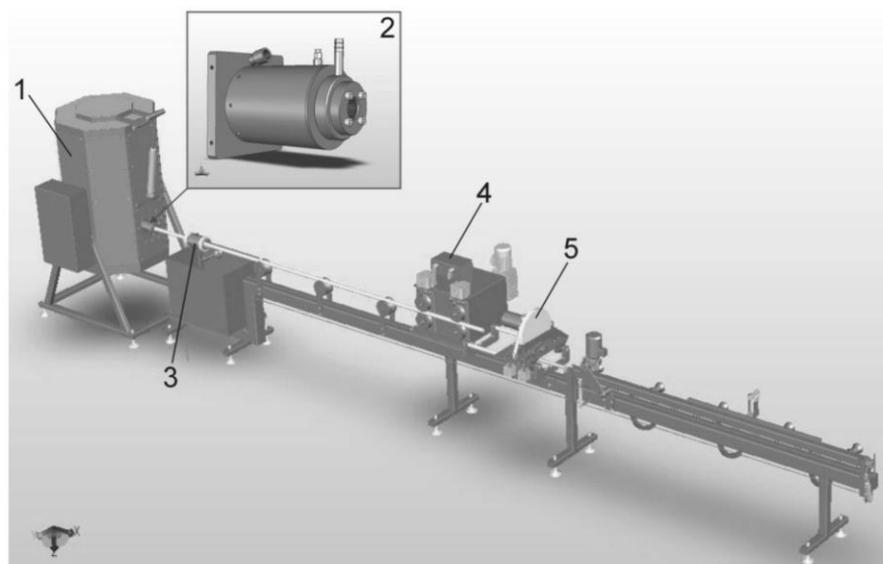


Рисунок 1.14 Установка горизонтального непрерывного литья:

1 – индукционная печь, 2 – кристаллизатор, 3 – система охлаждения, 4 – механизм вытягивания слитка, 5 – устройство отрезания слитка

Кристаллизатор скольжения, оснащенный электромагнитным перемешивателем, предназначен для получения алюминиевых слитков, имеющих диаметр от 20 до 40 мм. Индукционные катушки создают вращающееся электромагнитное поле. Максимальное значение электромагнитных сил, действующих на расплав, достигает 1,6 Н при частоте тока 100 Гц. На рисунке 1.15, а представлен образец макроструктуры чистого алюминия, отлитого в режиме без электромагнитного перемешивания. В ходе эксперимента получены образцы с добавлением модифицирующих добавок  $AlTi5B1$  (рисунок 1.14, б) и образцы с последующим электромагнитным воздействием после введения модификатора (рисунок 1.14, в). Анализ микроструктур слитков, полученных с применением ЭМП, показывает заметное измельчение и повышение однородности, по сравнению с вариантами без воздействия электромагнитного поля.

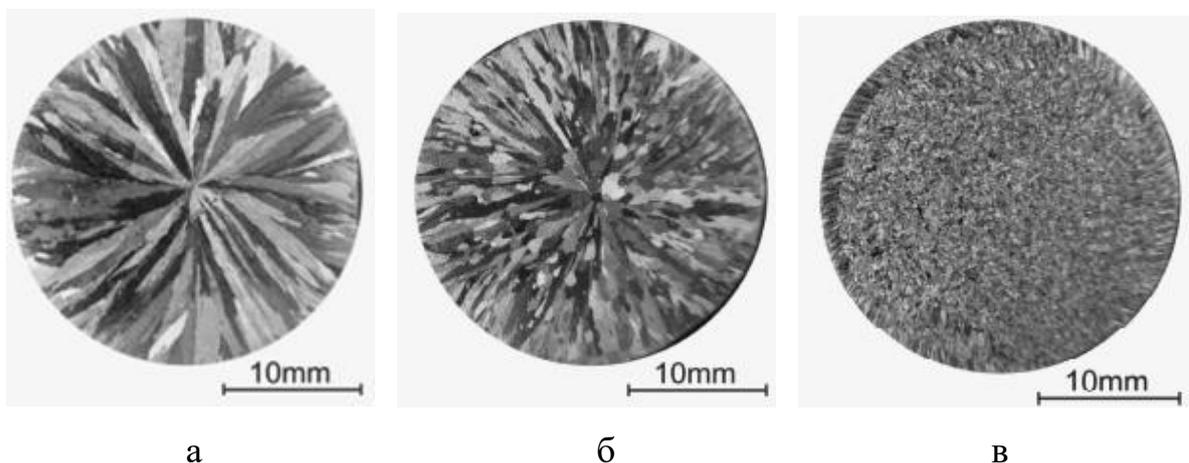


Рисунок 1.15 – Макроструктуры слитков, полученных:  
 без ЭМП (а), после модификации AlTi5B1 (б), 3 – после модификации с  
 последующим электромагнитным воздействием (в)

В работе китайских ученых из Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials [39] исследуются процессы электромагнитного перемешивания, вызванные совместным применением переменного и постоянного магнитного поля. Общий вид литейной установки, включающей в себя расплав 1, тепловую насадку 2, катушки постоянного тока 3, катушки переменного тока 4, графитовое кольцо 5, охладитель 6, кристаллизатор 7, затвердевший слиток 8, представлен на рисунке 1.16. Использование данной технологической схемы позволяет получить сложное по характеру воздействия электромагнитное поле. Первая пара индукционных катушек, расположенная за изложницей, создает постоянное магнитное поле. Вторая пара создает переменное магнитное поле. Литейный комплекс используется для производства алюминиевых слитков диаметром 200 мм. Расход воды регулируется в пределах 70 – 100 л/мин, скорость вытягивания слитка составляет 80 мм/мин. Температура расплава перед разливкой достигает 730 – 740 °С.

В результате комбинированного воздействия переменного и постоянного магнитного полей, позволяющих создавать гидродинамические течения сложной траектории, происходит интенсивное перемешивание

жидкой сердцевины слитка. Данный режим работы оказывает положительное влияние на структуру слитка, делая ее мелкозернистой (рисунок 1.17).

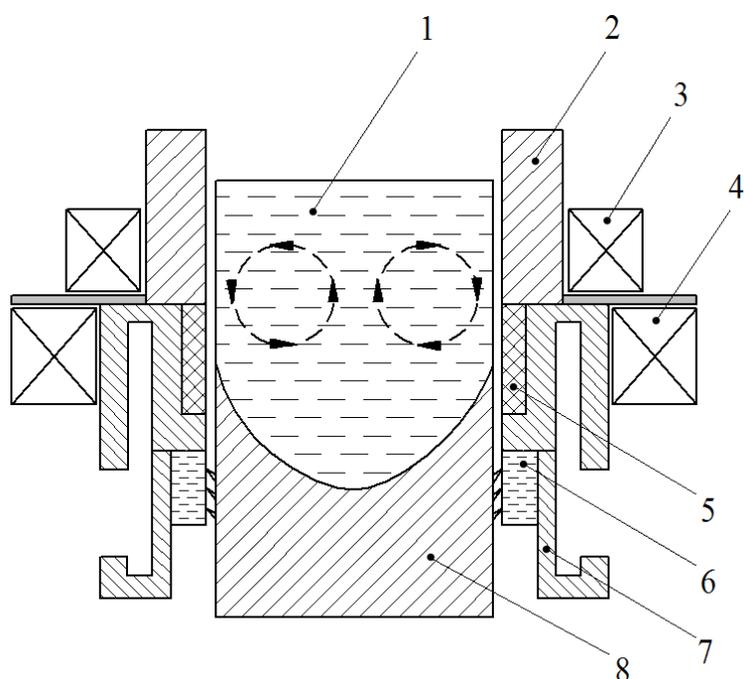
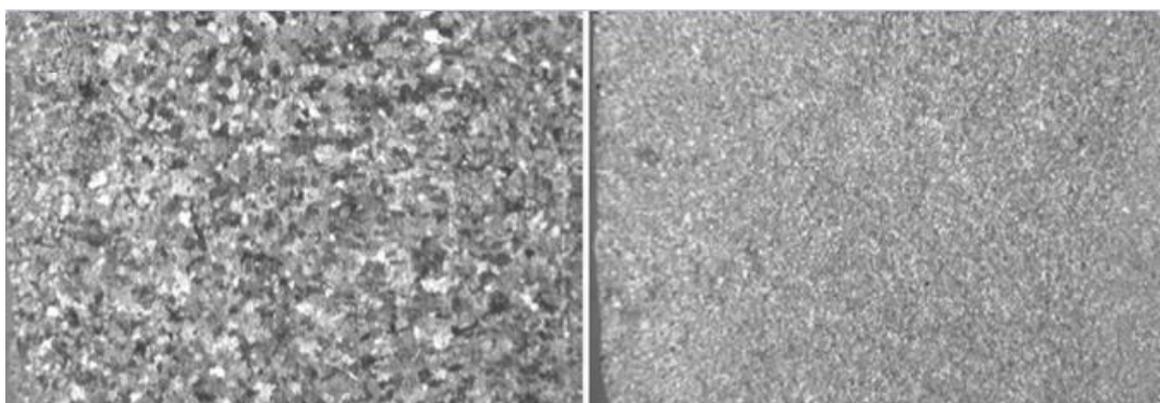


Рис. 1.16 – Конструкция установки воздействия комбинированным постоянным и переменным электромагнитным полем:



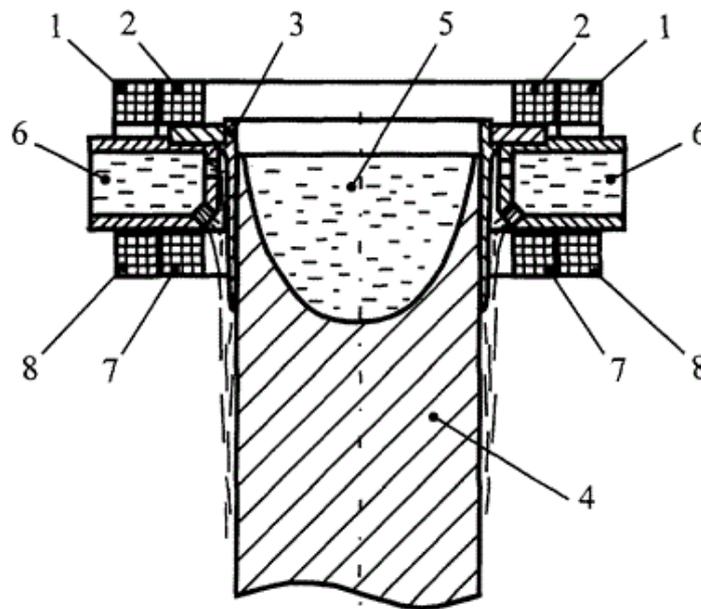
а

б

Рисунок 1.17 – Макроструктура слитков, полученных без электромагнитного перемешивания (а), с перемешиванием (б)

Научным коллективом кафедры «Электротехника» ПИ СФУ разработан электромагнитный перемешиватель жидкой сердцевины слитка, предназначенный для работы на промышленных литейных установках. «Устройство содержит магнитопровод в виде ферромагнитной части кристаллизатора с многофазной обмоткой (рисунок 1.18). С верхней и нижней сторон кристаллизатора 3 расположены по две катушки 1, 2, и по две катушки 7, 8, выполненные концентрическими, и подключенные к разным фазам. Две катушки, расположенные по разные стороны кристаллизатора симметрично относительно аксиальной оси слитка, подключены к одной фазе встречно, а две другие подключены к другой фазе согласно. Катушки, находящиеся по одну сторону кристаллизатора, могут быть размещены таким образом, что одна охватывает другую или одна над другой. Поля, возникающие в катушках, накладываются так, чтобы обеспечить эффективную циркуляцию в жидком металле 5, который непрерывно охлаждаясь потоком воды из охладителя 6, кристаллизуется в твердую фазу слитка 4» [47].

В результате электромагнитного воздействия индуктора происходит интенсификация процессов теплообмена в жидкой сердцевине слитка при кристаллизации. При этом обеспечивается перемешивание расплава в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Конструктивной особенностью данного устройства является необходимость применения кристаллизатора с ферромагнитной частью. Геометрические параметры системы не позволяют использовать полноценный внешний магнитопровод, что снижает эксплуатационную эффективность системы. Результаты проведенных исследований изложены в диссертационной работе Тимофеева С.П. «Индукционные перемешиватели жидкой сердцевины при кристаллизации алюминиевых слитков» [80].



Фиг. 1

Рисунок 1.18 – Устройство для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка в кристаллизаторе

В ходе обзора технологических устройств, используемых для электромагнитного воздействия на жидкую сердцевину слитка, установлено, что применение ЭМП позволяет решать следующие технологические задачи при производстве алюминиевых слитков из специальных высоколегированных сплавов:

1. Получение однородной мелкозернистой кристаллической структуры слитка.
2. Достижение равномерного химического состава по области слитка.
3. Снижение доли продукции с различными производственными дефектами.
4. Повышение производительности литья за счет ускорения процесса затвердевания жидкой фазы.

Выявлено, что для получения равномерного химического состава и кристаллической структуры по длине слитка и его поперечному сечению,

необходимо создание интенсивных гидродинамических течений в области жидкой сердцевины при средней скорости циркуляции от 0,1 до 0,6 м/с.

Стоит отметить, что известные установки для электромагнитного перемешивания, приведенные в обзоре, имеют возможность эксплуатироваться только на одноручьевых литейных комплексах. Оснащение существующих многоручьевых литейных комплексов разработанными перемешивающими устройствами не представляется возможным вследствие их габаритных размеров, не позволяющих разместить их в свободном пространстве между кристаллизаторами литейного стола. Поэтому разработка компактной конструкции электромагнитного перемешивателя, обладающей приемлемыми энергетическими характеристиками и возможностью размещения на многоручьевых литейных комплексах, является важной технологической задачей.

#### **1.4 Методы математического моделирования электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов при электромагнитном перемешивании**

Современные технологии проектирования позволяют проводить исследования электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов при помощи специализированных программных пакетов с достаточно высокой степенью точности и достоверности. Растущие требования к электрометаллургическому оборудованию предполагают применение комплексного подхода к разработке и исследованию данных устройств.

Анализ современных публикаций показал, что наиболее распространенным методом численного моделирования электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов является метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных объемов (МКО), что обусловлено наличием огромного числа вычислительных программных пакетов систем

инженерного анализа (CAE), базирующихся на данном способе вычисления [45].

В настоящий момент ведущее место среди программ для проведения численного моделирования физических процессов занимает ANSYS, включающий в себя множество модулей, предназначенных для проведения расчетов различной специализации [93].

Для численного моделирования электромагнитных процессов широко используется программный пакет ANSYS Mechanical APDL. Он позволяет исследовать физические явления из области электромагнетизма, теплообмена и механики. Его ключевой особенностью является наличие специального внутреннего языка программирования ANSYS Parametric Design Language (APDL), позволяющего автоматизировать создание и анализ параметрических моделей.

Для решения задач электромагнетизма большое распространение получил программный пакет ANSYS Maxwell [97]. Являясь достаточно специализированной программой, Maxwell нашел массовое применение при проектировании и исследовании различных электромеханических устройств. Основным его преимуществом является интуитивно понятный графический интерфейс, а также автоматизированный процесс создания расчетной сетки в зависимости от свойств геометрии и постановки решаемой задачи. Данные для гидродинамического расчета экспортируются через массив данных.

ANSYS Fluent является одним из наиболее функциональных пакетов для анализа задач магнитной гидродинамики [99]. В нем имеется возможность создания и подключения пользовательских подпрограмм, написанных на языке Си. Fluent располагает основными актуальными моделями турбулентности, используемыми в настоящее время. Важной особенностью данного пакета является наличие встроенного модуля решения задач плавления и кристаллизации. В работах [55, 77] успешно используется программный пакет ANSYS Emag в связке с ANSYS Fluent при

моделировании электромагнитных и гидродинамических процессов в установках непрерывного литья, оснащенных ЭМП.

Для моделирования гидродинамических течений в жидком металле нашел широкое применение пакет ANSYS CFX [98]. Данный пакет обладает многочисленными моделями турбулентности, позволяющих проводить исследования различных физических явлений при движении жидкости. Имеется возможность автоматической загрузки и интерполяции данных из внешнего файла на используемую расчетную сетку. CFX позволяет импортировать результаты электромагнитных либо тепловых расчетов, полученных в других модулях ANSYS. Кроме того CFX дает возможность внедрять пользовательские функции, используя внутренний язык программирования CFX Expression Language (CEL).

Перспективным программным пакетом для решения междисциплинарных задач является COMSOL [94]. Его главной особенностью является наличие модулей для совместного решения электромагнитной, тепловой и гидродинамической задач, не требующих дополнительных пользовательских подпрограмм для связанного расчета. В нём представлено большинство распространенных RANS – моделей турбулентности. Существенным недостатком пакета является отсутствие некоторых актуальных моделей турбулентности, в частности LES - модели. В работе [19] связанные электромагнитные и гидродинамические расчеты выполняются в программном пакете COMSOL.

В настоящее время всё большее распространение получают некоммерческие программные пакеты с открытым исходным кодом. Наибольшую известность приобрел OpenFOAM, предназначенный для электромагнитных, тепловых и гидродинамических расчетов [96]. Данный пакет является общедоступной платформой, непрерывно совершенствующейся сами пользователями. Рабочим языком кода программы является объектно-ориентированный CPP.

Проведя анализ потенциальных возможностей современных программных комплексов для численного моделирования, принято решение использовать программный пакет ANSYS Maxwell для построения и расчета электромагнитной задачи и ANSYS Fluent для расчета тепло-гидродинамической задачи. Дополнительные гидродинамические расчёты для фиксированной формы жидкой сердцевины осуществляются в ANSYS CFX. Данная связка программных модулей позволяет импортировать распределение объемных электромагнитных сил Лоренца в качестве исходных данных для решения гидродинамической задачи.

Использование методов математического моделирования при разработке ЭМП дает возможность произвести предварительную оценку исследуемой конструкции установки, убедиться в правильности принятия технических решений. Тем не менее, результаты математического моделирования, несмотря на достаточно высокий уровень развития современных программных пакетов, должны проходить обязательную верификацию с результатами физического моделирования.

### **1.5 Постановка задачи исследования**

При разработке электротехнологии перемешивания жидкой сердцевины слитка поставлены следующие задачи:

1. Для проведения исследований требуется создание математических и физических моделей, учитывающих электромагнитные, тепловые и гидродинамические процессы в системе «индуктор-слиток». При этом целесообразно принимать дополнительные допущения при постановке задачи. Математическое моделирование предполагается осуществлять в программных пакетах ANSYS Maxwell, ANSYS Fluent и ANSYS CFX.

2. С учетом ограниченного свободного пространства в многоручевой литейной машине с кристаллизатором, требуется определить максимальные габариты ЭМП, место его установки. Внутренний диаметр

индуктора обуславливается размером внешнего диаметра кристаллизатора скольжения и зазором между индуктором и кристаллизатором для протока воды, обеспечивающей охлаждение слитка.

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

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

5. Сравнить результаты физического и математического моделирования с целью верификации данных, полученных расчетными методами.

### **Выводы по главе 1**

1. В ходе обзора различных видов воздействия на жидкую сердцевину слитка при кристаллизации установлено, что применение электромагнитного перемешивания является наиболее эффективным и комплексным по воздействию. Выявлено, что для получения равномерного химического состава и кристаллической структуры по длине слитка и его поперечному сечению необходимо создание интенсивных гидродинамических течений в области жидкой сердцевины при средней скорости циркуляции от 0,1 до 0,6 м/с.

2. Возможность измельчения микроструктуры и улучшения физико-механических свойств получаемых слитков, а также повышение производительности литья определяет перспективность использования электротехнологии перемешивания жидкой сердцевины слитков на уже существующих промышленных литейных комплексах с минимальными доработками их конструкции.

3. Выбрана конструкция ЭМП – цилиндрическая индукционная машина, создающая вращающееся, либо бегущее магнитное поле. Габаритные размеры индуктора позволяют осуществить его размещение на многоручьевом литейном комплексе. Изменяя компоновку индуктора, энергетические параметры питающей сети можно создавать множество вариантов траекторий движения потоков в жидком металле.

4. Предложен метод исследования электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка, совмещающий математическое и физическое моделирование. С помощью данного метода производится оценка эффективности различных режимов электромагнитного воздействия на слиток в зависимости от создаваемого профиля скоростей движения металла в жидкой сердцевине кристаллизующегося слитка.

## ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПЕРЕМЕШИВАНИИ ЖИДКОЙ СЕРДЦЕВИНЫ СЛИТКА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

### 2.1 Математическая модель электромагнитных процессов

#### 2.1.1 Описание модели и основные допущения

Первым этапом математического моделирования электромагнитного перемешивания после предварительного определения формы жидкой сердцевины слитка является выполнение электромагнитного расчета в двухмерной постановке задачи.

Выполнить предварительную оценку влияния движения металла на электромагнитное поле позволяет магнитное число Рейнольдса:

$$\text{Re}_M = \mu_a \gamma v_0 l_0 = 0,228 \quad (2.1)$$

где  $\mu_a = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м;

$\gamma = 3,4 \cdot 10^6$  – удельная электрическая проводимость, См/м;

$v_0 = 0,3$  – характерная скорость, м/с;

$l_0 = 0,180$  – характерный размер, соответствует диаметру сечения жидкой фазы слитка в зоне начала кристаллизации, м.

Так как  $\text{Re}_M \ll 1$ , электромагнитную задачу можно решать без учета влияния скоростей в металле.

Система уравнений в общем виде, описывающих электромагнитное поле, записанная относительно векторного и скалярных потенциалов (2.2 и 2.3), и уравнение непрерывности вектора плотности тока (2.4) имеют вид:

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \nabla \left( \nabla \mathbf{A} + \varepsilon_a \mu \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) - \varepsilon_a \mu_a \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu_a \boldsymbol{\delta} \quad (2.2)$$

$$\nabla^2 \varphi + \frac{\partial}{\partial t} \nabla \mathbf{A} = -\frac{\rho_q}{\varepsilon_a} \quad (2.3)$$

$$\nabla \boldsymbol{\delta} = -\frac{\partial \rho_q}{\partial t} \quad (2.4)$$

где  $\mathbf{A}$  – векторный потенциал;

$\varphi$  – скалярный потенциал неподвижных зарядов;

$\boldsymbol{\delta}$  – вектор плотности тока;

$\varepsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость;

$\rho_q$  – плотность свободных зарядов;

$t$  – время.

Входящий в уравнения вектор плотности тока имеет вид:

$$\boldsymbol{\delta} = \gamma \left( -\nabla \varphi - \frac{\delta \mathbf{A}}{\delta t} + \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) \right) \quad (2.5)$$

где  $\mathbf{v}$  – вектор скорости.

Пренебрегая токами смещения, а также накладывая кулоновскую калибровку ( $\nabla \mathbf{A} = 0$ ) и учитывая отсутствие в расчетной области свободных электрических зарядов ( $\rho_q = 0$  и  $\varphi = 0$ ), уравнения (2.2 – 2.4) можно записать в следующем виде:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_a \boldsymbol{\delta} \quad (2.6)$$

$$\nabla \boldsymbol{\delta} = 0 \quad (2.7)$$

При этом вектор плотности тока принимает следующий вид

$$\delta = \gamma \left( -\frac{\delta \mathbf{A}}{\delta t} + \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) \right) \quad (2.8)$$

Анализ электромагнитного поля в математической модели сводится к решению системы уравнений (2.6 – 2.8) в 2D постановке относительно пространственных компонент векторного потенциала.

С учетом постановки задачи, уравнения можно записать в комплексном виде:

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{A}} = -\mu_a \dot{\delta} \quad (2.9)$$

$$\nabla \dot{\delta} = 0 \quad (2.10)$$

$$\dot{\delta} = -j\gamma\omega \dot{\mathbf{A}} \quad (2.11)$$

где  $\omega = 2\pi f$  - циклическая частота электромагнитного поля.

Определение магнитной индукции, напряженности электрического и магнитного полей, плотности тока в векторной форме происходит следующим образом:

$$\dot{\mathbf{B}} = \nabla \dot{\mathbf{A}} \quad (2.12)$$

$$\dot{\mathbf{E}} = -j\omega \dot{\mathbf{A}} \quad (2.13)$$

$$\dot{\mathbf{H}} = \frac{\dot{\mathbf{B}}}{\mu_a} \quad (2.14)$$

$$\dot{\delta} = \gamma \dot{\mathbf{E}} \quad (2.15)$$

Усредненное векторное распределение удельных электромагнитных сил описывается выражением:

$$\mathbf{f}_{\text{эм}} = \delta \times \mathbf{V} \quad (2.16)$$

Удельное значение выделяемой тепловой мощности определяется следующим образом:

$$q_{\text{эм}} = \gamma \mathbf{E}^2 \quad (2.17)$$

Чтобы электромагнитное поле в расчетной области определялось однозначно, система уравнений (2.9 – 2.11) дополняется граничными условиями. Считая, что расчетную область окружает среда с идеальными магнитными свойствами ( $\mu = \infty$ ), на границах расчетной области будут выполняться следующие условия:

– для касательной составляющей векторного потенциала:

$$\frac{\partial \mathbf{A}_{\tau}}{\partial n} = 0 \quad (2.18)$$

– для нормальной составляющей векторного потенциала:

$$\mathbf{A}_n = 0 \quad (2.19)$$

При построении математической модели 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 электротехнической стали.

### **2.1.2 Расчетная модель**

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 электромагнитного перешивателя, слитка, физические свойства сред, электрические параметры питающей схемы.

Геометрия математической модели в сечении представлена на рисунке 2.1, а. Модель включает в себя магнитопровод 3, катушки 4, жидкую область слитка 1 и твердую область слитка 5. На рисунке 2.1, б представлена расчетная сетка конечных элементов, состоящая из 31686 тетраэдральных элементов. Физические свойства материалов, используемых в электромагнитном расчёте, представлены в таблице 2.1.

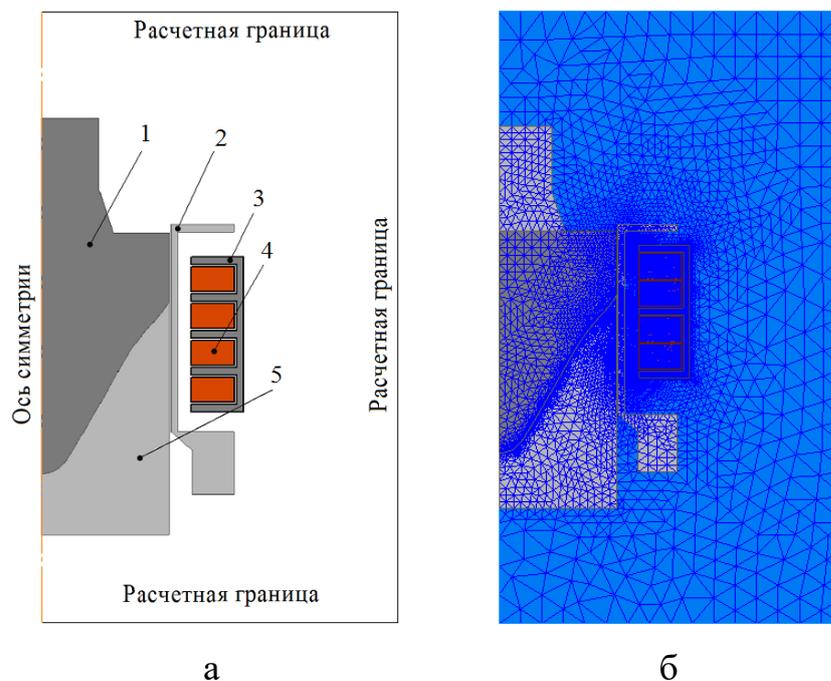


Рисунок 2.1 – Геометрия математической модели (а) и расчетная сетка (б)

Таблица 2.1 – Физические свойства материалов

Расчетная область	Материал	Удельное сопротивление	Магнитная проницаемость
Катушки	Медь	$1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м	1
Магнитопровод	Электротехническая сталь	$1 \cdot 10^6$ Ом·м	Кривая ВН
Жидкая сердцевина слитка	Жидкий алюминий	$3,46 \cdot 10^{-8}$ Ом·м	1
Твердая фаза слитка	Твердый алюминий	$9,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м	1
Окружающая среда	Воздух	$1 \cdot 10^{18}$ Ом·м	1

При задании физических свойств магнитопровода принята кривая намагничивания электротехнической стали Э11 [86]. Кривая намагничивания представлена на рисунке 2.2. Насыщение данной марки стали происходит при значениях магнитной индукции свыше 1,6 Тл.

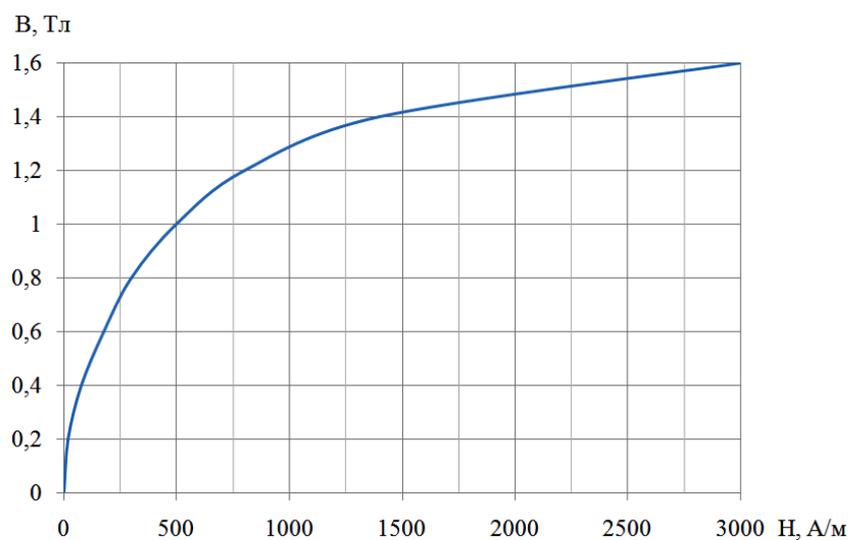


Рисунок 2.2 – Кривая намагничивания для электротехнической стали Э11

На рисунке 2.3 представлены геометрия и основные габаритные размеры системы «индуктор-слиток».

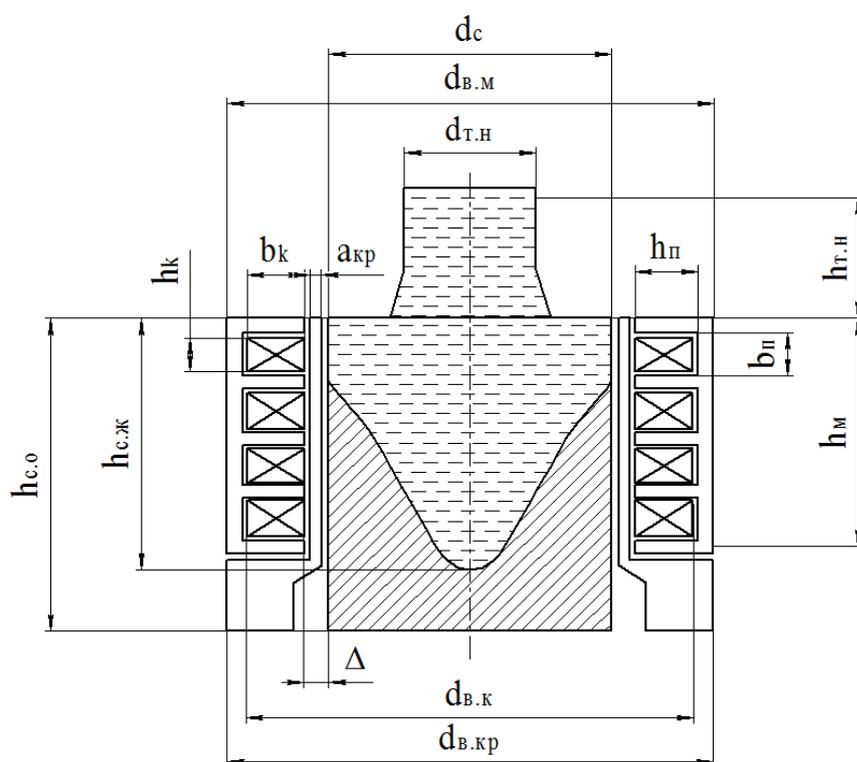


Рисунок 2.3 – Геометрия математической модели системы «индуктор-слиток»

В таблице 2.2 представлены базовые геометрические параметры системы «индуктор-слиток».

Таблица 2.2 – Параметры геометрии расчетной модели

Параметр	Значение
Высота катушки ( $h_k$ )	20 мм
Ширина катушки ( $b_k$ )	30 мм
Внешний диаметр катушки ( $d_{в.к}$ )	256 мм
Высота магнитопровода ( $h_m$ )	118 мм
Внешний диаметр магнитопровода ( $d_{в.м}$ )	268 мм
Глубина паза ( $h_p$ )	22 мм
Ширина паза ( $b_p$ )	43 мм
Внешний диаметр кристаллизатора ( $d_{в.кр}$ )	268 мм
Толщина стенки кристаллизатора ( $a_{кр}$ )	6 мм
Немагнитный зазор ( $\Delta$ )	8 мм
Диаметр слитка ( $d_c$ )	180 мм
Высота жидкой фазы слитка ( $h_{с.ж}$ )	192 мм
Общая высота слитка ( $h_{с.о}$ )	118 мм
Высота тепловой насадки ( $h_{т.н}$ )	80 мм
Диаметр тепловой насадки ( $d_{т.н}$ )	80 мм

## 2.2 Математическая модель тепло-гидродинамических процессов

### 2.2.1 Описание модели и основные допущения

Система уравнений, описывающих связанные электромагнитные, гидродинамические и тепловые процессы, протекающие в системе «индуктор-слиток» включает в себя уравнение магнитного векторного

потенциала (2.20), уравнение непрерывности (2.21), уравнение неразрывности (2.22), уравнения движения (2.23) и энергии (2.24) [85]:

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{A}} = -\mu_a \dot{\boldsymbol{\delta}} \quad (2.20)$$

$$\nabla \dot{\boldsymbol{\delta}} = 0 \quad (2.21)$$

$$\nabla \mathbf{v} = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial(\rho_0 \mathbf{v})}{\partial t} + (\rho_0 \mathbf{v} \cdot \nabla) \times \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \bar{\boldsymbol{\tau}} + \rho(T) \mathbf{g} + \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{\text{mush}} |\mathbf{v} - \mathbf{v}_{\text{выт}}| + \mathbf{f}_{\text{эм}} \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial(\rho_0 H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{v} H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q_{\text{эм}} \quad (2.24)$$

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, Н/м<sup>2</sup>;  $H$  – удельная энтальпия (Дж/кг);

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К));  $T$  – температура (К).

Для учета свободных конвективных течений используется приближение Бусинеска–Обербека:

$$\rho(T) = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)) \quad (2.25)$$

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  $Ha > 100$  – электромагнитное поле оказывает существенное влияние на движение расплава.

«Для расчета кристаллизации слитка исходными данными служат плотность, теплоемкость, теплопроводность для всех элементов системы, вязкость, температуры фазового перехода, коэффициенты теплоотдачи и значения температуры окружающей среды» [63].

Начальные условия задаются путем наложения сил Лоренца, полученных в результате электромагнитного расчета. Система уравнений, описывающих протекание гидродинамических процессов, основывается на уравнениях сохранения массы и движения. В качестве источникового члена уравнений движения при решении задачи магнитной гидродинамики служит сила Лоренца, представленная в виде векторного распределения удельных электромагнитных сил [64]. Решение системы дифференциальных уравнений в частных производных в расчётной области производится в ANSYS Fluent и ANSYS CFX, с использованием метода конечных объемов, анализ гидродинамических процессов проводился в ANSYS CFD-Post.

Для предварительной оценки характера течения используется число Рейнольдса, определяющее режим турбулентности в области жидкой сердцевины слитка:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{2370 \cdot 0,3 \cdot 0,178}{0,001} = 1,266 \cdot 10^5 \quad (2.26)$$

где  $\rho$  – плотность, 2370 кг/м<sup>3</sup>;

$d$  – гидравлический диаметр, 0,180 м;

$\mu$  – динамическая вязкость, 0,001 кг·м<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>.

Найденное значение числа Рейнольдса говорит о присутствии в жидкой сердцевине слитка турбулентных течений.

### 2.2.2 Расчетная модель

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 моделью 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 [74]. Турбулентная вязкость, входящая в тензор напряжений Рейнольдса имеет вид:

$$\mu_t = \rho_0 C \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.27)$$

где  $C$  – эмпирическая постоянная;  $k$  – кинетическая энергия турбулентных пульсаций;  $\varepsilon$  – 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:

$$-\lambda |\nabla T| = \alpha (T - T_{\text{окр}}) \quad (2.28)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи ( $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ );  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды (К).

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

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (2.29)$$

где  $\Phi$  – множество всех величин, использующихся при решении задачи.

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

$$p = 0 \quad (2.30)$$

Для решения тепло-гидродинамической задачи (рисунок 2.4) задаются следующие исходные данные:

1. Скорость вытягивания слитка.
2. Начальная температура расплава, подающегося при литье в кристаллизатор.
3. В качестве материала слитка задаются физические свойства чистого алюминия.
4. Расчетная область, включающая три зоны охлаждения с коэффициентами теплоотдачи, полученными экспериментальным путём.

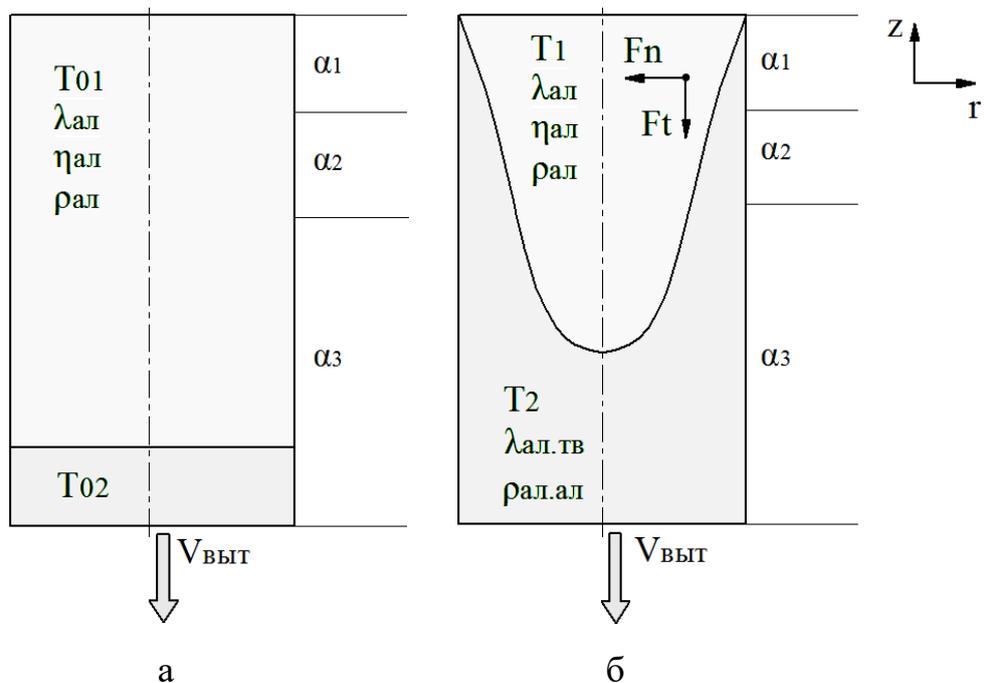


Рисунок 2.4 – Расчетная модель для решения тепло-гидродинамической задачи в момент времени  $t=0$  (а) и  $t= \infty$  (б)

Физические свойства материалов, используемых в качестве жидкой сердцевины слитка, представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Физические свойства материалов жидкой фазы слитка

Расчетная область	Материал	Плотность	Вязкость
Жидкая фаза слитка	Жидкий алюминий	2368 кг/м <sup>3</sup>	0,012 Па·с
Жидкая фаза слитка	Эвтектический сплав галлия	6440 кг/м <sup>3</sup>	0,0024 Па·с

Жидкий алюминий используется в качестве основного материала при моделировании тепловых и гидродинамических процессов. Эвтектический сплав галлия используется с целью верификации результатов численного моделирования на физической модели.

## Выводы по главе 2

1. Проведена предварительная оценка протекающих в системе «индуктор-слиток» электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов, приняты основные допущения моделей.

2. Построены математические модели с учетом процессов кристаллизации с целью получения дифференциальных и интегральных характеристик электромагнитных, тепловых и гидродинамических полей.

3. Выполненная постановка задачи позволила провести математическое моделирование физических процессов в системе «индуктор-слиток», учитывая их взаимное влияние друг на друга при кристаллизации алюминиевого слитка, отливаемого в кристаллизатор скольжения.

## ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

### 3.1 Анализ результатов теплового расчета

На первом этапе проводится расчёт процесса кристаллизации слитка с целью определения формы жидкой сердцевины слитка. В результате решения нестационарной тепло-гидродинамической задачи получены картины распределения теплового поля и фазового состояния металла при заданных параметрах литья.

Для верификации тепловой математической модели проведен расчет с параметрами литья согласно условиям эксперимента, опубликованного в монографии Г.С. Макарова «Слитки из алюминиевых сплавов с магнием и кремнием для прессования» [87]. Опыт проводился при непрерывном литье цилиндрического алюминиевого слитка диаметром 145 мм в кристаллизатор с тепловой насадкой. На рисунке 3.1, а представлено распределение фазового состояния металла в области кристаллизующегося слитка при достижении установившегося режима литья. Изотерме 660 °С соответствует температура, при которой образуется фронт кристаллизации в виде непрерывной поверхности раздела из растущих кристаллов твёрдой фазы [88]. На рисунке 3.1, б представлено распределение границ фронта кристаллизации по линии ликвидус и солидус, полученное расчетным и экспериментальным путем. Наблюдается достаточно высокое совпадение расчетных и экспериментальных данных, разница результатов, полученных с помощью математического моделирования, не превышает 15% от данных условий эксперимента. После оценки корректности постановки математической модели осуществляется расчет процесса кристаллизации алюминиевого слитка диаметром 180 мм для исследуемого литейного комплекса.

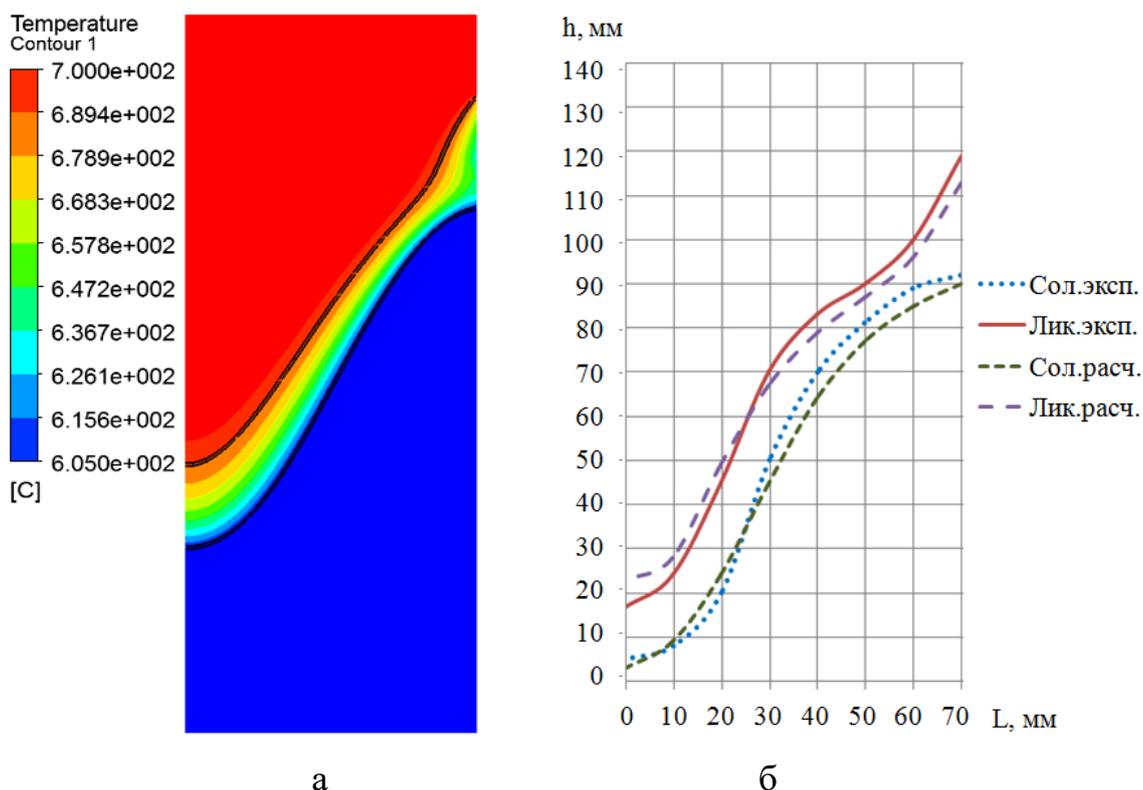


Рисунок 3.1 – Распределение границ фронта кристаллизации слитка (а) и сравнение результатов расчёта и эксперимента (б)

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  $T_{01}$ , подающегося в кристаллизатор, составляет 700 °С, начальная температура затравки 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, полученными экспериментальным путем [10, 89].

На рисунке 3.2 представлено распределение границ фронта кристаллизации при различных режимах литья после достижения установившегося режима работы. Наибольшее влияние на изменение формы

фронта кристаллизации оказывает скорость вытягивания слитка. С увеличением скорости литья прямо пропорционально возрастает глубина жидкой сердцевины. В исследовании были рассмотрены два режима литья с минимальной и максимальной скоростью вытягивания слитка для кристаллизатора с тепловой насадкой. При увеличении скорости литья со 100 до 150 мм/мин глубина лунки возрастает с 60 до 120 мм.

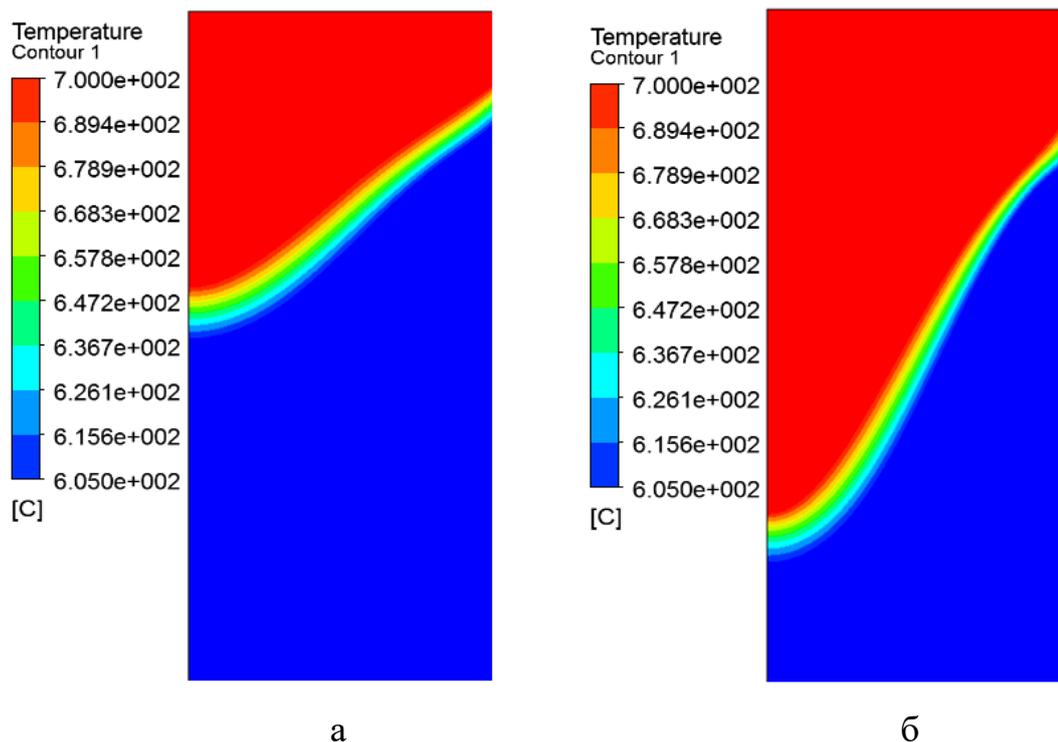


Рисунок 3.2 – Распределение границ фронта кристаллизации слитка при скоростях литья: а) 100 мм/мин; б) 150/мм/мин

В целях повышения производительности литейной установки наиболее приемлемым является режим работы с максимальной скоростью литья. Форма лунки с глубиной 120 мм, полученная при моделировании литья со скоростью 150 мм/мин, является предпочтительной. Особенностью данной геометрии лунки является определенная сложность создания интенсивных гидродинамических течений вдоль фронта кристаллизации, так чтобы они равномерно охватывали всю область жидкой сердцевины слитка. Исходя из предварительной оценки глубины проникновения магнитного поля в слиток

диаметром 180 мм, помимо режимов работы на промышленной частоте тока  $f=50$  Гц, необходимо обеспечить электромагнитное воздействие на пониженной частоте тока с целью повышения интенсификации движения металла в донной части жидкой сердцевины.

### 3.1 Анализ результатов электромагнитного расчета

Проведено исследование электромагнитных процессов в системе «индуктор-слиток» при различных энергетических и конструктивных параметрах ЭМП. Максимальная сила тока в обмотке индуктора  $I=8$  А взята для площади сечения провода, используемого в катушках. Был выбран режим воздействия в частотном диапазоне  $f=5-50$  Гц в соответствии с требуемой глубиной проникновения магнитного поля в кристаллизующийся слиток [78]. Для верификации данных численного моделирования рассмотрен вариант с питанием от промышленной сети на частоте  $f=50$  Гц. Этот режим работы является необходимым для анализа данных, полученных при исследовании физической модели, в таком случае для проведения эксперимента не требуется использование специализированного преобразователя частоты.

На рисунке 3.3 «представлен общий вид конструкции ЭМП, состоящего из магнитопровода 1 и катушек 2, с возможными электрическими схемами подключения. 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 результирующий магнитный поток  $\Phi_1$ . Катушки B1 и B2 подключены к другой фазе, по которой протекает ток  $i_2$ , создавая результирующий магнитный поток  $\Phi_2$ . 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 индуктора» [74].

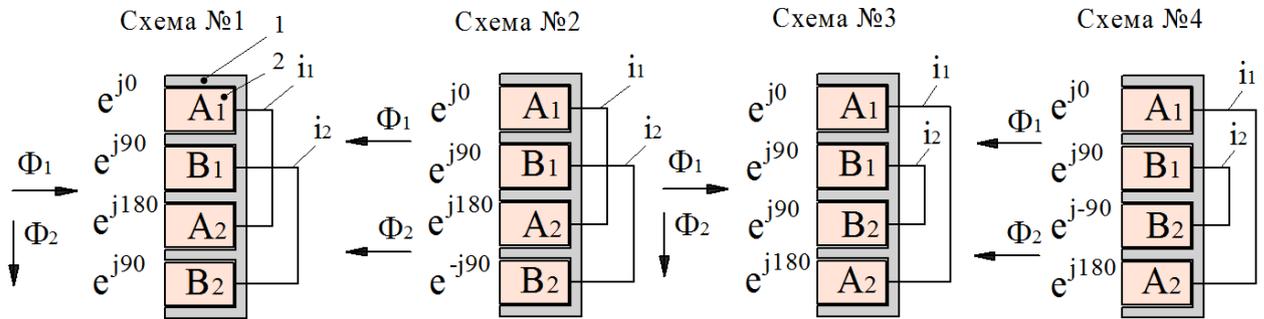


Рисунок 3.3 – Конструкция ЭМП и электрические схемы подключения катушек

Для определения геометрических параметров системы «индуктор-слиток» были рассмотрены три варианта конструкции цилиндрической индукционной машины с различной компоновкой зубцов магнитопровода (рисунок 3.4). Показатели эффективности оценивались по возникающим в области слитка тангенциальным и нормальным составляющим интегральных усилий. Кроме этого оценивались значения насыщения магнитопровода, чтобы при изменении конфигураций устройства сталь не теряла свои магнитные свойства. Оценочные показатели эффективности приведены в таблице 3.1. Во всех трех конструкциях сталь магнитопровода не доходит до точки насыщения  $B=1,6$  Тл, принятой для электротехнической стали марки Э11, рассеяния магнитного поля вне сердечника не происходит. Конструкция №1 с пятью зубцами (рисунок 3.4, а) имеет лучшие характеристики по силовому воздействию на слиток, но обладает наименьшим запасом по габаритам для размещения в ограниченном пространстве литейного стола. В целях минимизации габаритных размеров было принято решение убрать два зубца между верхней и нижней парой катушек в конструкции №2 (рисунок

3.4, б) и два зубца в верхней и нижней части магнитопровода в конструкции №3 (рисунок 3.4, в). В результате удалось добиться большего запаса по габаритам для размещения в ограниченном пространстве, сохранив приемлемую эффективность силового воздействия на слиток. Сравнивая две уменьшенные конструкции можно сделать вывод о достаточно высокой эффективности конструкции № 3, однако форма магнитопровода в данной конструкции не позволяет надежно зафиксировать верхнюю и нижнюю катушки, для их фиксации необходимо использование дополнительных крепежных элементов, что усложняет процесс сборки и монтажа, а также увеличивает общие габариты. Конструкция №2 обладает пониженными энергетическими характеристиками, силовое воздействие на слиток в данном случае оказывается минимальным. После проведения детального анализа полученных зависимостей интегральных усилий для каждой конструкции индуктора и режимов его работы, принято решение использовать вариант конструкции №1 с пятью зубцами, как наиболее эффективный в плане силового воздействия на жидкую сердцевину слитка.

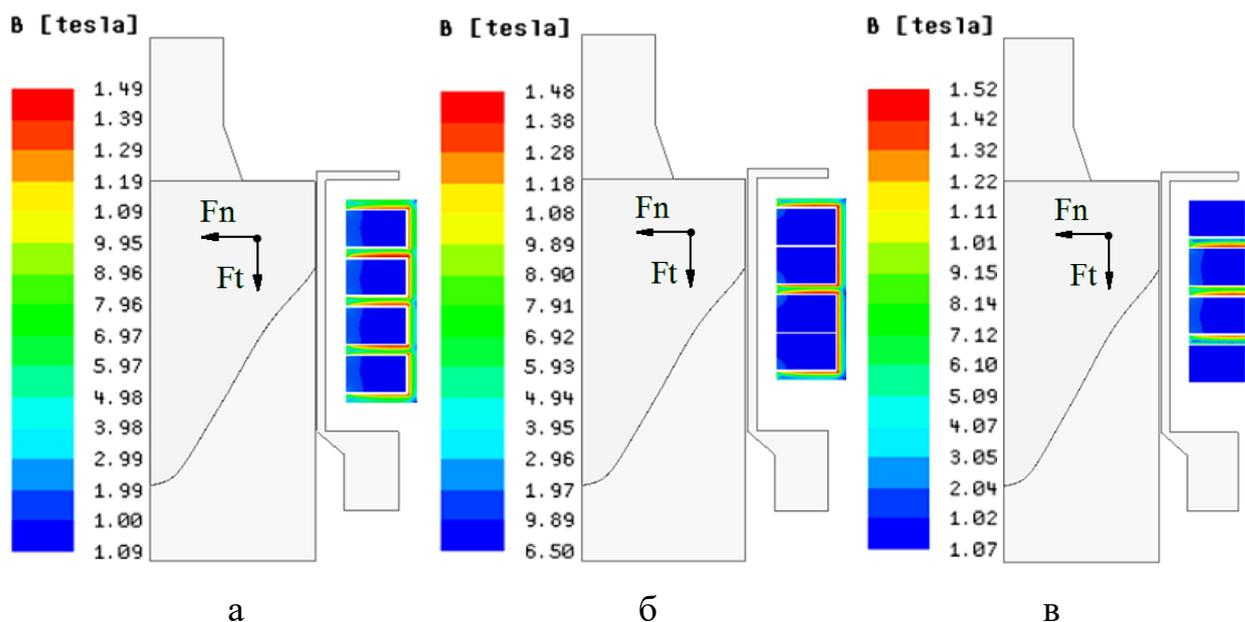


Рисунок 3.4 – Варианты конструкций индуктора и распределение магнитной индукции в магнитопроводе: а) конструкция №1; б) конструкция №2; в) конструкция №3

Таблица 3.1 – Оценочные показатели эффективности

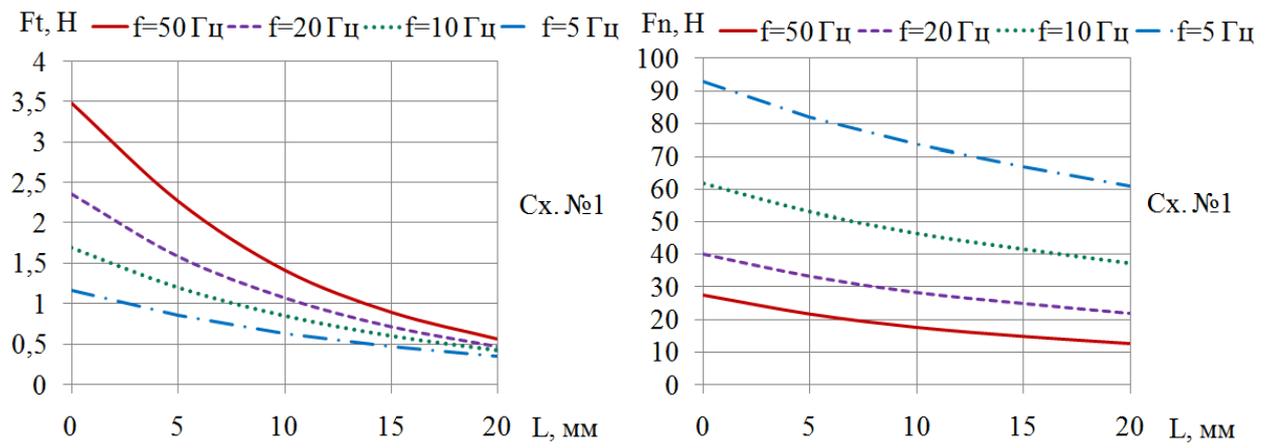
Вариант конструкции	1	2	3
$F_t, Н$	1,5	0,4	1,2
$F_n, Н$	18	12	16
$B, Тл$	1,49	1,48	1,52

Для оценки эффективности используемых схем подключения проведен анализ тангенциальных и нормальных составляющих интегральных усилий, возникающих в области жидкой сердцевины слитка. Основные параметры питания индуктора, используемые в расчётах, представлены в таблице 3.2.

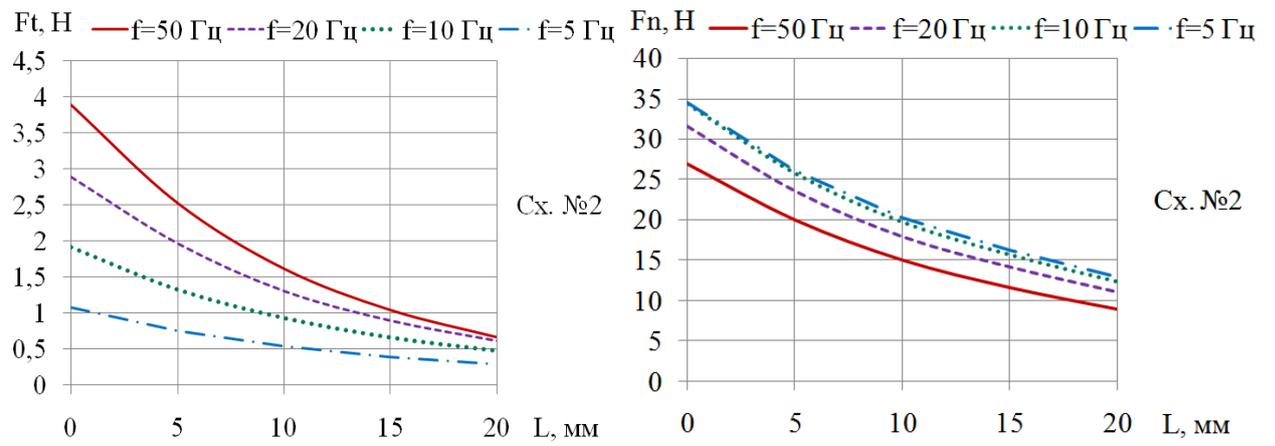
Таблица 3.2 – Параметры питания индуктора

№	Параметр	Значение
1	Количество катушек	4
2	Напряжение питающей сети, В	220
4	Число фаз	2
5	Фазовый сдвиг	90°
6	Сила тока в катушке, А	8
7	Частота питающей сети, Гц	5 – 50

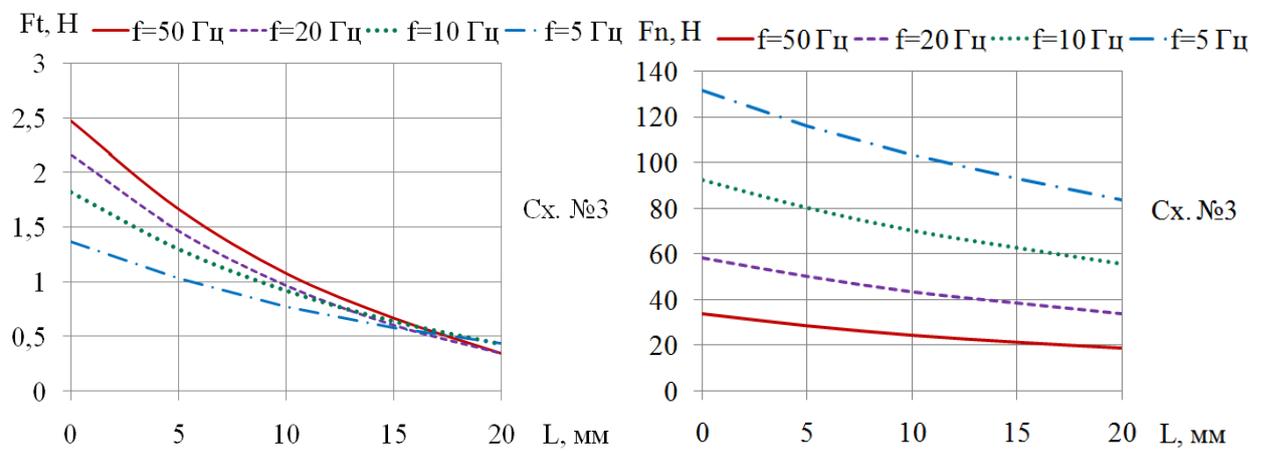
На рисунке 3.5 представлено распределение тангенциальных и нормальных составляющих интегральных усилий для исследуемой конструкции №1 при различных рабочих зазорах между индуктором и слитком. Исследование проводилось в диапазоне частот  $f=5-50$  Гц и максимальной силе тока в обмотке  $I=8$  А. В качестве рабочего зазора  $L$  между индуктором и кристаллизатором взято расстояние от 0 до 20 мм. С целью обеспечения свободного протока воды к зонам охлаждения слитка необходимо оставлять рабочий зазор не менее 10 мм.



a



б



в

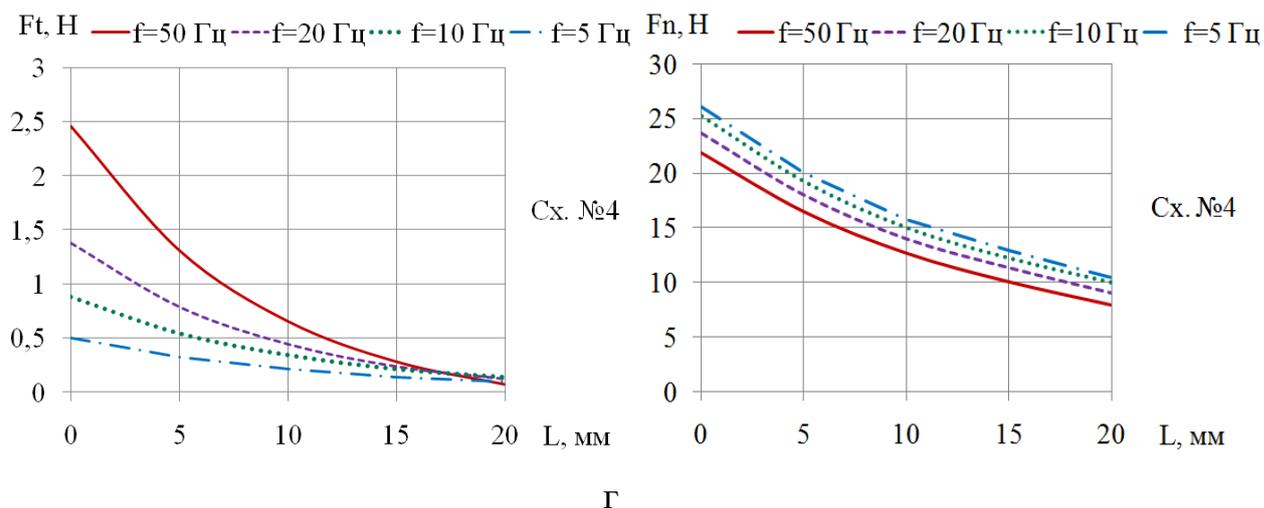
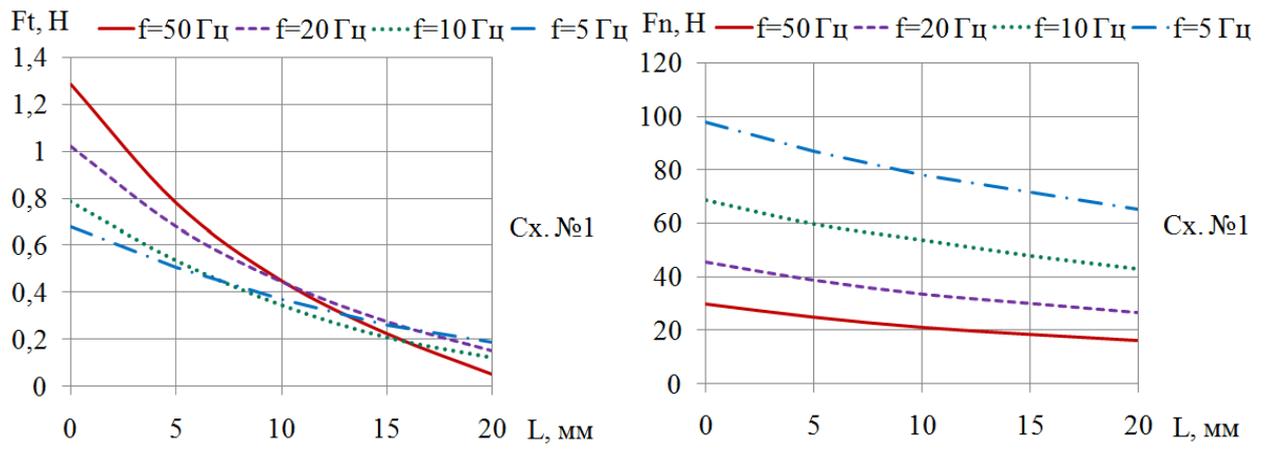


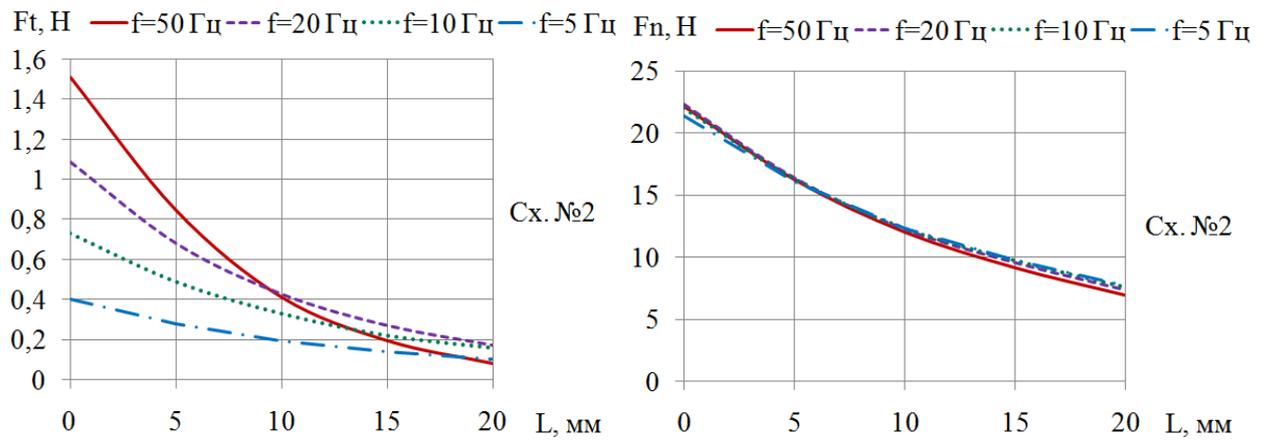
Рисунок 3.5 – Распределение интегральных усилий в области жидкой фазы слитка для конструкции №1: схема №1(а), схема №2 (б), схема №3 (в), схема №4 (г)

Из найденных зависимостей наибольший интерес представляют тангенциальные составляющие интегральных сил, так как они обеспечивают эффективность силового воздействия магнитного поля на жидкую сердцевину слитка. Наибольшие тангенциальные усилия  $F_t.max=3,5$  Н возникают при использовании схемы №1, создающей вращающееся магнитное поле и  $F_t.max=3,8$  Н для схемы №2, создающей бегущее магнитное поле. Схемы № 3 и №4 обеспечивают наименьшие тангенциальные усилия, их применение при дальнейших исследованиях не является рациональным.

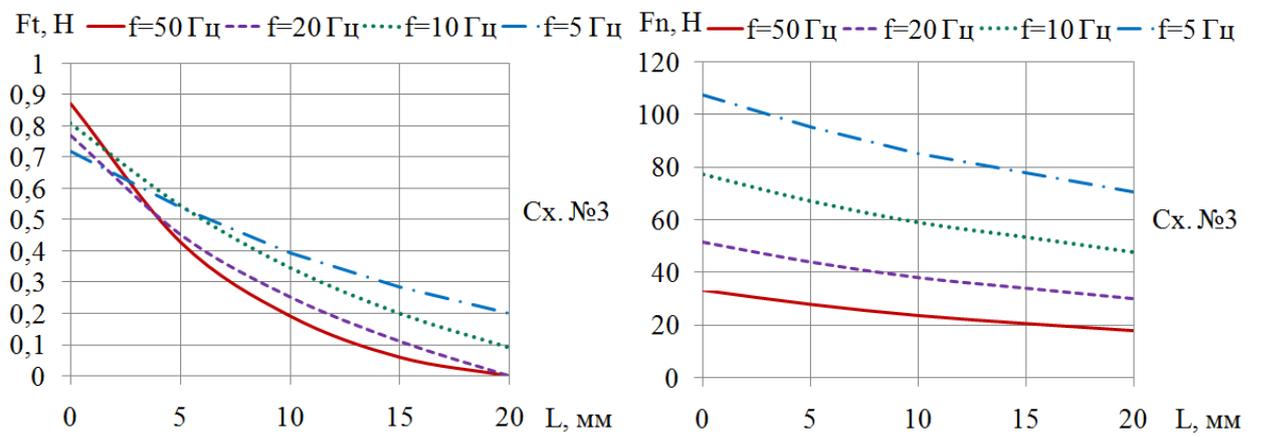
На рисунке 3.6 представлено распределение тангенциальных и нормальных составляющих интегральных усилий, полученных при анализе конструкции №2. Наибольшие тангенциальные усилия  $F_t.max=1,3$  Н возникают при использовании схемы №1, создающей вращающееся магнитное поле и  $F_t.max=1,5$  Н для схемы №2, создающей бегущее магнитное поле. Схемы № 3 и №4 обеспечивают минимальные тангенциальные усилия в слитке, их применение не является рациональным.



a



б



в

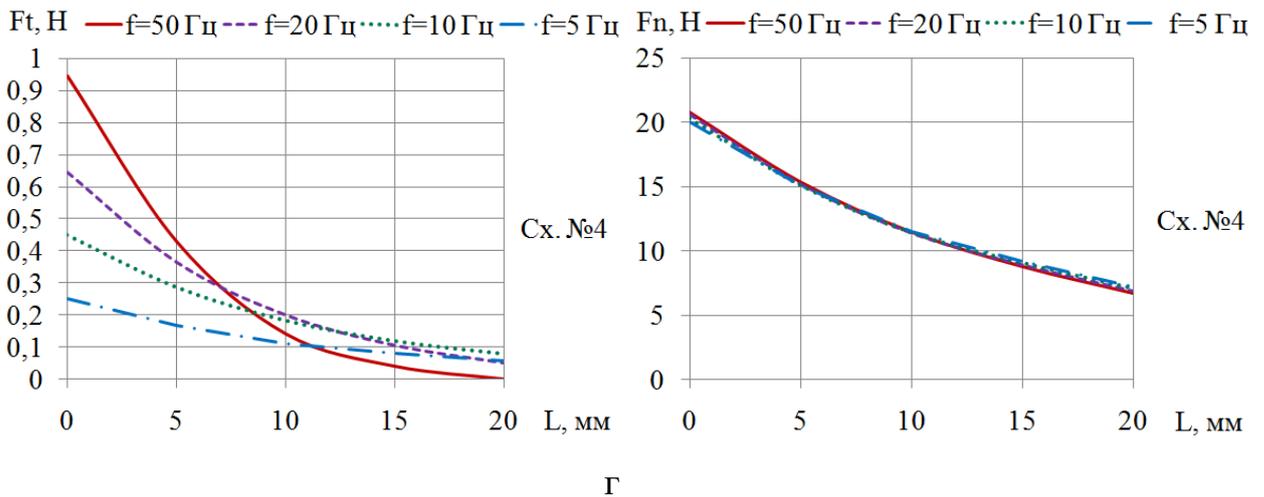
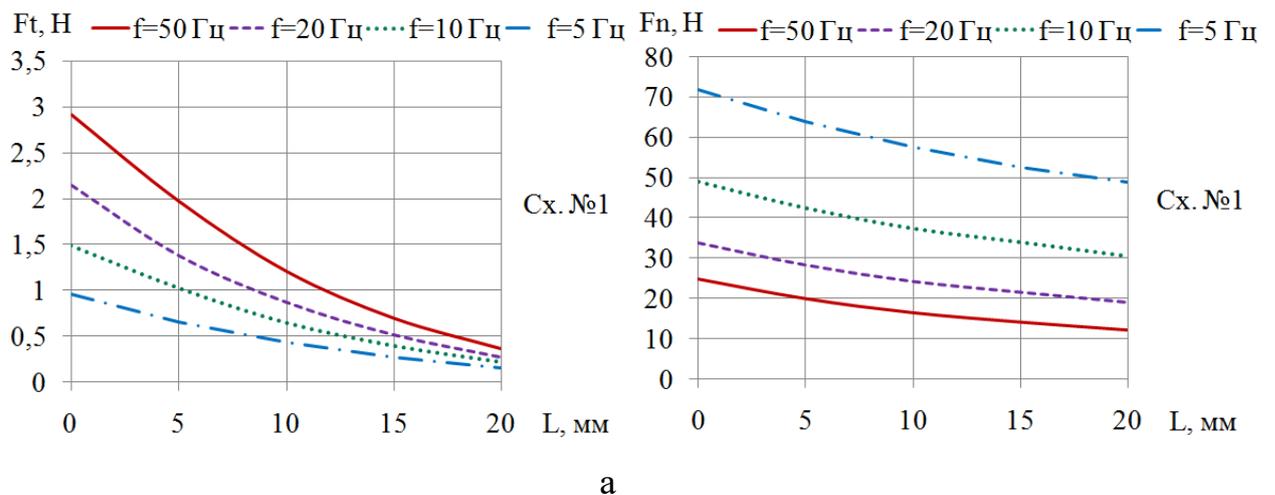
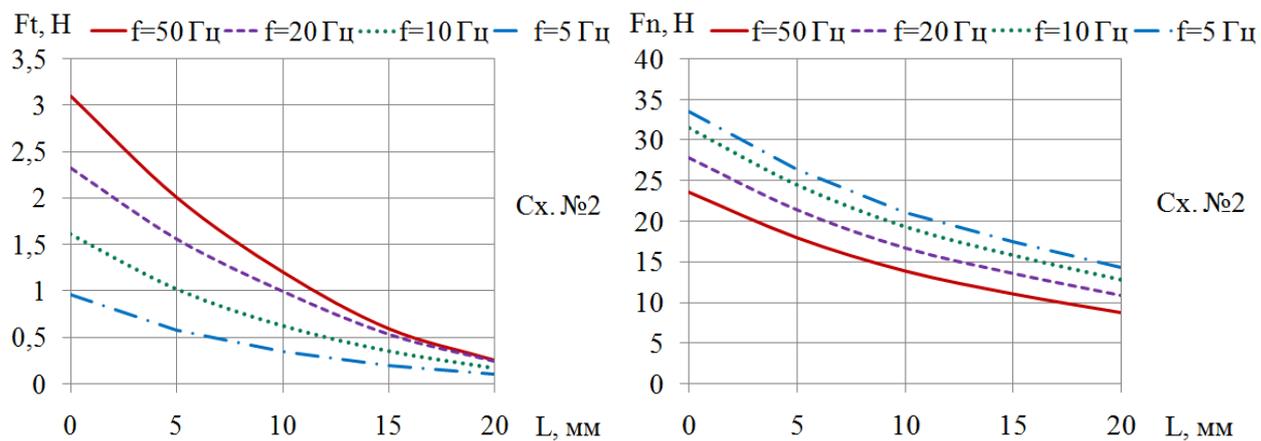


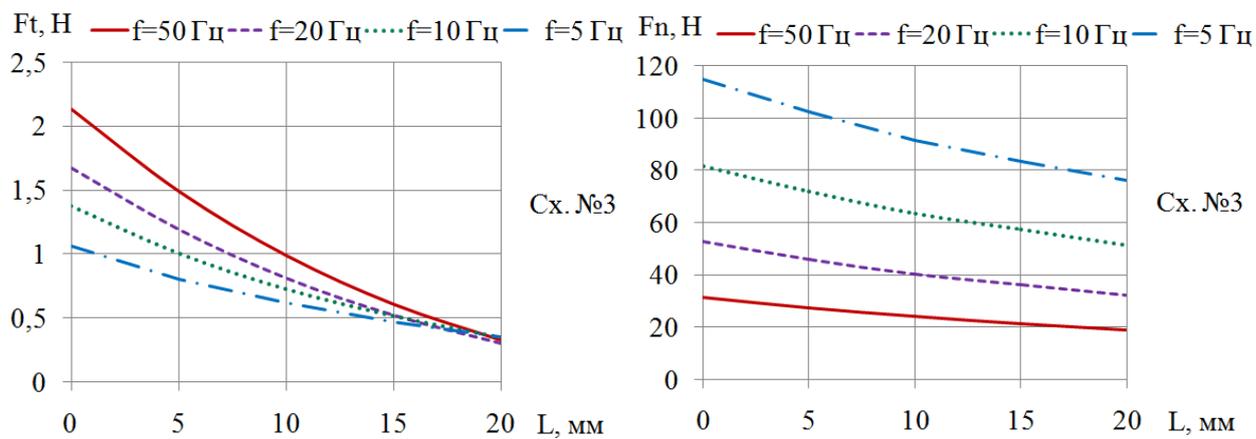
Рисунок 3.6 – Распределение интегральных усилий в области жидкой фазы слитка для конструкции №2: схема №1(а), схема №2 (б), схема №3 (в), схема №4 (г)

На рисунке 3.7 представлено распределение тангенциальных и нормальных составляющих интегральных усилий, полученных при анализе конструкции №3. Наибольшие тангенциальные усилия  $F_{t.max}=2,9$  Н возникают при использовании схемы №1, создающей вращающееся магнитное поле, и  $F_{t.max}=3,1$  Н для схемы №2, создающей бегущее магнитное поле. Схемы № 3 и №4 обеспечивают минимальные тангенциальные усилия в слитке, их применение не является рациональным.

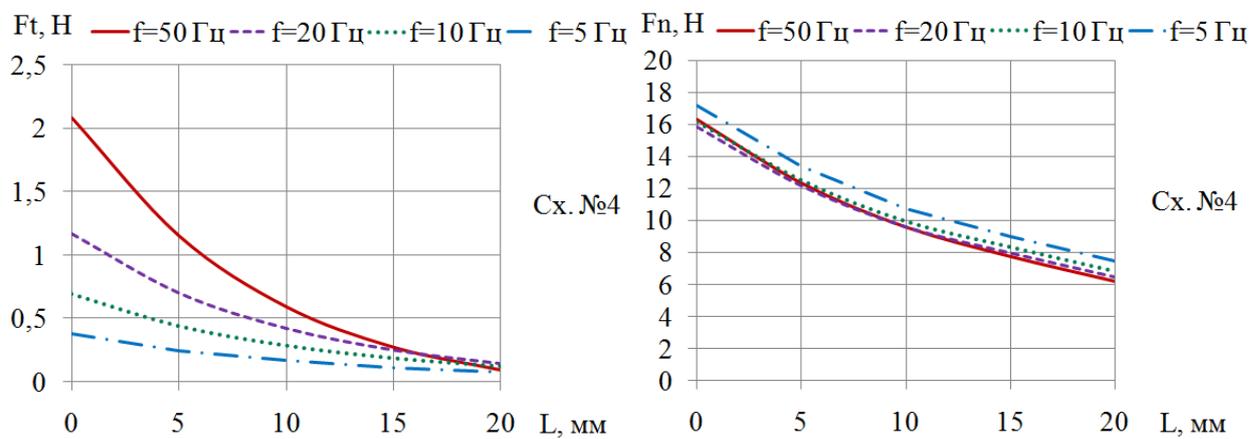




б



в



г

Рисунок 3.7 – Распределение интегральных усилий в области жидкой фазы  
 слитка для конструкции №3: схема №1(а), схема №2 (б),  
 схема №3 (в), схема №4 (г)

На рисунке 3.8 представлены картины распределения магнитной индукции в слитке при расчете на частотах тока  $f=5$  и  $f=50$  Гц и силе тока в обмотке  $I=8$  А с использованием схем подключения №1 и №2.

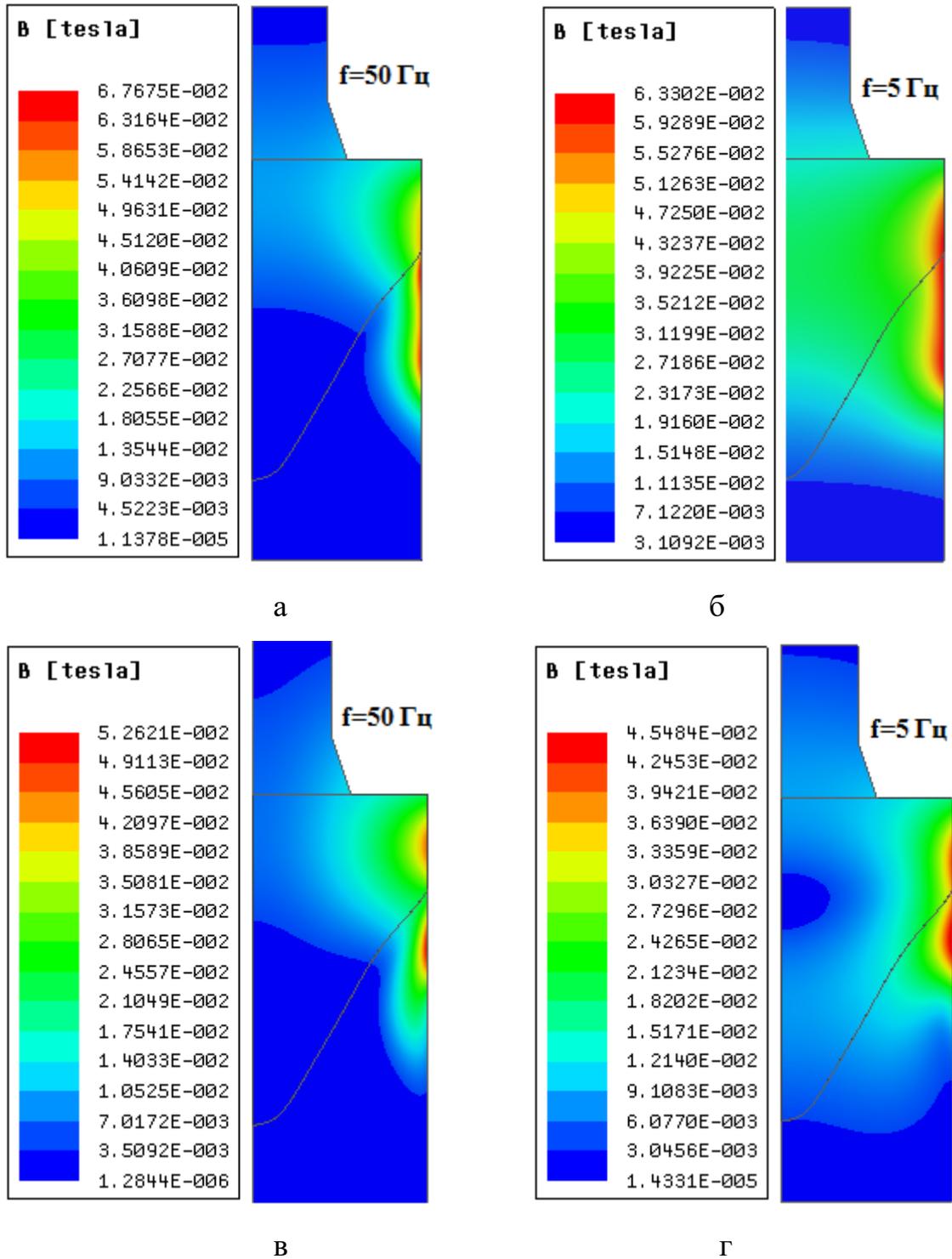


Рисунок 3.8 – Распределение магнитной индукции в области слитка при различных частотных режимах и схеме №1 (а, б), схеме №2 (в, г)

Наибольшая интенсивность воздействия наблюдается при подключении схемы №1, создающей вращающееся магнитное поле. При расчёте на частоте  $f=50$  Гц происходит существенный экранирующий эффект от твердой фазы слитка, магнитное поле не проникает в донные области жидкой сердцевины. Снижение питающей частоты до  $f=5$  Гц позволяет увеличить эффективную глубину проникновения поля в жидкую сердцевину слитка для каждой из схем подключения. Следовательно, для приемлемого силового воздействия поля на глубинные слои расплава необходимо обеспечение режима работы индуктора на пониженной частоте. Окончательное определение частотного диапазона, при котором электромагнитное воздействие на жидкую сердцевину наиболее рационально, определяется в ходе анализа результатов гидродинамического расчёта.

На рисунке 3.9 представлены картины распределения сил Лоренца в областях твердой и жидкой фаз слитка при расчете на частотах тока  $f=5$  и  $f=50$  Гц, используя схемы подключения №1 и №2. Максимальные значения сил, возникающих в слитке при схеме подключения №1 и частоте тока  $f=50$  Гц, достигают  $1,92 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>, при частоте  $f=5$  Гц их величина составляет  $5,21 \cdot 10^4$  Н/м<sup>2</sup>. При использовании схемы подключения №2 и частоты тока  $f=50$  Гц их максимальная величина составляет  $1,56 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>, при понижении частоты до  $f=5$  Гц показатели падают до  $2,71 \cdot 10^4$  Н/м<sup>2</sup>.

В процессе электромагнитного воздействия на частоте тока  $f=50$  Гц наблюдается увеличение интенсивности сил Лоренца, однако из-за снижения глубины проникновения магнитного поля в металл, данный эффект проявляется лишь в крайних областях слитка, расположенных рядом с индуктором. При понижении частоты тока до  $f=5$  Гц интенсивность объемных сил снижается, но за счёт увеличения глубины проникновения магнитного поля распределение сил охватывает центральные области слитка.

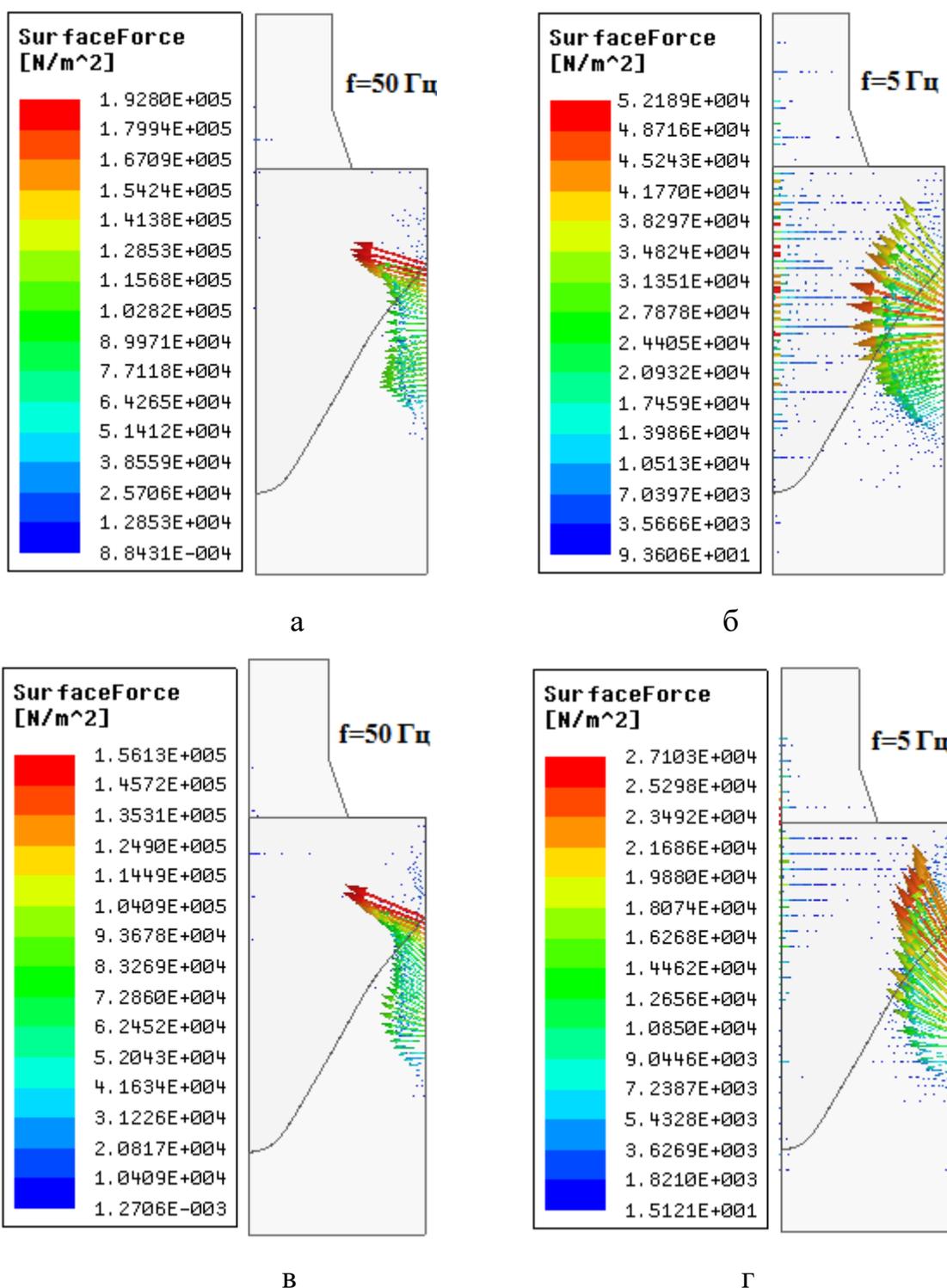


Рисунок 3.9 Распределение сил Лоренца в областях твердой и жидкой фаз слитка при схеме №1 (а, б), схеме №2 (в, г)

На рисунке 3.10 представлены зависимости выделяемых мощностей от токовой нагрузки в области твердой и жидкой фазы слитка, полученные при расчёте на частоте  $f=50$  Гц. Активная тепловая мощность, выделяемая в

области жидкой фазы при максимальном токе  $I=8$  А, не превышает 10 Вт. Эффект нагрева кристаллизующегося слитка электромагнитным полем индуктора практически отсутствует, не оказывая влияния на тепловые процессы, происходящие в расплаве.

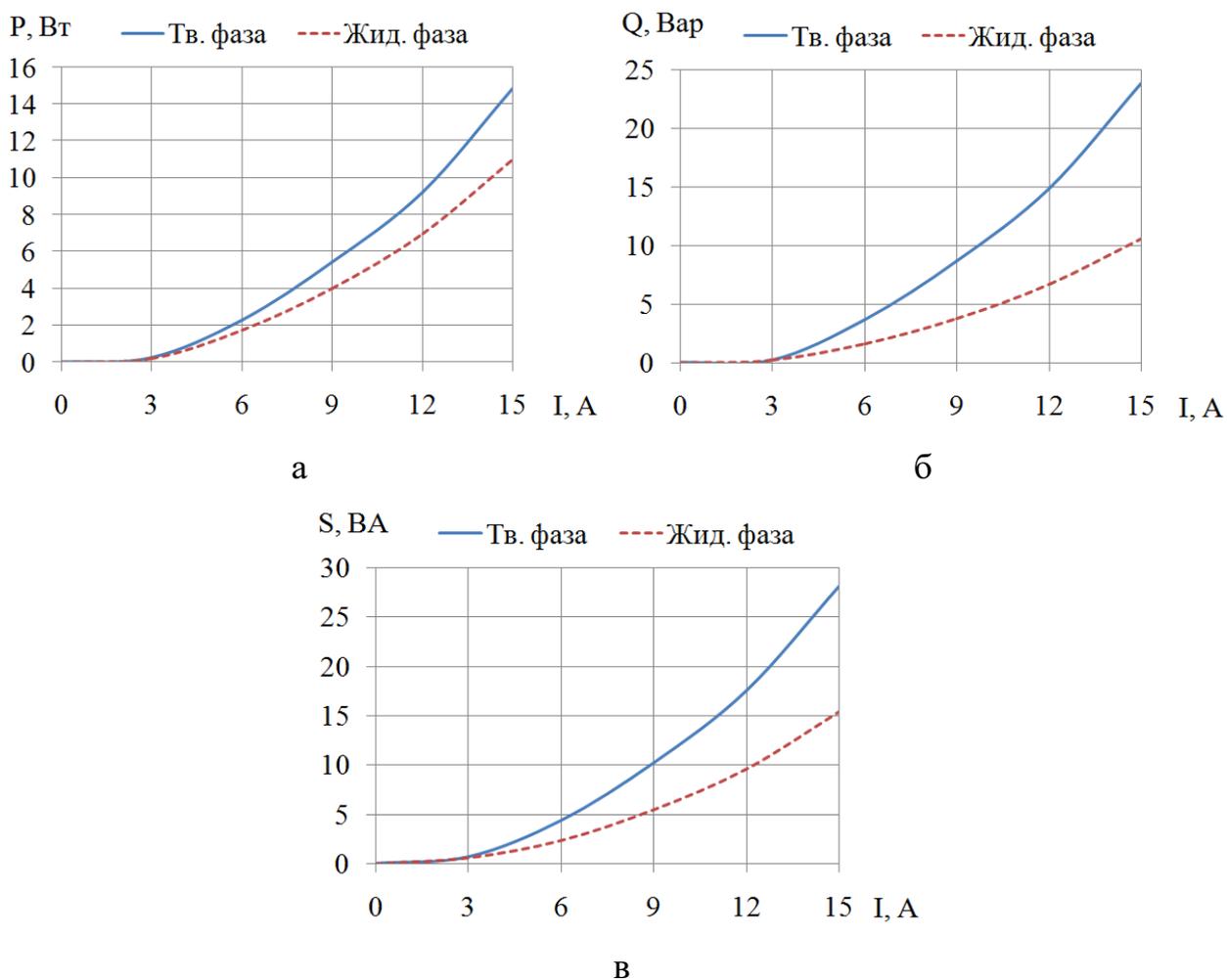


Рисунок 3.10 Распределение зависимости выделяемых мощностей от токовой нагрузки: а) активная; б) реактивная; в) полная

На рисунке 3.11 представлены зависимости  $\eta_{\text{с}}$  и  $\cos\phi$ , полученные при различных рабочих зазорах между индуктором и слитком в диапазоне частот  $f=5-50$  Гц с использованием схемы №1. Максимальные значения  $\eta_{\text{с}}$  и  $\cos\phi$  наблюдаются в режиме работы индуктора на частоте  $f=50$  Гц. При

увеличении рабочего зазора значения  $\eta_3$  и  $\cos\varphi$  начинают линейно снижаться по мере роста реактивной мощности и падения активной.

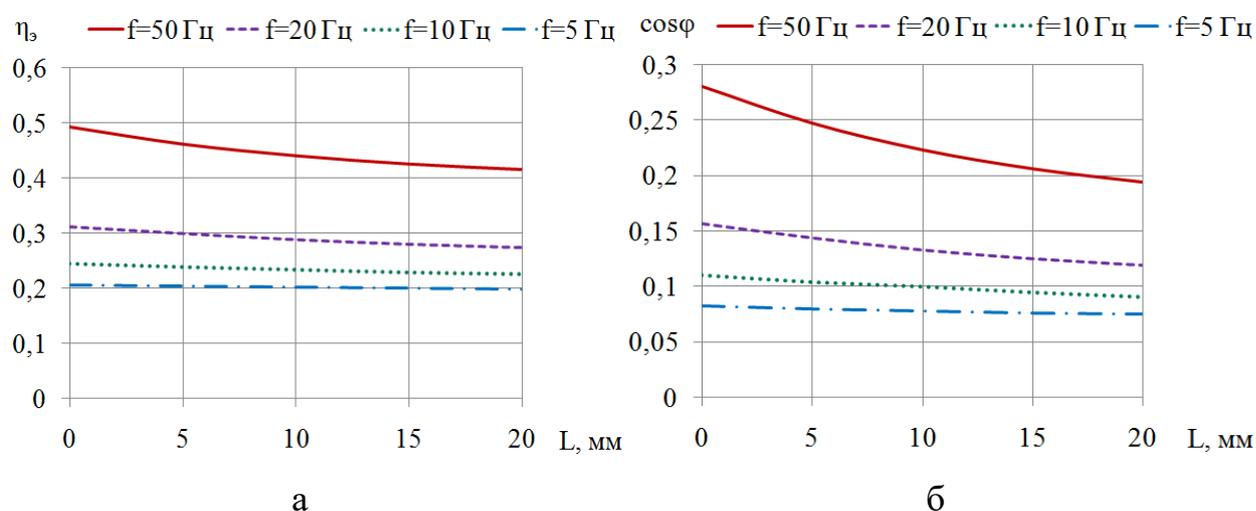


Рисунок 3.11 – Зависимости распределения  $\eta_3$  (а) и  $\cos\varphi$  (б) при различных рабочих зазорах и диапазонах частот

В таблице 3.3 приведены основные энергетические характеристики ЭМП при рабочем зазоре между индуктором и кристаллизатором  $L=10$  мм и диапазоне частот от  $f=5-50$  Гц. Максимальный электрический КПД  $\eta_3=0,44$  и  $\cos\varphi=0,223$  наблюдаются при работе индуктора на частоте  $f=50$  Гц с минимальным рабочим зазором между индуктором и кристаллизатором. При понижении частоты работы энергетические характеристики индуктора начинают снижаться из-за возрастания реактивной мощности.

Таблица 3.3 – Энергетические характеристики индуктора

$f$ , Гц	$P$ , Вт	$Q$ , Вар	$S$ , В·А	$\eta_3$ , о.е.	$\cos\varphi$ , о.е.
50	774	3380	3468	0,44	0,223
20	507	3776	3810	0,288	0,133
10	411	4140	4161	0,234	0,1
5	355	4543	4557	0,202	0,078

### 3.3 Анализ результатов гидродинамического расчета

Для достижения эффективного электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины кристаллизующегося слитка необходимо обеспечить интенсивные гидродинамические течения, равномерно охватывающие всю область расплава. Качественная оценка различных режимов электромагнитного воздействия осуществлялась по следующим критериям:

- 1) распределение осредненных по времени значений поля скоростей вдоль фронта кристаллизации;
- 2) интегральные величины средней скорости в области жидкой сердцевины слитка;
- 3) равномерность локального распределения поля скоростей в слитке при достижении установившегося режима.

Для исследования электромагнитного воздействия индуктора на область вдоль фронта кристаллизации слитка взяты 12 контрольных точек, расположенных с шагом 10 мм (рисунок 3.12). Первая верхняя контрольная точка располагается ниже на 10 мм от поверхности жидкой сердцевины слитка, чтобы исключить влияние колебаний свободной поверхности расплава, которые не учитываются при расчете. Все контрольные точки располагаются на расстоянии в 10 мм от границы раздела твердой и жидкой фаз, исходя из геометрических параметров фронта кристаллизации. В качестве критерия оценки эффективности электромагнитного перемешивания в данной области принято распределение осредненных по времени значений скоростей вдоль фронта кристаллизации после наступления установившегося режима.

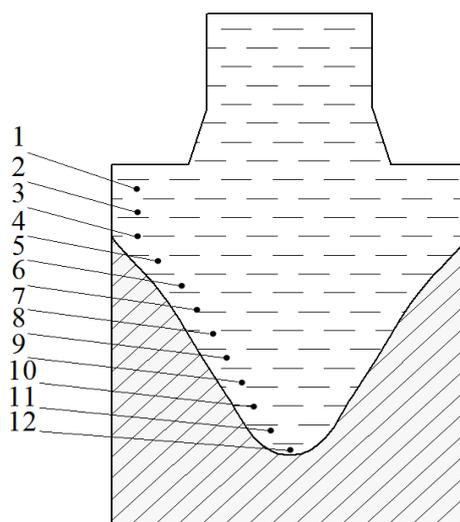


Рисунок 3.12 – Схема расположения контрольных точек  
вдоль фронта кристаллизации

На рисунке 3.13 представлены кривые распределения скоростей вдоль фронта кристаллизации при различных схемах подключения и частотных режимах работы.

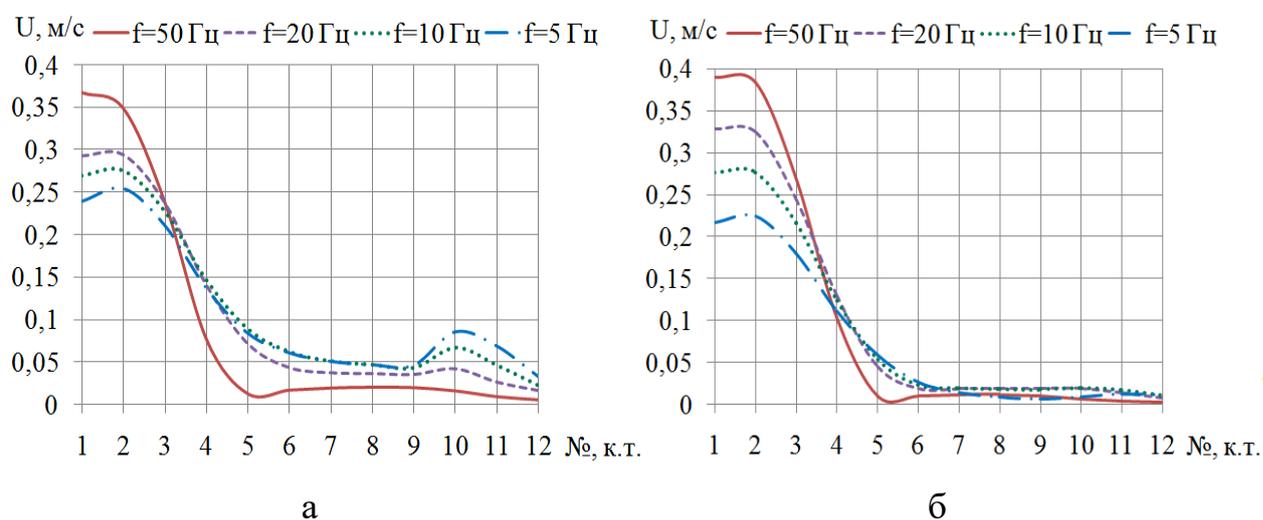


Рисунок 3.13 – Распределение поля скоростей вдоль фронта кристаллизации  
при различных частотных режимах и схеме №1 (а), схеме №2 (б)

Наиболее равномерное распределение поля скоростей вдоль фронта обеспечивает электрическая схема №1, создающая вращающееся магнитное

поле при частоте тока  $f=5$  и  $f=10$  Гц. Локальные максимумы скоростей в верхней части слитка достигают  $U=0,37$  м/с при частоте  $f=50$  Гц и  $U=0,24$  м/с при частоте  $f=5$  Гц. В центральной и нижней частях слитка локальные максимумы достигают  $U=0,09$  м/с при воздействии на частоте  $f=5$  Гц. При частотах выше  $f=10$  Гц локальные максимумы не превышают  $0,05$  м/с, питание индуктора при данном частотном диапазоне нерационально вследствие снижения скорости вдоль фронта кристаллизации в центральных и донных областях жидкой сердцевины.

Электрическая схема №2, создающая бегущее магнитное поле, обеспечивает приемлемое распределение поля скоростей лишь в верхней части жидкой сердцевины слитка. В центральной и нижней частях слитка интенсивность воздействия значительно снижается по всему фронту кристаллизации. Локальные максимумы скорости в верхней части слитка достигают  $U=0,39$  м/с при воздействии на частоте  $f=50$  Гц и  $U=0,22$  м/с на частоте  $f=5$  Гц. В центральной и нижней частях слитка локальные максимумы не превышают  $U=0,03$  м/с при работе индуктора на всём диапазоне частот. Поэтому использование электрической схемы №2, создающей бегущее магнитное поле, актуально только для режимов литья с пониженной скоростью вытягивания слитка, когда жидкая лунка имеет меньшую глубину.

На рисунке 3.14 представлены распределения средней скорости в области жидкой сердцевины слитка при различных частотных режимах воздействия с использованием электрической схемы №1. Оценка изменения интегральных величин средней скорости позволяет определить время наступления установившегося режима после начала электромагнитного перемешивания. Достижение установившегося режима наступает через 9 секунд после начала работы, максимальные значения средней скорости находятся в диапазоне от  $0,16$  до  $0,17$  м/с в зависимости от частоты питающей сети индуктора.

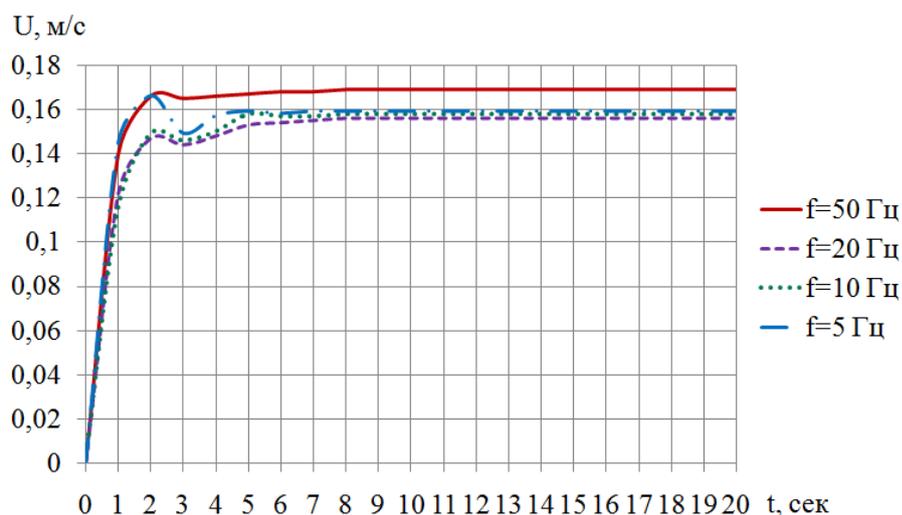


Рисунок 3.14 – Распределение средней скорости в области жидкой сердцевины слитка при различных частотных режимах и схеме №1

На рисунке 3.15 представлены распределения средней скорости при различных частотных режимах воздействия с использованием электрической схемы №2. Достижение установившегося режима наступает через 8 секунд после начала работы, максимальные значения средней скорости находятся в диапазоне от 0,11 до 0,19 м/с в зависимости режима питания.

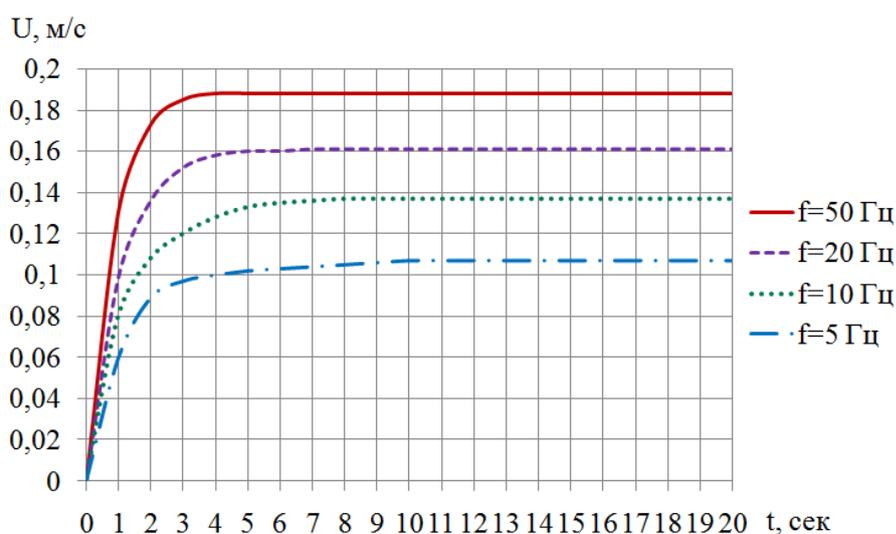


Рисунок 3.15 – Распределение средней скорости в области жидкой сердцевины слитка при различных частотных режимах и схеме №2

На рисунке 3.16 представлены картины распределения поля скоростей при достижении установившегося режима с использованием схем №1 и №2 в различных частотных режимах.

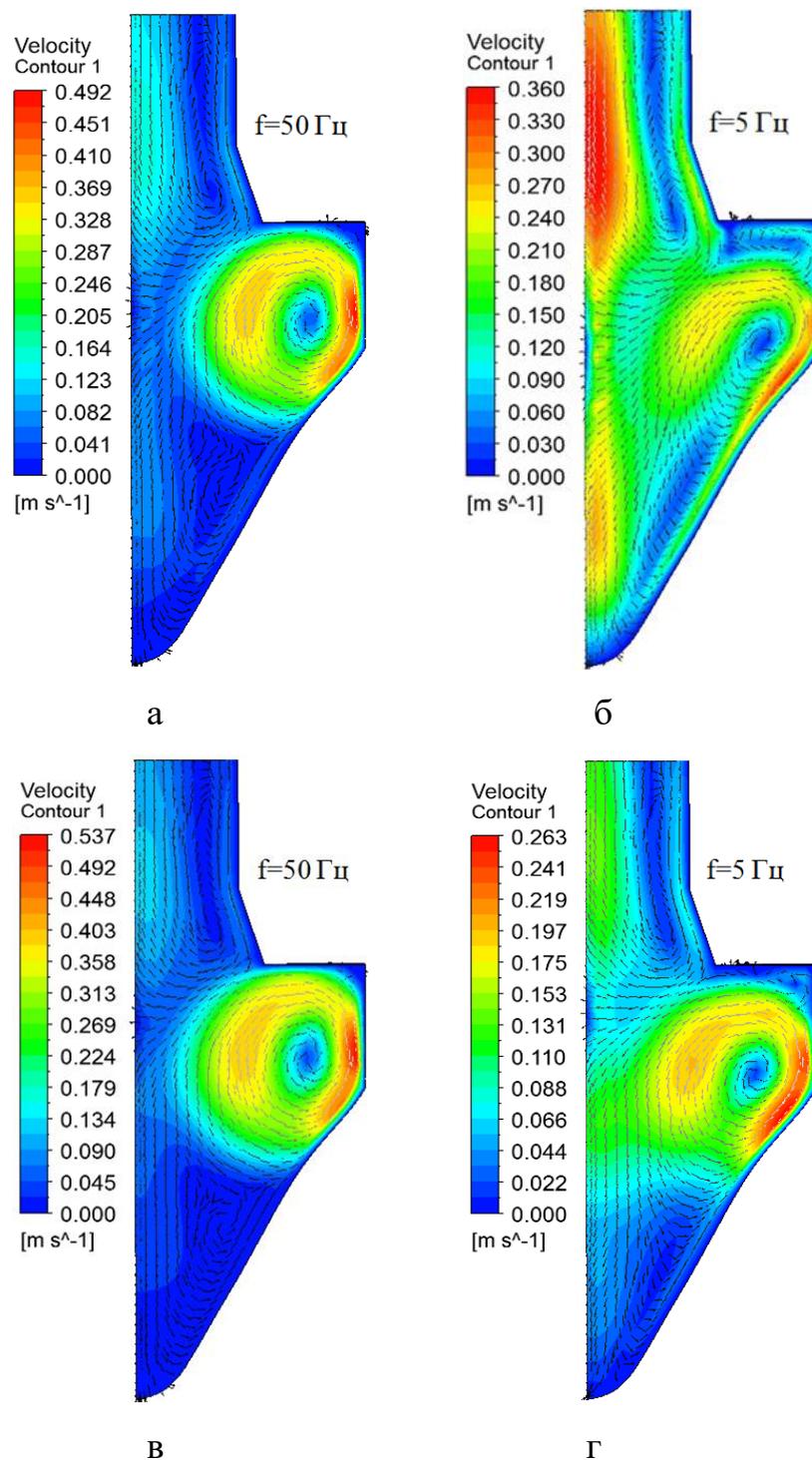


Рисунок 3.16 – Распределение поля скоростей в жидкой сердцевине слитка для различных режимов работы: схема №1 (а, б), схема №2 (в, г)

Наиболее равномерное распределение поля скоростей по всей области жидкой сердцевины слитка наблюдается при использовании схемы № 1 на частоте питания  $f=5$  Гц. Локальные максимумы значений скорости составляют 0,36 м/с. При электромагнитном воздействии в режиме  $f=50$  Гц локальные максимумы достигают 0,49 м/с, интенсивные течения возникают только в области слитка, расположенной рядом с индуктором.

Использование схемы №2 на частоте питания  $f=5$  Гц оказывает приемлемое воздействие на расплав только в верхней и центральной части слитка. Донная область жидкой сердцевины при этом остаётся непроработанной. Локальные максимумы значений скорости составляют 0,26 м/с. При воздействии в режиме  $f=50$  Гц локальные максимумы достигают 0,53 м/с, интенсивные течения наблюдаются в области рядом с индуктором, в нижней области слитка явно выраженные течения отсутствуют.

При анализе полученного распределения поля скоростей сделан вывод, что применение режима электромагнитного перемешивания на промышленной частоте  $f=50$  Гц не является рациональным для каждой из электрических схем. Активное движение жидкого металла происходит лишь в областях рядом с индуктором, из-за экранирования магнитного поля твердой фазой. Поэтому для создания интенсивных гидродинамических течений, максимально охватывающих всю область жидкой сердцевины, необходимо обеспечивать электромагнитное воздействие на слиток в режиме пониженной частоты тока.

На рисунке 3.17 представлено распределение траекторий гидродинамических течений, возникающих в жидкой сердцевине слитка при достижении установившегося режима с использованием схем №1 и №2 при различных частотных режимах работы. Анализ траектории создаваемых течений позволяет визуально оценить создаваемые контуры циркуляции и их влияние на эффективность процесса перемешивания.

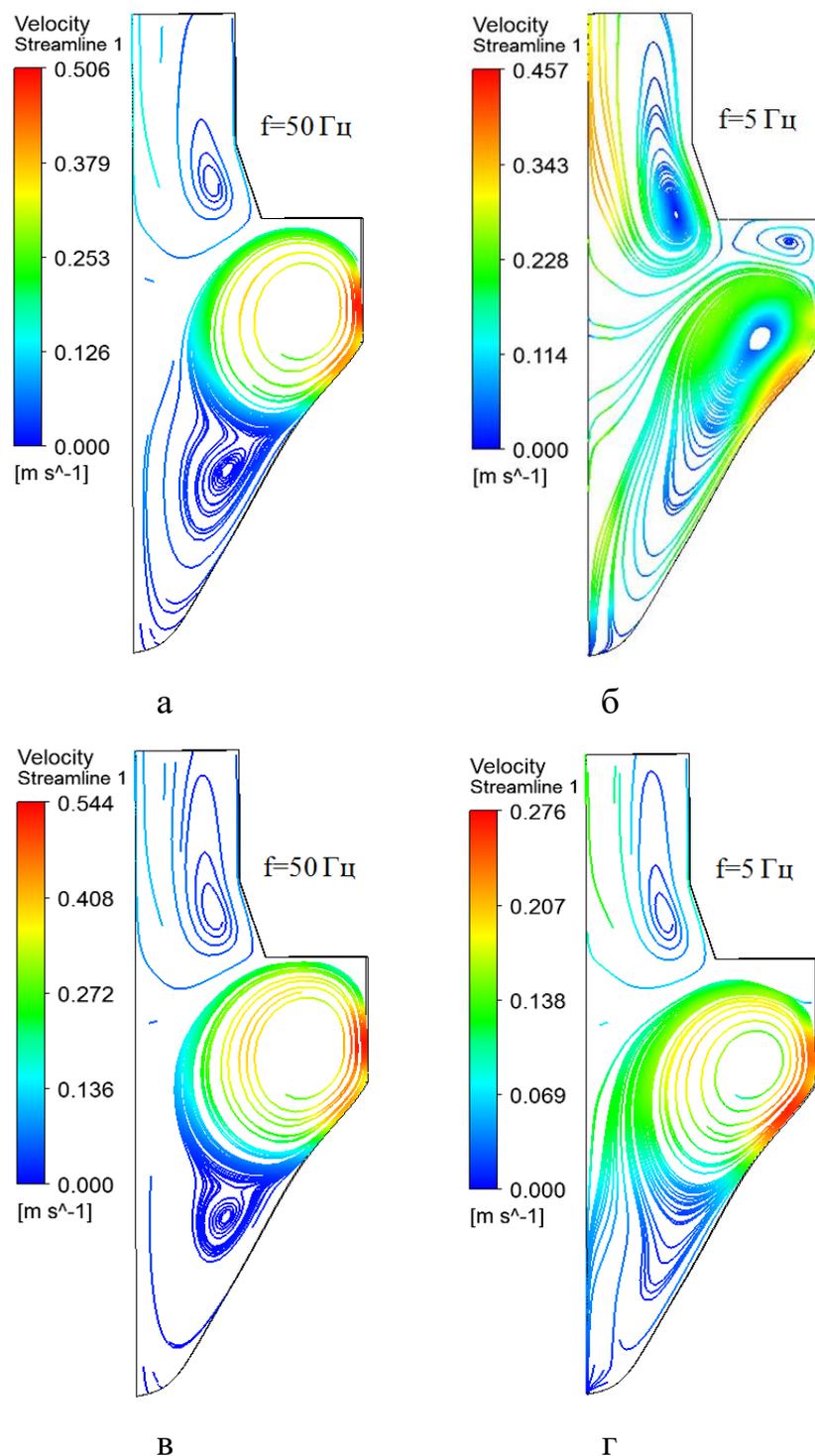


Рисунок 3.17 – Распределение траектории течений в жидкой сердцевине слитка для различных режимов работы: схема №1 (а, б), схема №2 (в, г)

При всех рассмотренных режимах воздействия наблюдается двухконтурная циркуляция расплава с явно выраженным главным контуром, охватывающим центральную и нижнюю части жидкой сердцевины. Данный

контур создаёт интенсивные потоки вдоль фронта кристаллизации. Верхний контур охватывает расплав в области подачи металла из тепловой насадки, не оказывая существенного влияния на процесс кристаллизации жидкой сердцевины.

### **Выводы по главе 3**

1. Проведен анализ электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов, протекающих в системе «индуктор-слиток» с помощью разработанных сопряженных математических моделей.

2. Определены геометрические и электромагнитные параметры индуктора, проведено исследование режимов работы устройства. Предложенная конструкция ЭМП обладает компактными геометрическими размерами, что позволяет использовать ее на многоручьевых литейных комплексах.

3. Выявлены режимы воздействия ЭМП на кристаллизующийся алюминиевый слиток, при котором электромагнитное воздействие осуществляется наиболее эффективно. Установлено, что воздействие электромагнитного поля на кристаллизующийся слиток при частотном диапазоне  $f=5-10$  Гц, используя электрическую схему с вращающимся магнитным полем, создает интенсивные гидродинамические течения, наблюдаемые в большей части жидкой сердцевины. 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.

## ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 4.1 Постановка проведения эксперимента

Для проверки достоверности разработанной математической модели создана физическая модель ЭМП жидкой сердцевины слитка. Физическая модель собрана из кольцевых катушек 1 и магнитопровода 2, представленных на рисунке 4.1. Кольцевой магнитопровод выполнен из электротехнической стали. В корпусе магнитопровода сделаны специальные вырезы с целью уменьшения наведения вихревых токов. Катушки намотаны из термостойкого обмоточного провода марки ПСД, имеющего двойную изоляцию из лака и стеклоткани. Сечение провода –  $1 \text{ мм}^2$ , максимально допустимая рабочая температура –  $155 \text{ }^\circ\text{C}$ . При размещении катушек в пазах магнитопровода укладывается дополнительная изоляция из стеклотекстолитовых пластин.

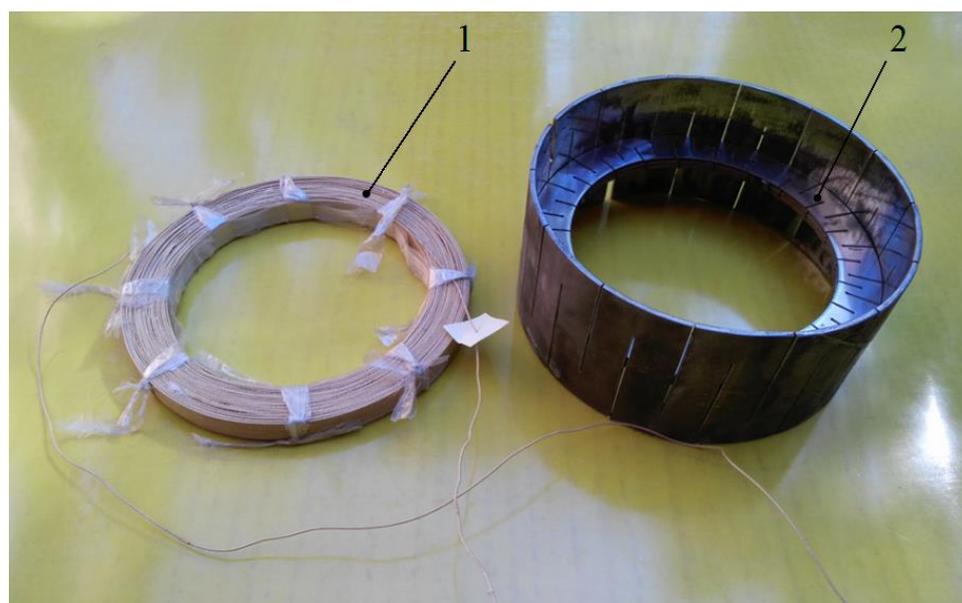


Рисунок 4.1 – Физическая модель в процессе сборки

На рисунке 4.2, а представлен общий вид экспериментальной установки. Установка включает в себя ЭМП и имитационную алюминиевую форму жидкой сердцевины слитка, заполненную специальным эвтектическим сплавом на основе галлия (галлий – 67%, индий – 20,5%, олово – 12,5%), имеющим относительно низкую температуру плавления.



а

б

Рисунок 4.2 – Общий вид экспериментальной установки (а) и лабораторные автотрансформаторы (б)

Для питания ЭМП используются два лабораторных автотрансформатора (ЛАТР) (рисунок 4.2, б), подключенных к вторичной обмотке понижающего трехфазного трансформатора. Один ЛАТР подключен к линейному напряжению 220 В, а другой ЛАТР подключен к фазному напряжению 127 В, фаза которого сдвинута относительно линейного напряжения на 90°. Однофазные ЛАТРы позволяют регулировать напряжение в пределах от 0 до 250 В.

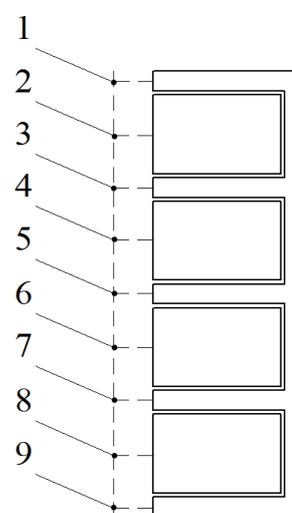
#### 4.2 Верификация результатов математического и физического моделирования

Оценка достоверности электромагнитного расчета осуществляется при помощи датчика Холла, показания с которого выводятся на цифровой

осциллограф (рисунок 4.3, а). В контрольных измерительных точках, расположенных вдоль индуктора, фиксируются значения нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции. Для замера были взяты 9 точек, находящихся на расстоянии 10 мм от индуктора, расположенных по оси зубцов магнитопровода и катушек. Опыт проводился без размещения алюминиевого слитка в индукторе. Схема расположения контрольных измерительных точек при проведении эксперимента представлена на рисунке 4.3, б.



а



б

Рисунок 4.3 – Оборудование для измерения магнитной индукции (а) и схема расположения контрольных точек при проведении измерений (б)

На рисунках 4.4 и 4.5 представлены зависимости распределения нормальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции. Наблюдается повышение значений тангенциальных составляющих в областях напротив катушек, и повышение значений нормальных составляющих в областях напротив зубцов магнитопровода, что соответствует характеристикам исследуемой конструкции ЭМП. Полученные результаты подтверждают достоверность расчетов, проведенных в пакете

Ansys Maxwell, расхождение результатов расчетов и измерений не превышает 15%.

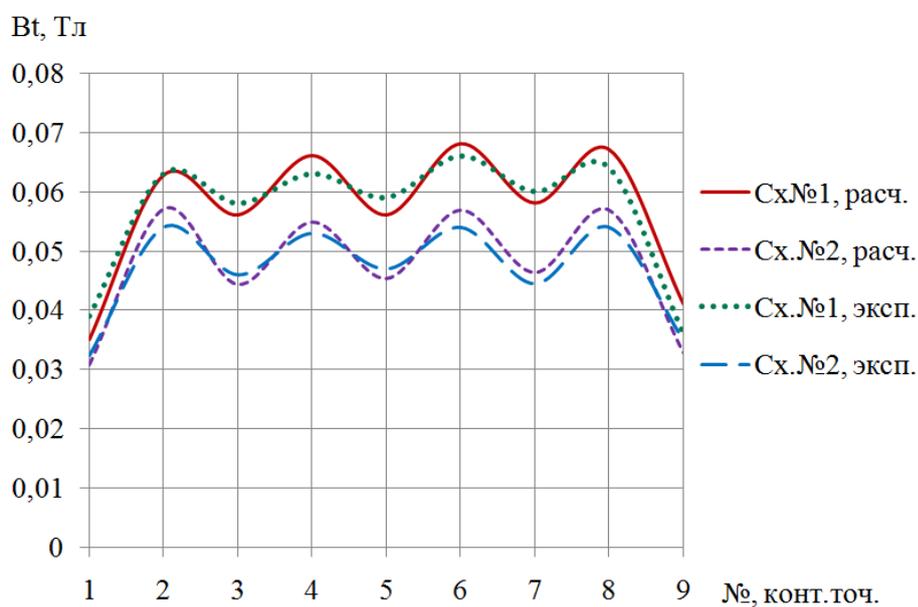


Рисунок 4.4 – Распределения тангенциальной составляющей магнитной индукции

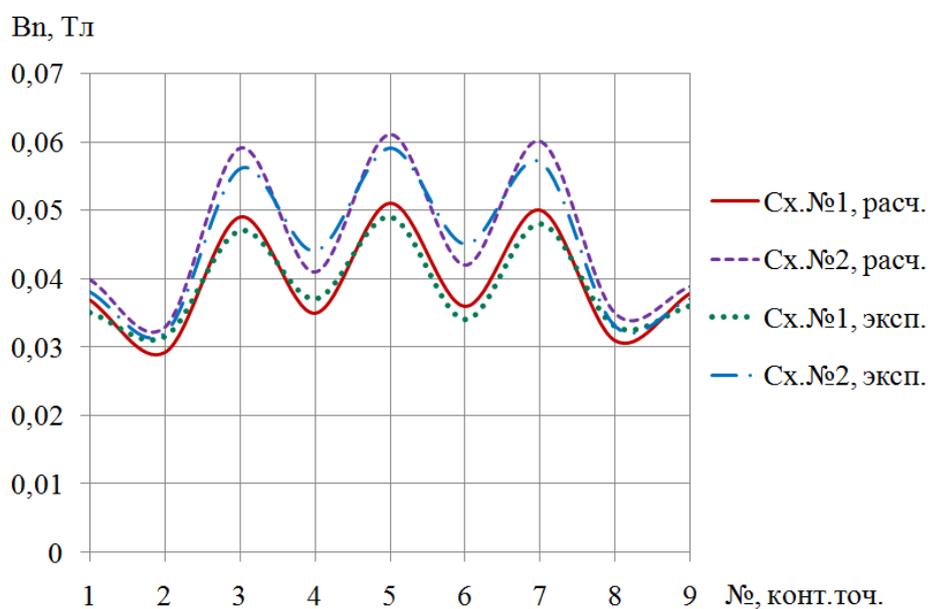


Рисунок 4.5 – Распределения нормальной составляющей магнитной индукции

Для оценки результатов гидродинамического расчета осуществляются экспериментальные исследования с применением эвтектического сплава. С помощью ультразвукового доплеровского измерителя скорости Signal Processing DOP 4000 проводятся замеры касательных составляющих поля скоростей в расплаве с целью установления закономерности интенсивности перемешивания от параметров электромагнитного воздействия. «В основе доплерометрических измерений скорости лежит применение сочетания эффекта Доплера и метода эхолокации. Дискретное излучение и прием пьезоэлементом акустических пучков при известной скорости звука в среде позволяет измерять расстояние до растворенных в жидкости частиц и неоднородностей. В свою очередь, движение частиц, движущихся под углом, отличным от  $90^\circ$ , неизбежно изменяет частоту колебаний в акустическом пучке (эффект Доплера) и может быть рассчитана скорость. Непрерывный анализ поступающих в зонд данных позволяет восстановить профиль касательной составляющей компоненты скорости по оси акустического луча» [91].

Общий вид ультразвукового доплеровского измерителя скорости Signal Processing DOP 4000 и система датчиков представлены на рисунке 4.6. Данный измерительный комплекс может использоваться в лабораторных и промышленных условиях при измерении поля скоростей в различных жидкостях.



Рисунок 4.6 – Ультразвуковой доплеровский измеритель скорости DOP4000 и система датчиков

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. 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 относительно слитка при проведении эксперимента представлена на рисунке 4.7, а где 1, 2, 3 – установленные датчики, 4 – жидкая сердцевина слитка, 5 – твердая фаза слитка. На рисунке 4.7, б представлен общий вид физической модели с установленными измерительными датчиками. Три датчика закреплены на текстолитовой пластине так, чтобы глубина их погружения в расплав составляла 10 мм.

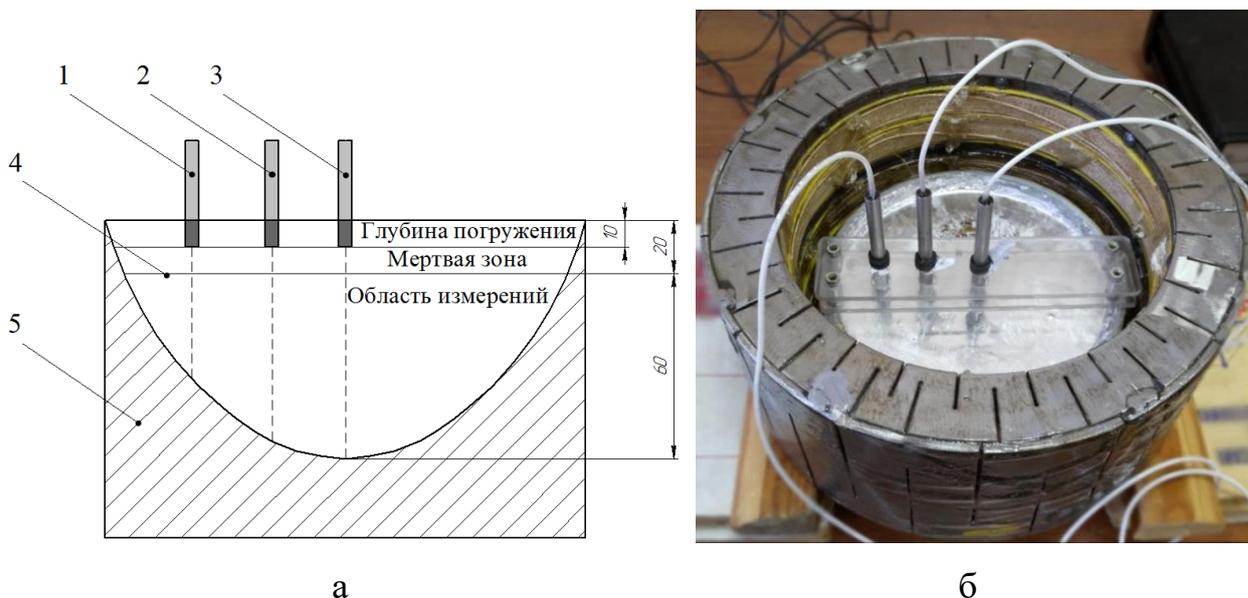


Рисунок 4.7 – Схема расположения датчиков при проведении измерений (а) и физическая модель с установленными датчиками (б)

На рис. 4.8 представлен график распределения средних значений касательных составляющих скоростей в области датчика №1, полученных в результате математического моделирования и экспериментальных исследований. В диапазоне глубин с 20 мм до 40 мм наблюдается интенсивное увеличение скорости. На глубине ниже 40 мм скорость начинает снижаться, достигая минимальных значений в области дна.

На рис. 4.9 представлен график распределения средних значений касательных составляющих скоростей, полученных в области датчика №2. Интенсивный рост скоростей происходит в промежутке от 20 до 30 мм. Начиная с глубины 30 мм, наблюдается плавное снижение скорости, которая достигает своих минимальных значений в области дна на глубине 75 мм.

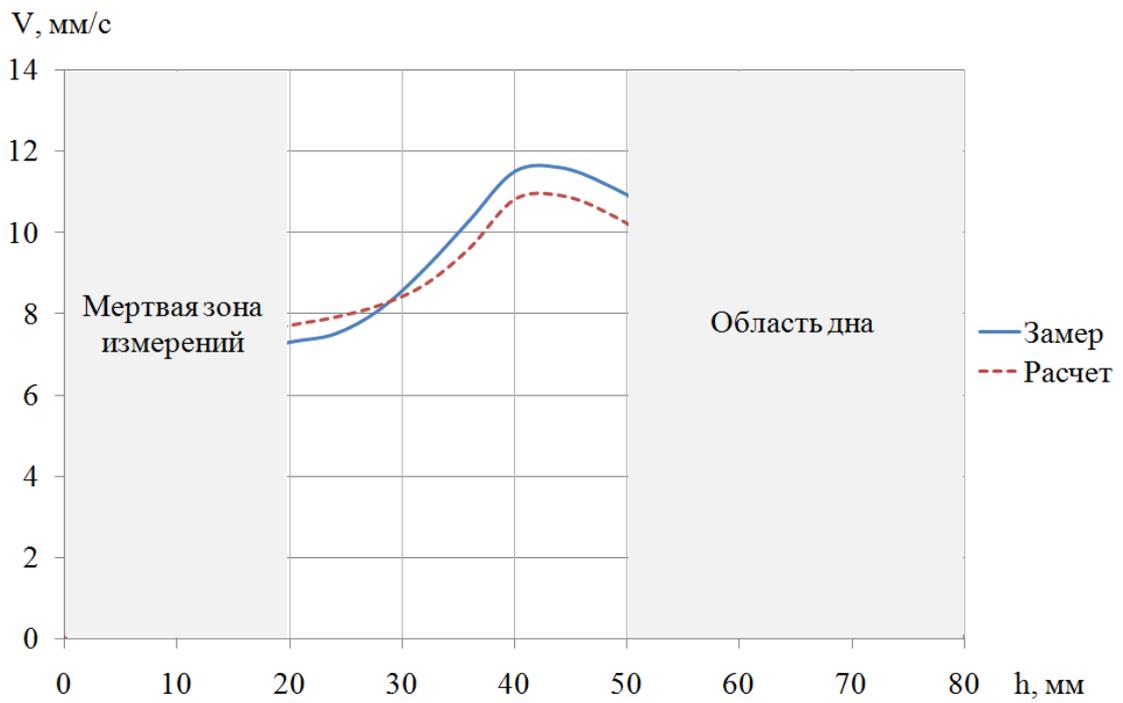


Рисунок 4.8 – Распределение касательных составляющих поля скоростей в области датчика №1

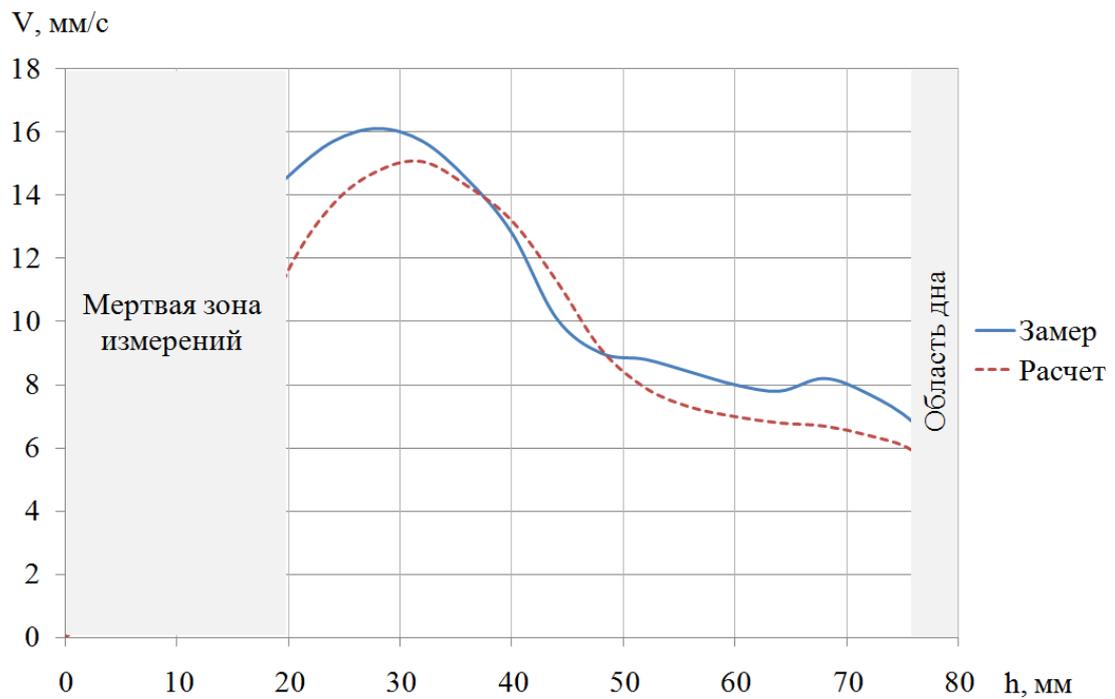


Рисунок 4.9 – Распределение касательных составляющих поля скоростей в области датчика №2

На рис. 4.10 представлен график распределения средних значений касательных составляющих скоростей, полученных в области датчика №3. Характер изменения скоростей аналогичен случаю с использованием датчика №2, что обусловлено сопоставимой глубиной слитка в указанных областях.

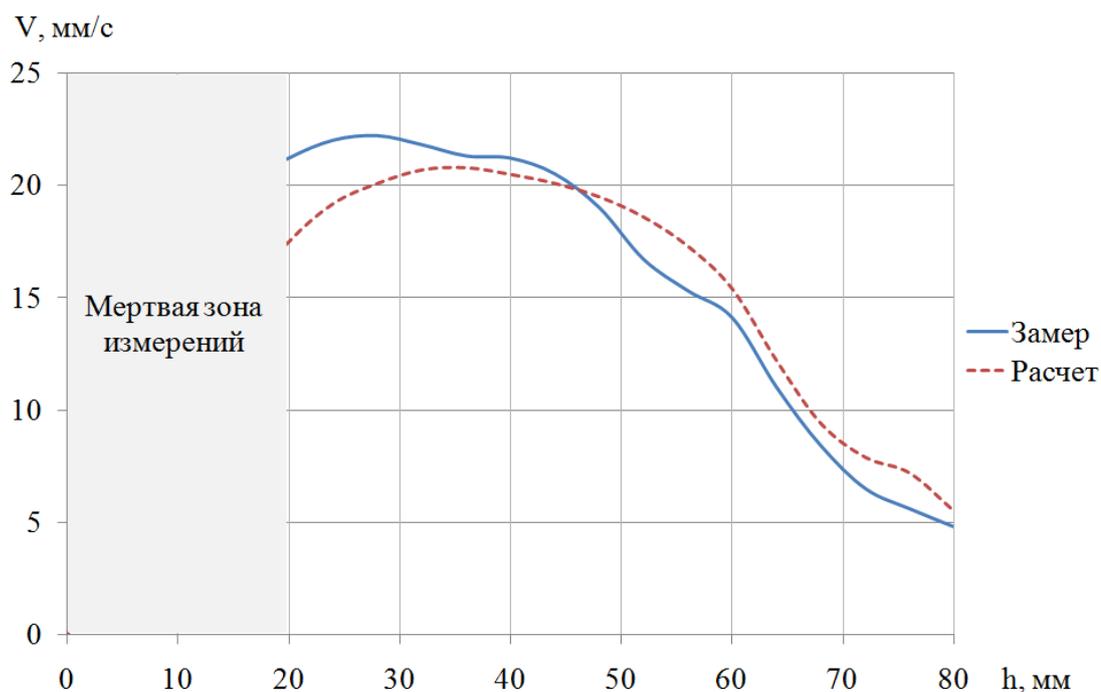


Рисунок 4.10 Распределение касательных составляющих поля скоростей в области датчика №3

Во всех трех точках измерений наблюдается достаточно высокое совпадение расчетных и экспериментальных данных. Построенные кривые имеют сопоставимую форму, при этом у них имеются незначительные колебания относительно друг друга, обусловленные турбулентным режимом течения расплава.

На рис. 4.11 представлен график относительных погрешностей между расчетными и экспериментальными данными для каждой контрольной точки. Разница результатов, полученных с помощью ультразвуковых измерений, не превышает 15% от расчетных данных.

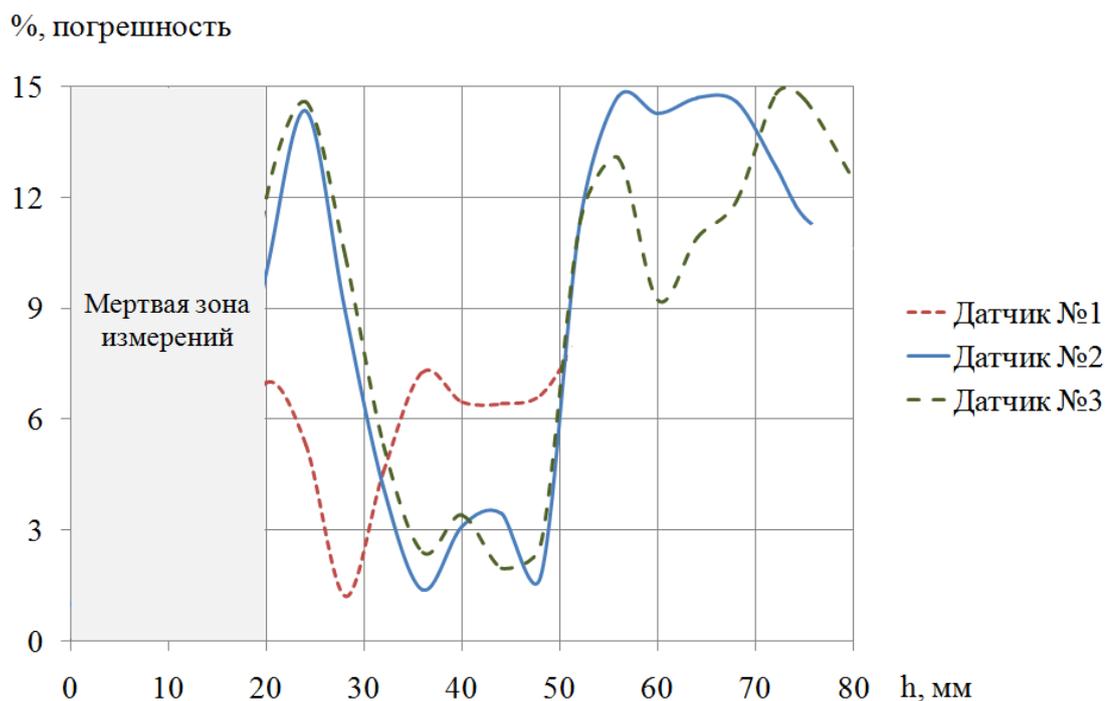


Рисунок 4.11 Относительная погрешность измерений в контрольных точках

После анализа полученных данных, можно сделать вывод о перспективности использования ультразвуковых измерений поля скоростей в качестве верификации математической модели.

#### Выводы по главе 4

1. Разработанные математические и физические модели ЭМП достоверно описывают электромагнитные и гидродинамические процессы, происходящие в жидкой сердцевине слитка. Использование ультразвукового измерителя скорости позволяет верифицировать результаты численного расчета, убедиться в корректности поставленной задачи.

2. Опробованная методика экспериментальных измерений проведенная для расплава галлия, показала свою высокую эффективность. При сравнении полученных результатов математическое моделирование гидродинамических

процессов в жидкой сердцевине также проводится для галлия, что позволяет не вводить критерии подобия для исследуемых моделей.

3. Эксперимент показал, что отклонение результатов, полученных с помощью ультразвуковых измерений, не превышает 15% от расчетных данных. Математическая модель может быть использована для дальнейших исследований при различных конструктивных параметрах индуктора и энергетических параметрах питающей сети.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы получены следующие научные и практические результаты:

1. Проведенный анализ технологий и устройств электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины алюминиевых слитков в кристаллизаторах скольжения показал, что для многоручьевой 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 работы и оценено его 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 в частотном диапазоне  $f=5-10$  Гц с использованием схемы 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.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЛАТР – лабораторный автотрансформатор;

КПД – коэффициент полезного действия;

ЭМП – электромагнитный перемешиватель;

МКО – метод конечных объемов;

МКЭ – метод конечных элементов;

ADPL – язык параметрического проектирования ANSYS (ANSYS parametric design language);

CAE – система инженерного анализа (computer-aided engineering);

CEL – язык выражений CFX (CFX expression language);

CPP – язык C++;

LES – метод крупных вихрей (large eddy simulation);

RANS – уравнения Навье-Стокса осреднённые по Рейнольдсу (Reynolds-averaged Navier Stokes).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плавка и литье алюминиевых сплавов / Сост. М.Б. Альтман, А.Д. Андреев, Г.А. Балахонцев и др.; Спр. изд. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, - 1983. - 352 с.
2. Ефимов, В. А, Эльдарханов, А. С. Технологии Современной металлургии. М: Новые технологии, 2004. 794 с.
3. Непрерывное литье во вращающемся магнитном поле / А.Д. Акименко, Л.П. Орлов, А.А. Скворцов, Л.Б. Мендеров.- М.: Металлургия., 1971. 177 с.
4. Повх И. Л., Капуста А. Б., Чекин Б. В. Магнитная гидродинамика в металлургии. – М.: Металлургия, 1974. –240 с.
5. Самойлович, Ю. Формирование слитка / Ю. Самойлов. М.: Металлургия., 1977.-160 с.
6. Верте, Л.А. Магнитная гидродинамика в металлургии. М.: «Металлургия», 1975, 288 с.
7. Колесниченко, А.Ф. Технологические МГД-установки и процессы / А.Ф. Колесниченко. – Киев : Наукова думка, 1980. – 190 с.
8. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970.
9. Добаткин, В. И. Металловедение цветных металлов и сплавов / В. И. Добаткин, В. И. Елагин, В. М. Фёдоров. – М. : Наука, 1972. – С. 163-169
10. Напалков В. И., Черепок Г. В., Махов С. В., Черновол Ю. М. Непрерывное литье алюминиевых сплавов. (Москва, Интернет Инжиниринг, 2005), 512 с.
11. Акименко, А.Д. Непрерывное литье во вращающемся магнитном поле / А.Д. Акименко, Л.П.Орлов, А.А.Скворцов, Л.В. Шендеров. М.: Металлургия, 1971. 177 с.
12. Кабаков З. К., Самойлович Ю. А., Чирихин В.Ф. и др. Применение электромагнитных воздействий для повышения качества металла и

производительности МНЛЗ (коллективная монография). Череповец, 2008.- 238 с.

13. Самойлович, Ю.А. Кристаллизация слитка в электромагнитном поле. - М.: Металлургия, 1986. 169 с.

14. Габидуллин, Р. М. Непрерывное литьё алюминиевых сплавов / Р. М. Габидуллин, В. А. Ливанов, В. С. Шипилов – М. : Металлургия, 1977. – 168 с.

15. Верте, Л.А. Электромагнитная разливка и обработка жидкого металла / Л.А. Верте. – М. : Металлургия, 1967. – 207 с.

16. Смирягин, А.П. Промышленные цветные металлы и сплавы. А.П. Смирягин Н.А. Смирягина, А.В. Белова. М., «Металлургия», 1974, с. 488

17. A. Kapusta, B. Mikhailovich, S. Khripchenko, I. Kolesnichenko, On the prediction of the structure of ingots solidifying in RMF. *Magnetohydrodynamics*, 2015, Vol. 51, No. 3. P. 473-483.

18. V.V. Buryak , A.A. Kolesnichenko, A.F. Kolesnichenko, MHD acoustics and its application to solidification control by continuous casting. *Magnetohydrodynamics*, 2012, Vol. 48, No. 2. P. 387-398.

19. Mapelli, C., Gruttadauria, A., Peroni, M., 2010. Application of electromagnetic stirring for the homogenization of aluminium billet cast in a semi-continuous machine. *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2), 306–314.

20. Wang, J., Li, P.J., Mi, G.H., Zhong, Y.X., 2010. Microstructural evolution caused by electromagnetic stirring in superheated AlSi7Mg alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 210 (12), 1652–1659.

21. Wang, Y.H., Lin, J.P., He, Y.H., Wang, Y.L., Chen, G.L., 2008. Microstructures and mechanical properties of Ti–45Al–8.5Nb–(W,B,Y) alloy by SPS–HIP route. *Materials Science and Engineering A* 489 (1–2), 55–61.

22. Zhao, Z.H., Cui, J.Z., Dong, J., Zhang, B.J., 2007. Effect of low-frequency magnetic field on microstructures and macrosegregation of horizontal direct chill casting 7075 aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 182 (1–3), 185–190.

23. Воздействие электромагнитного поля на расплав в процессе его кристаллизации / С.А. Бычков, Б.А Сокунов, Н.Г.Батов. // Вестник МЭИ. - 2010. - №2.С. 67-71.
24. Применение устройств электромагнитного перемешивания при отливке слитков на основе меди / С.А Бычков. // «Промышленная энергетика», №5, 2010. - С.25-28.
25. 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.
26. Энергетические характеристики индукционной машины с жидкометаллическим рабочим телом / Христинич Р.М., Христинич А.Р., Христинич Е.В. // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2013. № 9. С. 218-223.
27. Ефимов, В. А, Эльдарханов, А. С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов . М: Metallurgia, 1995. 272 с.
28. T. Wróbel , J. Szajnar, D. Bartocha, M. Stawarz, 2013. The Stand of Horizontal Continuous Casting of Al and its Alloys. Archives of Foundry Engineering. Volume 13, Issue 3, Pages 113–118.
29. Szajnar, J. Influence of electromagnetic field on pure metals and alloys structure // J. Szajnar, M. Stawarz, T. Wróbel, W. Sebzda // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2009. – May.
30. TANG Meng-ou, XU Jun, ZHANG Zhi-feng, BAI Yue-long, 2010. New method of direct chill casting of Al-6Si-3Cu-Mg semisolid billet by annulus electromagnetic stirring. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 20(9), 1591-1596.
31. Li WU, Hui-jun KANG, Zong-ning CHEN, Ning LIU, Tong-min WANG. Horizontal continuous casting process under electromagnetic field for preparing AA3003/AA4045 clad composite hollow billets. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 25(2015), 2675–2685.

32. Jieren Yang, Ruirun Chen, Hongsheng Ding, Jingjie Guo, Yanqing Su, Hengzhi Fu, 2013. Flow field and its effect on microstructure in cold crucible directional solidification of Nb containing TiAl alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 233(8), Pages 1355–1363
33. Currey, D.A., Pickles, C.A., 2004. Electromagnetic stirring of aluminium–silicon alloys. *Journal of Materials Science* 23, 3756–3763.
34. Lim, S.C., Yoon, E.P., 1997. The effect of electromagnetic stirring on the microstructure of Al–7wt%Si alloy. *Journal of Material Science Letter* 16, 104–109.
35. Lu, D., Jiang, Y., Guan, G., Zhou, R., Li, Z., Zhou, R., 2007. Refinement of primary Si in hypereutectic Al–Si alloy by electromagnetic stirring. *Journal of Material Processing Technology* 189, 13–18.
36. Bai, Y.L., XU, J., Zhang, Z.F., Shi, L.K., 2009. Annulus electromagnetic stirring for preparing semisolid A357 aluminum alloy slurry. *J. Trans. Nonferrous Met. Soc.China* 19 (5), 1104–1109.
37. LIU Zheng, MAO Wei-min, LIU Xiao-mei, 2010. Characterization on morphology evolution of primary phase in semisolid A356 under slightly electromagnetic stirring. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 20(2010), 805-810.
38. Yanyan Du, Yiping Lu, Tongmin Wang, Tingju Li, Guoliang Zhang, 2012. Effect of electromagnetic stirring on microstructure and properties of Al<sub>0.5</sub>CoCrCuFeNi alloy. *Procedia Engineering* 27 (2012) 1129 – 1134.
39. YAO Lei, HAO Hai, GU Song-wei, DONG Han-wei, ZHANG Xing-guo, 2010. Effects of electromagnetic stirring on microstructure and mechanical properties of super light Mg-Li-Al-Zn alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 20(2010), 388-392.
40. LIU S F, LIU L Y, KANG L G. Refinement role of electromagnetic stirring and strontium in AZ91 magnesium alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 450(1/2): 546–550.

41. Mao WM, Li SS, Zhao AM, Cui CL, Wang DR, Zhong XY. Microstructures of hypereutectic Al-24%Si alloy stirred by electromagnetic field. *The Chinese journal of nonferrous metals* 2001;11(5), 819-823.
42. Liu Zheng, Mao Weimin. Effect of pouring temperature on semi-solid slurry of A356 Al alloy prepared by weak electromagnetic stirring. *Trans. Nonferrous Met. SOC. China*, 2006, № 16. P. 71-76.
43. Управление структурой металлического расплава при его кристаллизации в бегущем магнитном поле / О. Ю. Сидоров, Ф. Н. Сарапулов, Б. А. Сокунов, С. Ф. Сарапулов. // сб. докл. 4-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках выстав. «Энергосбережение. Отопление. Вентиляция. Водоснабжение» — Екатеринбург : Издательство УМЦ УПИ, 2015. — С. 29-44.
44. Griffiths, W.D., McCartney, D.G., 1996. The effect of electromagnetic stirring during solidification on the structure of Al-Si alloys. *Materials Science & Engineering A*, 47-60.
45. Сидоров О. Ю., Сарапулов Ф. Н., Сарапулов С. Ф. Метод конечных элементов и конечных разностей в электромеханике и электротехнологии. М.: Энергоатом-издат, 2010. 331 с.
46. N. Barman. Studies on transport phenomena during solidification of an aluminum alloy in the presence of linear electromagnetic stirring. P. Kumar, P. Dutta. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, № 209. P. 5912-5923.
47. Пат. 2237542 РФ. МПК В22D 11/115. Устройство для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка в кристаллизаторе / Тимофеев В.Н., Христинич Р.М., Бояков С.А., Тимофеев С.П. Опубл. 2004. Бюл. №28. - 4 с.
48. S.G. Kanga, J.W. Baeb, B.M. Kima. The grain size control of A356 aluminum alloy by horizontal electromagnetic stirring for rheology forging. *Journal of Materials Processing Technology* 187-188 (2007) 344-348.
49. Beijiang, Z., Jianzhong, C. & Guimin, L. (2003). Effects of low-frequency electromagnetic field on microstructures and macrosegregation of continuous

casting 7075 aluminum alloy. *Materials Science & Engineering A*. A(355), 325-330.

50. Yang Z., Seo P. K., Kang C. G. Grain size control of semisolid A356 alloy manufactured by electromagnetic stirring. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2005, 21(2): 219-225.

51. E.J. Zoqui, M. Paes, E. Es-Sadiqi, Macro- and microstructure analysis of SSM A356 produced by electromagnetic stirring, *J. Mater. Process. Technol.* 120 (2002) 365–373.

52. S. Blais, W. Loue', C. Pluchom, Structure control by electromagnetic stirring and reheating at semi-solid state, in: *Proceedings of the Fourth International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites*, Sheffield, UK, 1996, pp. 187–192.

53. M. Paes, S. Herzig, E.J. Zoqui, SSM aluminium alloys produced by electromagnetic stirring: the Brazilian way, in: *Proceedings of the Sixth International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites*, Turin, Italy, September, 2000, pp. 693–699.

54. G. Hirt, M. Zillgen, Microstructural Effects of Electromagnetic Stirring in Continuous Casting of Various Aluminium Alloys, *Proceeding of the 4th International Conference on Semisolid Processing of alloys and Components*, England (1996) 180-186.

55. Jong Ho Kim, Myoung-Gyun Kim, Jubum Kim, Joon-Pyo Park, Gyu-Chang Lee and In-Sung Cho. Apparatus Design and Electromagnetic Continuous Casting Process for Near Net-Shaped Aluminum Alloy Billet. *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys*, September 5-9, 2010, 1851-1855

56. Коротков, В.Г. Рафинирование литейных алюминиевых сплавов /В.Г. Коротков. Москва-Свердловск: Машгиз., 1963 .-127с.

57. Шмидт, П.Г. Влияние механического перемешивания расплава в круглом кристаллизаторе на качество заготовки // Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл / П.Г. Шмидт, Н.Н. Власов, Г.А.Смирнов.- Киев: 1983. - 105 - 115 с.

58. Эскин, Г.И. Обработка и контроль качества цветных металлов ультразвуком / Г.И. Эскин. М.: Metallurgy., - 1992. - 126 с.
59. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 536 с.
60. Ефимов, В.А. Специальные способы литья / Справочник под ред. акад. АН УССР В.А.Ефимова, М.: Машиностроение, 1991. С. 422
61. Иванов-Смоленский, А.В. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А.В. Иванов-Смоленский, Ю.В. Абрамкин, А.И. Власов, В.А. Кузнецов. М. : Энергоатомиздат, 1986. -216 с.
62. Кирко, И.М. Жидкий металл в электромагнитном поле. Л.: Энергия, 1964.
63. А. А. Авдулов. Электромагнитный модификатор слитка в роторной литейной машине. Дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / А. А. Авдулов. Красноярск. – 2015. – 162 с.
64. М. Ю. Хацаюк. Индукционная установка с МГД воздействием в процессе приготовления и разлива высоколегированных алюминиевых сплавов. Дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / М. Ю. Хацаюк. Красноярск. – 2013. – 154 с.
65. Колесов, С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов. /С.Н. Колесов, И.С. Колесов. М.: Высш. шк., 2004. - 519 с.
66. Кузьменко, А.Г. Электромагнитные механизмы металлургических машин / А.Г. Кузьменко, В.Г. Грачев, Ф.С. Солодников. М.: Metallurgy, 1996.-508 с.
67. Немков, В.С. Теория и расчёт устройств индукционного нагрева/ В.С. Немков, В.Б. Демидович. -Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1988. -280 с.; ил.
68. Эскин, Г. И. Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия: справ. изд-е; 2-е изд., перераб. и доп. / Г. И. Эскин. – М. : Metallurgy, 1988. – 232 с.

69. Патанкар, С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. В. Патанкар ; пер. с англ. М. : Энергоатомиздат, 1984. — 124 с.
70. Рохлин, Л. Л. Металловедение цветных металлов и сплавов / Л. Л. Рохлин, Н. Р. Бочвар. – М. : Наука, 1972. – С. 61.
71. Фомин, Н.И. Электрические печи и установки индукционного нагрева/ Н.И. Фомин, Л.М. Затуловский. — М., «Металлургия», 1979. 247 с.
72. Шатагин, О.А. Горизонтальное непрерывное литье цветных металлов и сплавов/ О.А. Шатагин, В.Т. Сладкоштитев, М.А. Вартазаров, С.М. Козаченко, В.Н. Терехов. М., «Металлургия», 1974, 176 с.
73. Цаплин, А.И. Режим согласованного индукционного воздействия на жидкое ядро непрерывного слитка / А.И. Цаплин, И.Н. Шифрин // Магнитная гидродинамика. 1988. - № 1. С. 99-103.
74. 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.
75. Рубцов, В. П. Электромеханические системы электротехнологических установок: учеб. пособие / В. П. Рубцов, Н. А. Лавринов ; под ред. Ю. А. Слесарева ; Моск. энерг. ин-т. – М. : Изд-во МЭИ, 1993. – 81 с.
76. Гельфгат, Ю.М. Жидкий металл под действием электромагнитных сил / Ю.М. Гельфгат, О.А. Лиелаусис, Э.В. Щербинин. Рига: Зинатне., 1976. -232 с.
77. WANG Bin. Simulation of electromagnetic-flow fields in Mg melt under pulsed magnetic field. YANG Yuan-sheng, MA Xiao-ping, TONG Wen-hui. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2010, № 20. P. 283-288.
78. 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), 952-961.

79. Герман, Э. Непрерывное литье / Э. Герман. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, - 1961.-814 с.
80. Тимофеев С.П. Индукционные перемешиватели жидкой сердцевины при кристаллизации алюминиевых слитков: дис. канд. техн. наук: 05.09.03. – Красноярск, 2004. – 154 с.
81. Zhifeng ZHANG, Jun XUN, Likai SHI. Study on Multiple Electromagnetic Continuous Casting of Aluminum Alloy. J. Mater. Sci. Technol., Vol.22 No.4, 2006: 437-440.
82. Yang Z., Seo P. K., Kang C. G. Grain size control of semisolid A356 alloy manufactured by electromagnetic stirring. J. Mater. Sci. Technol., 2005, 21(2): 219-225.
83. A. Cramer, S. Eckert, V. Galindo, G. Gerbeth, B. Willers, W. Witke. Liquid metal model experiments on casting and solidification processes. Journal of Materials Science 39 (2004), 7285 – 7294.
84. Yang Qiu, Zhi Feng Zhang, Ming Wei Gao, Ya Jun Luo, Hong Tao Gai, 2017. Effects of A-EMS on Microstructure and Mechanical Properties of DC Casting Al-10Si-1.1Ni Alloy. Materials Science Forum (Vol. 898), 254-258.
85. М. В. Первухин. Электротехнология и оборудование для получения непрерывнолитых слитков в электромагнитном кристаллизаторе. Теория и практика. Дис. докт. техн. наук: 05.09.10 / М. В. Первухин. Красноярск. – 2012.– 310 с.
86. Молотилов Б.В., Миронов Л.В., Петренко А.Г. и др. Холоднокатаные электротехнические стали: Справ. изд.. – М.: Металлургия, 1989, - 168 с.
87. Макаров Г. С. Слитки из алюминиевых сплавов с магнием и кремнием для прессования. – Москва: Интермет Инжиниринг, 2011,-527 с.
88. Макаров Г.С. Особенности техники литья слитков алюминиевых сплавов в системы с тепловыми насадками. Технология легких сплавов. 2014. № 2. С. 65-77

89. Heat transfer boundary conditions for the numerical simulation of the DC casting process / Adrian Sabau, Kazunori Kuwana, Srinath Viswanathan, Kozo Saito, Lee Davis. // *Light Metals* 2004, pp. 667-672.
90. Брановер Г.Г., Цинобер А.Б. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред. М.: Наука, 1970.
91. М. Ю. Хацаюк. Теория и моделирование магнитогидродинамических процессов в электротехнологических комплексах металлургического назначения. Дис. докт. техн. наук : 05.09.10 / М. Ю. Хацаюк. Красноярск. – 2019.–338 с.
92. V. N. Timofeev and M. Y. Khatsayuk, Theoretical design fundamentals for MHD stirrers for molten metals. *Magnetohydrodynamics*, 2016, Vol. 52, No. 4. P. 495-506.
93. ANSYS Inc. [Электронный ресурс] : Официальный сайт ANSYS Inc. – Режим доступа: <https://www.ansys.com>
94. COMSOL Multiphysics. [Электронный ресурс] : Официальный сайт ANSYS Inc. – Режим доступа: <https://www.comsol.com/>
95. Branover H., Golbraikh E., Kapusta A., Mikhailovich B., Dardik I., Thompson R., Lesin S., Khavkin M. On the potentialities of intensification of electromagnetic stirring of melts // *Magnetohydrodynamics*. 2006. Vol. 42. No. 2/3. P. 291-298.
96. OpenFOAM / URL: <http://www.openfoam.com>
97. Описание ANSYS Maxwell / URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-maxwell>
98. ANSYS CFX / URL: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>
99. ANSYS Fluent / URL: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
100. Чернышев, И. А. Электромагнитное воздействие на металлические расплавы / И. А. Чернышев. – М. : Металлургиздат, 1963. – 85 с.
101. Лиелпетер, Я. Я. Жидкометаллические индукционные МГД-машины / Я. Я. Лиелпетер. – Рига : Зинатне, 1969. – 245 с.

102. Математическое моделирование гидродинамических течений в жидкой сердцевине слитка / Ю.А. Самойлович, В.И Тимошпольский, Ю.В. Дьяченко, И.Л. Нумеранова. // «Литье и металлургия», №3, 2000. - С.77-80.
103. Peng Qi, Bo Long Li, Wen Jian Lv, Tong Bo Wang, Zuo Ren Nie, 2017. Effects of Electromagnetic Stirring Frequency on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-7Si-0.42 Mg-0.1Cu Alloy by Semi-Solid Processing. Materials Science Forum (Vol. 898), 104-110.
104. Electromagnetic melt flow control during solidification of metallic alloys / Sven Eckert, Petr A. Nikrityuk, Bernd Willers, Dirk Rabiger, Natalia Shevchenko, Hieram Neumann-Heyme, Vadim Travnikov, Stefan Odenbach, Axel Voigt, Kerstin Eckert // Eur. Phys. J. Special Topics 2013, 220, 123–137.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Акты внедрения результатов диссертационной работы



СЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
ФГАОУ ВО «Сибирский  
федеральный университет»  
кандидат психологических наук  
Денис Сергеевич Гуц

*О. О.*  
«05» *апреля* 2022 г.

#### АКТ

Внедрения результатов диссертационной работы Кучинского Михаила Юрьевича в учебный процесс Политехнического института ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Теоретические и практические результаты диссертационной работы Кучинского М. Ю. на тему «Электротехнология перемешивания жидкой сердцевины слитков в многоручьевом литейном комплексе» использованы при:

- преподавании дисциплин «Электротехнологические установки и системы», «Установки индукционного нагрева» бакалаврам по профилю 13.03.02.11 «Электротехнологические установки и системы»;
- подготовке учебно-методического пособия «Магнитная гидродинамика в металлургии», преподаваемого студентам бакалавриата и магистратуры электротехнических направлений подготовки;
- создании лаборатории физического моделирования МГД-процессов, применяемой при выполнении исследовательских и выпускных квалификационных работ студентов и аспирантов кафедры «Электротехника».

Использование результатов диссертационной работы позволяет повысить качество подготовки специалистов в области электротехнологии и электротехники и расширяет диапазон знаний студентов.

Заведующий кафедрой «Электротехника»  
ПИ СФУ, д.т.н., профессор

*В.Н. Тимофеев*  
В.Н. Тимофеев

Директор ПИ СФУ, д.т.н., профессор

*М.В. Первухин*  
М.В. Первухин



**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ООО

«НПЦ Магнитной гидродинамики»

В. Н. Тимофеев

«06» апреля 2022 г.

**АКТ**

Внедрения в производственную деятельность результатов диссертационной работы Кучинского Михаила Юрьевича «Электротехнология перемешивания жидкой сердцевины слитков в многоручьевом литейном комплексе»

Результаты научно-исследовательской работы Кучинского Михаила Юрьевича внедрены и используются техническими специалистами ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» в производственной деятельности предприятия при модернизации и эксплуатации электротехнологического комплекса непрерывного литья для получения алюминиевых слитков диаметром 70 мм. Применение результатов позволило:

1. Определить конструкцию и схему соединения обмоток индуктора, обеспечивающих интенсивные гидродинамические течения в жидкой сердцевине слитка в процессе кристаллизации.

2. Выработать рекомендации по проектированию и испытаниям электромагнитных перемешивателей жидкой сердцевины кристаллизующегося слитка.

3. Установить взаимосвязь электромагнитных параметров индукционного оборудования с технологическими параметрами литья, что позволило обеспечить получение алюминиевого сплава с заданными физико-механическими свойствами.

Ведущий инженер отдела технологии токов  
высокой частоты ООО «НПЦ  
Магнитной гидродинамики», кандидат  
технических наук.

Сергеев Н.В.

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** **2 743 437** (11) **C1** (13)

(51) МПК  
[B22D 11/115 \(2006.01\)](#)  
(52) СПК  
[B22D 11/115 \(2020.08\)](#)  
[B22D 11/049 \(2020.08\)](#)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

### (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 02.07.2021)  
Пошлина: учтена за 3 год с 01.05.2022 по 30.04.2023. Установленный срок для уплаты пошлины за 4 год: с 01.05.2022 по 30.04.2023. При уплате пошлины за 4 год в дополнительный 6-месячный срок с 01.05.2023 по 30.10.2023 размер пошлины увеличивается на 50%.

(21)(22) Заявка: [2020116125](#), 30.04.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
30.04.2020

Дата регистрации:  
18.02.2021

Приоритет(ы):  
(22) Дата подачи заявки: 30.04.2020

(45) Опубликовано: [18.02.2021](#) Бюл. № [5](#)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2237542 C1, 10.10.2004. RU 2266798 C1, 27.12.2005. US 4933005 A, 12.06.1990. US 5699850A, 23.12.1997. DE 3730300 C2, 10.08.1989.

Адрес для переписки:  
660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 9А,  
пом. 225, ООО "Научно-производственный  
центр магнитной гидродинамики"

(72) Автор(ы):

Тимофеев Сергей Петрович (RU),  
Кучинский Михаил Юрьевич (RU),  
Первухин Михаил Викторович (RU),  
Тимофеев Виктор Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной  
ответственностью "Научно-  
производственный центр магнитной  
гидродинамики" (RU)

(54) Устройство для электромагнитного перемешивания жидкой сердцевины слитка в кристаллизаторе

(57) Реферат:

Изобретение относится к области металлургии, в частности, к непрерывному литью металлов с электромагнитным воздействием на жидкую фазу слитка. Магнитопровод выполнен Ш-образным, в пазах которого размещены попарно подключенные к разным фазам двухфазной питающей сети катушки обмотки. Ш-образный магнитопровод имеет в ярье и зубцах разнонаправленные воздушные зазоры и установлен вокруг кристаллизатора обращенными к нему зубцами и с возможностью смещения относительно оси кристаллизатора в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Ш-образный магнитопровод может быть выполнен из листов электротехнической стали, которые имеют равномерные встречно направленные прорези, или из волнообразно изогнутой ферромагнитной проволоки.