Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

Уральский энергетический институт, Кафедра электротехники

На правах рукописи

Швыдкий Евгений Леонидович

Исследование гидродинамических процессов в жидкометаллическом вторичном элементе индукционных МГД машин

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель докт. техн. наук, профессор Сарапулов Федор Никитич

Екатеринбург – 2020

Оглавление

Введе	ние	4
Обзор	литературы	10
1.	Электромагнитное перемешивание с помощью бегущего маг-	
	нитного поля в прямоугольной емкости	15
2.	Исследования по применению модулированных во времени маг-	
	нитных полей	20
3.	Исследования переноса примеси в жидком металле под воздей-	
	ствием переменных магнитных полей	28
4.	Исследования процесса затвердевания под воздействием БМП .	31
5.	Заключение	36
Глава	1. Исследование электромагнитного перемешивания од-	
нос	сторонним индуктором бегущего магнитного поля	39
1.1.	Объект исследования	39
1.2.	Численная модель в ANSYS Mechanical APDL	40
1.3.	Анализ насыщения и выбор размеров магнитопровода ЛИМ	56
1.4.	Несимметрия токов в обмотках ЛИМ	58
1.5.	Исследование гидродинамических течений	66
1.6.	Исследование электромагнитных сил в процессе кристаллизации	77
1.7.	Выводы к первой главе	94
Глава	2. Исследование распределения примеси в двухсторон-	
нем	и перемешивателе бегущего магнитного поля	97
2.1.	Объект исследования	98
2.2.	Метод исследования	99

2.3.	Анализ схем подключения обмоток индуктора и направления
	бегущего магнитного поля
2.4.	Моделирование переноса частиц в двумерной постановке 110
2.5.	Трехмерный анализ динамики распределения частиц 114
2.6.	Влияние размеров емкости жидкого металла на эффективность
	отвода тепла и электромагнитного перемешивания
2.7.	Выводы ко второй главе
Глава З	. Исследование кристаллизации под действием бегуще-
го м	агнитного поля
3.1.	Объект исследования
3.2.	Метод исследования
3.3.	Результаты
3.4.	Выводы к главе
Заключ	тение
Список	литературы
Прилох	кение А. Кривая намагничивания листовой электротех-
ниче	еской стали (холоднокатаной) марки 3413
Прилох	кение Б. Основные размеры экспериментальной установ-
ки, ј	рассматриваемой в главе 3
Прилоз	кение В. Частоты пульсаций БМП для главы 3 181

Введение

Актуальность и степень разработанности темы

Электромагнитное управление и контроль потоков электропроводной жидкости широко применяется в металлургии. Возбуждение течений жидкого металла позволяет интенсифицировать процессы тепло- и массобмена многих технологических операций. Более того, данное явление позволяет контролировать свойства материалов путем воздействия на конвективные потоки в процессе кристаллизации. Перемешивание переменным электромагнитным полем многократно показало свою эффективность в различных технологических приложениях. Однако, ряд исследований проведен экспериментально, для частных случаев, и поэтому, для более полного понимания процессов протекающих в непрозрачном жидко-металлическом вторичном элементе необходимы дополнительные численные исследования. Полученные при этом результаты способны повысить эффективность технологических операций и устройств электромеханических преобразователей данного типа.

Вопросами исследования процессов в электропроводящей жидкости под воздействием переменных магнитных полейзанимаются научные коллективы под руководством Колесниченко И.В. и Хрипченко С.Ю. (Институт механики сплошных сред), Тимофеева В.Н., Хацаюка М.Ю. (Сибирский федеральный университет), Кириллова И.Р., Обухова Д.М. (НИИЭФА), Gerberth G., Eckert S. (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf), Jakovičs A. (University of Latvia), Baake E., Nacke B. (Leibniz University Hannover), Fautrelle Y. (Grenoble Institute of Technology), Mikhailovich B. (Ben-Gurion University of the Negev), Bojarevics V. (University of Greenwich), Wang X. (University of Chinese Academy of Sciences). Так же в Уральском федеральном университете с 60-х годов двадцатого века существует школа исследующая электромагнитное перемешивание и транспорт жидкого металла преимущественно с точки зрения электромеханики.

Процессы протекающие в МГД машинах являются связанными и не могут рассматриваться в рамках отдельной дисциплины. Это положение делает данную область исследования междисциплинарной, сочетая подходы не только электромеханики, а также механики жидкости, теплотехники и металлургии. Поэтому по изложению данная работа может отличаться от классических электромеханических работ. Что объясняется необходимостью комплексного подхода к рассмотрению области МГД техники.

В настоящее время ведутся исследования по влиянию электромагнитного перемешивания различных сплавов на их макро- и микроструктуру при кристаллизации, эффективности процессов перемешивания пассивной примеси и гомогенизации температуры в объеме расплава, а также технологии выращивания полупроводниковых кристаллов. Активно ищутся оптимальные и предлагаются альтернативные технологии (техники) и устройства электромагнитного перемешивания. Для этого актуальным и необходимым становится более глубокое понимание физических процессов, протекающих в жидком металле под воздействием бегущего магнитного поля в различных технологических приложениях.

Цель диссертационной работы состоит в описании процессов теплои массообмена в жидкометаллическом вторичном элементе МГД машины с бегущим магнитным полем.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

- разработка численных моделей линейных индукционных машин с жидкометаллическим вторичным элементом для решения связанных задач на основании МКЭ и МКО;
- верификация результатов расчетов моделей путем сравнения с экспериметально полученными данными;

- анализ влияния параметров бегущего магнитного поля на потоки, массообмен, и затвердевание жидкого металла;
- анализ влияния пульсирующей и реверсивной модуляции во времени магнитного поля индукторов на эффективность перемешивания;
- формулировка рекомендаций для исследований и проектирования устройств данного типа.

Научная новизна определяется разработанными численными моделями электромагнитного перемешивания металлического расплава воздействием бегущего магнитного поля. С их помощью получены следующие результаты:

- характеристики влияния положения и формы фронта кристаллизации на удельное объемное электромагнитное усилие в жидкой фазе под действием бегущего магнитного поля;
- зависимости интенсивности гидродинамических течений расплава от электрических параметров и характера питания обмоток для случая с односторонним индуктором;
- динамика распределения нерастворенных, твердых частиц в объеме жидкого металла под действием бегущего магнитного поля, оценка влияния параметров индуктора и размеров емкости на эффективность перемешивания;
- числено рассчитан процесс затвердевания чистого металла под воздействием бегущего магнитного поля. Экспериментально и численно произведен анализ влияния пульсаций поля на параметры течений расплава.

Теоретическая и практическая значимость выражается в полученных численных моделях, которые адекватно отображают физические процессы в жидком металле при электромагнитном перемешивании. С помощью этих моделей выполнен анализ и определены зависимости процессов теплои массообмена в жидком металле под действием бегущих магнитных полей.

Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы для исследования процесса электромагнитного перемешивания, а также эксплуатации и проектирования магнитогидродинамических машин с бегущим магнитным полем.

Методология и методы исследования Основным подходом исследования, используемым в диссертации, является численное моделирование. Данное математическое моделирование осуществлялось с помощью методов конечных элементов и объемов. Для реализации решения уравнений на основе указанных методов использовались коммерческие пакеты COMSOL Multyphysics, Ansys Meachanical APDL и Fluent. Методом конечных элементов (МКЭ) выполнялся расчет электромагнитного поля, гидродинамических течений и трактории сферических частиц. Методом конечных объемов (МКО) решались задачи гидродинамики, температурного поля и фазового перехода (затвердевания). Основной особенностью электромагнитного расчета является использование безиндукционной постановки. Течения жидкого металла вычислялись с помощью различных моделей турбулентности.

Верификация численных расчетов выполнялась в несколько этапов. Первый этап заключался в сравнении с измереными значениями магнитной индукции и электромагнитного усилия. На втором этапе проводилось измерение скорости жидкого металла при помощи Допплеровского измерителя скорости и сопоставление с расчетными данными. Положение фронта кристаллизации верифицировалось посредствам сравнения со снимками, полученными методом нейтронной радиографии.

7

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

- Верифицированные численные модели связанных электромагнитных и гидродинамических полей с учетом фазового перехода и вычислением траекторий движения частиц.
- 2. Полученные характеристики гидродинамических течений, распределения примеси и процесса затвердевания под действием бегущего магнитного поля.
- Исследование и анализ применения модулированного во времени (пульсирующего и реверсивного) бегущего магнитного поля на процесс электромагнитного перемешивания.

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается сравнением результатов расчета, полученных различными методами с данными экспериментов и результатами других авторов.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались автором на следующих конференциях:

- IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 2016, 2017, 2018.
- XX Зимняя школа по механике сплошных сред, ИМСС УРО РАН, г. Пермь, 2017.
- Конференция «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве», УрФУ, Екатеринбург, 2017.
- VIII International Scientific Colloquium Modelling for Materials Processing (MMP-17), Riga, Latvia, 2017.

- Третья конференция молодых ученых Уральского энергетического института, Екатеринбург, 2018.
- Третья Российская конференция по магнитной гидродинамике (РМГД-18), ИМСС УРО РАН, Пермь, 2018.
- The 9th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials (EPM-18), Hyogo, Japan, 2018.
- International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources (HES-19), Padua, Italy, 2019.
- XXI Международная научная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 2019.
- XXV Конференция «Алюминий Сибири», Красноярск, 2019
- Всероссийский форум Математическое моделирование в естественных науках, Пермь, 2019

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 15 печатных работах, из них 8 статей в рецензируемых журналах [1–8] и 7 публикаций в сборниках трудов конференций [9–15].

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 3 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 181 страниц, из них 160 страницы текста, включая 87 рисунков. Библиография включает 178 наименований на 16 страницах.

Обзор литературы

Переход к ресурсосберегающей энергетике является одной из приоритетных задач научно-технической стратегии развития Российской Федерации. Одним из способов повышения энергоэффективности металлургической и машиностроительной промышленности является использование устройств для электромагнитной обработки жидких металлов. Такие устройства позволяют повысить экономическую эффективность технологических процессов плавки, подготовки и транспортировки расплавов. Другим применением электромагнитной обработки жидких металлов является электромагнитное перемешивание жидкой фазы кристаллизующего слитка [16]. Этот метод позволяет изменить структуру и улучшить механические свойства литых слитков. Этот же метод активно используется для производства композиционных материалов на основе легких цветных металлов и в технологии выращивания полупроводниковых кристаллов.

Исследования в мире. Вопросы прикладной магнитогидродинамики рассматриваются с середины прошлого века и по сей день. Основные результаты отражены в ряде монографий и книг [17–24]. Своеобразный бум развития магнитной гидродинамики вовлек много исследователей и школ со всего мира в активное исследования как теоретических, так и прикладных аспектов этой новой на тот момент науки. Данные, ставшие уже классическими работы достаточно полно описали процессы МГД технологии в различном, широком спектре приложений. Однако эта классическая теория основана на достаточно ограниченных экспериментах, на аналитических методах и подходах. Некоторые авторы уже тогда отмечали [25], что одним из главных вызовов будущей науки будет поиск адекватного и надежного метода для исследования турбулентных потоков, которые чаще всего вызывают это перемешивающее действие.

Вторая волна исследований началась уже в конце 80-х годов прошлого века, она была связана с поиском и широким применением как современных экспериментальных так и численных инструментов. Можно также отметить ряд монографий, которые наиболее полно описывают современное развитие исследований в области магнитной гидродинамики [26–34]

Исследования в Уральском федеральном университете. Параллельно с этими исследованиями развивалась школа исследования МГД машин для перемешивания и транспорта рассплавленного метала в металлургических приложениях в Уральском политехническом институте, позднее в Уральском федеральном университете. Впервые это было начато Резиным М.Г. [35,36]. Проектирование и расчет таких машин, преимущественно основанных на линейных индукционных машинах, производился с использованием электромеханического приближения.

Позднее, коллективом авторов был проведен ряд исследований по применению бегущего магнитного поля для перемешивания в процессе кристаллизации [37–39]. Показано позитивное влияние интенсивных течений в жидкой фазе кристаллизующегося слитка на измельчение литого зерна слитков разных сплавов цветных металлов.

Другим направлением было исследование линейных индукционных машин, в том числе в МГД приложении в качестве насосов для жидких металлов [40–43]. Был предложен и успешно применен метод детализированных схем замещения, изначально для электромагнитного расчета, а позднее для расчета тепловых и гидродинамических полей [44].

Актуальность темы. Перемешивание и транспорт жидких металлов переменными магнитными полями были темой исследования многих диссерта-

ционных работ как в России, так и в Мире, что может говорить о научной актуальности данной исследовательской деятельности в указанной тематике. Как некоторые приложения, для которых в последнее десятилетие были написаны диссертационные работы приведены в таблице 1. В данной таблице собран ряд значимых диссертаций в области прикладной магнитной гидродинамики за последнее десятилетие.

Таблица 1. Некоторые диссертационные работы в области прикладной магнитной гидродинамики за последнее десятилетие

Технологическое приложение	Диссертация	Институт	Год
Перемешивание жидких металлов с помощью	Идиятулин А.А. [45]	${ m Vp}\Phi{ m y}^1$	2010
ВМП и БМП	Бычков С.А. [46]	УрФУ	2011
	Фаткуллин С.М. [47]	УрФУ	2011
	Koal K. [48]	TU Dresden ²	2011
	Сарапулов С.Ф. [49]	УрФУ	2011
	Хацаюк М.Ю. [50]	$C\Phi Y^3$	2013
	Hachani L. [51]	$SIMaP^4$	2013
	Фризен В.Э. [52]	УрФУ	2014
	Авдулов А.А. [53]	СФУ	2015
	Garrido Pacheco M. [54]	SIMaP	2015
	Павлинов А.М. [55]	$\rm MMCC^5$	2016
	Болотин К.Е. [56]	УрФУ	2018
	Хацаюк М.Ю. [57]	СФУ	2019
МГД течения в случае однофазного индуктора	Umbraško A. [58]	LU^6	2011
(ИТП, ЛП, ЭМК ⁷)	Хацаюк М.Ю. [50]	СФУ	2013
	Ščepanskis M. [59]	LU	2014
	Spitāns S. [60]	LU	2015
	Мусаева Д.А. [61]	КГЭУ ⁸	2017
	Хацаюк М.Ю. [57]	СФУ	2019

 $^{^1}$ Ур
ФУ — Уральский федеральный университет

 $^{^2~}$ TU Dresden — Technischen Universität Dresden

³ СФУ — Сибирский федеральный университет

 $^{^4}$ SIMa
P-Science et Ingénierie des Matériaux et Procédés

 $^{^5}$ ИМСС — Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук

 $^{^{6}}$ LU — Latvijas Universitāte

 $^{^{7}}$ Индукционныя тигельная п
ечь, левитационная плавка, электромагнитный кристаллизатор

 $^{^8}$ КГЭУ — Казанский Государственный Энергетический Университет

Таблица	1.	Некоторые	диссертационные	работы	В	области	прикладной	магнитной	гидро-
динамик	из	а последние	е десятилетие (окс	ончание)					

Технологическое приложение	Диссертация	Институт	Год
Транспорт жидких металлов (МГД-насосы)	Ковальский В.В. [62]	СФУ	2010
	Сарапулов С.Ф. [49]	УрФУ	2011
	Чайка П.Ю. [63]	НИИЭФА ⁹	2013
	Тарасов Ф.Е. [64]	УрФУ	2015
	Goldsteins L. [65]	SIMaP	2015
	Горемыкин В.А. [66]	СФУ	2015
	Martin Lopez E. [67]	SIMaP	2018
Электромагнитный контроль потоков в МНЛЗ ¹⁰	Miao X. [68]	HZDR ¹¹	2014
	Luca Marioni [69]	$CEMEF^{12}$	2017
	Christoph Kratzsch [70]	TU Freiberg ¹³	2019
Перешивание и транспорт жидких металлов с по-	Beinerts T. [71]	LU	2019
мощью постоянных магнитов			
Электромагнитное пермешивание при	Dadzis K. [72]	TU Freiberg	2012
вырацивании полупроводниковых кристаллов	Geža V. [73]	LU	2015
	Хлыбов О.А. [74]	ИМСС	2015

Электромагнитное перемешивание. В данной работе, наибольший интерес представляет технологическое приложение в перемешивании жидких металлов, представленное в таблице 1. Однако все остальные из представленных приложений также представляют определенный интерес, поскольку представленные в них работы могут использовать подходы методы исследования актуальные в смежных приложениях.

Рядом авторов, как в рассмотренных монографиях, так и в диссертациях отмечаются позитивные влияния перемешивания переменными магнитными полями, которые можно обобщить в 2 пункта:

 $^{^9}$ НИИЭ
ФА — Науч.-исслед. ин-т электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова

 $^{^{10}\ \}mathrm{MHJ3}-\mathrm{Maiiiuha}$ непрерывного литья заготовок

 $^{^{11}\,\}mathrm{HZDR}-\mathrm{Helmholtz}\text{-}\mathrm{Zentrum}$ Dresden-Rossendorf

 $^{^{12}}$ CEMEF — Centre de Mise en Forme des Matériaux

¹³ TU Freiberg – Technische Universität Bergakademie Freiberg

- выравнивание примеси по объему
- выравнивание градиента температуры по объему

Перемешивание в процессе кристаллизации носит более сложный характер и вынесено в отдельный раздел 4, который будет представлен ниже.

Воздействие переменного электромагнитного (ЭМ) поля на электропроводящую жидкость генерирует силы Лоренца в пределах ее объема и приводит жидкость к движению. Таким образом, магнитное поле действует как перемешивающее устройство, и оно, может быть сформировано таким образом, чтобы обеспечить любую желаемую схему перемешивания [25]. В последние десятилетия многочисленные промышленные применения этого явления были успешно разработаны. От многотонных миксеров и электродуговых печей [75,76] до выращивания полупроводниковых кристаллов [72] электромагнитное перемешивание может повысить энергоэффективность технологических операций и улучшить качество литого материала [16,29].

Конструктивно применение переменного магнитного поля для воздействия на расплавы можно разделить на три случая: однофазная катушка (самый распространенный случай ИТП), вращающееся и бегущее магнитное поле. В последнем случае бегущее магнитное поле (БМП) генерируется индуктором или, другими словами, статором линейной индукционной машины. И это устройство имеет несколько отличий по сравнению с вращающимися машинами.

Настоящая работа сконцентрированна на исследовании применения только бегущих магнитных полей. Влияние бегущих магнитных полей (БМП) на электропроводящие жидкости широко применяется в современной промышленности. Например, на стадии приготовления расплава в миксерах или в электродуговых сталеплавильных печах использование магнитогидродинамических (МГД) пермешивателей может значительно повысить энергоэффективность операций. [76, 77]. Использование индукционных МГД-насосов на основе БМП успешно применяется как в металлургии, так и в атомной энергетике [78–80]. Электромагнитное перемешивание с помощью БМП в процессе кристаллизации металлов [81] и полупроводниковых кристаллов [72, 82] является одним из альтернативных способов повышения качества материала. В связи с этим исследования, направленные на повышение эффективности электромагнитного перемешивателя БМП, могут привести к значительному экономическому эффекту. Рассмотрим более детально некоторые приложения электромагнитного перешивания.

1. Электромагнитное перемешивание с помощью бегущего магнитного поля в прямоугольной емкости

Конструктивно электромагнитное перемешивание бегущим магнитным полем можно разделить на три типа. Первый и наиболее часто встречающийся – это перемешивание жидкого металла находящемся в цилиндрический емкости или тигле индуктором бегущего магнитного поля с кольцевыми обмотками или другими словами статором от цилиндрической линейной индукционной машины. Жидкость помещается в индуктор и БМП приводит в движение расплав. В этом случае так же отсутствует поперечный краевой эффект.

Второй способ – это размещение одного или двух плоских индукторов бегущего магнитного поля у боковых поверхностей цилиндрической емкости. Эффективность данного электромагнитного воздействия будет ниже. Однако, достоинством такой конфигурации является простота и легкость встраивания в уже эксплуатируемое оборудование.

И третий, наиболее простой и в то же время широко представленный в литературе способ перешивания с помощью БМП это силовое воздействие на

расплав в прямоугольной емкости. В данном случае плоский индуктор бегущего магнитного поля или другими словами линейная индукционная машина (ЛИМ) устанавливается у стенки прямоугольной емкости с жидким металлом активной поверхностью к расплаву.

Рассмотрим последний случай более подробно на примере установки, используемой в работе [83]. Внешний вид установки показан на рисунке 1. Она состоит из плексигласовой прямоугольной емкости, в которой находится жидкий металл. Под этой емкостью устанавливается статор ЛИМ, который подсоединяется к трехфазному источнику. Как известно, статор ЛИМ генерирует бегущее магнитное поле, которое проникает через технологический зазор и замыкается по жидкому металлу. В электропроводном металле под действием переменных магнитных потоков возникают вихревые токи. Взаимодействие этих токов с первичным магнитным полем приводит к возникновению электромагнитных усилий в объеме жидкого металла. Эти силы сонаправлены с бегущим магнитным полем и сконцентрированны на нижней поверхности. Такое силовое воздействие приводит к одноконтурной циркуляции расплава вокруг оси *у*.



Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки из [83]

Представленная экспериментальная установка находится в лаборатории SIMaP (Grenoble, Франция). Спроектированна она таким образом, что ширина емкости много меньше ширины индуктора ЛИМ. Это позволяет получать равномерное распределение магнитной индукции по ширине и минимизировать азимутальную составляющую потока расплава. Получившийся поток можно назвать квазидвумерным, если пренебречь неравномерностью распределения *у*-компоненты скорости. Такой поток более прост для исследований процессов тепло и массобмена под таким силовым воздействием. Данное сочетание ЛИМ и емкости жидкого метлаа, признано удачным и позднее в Университете имени Бен-Гуриона (Израиль) [84] и Институте механики сплошных сред (Пермь) [6], были созданы подобные установки.

Из рисунка 1 также видно, что на боковой поверхности емкости расположен датчик измерения скорости, таких датчиков обычно располагают до 4, как, например, в работах [84,85], чтобы можно было получить более полную картину течений. Более того, передняя стенка позволяет устанавливать на ней до 50 термопар [86]. Это делает данную установку достаточно удобным для экспериментальных измерений.

Применение постоянных магнитов Альтернативным способом создания интенсивных течений в прямоугольной емкости является передвижение или вращение постоянных магнитов. Хотя, только в одном случае движение постоянных магнитов создает нечто похожее на бегущее магнитное поле [87], а в других случаях используется вращающиеся постоянные магниты возле боковых стенок [88,89], данные исследования также представляют интерес. Тип емкости и силового воздействия в этих случаях таков, что генерирует похожие структуры гидродинамических потоков, как и в случае одностороннего БМП. В таких экспериментальных установках исследуются также скорости металла.

Предлагается более подробно рассмотреть случай ЭМ перемешивания жидкого галлия, исследованный Dzelme и др. [90, 91]. Расчет распределе-

ние скорости достигается с помощью связки Elmer и OpenFOAM¹⁴. Электромагнитная часть рассчитывается в пакете Elmer методом конечных элементов (МКЭ) в квазистационарном приближении (частотной области) и учитывается скорость жидкости. Гидродинамические потоки рассчитываются в OpenFOAM с помощью метода конечных объемов (МКО) и турбулентной модели k - ω RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes). Проведено сравнение численных данных и данных, полученных с помощью нейтронной радиографии (рис. 2).



Рис. 2. Сравнение числено полученного поля скоростей (слева) и снимок, сделанный при помощи метода нейтронной радиографии (справа) из [90]

Анализируя работы по перемешиванию как односторонним индуктором БМП, так и постоянными магнитами, можно отметить, что исследуются они как численно, так и экспериментально. Рассматриваемые установки представляют собой довольно простые конструктивные решения, реализованные в лабораторном масштабе. Однако данный класс устройств позволяет достаточно эффективно исследовать ряд гидродинамических характеристик, а также процессы затвердевания, которые будут представлены позднее. Обобщение работ, посвященных данной теме приведено, в таблице 2.

¹⁴ Связка данных пакетов осуществляется при помощи EOF library https://eof-library.org/

Автор	Модель турбулентно-	Затвердевание, метод	ОΠ	Сетка для ГД	Материал и размер
	СТИ				
Dadzis [92]	В настоящем исследовании		GetDP (MK9, $\Im M$), Elmer	Ш естигранная сетка с 42×42 \times	${\rm Ga}~100\times100\times75~{\rm mm}^3$
	модель турбулентности не		(МКЭ, тепл.), OpenFOAM	27 = 47628 элементами	
	используется при расчете		(МКО, ГД)		
	потока. Re $= 1400$				
Колесниченко и др. [85, 93–95]	$k-\omega$ SST	Да, экспериментально	COMSOL (MK9)	76554 шестигранных элементов	$\rm GaSnZn~450\times20\times75~{\rm mM}^3$
Ben David et. al [87,	ламинарный поток	Да, метод энтальпия-пори-	COMSOL (MK3)	$10,469$ элементов с 60,000 $\rm DOF^{15}$	Ga (и GaInSn [87]) в пря-
88, 96]		стость (С. Prakash, V.R.		и 32,144 с 176,610 DOF [96] [88],	моугольной емкости размером
		Voller [97])		80,485 и число степеней свободы	$0.06 \times 0.06 \times 0.09 \text{ m}^3$.
				было 73,550 для [87]	
Avnaim et. al [84,98,	Максимальное число Рей-	Да, Многодоменный метод	COMSOL Multiphysics 5.0	21,500 Элементов [84] и 50,000	Галлий в емкости с размерами
[66	нольдса не превышает	(Multi-Domain method)	(EMM)	[99], 50,400 для VOF метода и	$0.06 \times 0.06 \times 0.09 \text{ m}^3$.
	2500. Прямое 3D-числен-			22,890 для много доменной моде-	
	ное моделирование (DNS)			ли [98].	
Hachani et. al [86,	Realizable k- ϵ	Трехфазная усредненная	ANSYS FLUENT (MK3)	сетка, содержащая 100×60×15	Ga–In–Sn сплав $0.1\times0.06\times0.01$
100, 101		по объему модель ¹⁶		элементов	M3
Wang et. al [83, 102]	2D теоретическая модель	Her	Аналитически	2D теоретическая модель	GaInSn 0.1 \times 0.06 \times 0.01 ${\rm m}^3$
Köppen et. al [103,	Экспериментальное	Да	Эксп.	Эксп.	$0.12 \times 0.11 \times 0.02 \ {\rm m}^3$ (2 индук-
104]					ropa)
Dzelme, Ščepanskis	$k-\omega$ SST	Her	Elmer (MKЭ) и	37500 элементов	галлий $0.12(100,75)\!\times\!0.11\!\times\!0.02$
et. al [89, 90, 105]			OpenFOAM (MKO)		M3
Oborin et. al [106]	2D $k - \epsilon$ модель турбулент-	Her	ОрепFОАМ (МКО) для по-	$500 \times 250 = 125000$ контролируе-	сплав галлия (Ga87.5%,
	ности		ля скоростей и аналитиче-	мых объемов	Sn10.5%, Zn2.0%); $l_1=24$ cm,
			ское решение для электро-		$l_2=18$ см и $h{=}9.5$ см (асиммет-
			магнитного усилия		ричная емкость)

Таблица 2. Исследования ЭМ перемешивания расплава в прямоугольной емкости

¹⁵ от англ. Degrees of freedom – Степени свободы

 16 A three-phase volume averaged equiaxed model

19

2. Исследования по применению модулированных во времени магнитных полей

Необходимо отметить, что индукционные МГД машины из-за большого технологического зазора и относительно низкой электропроводности жидких металлов имеют низкую эффективность по сравнению с классическими индукционными машинами. Поэтому, исследователи, занимающиеся вопросами электромагнитного перемешивания, находятся постоянно в процессе поиска резервов по увеличению эффективности данного процесса. В этой связи недавние работы показали перспективность использования метода временной модуляции переменного магнитного поля. Заключается данная техника в том, что магнитное поле не действует постоянно, а либо периодически прерывается паузами, либо меняет свое направление на противоположное. Этот метод позволяет значительно повысить эффективность электромагнитной обработки расплавов с постоянным или сниженным энергопотреблением. Однако природа образования и поведения гидродинамических течений электропроводящей жидкости при таком внешнем воздействии до конца не исследована и является актуальным предметом исследований.

Одни из первых об этом говорят S. Eckert и др. в работе [107], и основная идея заключается в том, что классическое вращающееся магнитное поле модулируется во времени периодическим сигналом либо реверсивной, либо пульсирующей функциями, которые изображенны на рисунке 3.

Данные функции были применены к перемешивателю с вращающимся магнитным полем, и исследовано как численно, так и экспериментально поведение жидкого металла под таким воздействием. Более того во второй части исследования [108] показано позитивное влияние на кристаллизацию в таких условиях. Данное, нестационарное воздействие генерирует нестабильную структуру течения расплава, что не позволяет возникновению центральной



Рис. 3. Функция силы Лоренца, модулированная во времени из [107]. а – пульсирующее, b – реверсивное усилия

сегрегации, характерной для данного случая, там самым способствует улучшению макроструктуры слитка.

Применение модуляции для бегущего магнитного поля, воздействующего на электропроводную жидкость, представленно в работах [83,102]. В первой части приводятся результаты экспериментов с низкотемпературным сплавом GaInSn. В качестве источника БМП использована линейная индукционная машина. Измерения проводились при помощи ультразвукового доплеровского анемометра. Реверсирование магнитного поля, с частотой от 0.05 до нескольких Гц, производится переключением двух фаз. При переключении фаз создается коммутационная пауза, равная 80 миллисекунд, за которую скорость потока снижается до нуля. Во второй части работы проведено исследование с помощью аналитической модели гидродинамических течений в двухмерной постановке. Результаты расчета и экспериментальных значений скорости под воздействием реверсивной модуляции показаны на рисунке 4.

В результате исследований определено, что при низкой частоте модулирования скорость на каждом полупериоде возрастает экспоненциально и ее рост замедляется. А при высокой частоте полупериод слишком короток для достижения устойчивой турбулентности. Данное явление является достаточно значимым и для наиболее эффективной работы рекомендуется подобрать



Рис. 4. Распределение скорости под воздействием модулированного магнитного поля [102] частоту таким образом, чтобы переключаться на «колене» функции. Исходя из полученных кривых, предложена формула определения оптимальной

частоты модуляции магнитного поля:

 $f_m = \frac{1}{2t_s},$

(1)

где время насыщения $t_s = \frac{a^2}{v_t}$, a - полуширина емкости в направлении оси y, v_t - турбулентная вязкость.

Численное исследование роста монокристалла под воздействием пульсирующего бегущего магнитного поля представлено в работах [109, 110]. Исследованы случаи с разной частотой, амплитудой и знаком модуляции поля. Расчет произведен в трехмерной постановке с использованием $k -\omega$ SST (Shear Stress Transport) модели турбулентности. Отмечается, что в процессе кристаллизации при высоком значении градиенты силы плавучести также учитываются. Результаты показали превосходство метода синусоидальной амплитудной модуляции переменного тока с частотой импульсов $f_p = 0.3$ Гц и амплитудой импульса 50% от немодулированного значения переменного тока. Предложенная методика позволила быстро и просто улучшить процесс, избегая дорогостоящих аппаратных изменений. Полученные в результате значения скорости жидкой фазы для одного из случев показаны на рисунке 5.



Рис. 5. Значение скорости расплава, находящегося под действием модулированного БМП на разной высоте [109]

Первая попытка численного анализа течения расплава при реверсивном БМП была сделана Обориным и др. [106]. Представлены двухмерные численные расчеты процесса гомогенизации примеси в объеме жидкого металла. Бегущее магнитное поле генерируется индуктором, расположенным снизу ванны с металлом. Модель решается посредством метода конечных разностей и конечных объемов в пакете OpenFOAM. Для вычисления гидродинамических течений с использованием RANS k- ε модели, с добавлением уравнения переноса пассивной примеси. Результаты расчета представлены на рис. 6. Авторами отмечается, что при реверсивной модуляции структура потока разбивается на несколько малых вихрей, при этом достигается наибольшая эффективность перемешивания. Результаты показали, что бегущее магнитное поле, направление которого периодически менялось, увеличивает эффективность перемешивания в несколько раз.

В работах Мусаевой Д.А. [61, 111, 112] исследуется применение пульсирующей модуляции для однофазного индуктора, на примере индукционной тигельной печи. Показано, что применение периодической пульсации магнитного поля может привести к увеличению турбулентной кинетической энергии и следовательно к интенсификации процессов теплообмена, а также показан



Рис. 6. Поле скоростей при реверсивной модуляции БМП с разной частотой [106]

эффект сокращения зерна структуры слитка в приложениях к кристаллизации.

В работе Hachani et al. [86] продемонстрировано, как модулированное БМП может влиять на затвердевание двухкомпонентного сплава. Экспериментальное исследование подтверждает, что вынужденная электромагнитными силами конвекция в этих условиях способствует образованию равноосных зерновых структур, эффективно уменьшает образование макросегрегаций и развитие сегрегированных каналов. Эти результаты демонстрируют способ улучшить качество затвердевших металлов.

Представленные исследования носят в основном экспериментальный характер. Однако, поскольку жидкие металлы полностью непрозрачны, и такие исследования не могут показать полную картину процесса электромагнитного перемешивания. В сущности у нас нет полного объяснения взаимодействия между модулированным БМП и конвективными потоками. Численное моделирование является очень привлекательным инструментом для понимания процессов внутри непрозрачного потока расплава. На данный момент такие исследования проведены в недостаточном объеме и для некоторых частных случаев.

Таким образом, в научном сообществе существует твердое мнение, что метод модуляции во времени магнитного поля имеет большой потенциал повышения эффективности. В частности, определение влияния частоты пульсаций и реверса на параметры гидродинамического потока предлагается исследовать как численно, так и экспериментально.

В таблице 3 приведено обобщение работ, посвященных исследованию модулированного магнитного поля для электромагнитного перемешивания.

Автор и ссылка	Тип магнит-	Частота модуляции	Численное / эксперименталь-	Оптимальный критерий
	ного поля		ное	
Eckert et. al [107,108]	BMII	0.2; 0.475; 0.77 Гц для пульсирующего и 0.02; 0.08; 0.15; 0.2 Гц для реверсивного случая [107]. Для кристаллизации 0.1, 0.2, 0.3, 0.35, и 0.45 Гц. [108]	Числено (для кристаллизации) и экспериментально	0.15 Гц для максимальной интенсивности вторичного потока и 0.45 Гц для исключения сегрегации.
Wang X. et. al [83, 102]	ВМП	Исследованные частоты модуляции составляют 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0,5, 0,2, 0,1	Аналитическое и Эксперимен- тальное с помощью УДА	Оптимальная частота модуляции, которая позволила бы достичь насыщения, $f_m = \frac{1}{2t_s}$ где время насыщения $t_s = \frac{a^2}{v_t}, a$ - полушири-
Räbiger et. al [113]	BMII	и 0,00 г.ц. (реверсивная модуляция) Импульсная модуляция с периодом времени 2 - 6 сек. и 10 - 30 сек.	Экспериментальное с помощью УДА	на емиости <i>y</i> , <i>v</i> ^t - эффективная вязмость. Найдены зависимости вторичной интенсивности в настоящее время от длительности импульсного цикла для различной интенсивности
				BMII.
Oborin et. al [106]	BMII	Обратные частоты 0,08; 0,1; 1; 1,25; 10 Гц	Численный в ОрепFOAM и экспериментальный ульгразвуковым доплеровским анемометром	Введен коэффициент гомогенности: $\xi(t) = \sqrt{\frac{\sum (C(\tau) - C_i(\tau))^2 _{\tau=t}}{(C(\tau) - C_i(\tau))^2 _{\tau=0}}}$ т.е. через соотношение между стандартным отклонением концентрации примеси C_i после перемешивания (в момент времени t) и тем же стандартным отклонением в начальный момент времени $t = 0$. Характеристическое время перемешивания t_{eff} , которое определяет время за которое параметр $\xi(t)$ синжается до $\xi(t)_{eff}$ также оценивается
Dropka et. al [109, 110]	BMII	Пульсирующее БМП направленное вниз с частогой ог 0.5 до 0.05 Гц для разных амплитуд модуляции.	 3D численный анализ. Течение в расплаве описывалось моделью <i>k</i>ω - SST ПО ANSYS CFX 13.0 и Ansys Classic. 	Сравнение радиальных профилей температуры в середине распла- ва для различных модулированных потоков с немодулированным, обычным БМП. Наиболее многообещающая конфигурация потока в этом исследовании была получена для синусоидального режима
				включения-выключения БМП с $f_p=0.3$ Г ц. Также исследуется динамика переноса массовой доли фракции
Musaeva et. al [111]	Однофазная катушка	Пульсирующее значение силы Лоренца применялось в диапазоне частот модуляции 0,05 $\Gamma_{\rm L} < f_p < 1$ $\Gamma_{\rm L}.$	Числено с помощью программно- го пакета ANSYS Fluent, модель турбулентности LES.	Исследовано влияние импульсного магнитного поля на турбулент- ную кинетическую энергию течения расплава. Чтобы определить влияние низкочастотной импульсной силы Лоренца на перемеши- вание в расплаве, было выполнено моделирование гомогенизации
Hachani et. al [86]	БМП	Направление электромагнитной си- лы периодически меняется на про-	Экспериментально (термопары; химический метод в сочетании с	Дифференциальные параметры были проанализированы экспери- ментально для оценки влияния БМП на процесс затвердевания: 1. Эволюция температурного поля.
		тивоположное. Частога инверсии ре- верса равна 0,125 Гц. Электромаг- нитный	техникой индуктивно-связанной плазмы и рентгеноструктурным анализом)	 Конечная металлографическая структура и размер зерна. Распределение концентрации свинца (макро- и мезосегрегации) и морфоло- гия сегрегационных каналов.

Таблица 3. Исследования модуляции/пульсации магнитного поля

9
Ξ
E
EG .
E.
Ë
X
ē
J
H-
Ĕ
C
Ĕ
-
2
E
Ĕ
F
И
Η
Ŀ
Гa
\geq
М
11
P
F
ö
Р
E
<u>S</u>
<u>, н</u>
E I
Ħ
Fr
ЦЦ
циви
рляц
цияци
рияцуляц
рикцуляц
н модуляц
ривидуляц
рияпудом вин
рния модуляц
вания модуляц
ования модуляц
дования модуляц
едования модуляц
ледования модуляц
зследования модуляц
Ісследования модуляц
Исследования модуляц
. Исследования модуляц
3. Исследования модуляци
а З. Исследования модуляц
ца 3. Исследования модуляц
ица 3. Исследования модуляц
лица З. Исследования модуляц
блица 3. Исследования модуляц
аблица 3. Исследования модуляц
Таблица 3. Исследования модуляци

Автор и ссылка	Тип магнит-	Частота модуляции	Численное / эксперименталь-	Оптимальный критерий
	ного поля		ное	
Wang B. et. al [114]	Спиральное МП	периодически реверсивная мо- дуляция с частотами f_m = 0,025;0,05;0,1;0,25 Гц	ультразвуковая допилеровская анемометрия (UDV, DOP 3010) использовали для количествен- ного измерения потока жидкого металла.	Получены усредненные осевые и азимутальные скорости для различных ча- стот модуляции с различным соотношением сторон емкости. Оптимальная частота модуляции, при которой магнитное поле могло бы эффективно пере- мешивать растворенное вещество на фронте затвердевания, существует как во вторичном, так и в первичном, осевом потоке: 0,1 Гц и 0,625 Гц, соответ- ственно.
Li et. al [115, 116]	BMII	по часовой стрелке или/и против ча- совой стрелки с обратным ходом со временем наложения, которое было установлено на 0.05, 0.1, 0.2, 0.35 и 0.5 с.	Экспериментально.	Измерялся средний диаметр зерна и средняя длину зерна затвер- девшего слитка. Микроструктуры в магниевом сплаве AZCa912 из- мельчились с увеличением времени обратного наложения и достиг- ли минимума около 120 мкм в среднем диаметре.
Musaeva et. al. [103]	BMII	Пульсирующая модуляция 0,1, 0,3, 0,5, 1, 2 Гц.	Экспериментально с помощью нейтронной радиографии	Экспериментально доказано, что более плоская форма фронта за- твердевания и уменьшенная неравномерность границы раздела фаз может быть получена с помощью значения f_P ближе к характерной частоте циркуляции расплава.
Khripchenko et. al [117]	BMII # BMII	Реверсивная модуляция с периода- ми 8, 16, 24 и 32 с	Числено с помощью Ansys CFX и экспериментально	Выло проанализировано несколько параметров: количество зерен, твердость по Бринеллю и удельная кинетическая энергия. Анализ результатов экспери- мента выявил экстремумы на кривой, иллюстрирующие размер зерна в струк- туре слитка, зависящие от периода обращения вращающегося магнитного по- ля. Выявлено, что в экспериментально изучениом периоде обратных пульса- ций вращающегося магнитного поля интегральные характеристики гидроди- намических полей, такие как удельная кинетическая энергия крупномасштаб- ного потока, энергия турбулентных пульсаций, кинетическая энергия верти- кального полекения. мокотонно зависит от периода.

3. Исследования переноса примеси в жидком металле под воздействием переменных магнитных полей

Проблема равномерного распределения примеси в расплавах играет важную роль во многих технологических операциях металлургической промышленности [118].

Электромагнитное (ЭМ) воздействие на жидкие расплавы является хорошо известным способом обеспечения процесса перемешивания. Численный анализ в этой области широко используется и хорошо развит. Рассмотренные выше стандартные ЭМ и гидродинамические (ГД) сопряженные численные модели с помощью силы Лоренца способны получить только характер потока и скорость, что недостаточно для полного анализа процесса перемешивания. В этой связи необходимо применять дополнительные методы для оценки качества перемешивания.

Так, в случае металлургических печей и миксеров, в которых образуется большой перепад температур ванны с расплавом, оценка снижения вертикального градиента температуры является достаточным параметром для оценки эффективности [57,119]. Дополнительный расчет теплообмена в объеме жидкого металла с источником тепла от верхней поверхности может помочь понять динамику температурного выравнивания [56, 120–122].

Другой способ получить качественный анализ эффективности перемешивания - это исследование распределения пассивной примеси [48,123]. Этот подход может показать динамику переноса концентрации и гомогенизации растворенного вещества. Dadzis и др. [124] провели 3D нестационарные расчеты переноса частиц углерода при направленном затвердевании кремния в бегущем магнитном поле. Оборин и соавт. [106, 125] реализовали модель Эйлера–Эйлера для моделирования переноса примеси под действием БМП и получили зависимости эффективного времени перемешивания как от амплитуды тока, так и от частоты. Пример численных результатов показан на рисунке 7.



Рис. 7. Распределение примеси во времени (квадрат в нижнем левом углу (a) ванны), ток 200 A, частота 50Гц: a - 0 c., b - 10 c., c - 60 c., d - 120 c., e - 200 c., f - 400 c. [106]

Упомянутые выше подходы являются хорошими индикаторами эффективности перемешивания. Однако некоторые промышленные процессы имеют дело с твердым включением в поток расплава и для более точного моделирования таких процессов необходимо учитывать поведение каждой частицы в потоке жидкого металла. Подход к отслеживанию (трассировке) траекторий частиц казался подходящим для такого рода задач. Первая попытка численного исследования поведения частиц в потоке под воздействием электромагнитных сил в случае индукционной тигельной печи (ИТП) была сделана в работе Кирпо М. и др. [126]. Позднее Щепанский М. и др. [59, 127] полностью описал движение частиц в ИТП с помощью подхода Эйлера-Лагранжа и завершил экспериментальную проверку. На основе этих моделей в работе [128] численно исследован и показан новый процесс фильтрации частиц в ИТП на основании подхода Лагрнжа. Также для анализа движения частиц в ИТП было проведеноо исследование [129], в котором даны рекомендации по использованию модели турбулентности.

LES-исследование переноса частиц для промышленной индукционной

канальной печи выполнено Pavlovs et al. в работе [130], наглядно показано распределение примеси в канале и ванне печи. Расчеты траекторий движения частиц могут помочь в оценке распределения непроводящих частиц в литейных композитах [131].

В настоящей работе наибольший интерес представляют установки перемешивания с бегущим магнитным полем. И Bojarevics et al. [132] сделали первую попытку описать поведение движения частиц в жидком металле в присутствии БМП. Была использована двумерная численная модель для расчета траектори движения частиц с учетом сопротивления, гравитации и электромагнитных сил, действующих на электропроводящие включения.

Проделанный обзор литературы выявил ряд работ, посвященных численному моделированию поведения частиц и пассивной примеси в расплаве под воздействием переменного магнитного поля. В данных работах рассматриваются примеры моделирования поведения примеси в следующем электротехнологическом оборудовании металлургического назначения: индукционных канальных печах [130], индукционных тигельных печах [118, 126], электромагнитных индукторах бегущего и пульсирующего поля для миксеров [125] и кристаллизаторов [131, 132]. Все вышеперечисленные модели представляют собой совместный расчет электромагнитного поля и гидродинамических течений с интегрированной моделью расчета траектории частиц.

Метод Лагранжа оказался очень многообещающим подходом для широкого спектра расчетов металлургических процессов из вышеупомянутой литературы. К сожалению отсутствуют полные трехмерные исследования транспорта частиц в потоке, индуцированном БМП. В настоящей работе будет сделана попытка описать это явление в двухстороннем перемешивателе БМП, которая будет представлена в главе 2.

4. Исследования процесса затвердевания под воздействием БМП

Течение жидкости играет большую роль в процессах затвердевания, чем это принято считать, и оказывает значительное и многостороннее влияние на структуру и ликвацию при затвердевании [133]. Применение электромагнитного перемешивания как бесконтактного способа воздействия помимо вышеописанных приложений также позволяет контролировать конвективные потоки в процессе кристаллизации. Тем самым можно влиять на условия кристаллизации металлов и полупроводников. Рассмотрим несколько случаев, как вынужденные конвективные потоки под воздействием переменных магнитных полей могут влиять на кристаллизацию. Анализ применения в первую очередь вращающихся и бегущих магнитных полей показал, что общепринятые эффекты в кристаллизующихся сплавах могут быть разделены на 2 группы [107].

Во первых, это модификации микроструктуры, вызванные потоками в жидкой фазе, такие как:

- Ориентация зёрен;
- Измельчение зерен и фрагментация дендритов;
- Переход от столбчатой к равноосной структуре;

Во вторых, можно выделить следующие изменения макроструктуры:

- Образование пор или пятнистых сегрегаций¹⁷ [134];
- Макро и мезосегрегации;
- Сепарация [135].

 $^{^{17}}$ от англ. freckles formation

Рассмотрим некоторые из этих явлений, которые могут появляться в случае перемешивания бегущим магнитным полем. Прежде всего стоит отметить работу [136], в которой сообщается о измельчении зерна при кристаллизации AlSi сплава под воздействием БМП. Обнаружено, что интенсивность магнитного поля провоцирует образованию мелкой структуры слитка. Более того приводится хорошее описание механизма измельчения зерна и перехода от столбчатой к равноосной структуре. Отмечается значительное влияние переноса растворённого вещества¹⁸, в данном эффекте.

Влияние бегущего магнитного поля на образование макросегрегации достаточно полно исследовано в работе [137]. Авторами показано, что взаимодействие свободных и вынужденных электромагнитными усилиями конвективных потоков определяют макроструктуру по объему слитка. Сообщается об явлении возникновения сегрегации типа рыбьей кости¹⁹, когда интенсивность этих конвективных потоков соразмерна.

Более комплексно процессы тепло и массообмена, а также их влияние на кристаллизацию под воздействием БМП исследованы в работе [86]. Представленная в работах [83,102] экспериментальная установка была дополнена системой охлаждения и нагрева, которая создавала необходимый градиент для кристаллизации оловянно-свинцового сплава (Sn-10% Pb). Более того на фронтальной стенке установлены 50 термопар, которые позволяли анализировать в динамике температурное поле по всей поверхности слитка.

Авторы рассматривают 4 случая: естественная конвекция, направление БМП совпадает с направлением естественной конвекции, БМП напрвлено против и направление БМП периодически изменяется (модулированное или реверсивное поле). Проведен анализ динамики температурного поля, макроструктуры слитка, объемной концентрации свинца и ликваций. Определен-

 $^{^{18}}$ от англ. solute transport

 $^{^{19}}$ от англ. fish bone segregation

но, что усиленная конвекция влияет на образование равноосной структуры и характер перемешивания определяет размер зерна. Все режимы электромагниного воздействия значительно снижают образование ликваций и в то же время не влияют на замедление развития ликвационных каналов. На рисунке 8 представленны результаты для наиболее интересного случая с модулированным бегущим магнитным полем с частотой 0.125 Гц.



Рис. 8. Результаты экспериментального исследования кристаллизации под действием модулированного магнитного поля из [86]. а – температурное поле кристаллизующегося слитка, б – макроструктура слитка, в – макросегрегации в слитке

Подобное, но только уже численное исследование было проведено Ben-David et. al [87,88] и позднее Avnaim et al. [99]. Авторами была разработана трехмерная численная модель с учетом процесса затвердевания. Жидкий металл (чистый галлий) находится в прямоугольной емкости, в которой создается горизонтальный температурный градиент. Представленна трехмерная модель связанных электромагнитных, гидродинамических и тепловых полей. Верификация течений в жидкой фазе слитка производилась при помощи измерений ультразвуковым доплеровским аннемометром, а температурного поля – погружными термопарами. Исследовались режимы с разным направлением БМП, разной величиной воздушного зазора между металом и индуктором, а также частотой тока, расчетные значения имеют хорошую сходимость с измеренными величинами. Экспериментальная установка с системами измерения и результаты моделирования представленны на рисунке 9. Явно показано влияние электромагнитно вынужденной конвекции на формирование фронта кристаллизации. Но, к сожалению, расчеты влияния модулированного бегущего магнитного поля на форму и динамику фронта затвердевания до сих пор не проведены.



Рис. 9. Экспериментальная установка исследование кристаллизации в БМП [84] (a), а так же результаты численного исследования (б) [99].

Использование вращающихся магнитов в установке, описанной ранее в разделе 1, приводит к вибрациям, поэтому позднее они были заменены индукторами БМП. Также экспериментальная установка дополнена возможностью исследовать затвердевание. Экспериментальные исследования кристаллизации расплава галлия под действием БМП методом нейтронной визуализации описаны в [103]. Установка состоит из емкости с расплавленным галлием, по бокам которого расположены индукторы бегущего магнитного поля; под сосудом находится система охлаждения, которая создает необходимый градиент для затвердевания металла. В результате эксперимента были получены изображения динамики фронта кристаллизации при постоянном, пульсирующем, бегущем магнитном поле и без внешнего воздействия. Частота пульсирующего поля варьировалось в диапазоне от 0.1 до 2 Гц. Произведена оценка искривления фронта кристаллизации и ширина переходной зоны, т.н. mushy zone и было установлено, что частота модуляции, близкая к собственной резонансной частоте жидкости, дает улучшение в процессе теплообмена, приводящее к выравниванию температуры по объему расплава. Такая характерная частота определяется следующим образом:

$$T_{ch} = \frac{L_{ch}}{V_{ch}} \tag{2}$$

$$L_{ch} = 2\pi \frac{r_r + r_z}{2} \tag{3}$$

$$f_{ch} = \frac{1}{T_{ch}} \tag{4}$$

где r_r и r_z – радиальные и осевые размеры вихря.

Обобщая рассмотренные работы, можно сделать вывод, что позитивное влияние электромагнитного перемешивания безусловно существует. Большое количество современных работ по этой теме указывает на его актуальность. Однако процесс кристаллизация является сложным с точки зрения физики, поскольку необходимо взаимное влияние тепловых, гидродинамических и электромагнитных полей. А большое количество рассматриваемых явлений требует большого количества исследований, так как для каждого сплава, типоразмера или способа электромеханического воздействия условия кристаллизации будут отличаться. Большинство этих работ являются экспериментальными, а как известно металл является непрозрачной, а в некоторых случаях также высокотемпературной и химически агрессивной жидкостью, поэтому инструмент математического моделирования здесь актуален. Тем самым становятся необходимыми численные исследования, способные дополнить полученные экспериментальные результаты. Они позволяющие получить более полное описание процессов тепло- и массопереноса в процессе кристаллизации.

5. Заключение

Подводя итог, можно заключить, что выбранная тема была широко исследована в 20-м веке, однако тогда она достигла своего логического предела и исследователи заключили, что следующим этапом будет поиск и создание точных и надежных методов исследования [25]. Одним из таких инструментов стало численное моделирование и уже в течении более чем трех десятилетий исследователи со всего мира работали над моделированием процессов, происходящих в области прикладной магнитной гидродинамики и в частности, электромагнитного перемешивания. Однако, даже с учетом развития вычислительных мощностей, до сих пор решение задач прикладной магнитной гидродинамики является достаточно трудной задачей [57] и требует разработки модели для каждого частного случая. В этой связи, в рамках настоящей диссертационной работы предлагается сделать попытку логического продолжения численных исследований задач электромагнитного перемешивания в нескольких приложениях.

Проведенный обзор не претендует на полноту всех источников, а включает в себя ряд важных с точки зрения темы исследования данной диссертации ряд работ, а также наиболее повлиявшие на автора публикации. Приведенный обширный библиографический список поможет читателю найти подробное изложение ряда вопросов, не получивших должного внимания в данном обзоре.

В представленном обзоре приводятся как теоретические, так и экспери-
ментальные исследования электромагнитного перемешивания в различных приложениях, и основные идеи можно обобщить в несколько пунктов:

1. Продемонстрирован ряд работ по перемешиванию с помощью бегущего магнитного поля. Показано, что данный тип силового воздействием является достаточно эффективным инструментом для ряда технологических приложений. Рассмотрены преимущественно численные методы исследования электромагнитного перемешивания в прямоугольной емкости.

2. Показано, что использование временной модуляции переменных магнитных полей может привести к повышению эффективности технологических процессов. Рассмотрены многие методы оценки эффективности перемешивания и показаны некоторые аналитические зависимости по определению оптимальной частоты модуляции магнитного поля.

3. Рассмотрен процесс моделирования поведения пассивной примеси в жидком металле под воздействием переменного магнитного поля. Выявлено, что использование уравнения Лагранджа для описания траектории сферической частицы является хорошим инструментом для исследования и предлагается к использованию в главе 2 данной работы.

4. Проанализированы работы по кристаллизации металлических расплавов под воздействием бегущего магнитного поля. Определены методы расчета фазового перехода а также экспериментальные техники для верификации расчета.

Определенный интерес представляют следующие исследования:

 – численное исследование электромагнитного перемешивания модулированным во времени бегущим магнитным полем;

 – полное трехмерное моделирование переноса сферических частиц в жидком металле под воздействием БМП;

 моделирование и верификация процесса затвердевания под водействием БМП.

Были поставлены следующие задачи в данном диссертационном исследовании:

- разработка численных моделей для решения связанных задач на основании МКЭ и МКО;
- верификация результатов расчетов моделей;
- анализ влияния бегущего магнитного поля на потоки, массообмен, и затвердевание жидкого металла;
- анализ влияния реверсивных и импульсных (пульсирующих) режимов работы индукторов на эффективность перемешивания;
- формулировка рекомендаций для исследований и проектирования устройств данного типа.

Ввиду ограниченности формата в данной работе предлагается сконцентрироваться только на процессах, происходящих во вторичном элементе, в большинстве случаев жидкометаллическом. Статор же или индуктор не подвергается исследованиям или изменениям (за исключением раздела 1.3), помимо режимов его работы и питания.

Глава 1

Исследование электромагнитного перемешивания односторонним индуктором бегущего магнитного поля

В данной главе приводится описание процесса создания численной подели электромагнитного перемешивания на основе линейной индукционной машины (ЛИМ). Приводится верификация данной модели и исследования гидродинамических потоков. Другим исследуемым вопросом являются магнитные свойства материалов ЛИМ. Оценка магнитного насыщения электротехнической стали магнитопровода позволит определить диапазон эффективной работы ЛИМ, результаты которой также изложены в данной главе. Так приведено краткое описание и анализ нессиметрии токов в обмотке ЛИМ. Последним вопросом, рассматриваемым в данном отчете, является анализ влияния формы и положения фронта кристаллизации на удельное электромагнитное усилие в жидкой фазе.

1.1. Объект исследования

Исследуемым объектом является линейная индукционная машина, которая представляет собой шесть медных катушек, уложенных в пазах магнитопровода (рис. 1.1). Катушки подключены к трехфазному источнику переменного тока (Pacific Smart Source 360 ASX-UPC3). Тип обмотки – двухрядная шаблонная со схемой соединения, показанной на рисунке 1.2. Данный тип обмотки не является самым эффективным, так как в одном пазу находятся две обмотки с фазовым сдвигом между ними 120° и, следовательно, общий магнитный поток вокруг паза будет в $\sqrt{2}$ раз меньше. Однако, данный тип обмотки обладает хорошими эксплуатационными качествами и относительно прост в изготовлении, и поэтому был выбран для экспериментальной установки. Генерируемое бегущее магнитное поле проникает во вторичный элемент (ВЭ) – электропроводную пластину, в которой по закону электромагнитной индукции¹ возникает электродвижущая сила и протекает вихревой электрический ток. Взаимодействие этого индуцированного тока с магнитным полем индуктора порождает электромагнитные усилия (силы Лоренца) в пластине, большая часть которых сонаправлена с направлением бегущего поля и образует тяговое усилие в объеме ВЭ.



Рис. 1.1. Внешний вид ЛИМ с вторичным элементом

1.2. Численная модель в ANSYS Mechanical APDL

1.2.1. Электромагнитный анализ

Определяющие уравнения

Расчет производился в ANSYS Mechanical APDL, на основе уравнений Максвелла:

 $^{^1}$ или закону Фарадея



Рис. 1.2. Схематичное изображение сечения ЛИМ с основными размерами и схема соединения обмотки.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} = \mathbf{J}_{\mathbf{s}} + \mathbf{J}_{\mathbf{e}} + \mathbf{J}_{\mathbf{v}}, \qquad (1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \mathbf{t}},\tag{1.2}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \mathbf{0},\tag{1.3}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_{\mathbf{e}},\tag{1.4}$$

где $\nabla \times$ – оператор ротора; $\nabla \cdot$ – оператор дивергенции; **H** – вектор напряженности магнитного поля; **J** – вектор полной плотности электрического тока; **J**_s – вектор плотности тока источника; **J**_e - вектор индуцированной плотности тока; **J**_v – вектор плотности тока, обусловленной наличием ЭДС движения; **D** – вектор плотности электрического поля; t – время; **E** – вектор электрического поля; **B** – вектор магнитного потока; ρ_e – плотность электрического заряда.

Уравнение непрерывности получаем путем дивергенции обеих сторон уравнения 1.1:

$$\nabla \cdot \left[\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right] = 0. \tag{1.5}$$

Решение электромагнитной задачи производится в трехмерной постановке методом граничного² магнитного векторного потенциала на основе следующих дифференциальных уравнений:

$$\nabla \times [\mu - 1]\nabla \times \mathbf{A} + [\sigma] \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V_e \right) + [\varepsilon_p] \left(\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \nabla \frac{\partial V_e}{\partial t} \right) = 0 \qquad (1.6)$$

$$\nabla \cdot \left([\sigma] \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V_e \right) + [\varepsilon_p] \left(\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \nabla \frac{\partial V_e}{\partial t} \right) \right) = 0$$
(1.7)

$$\nabla \times [V_e] \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_{\mathbf{s}} \tag{1.8}$$

где $\mu = \mu_0 \mu_r$ – магнитная проницаемость; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_r – относительная магнитная проницаемость; **A** – векторный магнитный потенциал; V_e – электрический скалярный потенциал; $[\sigma]$ – тензор электропроводности; $[\varepsilon_p]$ – тензор диэлектрической проницаемости.

Индуцированная плотность тока вычисляется, как

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_{\mathbf{e}} + \mathbf{J}_{\mathbf{v}} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{B}) \tag{1.9}$$

 $^{^2}$ от англ. edge-based

где \mathbf{v} – вектор скорости.

Однако, вводится допущение безиндукционной постановки и пренебрегается переносом магнитного поля, скоростью движения ВЭ из-за низкого значения магнитного числа Рейнольдса ($Re_m = \mu_0 \sigma vL = 4\pi 10^{-7} \cdot 3.86 \cdot 10^6 \cdot 0.030 \cdot 0.12 = 0.0756 \ll 1$, где v это скорость и L это характерный размер ВЭ). В таком случае выражение (1.9) примет форму:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \tag{1.10}$$

Электродинамическая задача решалась в частотной области и любые полевые переменные описывались следующими периодическими функциями:

$$A(t) = A \cdot \cos(\omega t + \phi) \tag{1.11}$$

где
 A – амплитудное значение переменной;
 ω – угловая частота; ϕ – угол сдвига фазы.

Сила Лоренца в гармонической постановке вычисляется как

$$F(t) = J(t)B(t) \tag{1.12}$$

Объемное и усредненное во времени значение может быть определено в том числе через комплексные переменные:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} \int_{vol} \mathbf{N}^T \left(\mathbf{J}^* \times \mathbf{B} \right) d(vol) = \frac{1}{2} (\mathbf{J}^* \cdot \dot{\mathbf{B}})$$
(1.13)

где ${\bf N}$ – вектор функции формы; ${\bf J}^*$ – комплексно сопряженный вектор плотности тока

Мощность тепловыделения (джоулево тепло) на единицу объема:

$$Q = Re\left(\frac{1}{2n_p}\sum_{i=1}^{n_p}\rho_r \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^*\right)$$
(1.14)

 n_p – число точек интегрирования; ρ_r – электрическое сопротивление

Среднее, объемное значение электромагнитной энергии

$$W = \frac{1}{4} \int_{vol} \left(\mathbf{E}^T \mathbf{D}^* \right) d(vol)$$
(1.15)

Плотность тока в катушке задается выражением:

$$J_{coil} = I \cdot N, \tag{1.16}$$

где *I* – подаваемый ток; *N* – число витков катушки. При этом индуцированная плотность тока в катушках не учитывается.

Граничные условия и конечноэлементная сетка

В качестве граничного условия векторный магнитный потенциал устанавливается равным нулю во всех внешних поверхностях расчетной области.

Сетка для электромагнитного анализа показана на рисунке 1.3. Построена из тетраэдральных элементов с десятью узлами типа SOLID98³ (рис. 1.3). Размер элемента в воздухе (скрыт на рисунке) - 20 мм, в катушках и магнитопроводе ЛИМ - 10 мм. Во вторичном элементе (пластине) из-за поверхностного эффекта размер элемента сетки был задан 4 мм. Общее количество элементов модели составило 1 773 342.

Геометрия и параметры модели

Рассматриваемая линейная индукционная машина состоит из магнитопровода с уложенными в пазах шестью обмотками и изображена на рисунке 1.2. Основные геометрические размеры исследуемой машины приведены в таблице 1.1.

³ см. Mechanical APDL Theory Reference. APDL Mechanical Element Library http://www.mm.bme. hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID98.html



Рис. 1.3. Конечноэлементная сетка модели

Таблица 1.1. Основные параметры ЛИА	Таблица	1.1.	Основные	параметры	ЛИМ
-------------------------------------	---------	------	----------	-----------	-----

Магнитопровод:			
Длина магнитопровода	l_c	440	MM
Ширина магнитопровода		340	MM
Высота спинки магниттопровода	h_b	45	MM
Ширина паза	l_s	40	MM
Глубина паза:	h_s	85	MM
Катушки:			
Количество витков в катушке	N	225	
Сечение провода в катушке		$5{ imes}1$	MM^2
Толщина вторичного элемента	h_{SS}	10	MM
Вторичный элемент:			
Удельное электрическое сопротивление		$2.5 imes 10^{-8}$	Ом/м
длина (ось х)	l_{SS}	500	MM
высота (ось у)	h_{SS}	10	MM
ширина (ось z)		400	MM
воздушный зазор	h_g	10	MM

Сила тока индуктора

Величина тока в катушках является одной из основных величин, влияющих на мощность ЛИМ. Поскольку в машинах без принудительного охлаждения допустимая плотность тока в медном проводнике составляет j = 3 A/mM^2 , то в проводе сечением $S = 5 \times 1 mM^2$ максимальное действующее значение тока составляет $I = j \cdot S = 15A$.

1.2.2. Результаты электромагнитного расчета

На рисунке 1.4 показано распределение магнитного потока в воздушном зазоре машины. Как видно из графиков, по мере удаления от активной поверхности ЛИМ значение магнитной индукции падает, также видно затухание кривых ближе к краям машины, обусловленное продольным краевым эффектом. Необходимо отметить, что результаты расчета магнитной индукции представлены для случая нулевого момента времени. Это означает, что в фазе A ток максимальный, а в двух оставшихся меньше в $\sqrt{2}$ раз.



вдоль оси x

вдоль оси z

Рис. 1.4. Распределение магнитной индукции в зазоре ЛИМ на разном растоянии от поверхности магнитопровода для случая 15 А.

Индуцированная плотность тока в пластине показана на рисунке 1.5. Мы можем наблюдать развитые 3 вихря индуцированного тока. При этом

ток, протекающий вдоль оси z, является полезным, поскольку его взаимодействие с первичным магнитным полем индуктора приводит к возникновению результирующего тягового усилия в пластине. Однако эти токи далее должны замыкаться по краям пластины и это приводит к возникновению поперечного краевого эффекта. Из результатов расчета наглядно видно, как на краях пластины сконцентрированна большая плотность тока, направленная вдоль оси x. Причем этот ток не развивает полезного тягового усилия в направлении бегущего магнитного поля. Впрочем, в случае электромагнитного перемешивания представляет определенный интерес влияние усилий, генерируемых этим током, на движение жидкой среды.



Рис. 1.5. Индуцированная плотность тока во вторичном элементе для случая 15 А

Результатом решения задачи являются электромагнитные параметры в пластине представленные на рисунке 1.6. Из рисунка четко виден эффект зубчатости магнитопровода, так как основной магнитный поток и, следовательно, электромагнитные усилия сконцентрированы в зонах зубцов индуктора ЛИМ.

Для анализа виляния размеров ВЭ на характер распределения вихревых токов проведено две серии исследований. В первом случае, с целью определения влияния длины ВЭ на характер и распределение индуцированных токов проведено четыре опыта для соответствующих размеров пластин в направле-



Рис. 1.6. Результаты расчета электромагнитных параметров в пластине (ВЭ), вид сверху. а – суммарная составляющая магнитной индукции, б – плотность усилий в пластине, в – компонента электромагнитного усилия по оси х

нии оси x: 375, 480, 750 и 1000 мм. Ширина при этом оставалась постоянной 400 мм. Результаты распределения вихревого тока показаны на рисунке 1.7. В первом случае (375 × 400 мм) когда длинна ВЭ меньше длинны индуктора ЛИМ мы можем наблюдать один вихрь токовых линий, что снижает эффективность использования ЛИМ. Во втором случае (480 × 400 мм) длина ВЭ равна длине магнитопровода и число вихрей увеличивается до 3, что соотвествует данной конфигурации обмотки машины. В случаях 750 и 1000 мм длина вторичного элемента больше размера индуктора, и в этом случае мы имеем также три развитых вихря. Однако можно отметить, что интенсивность крайних вихрей ниже, чем центрального. Более того, в случае 1000 мм в крайних частях пластины, находящихся за пределами индуктора ЛИМ индуцированный ток затухает, практически до нулевого значения. В таком случае, когда длина ВЭ значительно превышает длину ЛИМ остаются, большие объемы в неактивной зоне, что также снижает эффективность. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что наиболее эффективное использование ЛИМ будет для пластин, длина которых близка к длине магнитопровода ЛИМ.

Поперечный краевой эффект играет большую роль в теории ЛИМ, его



Рис. 1.7. Индуцированная плотность тока в пластине вторичного элемента при различной длине вторичного элемента.

влияние заключается в том, что помимо тяговых в пластине возникают «тормозящие» усилия, направленные от боковых сторон пластины к центру, а в случае с индукционным насосом эти усилия способны даже отжимать жидкий металл от стенок канала. Одним из способов ослабить влияние этого эффекта является изменение ширины пластины. Ожидая определения влияния ширины ВЭ на распределение и характер индуцированных токов, было проведено исследование для 4 размеров ВЭ: 500 × 500 мм; 500 × 400 мм; 500 × 300 мм; 500 × 200 мм. То есть изменялась длина, а ширина вторичного элемента оставалась постоянной, а ширина магнитопровода составляет



340 мм. Результаты расчета показаны на рисунке 1.8.

Рис. 1.8. Индуцированная плотность тока в пластине вторичного элемента при различной ширине вторичного элемента.

Как видно из рисунка 1.8 (500 \times 500 мм), ширина вторичного элемента превышает ширину ЛИМ, в этом случае плотность индуцированных токов на краях пластины, векторы которых лежат преимуществено на оси x, занчительно ниже тех, которые протекают поперек направления БМП и генерируют тяговое усилие. И наоборот, в случае (500 \times 300 мм) значение токов на краю пластины почти в 2 раза больше токов в центре соответственно. Тем самым можно заключить, что ширина пластины прямо пропорционально влияет на величину «полезных» токов во ВЭ. Конечно, абстрактного понятия полезных токов для исследования ЛИМ недостаточно и необходим анализ тяговых усилий возникающих в пластине ВЭ.

Тяговое усилие во вторичном элементе

Влияние изменения электрических параметров ЛИМ на пространственное распределение и интегральные значения электромагнитных усилий играет значительную роль для характера и интенсивности электромагнитного перемешивания. Оценка этих результирующих усилий будет проведена в данном разделе. Чтобы оценить работу ЛИМ, был проведен анализ тягового усилия в пластине. Тяговое усилие⁴ вычислялось как объемный интеграл *х*компоненты электромагнитных сил.

Для тестирования модели было проведено исследование влияния тока в катушках на тяговое усилие во вторичном элементе. На рисунке 1.9 показан результат расчета интегрального значения тягового усилия пластины в зависимости от величины тока в катушках. Рассмотрено три варианта обмотки с количеством витков 169 (13×13), 196 (14×14) и 225 (15×15). С увеличением тока в обмотке тяговое усилие, как и ожидалось, увеличивается пропорционально квадрату тока, также при увеличении числа витков полный ток паза возрастает, как и результирующее усилие. Напомним, для изготовления опытного образца и дальнейших исследований был использован вариант с 225 витками.

Оценка тягового усилия производится для выбора размеров емкости для жидкого металла.

Исходя из графиков плотности индуцированного тока в пластине 1.7 можно сделать вывод, что вследствие продольного краевого эффекта значение силы тока и следовательно электромагнитных сил затухает в неактивных областях ВЭ при его длине больше 500 мм. В этом случае изменения тягового

 $^{^4}$ на графиках используется англ. вариант Thrust Force



Рис. 1.9. Зависимость тягового усилия от тока катушки

усилия, показанного на рисунке 1.10, почти не происходит. С другой стороны при ВЭ короче индуктора ЛИМ значение усилия значительно снижается от центра пластины. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что для наиболее эффективного использования ЛИМ в приложениях электромагнитного перемешивания, рекомендуется использовать ВЭ с длиной, близкой к размеру индуктора.



Рис. 1.10. Тяговое усилие в пластине в зависимости от ее длины l_{SS}

Экспериментальные измерения и верификация

Чтобы проверить вычислительную модель, предлагается проверить численные результаты путем сравнения с экспериментальными данными. Были измерены профили индукции магнитного поля и электромагнитной силы, действующей индуктором БМП на проводящую среду. Компоненты вектора магнитной индукции измерялись с помощью трехканального тесламера Lake Shore 460 Gaussmeter. Положение трехмерного датчика Холла было установлено с точностью до 1 мм.

Для тестирования измерительной системы было проведено пространственное измерение магнитной индукции одной катушки ЛИМ в трех координатах. Результаты измерений показаны на рисунке 1.11. На левом рисунке показано затухание магнитной индукции по мере отдаления от поверхности индуктора. В этом случае выполнялось измерение над катушкой, при этом датчик удалялся от активной поверхности. Как и ожидалось, магнитное поле затухает экспоненциально. На среднем рисунке показано измерение магнитной индукции над катушкой без магнитопровода вдоль оси z. Значение индукции в активной области составляет 10 млТл. Однако, ближе к краям катушки у-компонента магнитной индукции затухает и возрастает z-компонента, что соответствует изгибу катушки, который будет находится в лобовой части ЛИМ. На третьем графике на зубец магнитопровода. Можно отметить, что это дало увеличение индукции в 4 раза, при этом характер кривой суммарной индукции изменился, стал немного изогнут в центральной области, что объяснятся влиянием лобовой части обмотки ЛИМ. Полученные результаты показали хорошую способность выбранной системы для пространственного измерения магнитного поля индукционных устройств, которая будет использована для дальнейших исследований ЛИМ.

Однако при измерении индукции возникли некоторые трудности. А именно – в линейной индукционной машине продольный краевой эффект вызывает неравномерность сопротивлений катушек, порождая тем самым ассиметрию токов обмотки. Если мы обратимся к данным измерения индукции над поверхностью ЛИМ (рис. 1.12 а), мы обнаружим, что компонент кривой B_y имеет пик на средней длине индуктора. Это явление можно объяснить тем,



Рис. 1.11. Измерение магнитной индукции одной катушки ЛИМ

что линейный индуктор обеспечивает асимметричное распределение фазных токов в пазах индуктора. Асимметрия, которая, является результатом влияния краевых эффектов на перераспределение взаимной индуктивности фаз, является продуктом не только разных амплитуд токов в обмотках ЛИМ, а так же разными углами сдвига между фазами. Данное явление было учтено в численной модели и будет рассмотрено подробнее в разделе 1.4.1 заданием углов между тремя фазами равными $138^{\circ} - 85^{\circ} - 137^{\circ}$. Данные численной модели хорошо согласуются с экспериментальными результатами (рис. 1.12 а). Третья z-компонента магнитного поля имеет на порядок меньшие величины и поэтому исключена из рассмотрения.



Рис. 1.12. Сравнение экспериментальных измерений и численного моделирования: а - кривые x и y компонент магнитной индукции, б - зависимость тяговой F_p и нормальной F_n составляющих электромагнитной силы от тока источника питания.

Другим подходом верифицировать электромагнитный расчет являются измерения электромагнитных усилий, возникающих в пластине. Измерения усилий были выполнены с использованием модельной установки, основным компонентом которой была медная пластина размером $590 \times 290 \times 13$ мм³. Пластина была подвешена на нерастяжимых нитях на постоянном расстоянии от поверхности индуктора, чтобы она могла свободно перемещаться в плоскости над ней подобно экспериментам, изложенным в работе [138]. Измерения планарной и подъемной составляющих электромагнитной силы проводились с помощью динамометров. Чтобы измерить вертикальную или нормальную составляющую силы, четыре динамометра закреплялось на углах пластины. Динамометры, измеряющие тяговую составляющую силы, были жестко прикреплены к плите и раме установки. При включенном индукторе сила, создаваемая БМП, сместила пластину в плоскости и уменьшила ее вес. Схематическое изображение эксперимента по измерению усилий представлено на рисунке 1.13. Точность измерения горизонтальной (тяговой) и вертикальной (нормальной) составляющих усилия составляла 0,1 Н и 1,0 Н соответственно.



Рис. 1.13. Схематическое изображение установки по измерению электромагнитных усилий создаваемых ЛИМ.

Сравнение измерений усилий с результатами расчета показано на рисунке 1.12 б. Как видно из графика, нормальная составляющая усилия превосходит продольную. С увеличением тока и нормальная, и продольная составляющие электромагнитных усилий увеличиваются экспоненциально. Сходимость

экспериментальных и численных данных удовлетворительна. В итоге, исходя из сравнений значений разных компонент магнитной индукции над поверхностью ЛИМ, а также электромагнитных усилий во ВЭ, можно заключить о достоверности расчета выбранной численной модели. На основании описанной модели были проведены следующие исследования.

1.3. Анализ насыщения и выбор размеров магнитопровода ЛИМ

Учет насыщения стального магнитопровода, в равной степени как и выбор его геометрических размеров, позволяет оценить эффективность использования материалов для создания ЛИМ. Изменение высоты спинки магнитопровода (параметр h_c , см. Рис. 1.1) может привести к быстрому насыщению. Таким образом, мы рассматриваем 3 разных случая: наименьшее значение h_c = 10 мм, среднее $h_c = 35$ мм и наибольшее значение $h_c = 55$ мм.

Для расчета в модели была задана функция насыщения. Данная кривая намагничивания для холоднокатаной, анизотропной электротехнической стали 3413, из которой изготовлен шихтованный магнитопровод ЛИМ, показана на рис. 1.14 [139]. Подробные данные приведены в Приложении А.

Опыт насыщения заключался в следующем: в трех катушках задавалось условно положительное направление тока а в оставшихся трех отрицательное. Таким образом достигалось максимальное значение напряженности магнитного поля в магнитопроводе. Для данного исследования значение тока катушки варьировалось от 1 до 40 ампер, и рассчитывалось интегральное значение магнитной индукции во вторичном элементе. На рисунке 1.15 показаны численные результаты значения магнитной индукции в магнитопроводе с разным размером h_b .

На рисунке 1.16 приведены зависимости магнитной индукции от тока



Рис. 1.14. Кривая намагничивания листовой электротехнической стали (холоднокатаная) марки 3413.



Рис. 1.15. Магнитная индукция для различной высоты размеров спинки магнитопровода h_b

для разных размеров магнитопровода, высота спинки h_b которого изменялась от 10 до 55 мм. При начальных значениях тока плотность магнитного потока линейно увеличивается для всех размеров магнитопровода, затем в первом случае ($h_c = 10$ мм) сердечник начинает насыщаться при 10 А, и рост индукции замедляется. Для магнитопровода с высотой спинки 35 мм насыщение наступает при токе 25 А. Тогда как в случае с наибольшим размером спинки магнитопровода, площадь ее поперечного сечения увеличивается, вследствие



чего насыщение не наблюдается даже при 40 А.

Рис. 1.16. Зависимость значения электромагнитной индукции во ВЭ от величины питающего тока ЛИМ для разной толщины спинки магнитопровода h_b

Исходя из допустимой плотности тока в катушках была принята конструкция с высотой спинки 35 мм. Для эксплуатации ЛИМ с такими геометрическими размерами необходимо питать током не больше 25 А.

1.4. Несимметрия токов в обмотках ЛИМ

Как было уже сказано выше, численное моделирование из-за непрозрачности, высокой температуры и агрессивности жидких металлов является хорошим инструментом для исследования МГД устройств. Однако из-за того, что задачи магнитной гидродинамики являются сложными и связанными, в них даже с развитием вычислительных мощностей используется множество упрощений и допущений. Многие разработчики используют упрощения в электромагнитной части численных моделей. Это может быть полезно как для сокращения времени разработки модели, так и для сокращения потребности в вычислительной мощности. Но иногда эти упрощения включают в себя особый аспект и могут влиять на численные результаты, особенно в случае неидеального индуктора описанного в работе [140]. В случае перемешивания бегущим магнитным полем это поле генерируется другими словами, статором линейной индукционной машины. И это устройство имеет несколько отличий от статоров вращающихся машин. Индукторы БМП имеют продольный и поперечный эффект. Помимо распределения электромагнитных сил, рассмотренных ранее, это приводит к неодинаковым сопротивлениям в катушках и, следовательно, к различиям в значениях электрического тока. Некоторые теоретические работы принимают в качестве электромагнитного поля идеальную волну БМП и не учитывают особенности конструкции реального индуктора [141, 142]. При этом отмечается, что даже небольшое (0.5 мм) смещение между осями волны бегущего магнитного поля и объема металла, что в условиях реальной эксплуатации легко достижимо, может привести к четкой трехмерной составляющей структуры потока и, таким образом, к полному изменению обычно предполагаемого осесимметричного тороидального потока [143].

Также обычно авторы устанавливают одинаковое значение плотности тока во всех трех фазах со сдвигом между ними 120° [81,84], а для некоторых типов обмоток это может быть некорректным или не соблюдаться из-за разности сопротивлений фаз и катушек. [144–148]. В данном разделе предлагается сравнить идеальные (симметричные) и реальные (нессиметричные) случаи протекания токов в катушках ЛИМ на примере рассматриваемой в данной главе установки для электромагнитного перемешивания.

Исследование в данном разделе и далее в главе основано на установке электромагнитного перемешивания, изображенной на рис. 1.23. Источником магнитного поля в ней является прежний индуктор ЛИМ, а единственным отличием является замененный ВЭ с пластины на емкость с жидким металлом для того, чтобы можно было исследовать гидродинамические процессы.



Рис. 1.17. Схема подключения обмоток и векторы тока катушек

1.4.1. Численная модель в COMSOL Multyphysics

В данном разделе трехмерные численные расчеты проводились методом конечных элементов с использованием программного обеспечения Comsol Multiphysics. На первом этапе для электромагнитных расчетов мы использовали уравнения Максвелла, которые были сформулированы в терминах магнитного векторного потенциала. Расчеты магнитного поля, индуцированного тока и распределения сил Лоренца были выполнены с использованием интерфейса магнитных полей. В предположении о низком магнитном числе Рейнольдса ($Re_m = u_0 \mu_0 h \sigma = 0.065 \ll 1$) плотность индуцированного тока была рассчитана с помощью безиндукционной формулировки [20, 81, 149] основные уравнения для магнитного поля **В**, электрического поля **Е**, и электрического тока **J**:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \tag{1.17}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_B \mathbf{J},\tag{1.18}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},\tag{1.19}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E},\tag{1.20}$$

$$\nabla \times \mathbf{J} = 0, \tag{1.21}$$

где μ_B – магнитная проницаемость и σ – электропроводность.

Ток в пазах был задан как гомогенизированная многовитковая катушка, обмотка которой состояла из 170 витков медного провода. Сетка для электромагнитного расчета включала 152 329 тетраэдрических, 16 246 треугольных и 13 200 шестигранных элементов. Сетка для домена ячейки была построена с использованием прямоугольных элементов. Уточнение сетки выполняется по направлению к нижнему слою домена с учетом скин-эффекта. Внешний вид построенной сетки в индукторе и металле показан на рисунке 1.18.



Рис. 1.18. Конечно-элементная сетка для расчета в COMSOL Multiphysics.

Электромагнитная сила, действующая на жидкий металл, рассчитывалась как:

$$\mathbf{f}_{EM} = \mathbf{J} \times \mathbf{B},\tag{1.22}$$

где В магнитная индукция

Трехмерные численные расчеты проводились методом конечных элементов с использованием программного обеспечения Comsol Multiphysics. На первом этапе для электромагнитных расчетов были использованы уравнения Максвелла, которые сформулированы в терминах магнитного векторного потенциала в частотной области.

$$\nabla(\nabla \times \mathbf{A}) = \begin{cases} j\mu_r \mu_0 \omega \gamma \ - \ for \ non - conducting \ domains \\ j\mu_r \mu_0 \omega \gamma + \mathbf{J}_{ext} \ - \ for \ conducting \ domains \end{cases}$$
(1.23)

$$\mathbf{E} = -j\mu\omega\mathbf{A},\tag{1.24}$$

где **A** - магнитный векторный потенциал, μ - магнитная проницаемость, ω - угловая частота, γ - электропроводность, **J**_{ext} - внешняя плотность тока, **E** - напряженность электрического поля.

Как было упомянуто выше, исследование разделено на два случая. Первый случай - это обычное равномерное распределение плотности тока в катушках индуктивности. Это означает, что внешний ток определяется непосредственно плотностью тока. Для этого случая описанная модель ни чем принципиально не отличается от модели, реализованной в ANSYS Mechanical APDL, описанной в разделе 1.2.1.

Однако во втором случае внешний ток определяется косвенно расчетным напряжением с учетом схемы замещения и каскадного соединения обмотки. Расчет производится в соответствии с законами контура Кирхгофа для цепи, представленной на рисунке 1.19.



Рис. 1.19. Эквивалентная цепь для расчета случая с учетом нессиметрии токов

$$\mathbf{E_{coil}} = \int \mathbf{E} \ dL \tag{1.25}$$

$$R_{coil} = \int \frac{N\mathbf{L}}{\sigma aA} \, dA \tag{1.26}$$

где R_{coil} - полное сопротивление катушки, N - число витков, L - длина катушки, σ_{coil} - объемная проводимость провода, a_{coil} - площадь поперечного сечения провода, A - общая площадь поперечного сечения домена катушки. Интегрирование обеспечивалось по длине проводников катушки.

1.4.2. Результаты

На первом этапе анализируется полученная магнитная индукция в воздушном зазоре и жидкометаллическом ВЭ. Сравнение значений магнитной индукции, полученной с помощью двух расчетных подходов (идеальный и несимметричный), а также экспериментальных данных показано на рисунке 1.20. Видно, как *y*-компонента достигает максимума над зубцами магнитопровода и в целом распределена равномерно. Однако *x*-компонента магнитной индукции для расчета с учетом несимметрии имеет максимальное значение над пазом, где соединены потоки. Данный результат имеет хорошую сходимость с экспериментальными данными, за исключением двух областей над вторым и пятым зубцом магнитопровода где значения численных данных лежат ниже экспериментальных.

Как и следовало ожидать из рисунка 1.20, полученные графики распределения магнитой индукции над поверхностью ЛИМ будут идентичными со значениями магнитной индукции во ВЭ. Поверхность сечения по середине жидкометаллического ВЭ показана на рисунке 1.21, изображенная при этом магнитная индукция является соммой всех компонент. Сравниваются два случая задания симметричной и асимметричной системы токов индуктора. Как и ожидалось, в первом случае расчет дал равномерное распределение магнитной индукции с локальными пиками в зонах зубцов магнитопровода. Во





х-компонента

Рис. 1.20. Магнитная индукция в воздушном зазоре.

втором «несимметричном» случае различия величин тока и фазовых сдвигов между ними приводят к неравномерному распределению плотности магнитного потока. В средней области ВЭ появляется пик магнитного поля. Это явление можно объяснить уменьшением угла сдвига фаз между токами I_B и I со 120 ° до 89 ° (см. Рисунок 1.17), которые помещены в один паз с магнитным сердечником.



Рис. 1.21. Магнитная индукция в жидком металле [Тл].

Как известно, произведением векторов магнитной индукции и плотности индуцированного тока являются силы Лоренца. И для электромагнитного перемешивания это электромеханическое преобразование является ключевым фактором, определяющим эффективность работы. В этой связи представляет определенный интерес сравнение результата расчета ЭМ усилий, полученных двумя рассматриваемыми подходами. Тем более, как видно из графика 1.20, происходит не только изменение концентрации магнитного поля, а так-

же локальное превосходство одной компоненты магнитной индукции.

На рисунке 1.22 показаны векторы электромагнитных сил в расплаве, направление соответствует направлению вектору усилия, а размер пропорционален величине. Силы сонаправлены с бегущим магнитным полем. Следовательно, в результате воздействия магнитного потока ЭМ силы также имеют различие между симметричным и несимметричным случаями. В симметричном случае силы распределяются равномерно и сконцентрированы в основном у нижней поверхности расплава. С другой стороны, для несимметричного случая наблюдается пик усилий в средней области слоя металла в диапазоне с -0.05 до 0.05 м по длине x. Более того, x-компонента магнитной индукции, по правилу левой руки, вызывает отклонение векторов усилий в направление y-координаты или нормальной компоненты.



симметричный

несимметричный

Рис. 1.22. Распределение силы Лоренца в объеме жидкого металла.

Учет несимметрии токов индуктора БМП показал, что она оказывает определенное влияние на результат моделирования. В первую очередь это влияет на распределение магнитного потока, что позволило добиться хорошей сходимости с экспериментальными данными (рис. 1.20). Кроме того, этот эффект приводит к неравномерному распределению сил Лоренца и может оказывать влияние на динамику потока. Концентрация плотности магнитного потока в середине длины расплава может порождать дополнительные вихри и усложнять картину течений жидкого металла [14]. Данное явление может как отрицательно (тормозить основной поток), так и положительно (увеличивать нестабильность и кинетическую турбулентную энергию потока) влиять на технологический процесс и нуждается в дополнительных исследованиях выходящих за область данной работы. Например, стоит оценить влияние угла сдвига между фазами, вызванного асимметричной компенсацией, а также исследовать другие конструкции ЛИМ для объекта несимметрии.

Сравнивая с предыдущими исследованиями перемешивания БМП [84, 95,100,102], можно отметить, что предложенный подход к определению токов позволил повысить точность моделирования и целесообразности использования метода эквивалентной схемы для случая выраженной несимметрии. Подводя итог, можно сделать вывод, что поставленные задачи были достигнуты, выбранный метод показал хорошую сходимость по сравнению с экспериментом и может найти широкое применение как в области прикладной магнитной гидродинамики, так и моделирования ЛИМ в других приложениях.

1.5. Исследование гидродинамических течений

Для исследований гидродинамических течений в рассматриваемой экспериментальной установке пластина ВЭ заменена на прямоугольную емкость с жидким металлом. В качестве жидкого металла использовался низкотемпературный сплав GaSnZn. при этом индуктор ЛИМ остается прежним. Внешний вид экспериментальной установки показан на рисунке 1.23.

Параметры жидкого металла, используемого для исследования, приведены в таблице 1.2.

1.5.1. Математическая постановка гидродинамической задачи

Полученное поле электромагнитных сил f_{EM} из первой части модели было перенесено в гидродинамическую (ГД) часть в качестве исходного члена уравнения Навье-Стокса:



Рис. 1.23. Внешний вид экспериментальной установки перемешивания бегущим магнитным полем.

Таблица 1.2. Параметры жидкого сплава GaSnZn

Размер	$450\times20\times75$	MM^3
Электропроводность	$3.56\cdot 10^6$	См
Плотность	6256	kg/m^3
Кинематическая вязкость	$3 \cdot 10^{-7}$	m^2/c

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{g} + \frac{\mathbf{f}_{\mathbf{EM}}}{\rho}$$
(1.27)
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$
(1.28)

где ρ – плотность; **u** – скорость; ∇ – оператор набла; p — давление; η – динамическая вязкость; **g** – гравитация.

Максимальное значение числа Рейнольдса составляет $Re = \frac{\rho u_0 h}{\eta} = 1.5 \cdot 10^4$, поэтому, для описания течения жидкого металла была выбрана модель турбулентности k- ω SST⁵. также было прописано условие скольжения на границе верхней поверхности и условие прилипания на остальных стенках. Расчетная

 $^{^5}$ SST – Shear Stress Transport

область содержала 37 500 шестигранных⁶ и 7 750 четырехугольных⁷ конечных элементов. Максимальный размер элемента был ограничен 5 мм, и сетка была уточнена в приграничных областях объема.

Экспериментальные измерения скорости жидкого металла

Предлагается проверить численные результаты путем сравнения с экспериментальными данными. Измеряемый параметр – это профили течений жидкого металла. Скорость этих потоков, инициируемых в жидком металле, измерялась ультразвуковым доплеровским анемометром (УДА) DOP 2000, Signal Processing. Четыре датчика УДА были размещены на тонкой стенке ячейки на равном растоянии друг от друга равном 16 мм. Внешний вид экспериментальной установки и схематическое расположение датчиков УДА показано на рисунке 1.24. Ультразвуковая допплеровская анемометрия включает в себя излучение волновых сигналов ультразвуковым преобразователем, прием отраженных импульсов (эхо-сигналов) и вычисление доплеровского сдвига частоты между излучаемым и принимаемым волновыми сигналами. Более подробное описание экспериментальной установки и измерительных систем можно найти в работах [85,93].





 $^{^{6}}$ от англ. h
exahedral

 $^{^7}$ от англ. quadrilateral

Результаты расчета гидродинамических течений

Следующим этапом расчета является расчет гидродинамических течений под электромагнитным силовым воздействием. На рисунке 1.25 показана эволюция скорости жидкого металла под действием бегущего магнитного поля. Изначально расплав находился в покое и имел нулевую скорость во всем объеме. Затем индуцированные силы, которые сконцентрированы на нижней поверхности объема жидкого металла начинают приводить его в движение. Поток образует один основной вихрь. Значение скорости в нижней части больше из-за близости индуктора и наличия скин-эффекта. Начиная с восьмой секунды уже весь объем приводится в движение и развивает значительные скорости. Такие, что движение расплава носит весьма нестабильный характер. Поток образует один основной вихрь. Скорости достигают значения 100 мм/с, при токе индуктора 6 А. Стоит отметить, что эта схема потока соответствует, описанной аналитически в [150].

На рисунке 1.26 приведено сравнение профиля скорости, рассчитанного моделью, с измеренным УДА на расстоянии 29,5 мм от нижней поверхности емкости. В основном скорость имеет отрицательные значения, что означает, что поток в нижней части емкости направлен в сторону от оси . Резкое снижение скорости между 0,2 и 0,25 м может быть объяснено пиком магнитной индукции, отмеченным ранее на рисунке. 1.20. Пик в последнем сегменте профиля скорости, полученный расчетным путем, отсутствует на экспериментальной кривой из-за разрушения ультразвуковой волны. Рисунок. 1.26 показывает хорошее согласие между результатами численного моделирования поля скоростей и экспериментальными результатами.

Применение модуляции во времени бегущего магнитного поля Исходя из обзора литературы был принят исследуемый диапазон частот времен-



Рис. 1.25. Эволюция скорости потока жидкого металла под воздействием постоянно действующего БМП



Рис. 1.26. Сравнение экспериментальных измерений и численного моделирования усредненного продольного профиля скорости.

ной модуляции бегущего магнитного поля с 0.02 по 0.1 Гц.

На рисунке. 1.27 приводится сравнение динамики локальной скорости

экспериментально измеренной и полученной в результате численного моделирования. Координаты выбранной точки составляли 0.25 от длины емкости и 0.42 от ее высоты. В обоих случаях возникающий поток крайне нестабилен из-за относительно высокого числа Рейнольдса. В случае применения постоянно приложенного устойчивого БМП скорости потока лежат в основном в области положительных значений. Как и ожидалось, модулированное БМП генерирует обратную полуволну потока.



Рис. 1.27. Сравнение динамики скорости металла в точке, полученной в результате численного моделирования и экспериментально измеренной. Рассматривается 2 случая: а – постоянно приложенное БМП, б – реверсивно модулированное БМП.

На рисунке 1.27 (б) изображена динамика скорости потока с периодом реверсирования 40 секунд. Функция модуляции была задана синусоидой, а не ступенчатой функцией, как, например, в работах [107, 150]. В результате, получена кривая без экспоненциального характера, которая ближе к синусоиде. Однако стоит отметить большую нестабильность скорости потока, которая измерена экспериментально и в этом случае будет наблюдаться множество гармоник.

Исходя из сравнения, можно заключить, что RANS подход (с осреднением), используемый в модели, не позволяет предсказать мелкомасштабные пульсации и колебания значения скорости, однако имеет хорошую интегральную сходимость с экспериментальными данными как для постоянного, так и для реверсивного случаев. Таким образом, можно сделать вывод о достоверности расчета гидродинамических течений, как под воздействием постоянно приложенного БМП, так и при реверсивной модуляции БМП. В дальнейших исследованиях, чтобы лучше идентифицировать пульсации, необходимо использовать метод крупных вихрей LES⁸

Основными характеристиками эффективности перемешивания жидкого металла были выбраны среднее Re_m и пульсационное Re_p значения числа Рейнольса. Эти значения рассчитаны для максимальной на средней и пульсационной х-составляющей скорости. Рисунок 1.28 представляет зависимости чисел Рейнольдса от интенсивности электромагнитного воздействия и периода модуляции БМП.

По мере увеличения интенсивности внешнего воздействия скорость течения увеличивается нелинейно с выходом в область «насыщения» при токах питания индуктора более 6 А. При этом максимума достигает как среднее так и пульсационное числа Рейнольдса (Рис. 1.28 а, б). Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Отличие наблюдается лишь вблизи верхней поверхности металла в силу искривления свободной поверхности в эксперименте, что не учитывается в численной модели. Наилучшая сходимость численных и экспериментальных данных обеспечивается при низких значениях тока в катушках в силу слабого влияния течения на форму свободной поверхности. Максимально достижимое среднее число Рейнольдса лишь незначительно превышает максимум пульсационного, что говорит о значительном вкладе мелкомасштабных течений в общую структуру потока. Тем не менее, наличие области «насыщения» показывает неэффективность управления перемешиванием жидкого металла за счёт од-

⁸ от англ. Large Eddy Simulation


Рис. 1.28. Средняя по времени скорость потока (а, в, д) и амплитуда пульсации скорости (б, г, е) в зависимости от тока питания (а, б), периода пульсирующей модуляции (в, г) и периода реверсивной модуляции (д, е). Линия представляет численные результаты, а точки представляют экспериментальные данные. Числа в легенде представляют высоты уровня поперечных сечений: 1) 62 мм, 2) 46 мм, 3) 30 мм, 4) 14 мм

ного только увеличения вкачиваемой в систему мощности. Это приводит к необходимости разработки дополнительных механизмов внесения мелкомасштабных гидродинамических структур в основной поток. Таким механизмом могут послужить модуляции электромагнитного воздействия.

Модулированное течение создавалось при амплитуде тока питания 6.0 А. Таким образом выполнялось условие минимизации энергозатрат при максимальном увеличении скорости течения металла. В режиме модуляции амплитуда БМП изменялась по периодическому закону от нуля до амплитудного значения с периодом $\tau = 5 - 50$ с. Зависимости среднего и пульсационного значения числа Рейнольдса представлены на Рис. 1.28 в, г. По мере увеличения периода модуляции наблюдается уменьшение Re_m . При этом происходит незначительное увеличение Re_p . Наибольшая интенсивность гидродинамических пульсаций наблюдается в области локализации крупномасштабного вихря (вблизи дна кюветы и свободной поверхности). Эти пульсации повторяют характер электромагнитного воздействия и являются низкочастотным квазистационарным течением, на фоне которого возникают вторичные мелкомасштабные структуры.

Второй рассматриваемый режим модуляции БМП принято называть реверсивным. В этом случае величина магнитной индукции изменялась в течение периода по синусоидальному закону. Во втором полупериоде направление БМП изменилось на противоположное. Эта реверсивная модуляция генерировала выраженный импульсный поток в жидкой фазе. Реверсный режим течения характеризуется низкими значениями Re_m в силу периодической смены направления крупномасштабных вихрей. Значительное отличие экспериментальных и численных данных в области верхней поверхности металла объясняется изменением формы свободной поверхности при периодическом изменении направления вращения крупномасштабных вихревых структур. Тем не менее, в основном объёме кюветы данные экспериментов и симуляции согласуются.

Пульсационная составляющая реверсного течения отличается значительным вкладом мелкомасштабных (в смысле пространственных размеров и периодов оборота вихрей) в общую структуру потока по сравнению с ранее рассмотренными режимами. В силу ограниченности разрешения пространственных и временных масштабов вихревых структур метода измерений УДА, экспериментально полученные значения Re_p оказываются занижены по сравнению с численной симуляцией, разрешающей гораздо более мелкомасштабные структуры. Опираясь на данные симуляции (в основном объёме слоя) можно сделать вывод о двукратном увеличении Re_p в случае низкочастотной реверсивной модуляции по сравнению со случаями отсутствия модуляции течения или амплитудной модуляции.

74

Выводы по разделу

В ходе выполнения работ в данном разделе были достигнуты следующие результаты:

- 1. Создана численная модель электромагнитного перемешивания односторонним индуктором БМП
- 2. Описан экспериментальный метод измерения скорости течения жидкого металла
- 3. Проведена верификация гидродинамического расчета
- 4. Исследовано влияние питающего тока индуктора на характеристики гидродинамического потока расплава
- Исследовано влияние модуляции во времени бегущего магнитного поля на характеристики гидродинамического потока расплава

В представленном разделе проведено численное и экспериментальное исследование влияния параметров питания индуктора БМП на результирующий поток жидкого металла в прямоугольной ячейке. Экспериментальные и численные результаты имеют хорошую сходимость.

Увеличение величины тока до 5 А и выше приводит к линейному увеличению средней скорости потока, а при больших значениях тока к «насыщению» его зависимости от тока. Было установлено, что низкочастотная модуляция БМП влияет на динамику потока и представляет особый интерес для исследований. Модуляции изменяют структуру потока, генерируемого в жидком металле. Низкочастотные модуляции приводят к созданию дополнительной пульсации потока. Он оказывает благотворное влияние на эффективность перемешивания металла и может применяться в процессе кристаллизации слитков. Применение обратных модуляций разрушает крупномасштабный средний вихрь. Увеличение периода модуляции предположительно приводит к росту энергии пульсирующего потока и минимизирует среднюю скорость. Это явление не только эффективно увеличивает перемешивание, но также изменяет теплообмен в объеме металла. Это может найти применение как в металлургическом производстве, так и в процессе выращивания кристаллов.

Под действием постояно приложенного БМП интенсивность течений в расплаве растет нелинейно и имеет область «насыщения» при питании более 6 А. Образование крупномасштабного вихря, интенсивность которого не зависит от величины приложенного электромагнитного воздействия, способно оказать негативное влияние на распределение примесей и легирующих добавок в объёме металла за счёт удержания примесей вихрем. Наличие предела максимальной скорости течения приводит к необходимости внедрения новых механизмов повышения эффективности перемешивания. Таким способом может послужить управление питанием индукционной машины. Очевидным преимуществом метода является техническая простота и дешевизна модификации существующих технологических установок.

Низкочастотные модуляции питания ЛИМ повышают интенсивность мелкомасштабных течений, создаваемых в объёме перемешиваемого расплава. Это также позитивно сказывается на переносе тепла в ходе кристаллизации отливок (сглаживает фронт кристаллизации и уменьшает количество дефектов зерен). Изменение направления БМП разрушает крупномасштабные вихри и создаёт множественные мелкомасштабные течения, способствующие эффективному перемешиванию жидкости. Такой режим питания ЛИМ может осуществляется при помощи простого реверсивного контактора.

Ограниченные возможности существующих экспериментальных методик приводят к необходимости развития и верификации численных моделей, учитывающих специфику конкретных задач (в том числе геометрию емкости,

76

взаимное влияние электромагнитных полей всех участков установки, фазовые превращения). В данном разделе была предпринята попытка продвинуться в области численного моделирования и верификации МГД-модели. Несмотря на некоторое несовершенство, использованная модель позволяет адекватно описать структуру и характеристики течения в основном объёме жидкого металла.

Перспективным в дальнейшем может быть проведение исследований образования вихрей под действием модулированного БМП с использованием более точных моделей турбулентности, а так же численное исследование процесса кристаллизации в модулированном БМП.

1.6. Исследование электромагнитных сил в процессе кристаллизации

Как показано в разделе 1.5, электромагнитное перемешивание является хорошим инструментом для контроля потоков жидкого металла. Одно из перспективных применений данной техники это управление конвективными потоками жидкой фазы затвердевающего металла. Применение электромагнитного перемешивания позволяет управлять параметрами макро и микроструктуры, что влияет на механические свойства затвердевающих металлов [86,136,137,151]. Логическим продолжением исследования электромагнитного перемешивания описываемого в данной главе, является проведение попытки анализа электромеханического или электромагнитного воздействия на процесс кристаллизации.

Электромагнитные силы, возникающие в жидком металле, являются важнейшим параметром определяющим характер потока жидкости и следовательно условий кристаллизации металла.

Pahee, Dubke et al. [138, 152] показали возможность аналитически опре-

77

делять усилия, индуцируемые в жидком металле при воздействии на него индуктором бегущего магнитного поля. Усилие определяется как:

$$F_{x \ time \ average} = \frac{\sigma \omega B_0^2}{2\lambda h},\tag{1.29}$$

где волновой вектор поля $\lambda = \pi/\tau$; τ – полюсное деление индуктора; B_0 – вещественная амплитуда B_y на поверхности (y = 0) металлической среды.

Позднее Герберт и Грантс [153] проанализировали влияние этого безразмерного электромагнитного параметра силового воздействия на стабильность и интенсивность потоков в цилиндрическом объеме жидкого металла. Отмечается, что отношение числа Грасгофа и данного электромеханического параметра N = Gr/F является определяющим для характера и интенсивности потоков затвердевающего металла под воздействием БМП.

Однако, как известно, в процессе направленной кристаллизации или плавки объем жидкой фазы не является постоянным во времени, а перемещается по направлению приложенного градиента температур. Никритюк П. [33] провел исследование влияния отношения σ_s/σ_l на силы Лоренца при кристаллизации во вращающемся магнитном поле. Показано, что не только твердая фаза сама по себе, но также и отношение электропроводностей твердой и жидкой фаз металла σ_s/σ_l могут влиять на распределение и интенсивность электромагнитных усилий в жидкой фазе кристаллизующегося слитка.

Noeppel и др [137] отмечают, что взаимодействие свободной тепловой и вынужденной электромагнитными силами конвекций в итоге определяют распределение макросегрегаций в кристаллизующемся слитке двухкомпонентного сплава.

как показано в работе [99], отношение N = Gr/F, влияет на характеристики результирующих конвективных потоков в жидкой фазе слитка и форму фронта кристаллизации. Численно обнаружено, что с продвижением фронта кристаллизации параметр ЭМ силового воздействия *F* становится меньше, что соотвественно влияет на параметр *N*. Контроль этого параметра может привести к контролю над условиями кристаллизации и поможет предсказанию макроструктуры слитка.

Разница температур между горячей стенкой и фронтом кристаллизации определяет величину свободно-конвективных сил и число Грасгофа

$$Gr = \frac{g\beta(T_h - T_S)H^3}{\nu^2},$$
 (1.30)

где g – гравитационная постоянная; β – коэффициент теплового расширения; T_h – температура горячей стенки; T_S – температура фронта кристаллизации; H – высота емкости; ν – кинематическая вязкость.

Для того чтобы сравнить $F_{x \ time \ average}$ с числом Грасгофа, вводится безразмерный параметр ЭМ силового воздействия, который определяется относительно сил вязкости следующим образом:

$$F = \frac{F_{x \ time \ average}H^3}{\rho\nu^2}.$$
 (1.31)

Схематически взаимодействие этих двух параметров для горизонтальной кристаллизации под действием бегущего магнитного поля показано на рисунке 1.29.

То есть, эти два параметра могут быть оцененны аналитически. Следовательно, можно, зная все параметры, оценить характер конвективных потоков в жидкой фазе и форму фронта кристаллизации. Однако приведенная формула безразмерного параметра электромагнитного силового воздействия справедлива только для начального момента времени, когда весь объем металла жидкий. А, как отмечается, с продвижением фронта кристаллизации, а так же с изменением его формы может произойти изменение этого параметра.

В данном разделе предлагается численно оценить влияние роста и формы фронта кристаллизации на удельное электромагнитное усилие в жидкой



Рис. 1.29. Схематическое изображение взаимодействия свободно конвективных (Buoyancy) и вынужденных электромагнитной силой (EM forced) потоков в случае горизонтальной кристаллизации.

фазе. Это может быть полезным для определения отношения числа Грасгофа к параметру ЭМ силового воздействия на разных стадиях кристаллизации в бегущем магнитном поле. То есть позволит определить структуру и интенсивности взаимодействующих потоков в кристаллизующейся жидкости в зависимости от формы и продвижения границы раздела фаз. И соотвественно определить условия кристаллизации, что поможет оценить параметры материала, которые будут получены в данных условиях.

1.6.1. Исследуемая установка и метод

Ранее была разработана экспериментальная установка по электромагнитному перемешиванию бегущим магнитным полем в Институте механики сплошных сред УрО РАН [93]. На ней были проведены эксперименты по горизонтальному затвердеванию GaSnZn [85]. В качестве измерений использовался метод УДА с помощью которого определялось положение, скорость роста и форма фронта кристаллизации. Было определено, что вынужденные электромагнитными силами конвективные потоки могут влиять на форму фронта кристаллизации. В настоящей работе будет произведена оценка, как встречающиеся в литературе изменения формы фронта кристаллизации могут влиять на параметр электромагнитного силового воздействия.

Численный анализ определялся следующим образом. Расчетная область делилась на условно жидкую и условно твердую. Электропроводность твердой фазы составляет $\sigma_S = 4.63 \cdot 10^6 \text{ Cm/m}$, а жидкой $\sigma_L = 3.86 \cdot 10^6 \text{ Cm/m}$ таким образом, их отношение равно $\sigma_S/\sigma_L = 1.2$. Затем в объеме жидкой фазе вычислялось интегральное значение электромагнитных сил F_x по оси x. Данное усилие делили на объем жидкой фазы, тем самым получая удельное объемное усилие в жидкой фазе $F = F_x/V_L$. Для того, чтобы понимать измение этого удельного электромагнитного усилия в зависимости от продвижения фронта кристаллизации, был введен безразмерный параметр электромеханического воздействия $F_{em} = F/F_0$, который учитывает отклонение от первоначального значения, когда весь объем был жидким F_0 .

Электромагнитные расчеты выполнялись методом конечных элементов в соответствии с описанным в 1.4.1 подходом.

1.6.2. Постановка задачи исследования

При исследовании удельного усилия в расплаве использовалась описанная ранне трехмерная модель ЛИМ, с емкостью размером – 0.44×0.076×0.02 м, заполнена эвтектическим сплавом GaZnSn, направление БМП однонаправленно с направлением затвердевания расплава, питание симметричным напряжением, сила тока ≈ 4 А. Для того, чтобы определить, как фронт кристаллизации влияет на безразмерный параметр электромагнитного силового воздействия, были выделены следующие случаи для рассмотрения в данном разделе.

Первый, самый очевидный случай – это пространственное продвижение фронта кристаллизации во времени, связанного с уменьшением соотношения объемов жидкой и твердой фаз кристаллизующегося слитка. В данном случае вводится допущение, что фронт абсолютно плоский и перпендикулярен направлению кристаллизации.

Для того, чтобы определить дополнительные исследуемые случаи изменения фронта кристаллизации, необходимо обратиться к литературе и выявить наиболее часто встречающиеся деформации фронта.

Итак, вторым и третьим рассматриваемым случаем принято исследование наклона границы раздела фаз. Отклонение фронта кристаллизации от перпендикулярного положения относительно направления кристаллизации может быть вызвано интенсивными конвективными потоками в жидкой фазе. Данный тип деформации фронта часто встречается в случаях кристаллизации под воздействием бегущего магнитного поля. В настоящей работе предлагается рассмотреть изменение угла наклона относительно центральной точки (второй случай) емкости и центральной точки на дне кюветы (третий случай).

Четвертым исследуемым случаем принята деформация фронта, которая наиболее близко описывается синусоидой. Данный тип деформации встречается при горизонтальной кристаллизации с одновихревым перемешиванием, которое может быть вызвано бегущим магнитным полем или значительным градиентом температуры, и наблюдался в работе [85].

И последним, **пятым** случаем исследована деформация границы разделом фаз в форме мениска, причем, как с положительным, так и с отрицательным изгибом. Данный тип деформации может наблюдаться при достаточно интенсивном одновихревом перемешивании (для одностороннего перемешивания БМП или свободно-конвективных потоков), в таких условиях фронт размывается более теплой жидкой фазой [88]. Другие приложения, в которых можно наблюдать данную деформацию фронта, это перемешивание цилиндрическим [81] или двусторонним индуктором [103] бегущего магнитного поля. Причем под цилиндрическим принимается индукторы БМП для выращивания полупроводниковых кристаллов.

Также необходимо отметить, что третья компонента деформации на данном этапе не учитывается и рассматриваются только изменения в плоскости x-y. Принимается, что задача квазидвумерная или так называемый $2D^{1/2}$ случай [154], когда ширина расплава значительно меньше ширины индуктора.

Обобщая рассматриваемые случаи, можно сформулировать их как:

- 1. Движение прямолинейного фронта;
- Изменение наклона фронта относительно центральной точки на дне емкости;
- 3. Синусоидально изогнутый фронт;
- 4. Изменение наклона фронта относительно центра емкости;
- 5. Параболически изогнутый фронт;

В таблице 1.3 приводится обобщенные параметры, задействованные в данном разделе для упрощения восприятия информации читателем.

1.6.3. Результаты

Движение прямолинейного фронта

Итак, первый рассматриваемый случай – это продвижение плоского фронта кристаллизации перпендикулярно приложенному градиенту температуры, т.е. горизонтально. На рисунке 1.30 (левая часть) показаны три стадии продвижения фронта. Затвердевание начинается от правой стенки и затем фронт передвигается к левой стороне, пока объем полностью не будет твердым. Параметр L_S обозначает размер затвердевшего металла по оси x, а относительное положение фронта характеризуется отношением L_S/L_x , где $L_x = 0.44$ м – это длина слитка по оси x.

Параметр	Обозначение	
L_S	размер твердой фазы вдоль оси x	Рис. 1.30
L_x	длина металла вдоль оси x	0.44 м
F_{em}	безразмерный параметр электромеханического	$F_{em} = F/F_0$
	воздействия на жидкую фазу	
F	удельное объемное усилие в жидкой фазе	$F = F_x / V_L$
F_x	интегральное значение усилия вдоль	$F_x = \int_{vol} F_x dV_L$
	оси x в жидкой фазе	
V_L	объем жидкой фазы	
F_0	усилие в первоначальном объеме жидкого металла	$F_0 = F_x / V_{L0}$
V_{L0}	первоначальный объем жидкого металла	$0.44 \times 0.076 \times 0.02 \text{ m}^3$
ϕ	угол наклона фронта кристаллизации	Рис. 1.31 и 1.32
A	амплитуда синусоиды и параболы	Рис. 1.33 и 1.34

Таблица 1.3. Обозначение параметров

Также, на рисунке отмечена цветовой шкалой электропроводность затвердевающего слитка. Черный цвет соотвествует твердой фазе и следовательно имеет большую электропроводность чем жидкая фаза, обозначенная белым цветом. В жидкой фазе черные векторы соответствуют электромагнитным усилиям в ней. Данная легенда будет соответствовать всем нижеописанным случаям.

Как видно из рисунка 1.30 (левая часть), основные усилия сконцентрированны на нижней поверхности слитка, а также в районе центральной области. Эта неравномерность в распределении усилий будет играть основную роль в определении удельного электромагнитного усилия. Если же мы обратимся к правой части рисунка, мы обнаружим зависимость безразмерного параметра электромеханического воздействия на жидкую фазу F_{em} от относительного положения фронта L_S/L_x . На нулевом этапе весь объем является жидким и $F = F_0$, следовательно $F_{em} = 1$. Затем, продвижение фронта исключает краевую зону, в которой усилия менее интенсивны и относительное удельное



Электропроводность (См/м) и векторы ЭМ сил в жидкой фазе

Рис. 1.30. Случай 1. Продвижение прямолинейного фронта

усилие немного увеличивается на (10%). Однако, после прохождения середины слитка ($L_S/L_x = 0.5$) можно наблюдать снижение силового параметра, связанное с тем, что наиболее активные усилия в центральной области более не находятся в жидкой фазе. Объем жидкой фазы V_L уменьшается линейно по мере роста твердой фазы.

Результаты численного расчета, выполненные с шагом $L_x/20 = 0.022$ м, были апроксимированы функцией

$$F_{em}(L_S) = -1.752 \left(\frac{L_S}{L_x}\right)^2 + 0.8829 \frac{L_S}{L_x} + 0.9873, \qquad (1.32)$$

которая показана на графике. Коэффициент детерминации⁹ составил 0.99.

Изменение наклона фронта относительно нижней центральной точки кюветы

В этом случае изменялся угол наклона фронта кристаллизации ϕ относительно нижней, центральной точки емкости. Характер изменения представлен на рис. 1.31 (левая часть). Тем самым имитируя неравномерный рост

 $^{^{9}}$ adjusted R-square

твердой фазы. Данный случай должен показать зависимость удельного усилия от угла наклона фронта, а также экранирующее влияние уже затвердевшего металла, которое отмечалось, например, в работе [2]. Стоит отметить, что в этом случае объем жидкой фазы уменьшается с увеличением угла ϕ .



Электропроводность (См/м) и векторы ЭМ сил в жидкой фазе



На рисунке 1.31 (правая часть) показана зависимость удельного объемного усилия в расплаве F_{em} от угла наклона фронта ϕ . График исключает экстремальные случаи, (из-за их не физичности), и показывает значения только в диапазоне $40^{\circ} - 140^{\circ}$.

Увеличение угла наклона ведет к повышению удельного усилия. При $\phi = 40^{\circ}$ значение функции меньше единицы, что объясняется тем, что твердая фаза заполняет активную область в правой части емкости, при этом верхний объем, в котором усилия значительно меньше, остается жидким. Затем, когда угол становится прямым, функция достигает значения, равного единице, и растет практически линейно. На этой стадии $\phi > 90^{\circ}$ твердая часть заполняет верхние, неактивные слои при том, что жидкая фаза остается в нижнем активном слое.

Кривая носит нелинейный характер, который объясняется прямоуголь-

ной формой объема, и, следовательно, нелинейным уменьшением объема жидкой фазы при увеличении угла ϕ и, например при $\phi = 130^{\circ}$ фронт находится в углу, после которого идет увеличение наклона кривой.

Аналитическая аппроксимация в рассматриваемом диапазоне значений угла ϕ может быть сделана линейной функцией

$$F_{em}(\phi) = 0.006048 \cdot \phi + 0.493, \tag{1.33}$$

которая показана на графике. Коэффициент детерминации составил 0.99.

Изменение наклона фронта относительно центра

Помимо наклона относительно нижней точки металла был рассмотрен случай наклона относительно центральной точки. В данном случае объем остается постоянным. Характер изменения представлен на рис. 1.32 (лево), изменялся угол наклона плоскости относительно средней точки. Экстремальные случаи, так же были исключены из анализа и рассматривается только диапазон 40° – 140°.



Электропроводность (См/м) и векторы ЭМ сил в жидкой фазе

Рис. 1.32. Сазе 4. Положение наклоненного по центру фронта

Зависимость же параметра электромеханического воздействия от угла наклона фронта показана на рисунке 1.32 (право). При угле $\phi = 40^{\circ}$ силовое

воздействие составляет лишь 0.6 от изначального, что объясняется тем, что жидкий металл преимущественно расположен в верхних слоях, а в активной зоне электромагнитного воздействия располагается твердый металл. Затем, значение функции растет, так как все больше объема жидкой фазы попадает в нижние слои активного электромагнитного силового воздействия. Кривая численных результатов была аппроксимированна функцией

$$F_{em}(\phi) = 0.007656 \cdot \phi + 0.3129, \tag{1.34}$$

где ϕ – угол наклона фронта кристаллизации относительно средней горизонтальной линии, градусы.

На рис 1.32 показаны графики усилия в расплаве, объема и удельного усилия в расплаве. так же отмечается что при увеличении угла границы раздела фаз эффективность электромеханического воздействия возрастает.

Синусоидальный фронт

Характер изменения так называемого синусоидального фронта представлен на рис. 1.33. Изменялась амплитуда синусоидальной функции A от 38 мм до -38 мм, другими словами амплитуда изменяется от 0 до 38 мм при двух углах сдвига фазы синусоидальной функции 0 и 180 градусов. Значение максимальной амплитуды выбрано таковым, что является половиной высоты жидкого металла.

В данном случае объем жидкой фазы остается постоянным $V_L = const.$ Поэтому на удельное объемное усилие оказывает влияние только интегральное значение усилий в этой жидкой фазе. Как известно, основные силы сконцентрированны в нижних слоях металла, поэтому нижняя полуволна синусоиды является определяющим параметром. В случае, когда нижняя полуволна заполняет пространство твердым металлом, удельное объемное усилие ниже



Электропроводность (См/м) и векторы ЭМ сил в жидкой фазе

Рис. 1.33. Сазе 3. Положение синусоидального фронта

единицы, так как при этом верхняя полуволна заполнена жидким металлом. Затем по мере уменьшении амплитуды до нуля и увеличение ее в обратной фазе мы можем наблюдать линейный рост функции, который объясняется тем, что все больше жидкой фазы находится в активной области электромагнитного воздействия

Экспериментальные данные апроксимированы кривой с коэффициентом детерминации равным 0.99:

$$F_{em}(A) = 2.611 \frac{A}{L_x} + 1.004, \qquad (1.35)$$

где $\frac{A}{L_x}$ – максимальное относительное отклонение синусоидальной функции описывающей деформацию фронта кристаллизации, о.е.

Параболический фронт

Последним рассматриваемым случаем является параболическая деформация фронта кристаллизации. Характер изменения наглядно представлен на рисунке 1.34 (лево), изменялась амплитуда параболы A в пределах от 38 мм до -38 мм, тем самым имитируя прямой и обратный мениск. На рисунке показаны три случая выгнутого (A = -18 мм), близкого к плоскому (A = 2



мм) и вогнутого фронта кристаллизации (A = 18 мм), а так же усилия в жидкой фазе.

Электропроводность (См/м) и векторы ЭМ сил в жидкой фазе

Рис. 1.34. Case 5. Положение параболического фронта

Анализ влияния амплитуды параболического фронта выполнен на рисунке 1.34 (право). Показана зависимость удельного объемного усилия в жидкой фазе F_{em} от относительного отклонения параболического фронта A/L_x . Увеличение соотношения A/L_x вызывает увеличение объема жидкой фазы. Тем самым удельное объемное усилие линейно уменьшается. Также это снижение можно связать и с «зарастанием» нижней части кюветы более электропроводящим и экранирующим твердым металлом. Однако стоит отметить, что влияние не такое значительное, как в некоторых предыдущих случаях. Так, например, созданная «лунка» глубиной, равной половине высоты металла (38 мм), снижает электромагнитное усилие на $\approx 2\%$.

Полученные расчетные данные апроксимированы кривой с коэффициентом детерминации равным 0.99:

$$F_{em}(A) = -0.2804 \frac{A}{L_x} + 1.005, \qquad (1.36)$$

где $\frac{A}{L_x}$ – максимальное относительное отклонение параболической функции или относительная глубина лунки, о.е.

Комплексное влияние продвижения и наклона фронта кристаллизации

Выше рассмотрены идеализированные случаи. Однако в реальности могут встречаться различные комбинации деформаций и перемещения границы раздела фаз. Так в настоящем разделе будет показана попытка совместить продвижение (случай 1) и наклон фронта кристаллизации (случай 3) и определить влияние этих параметров на удельное объемное электромагнитное усилие F_{em} . Для этого на каждом этапе продвижения фронта L_S было дополнительно рассчитано 5 углов наклона ϕ .

На рисунке 1.35 приводятся результаты расчета такого численного эксперимента. Точки соответствуют результатам численного моделирования, а поверхность является аппроксимацией полученных данных. На первом этапе, когда объем металла полностью жидкий, параметр F_{em} равен единице. Затем по мере продвижения фронта кристаллизации для $\phi > 110^{\circ}$ возникает увеличение удельного усилия, которое почти достигает значения 1.4. В этом случае фронт наклонен таким образом, что верхние, неактивные слои становятся твердыми, а нижние, активные остаются жидкими.



Рис. 1.35. Сравнение удельных усилий в жидкой фазе в зависимости от наклона и формы границы раздела сред

Противоположную картину можно наблюдать в случае $\phi < 80^{\circ}$. В этой области до того, как фронт заполнил 40% от объема, удельное усилие держится в районе единицы, однако при соотношении $L_S/L_x > 0.4$ можно наблюдать достаточно резкое снижение силового параметра. Данное явление можно объяснить тем, что угол наклона фронта таков, что верхние, неактивные слои остаются жидкими, тогда как а нижние, активные являются твердыми и, более того, экранируют магнитное поле.

Угол $\phi < 80^{\circ}$ является меннее эффективным на стадиях $L_S/L_x > 0.5$ и в экстремальном случае может привести к полному затуханию электромагнитных сил в жидкой фазе. Тогда как удержание угла $\phi > 100^{\circ}$ даже на последних стадиях кристаллизации позволяет сохранять параметр силового воздействия около единицы. Это означает сохранение условий кристаллизации на всем протяжении этого процесса.

Аппроксимация полученных данных плоскостью также показана на рисунке 1.35. Функция, описывающая эту плоскость с коэффициентом детерминации, равным 0.99, выглядит следующим образом:

$$F_{em}(L_S,\phi) = 0.451 - 0.03717 \frac{L_S}{L_x} + 0.01946\phi + -1.82 \left(\frac{L_S}{L_x}\right)^2 + 0.00437 \frac{L_S\phi}{L_x} - -0.0002151\phi^2 + 0.004009 \left(\frac{L_S}{L_x}\right)^2 \phi + 3.673e^{-5} \frac{L_S}{L_x}\phi^2 + 7.599e^{-7}\phi^3, \quad (1.37)$$

где $\frac{L_S}{L_x}$ – относительное положение фронта кристаллизации, о.е., ϕ – угол наклона фронта кристаллизации, градусы.

Данная функция получается достаточно большой, и было принято решение ее упростить следующей функцией:

$$F_{em}(L_S,\phi) = 1.038 - 1.145 \frac{L_S}{L_x} - 0.001798\phi - 1.201 \left(\frac{L_S}{L_x}\right)^2 + 0.01896 \frac{L_S}{L_x}\phi + 1.267e^{-5}\phi^2$$
(1.38)

Точность такой функции ниже предыдущей, коэффициент детерминации равен 0.9485, что является приемлемым. Функция может быть еще более простой:

$$F_{em}(L_S,\phi) = 1 - 0.9379 \frac{L_S}{L_x} + 0.0003019\phi - 1.317 \left(\frac{L_S}{L_x}\right)^2 + 0.0164 \frac{L_S\phi}{L_x} \quad (1.39)$$

1.6.4. Выводы и анализ полученных в разделе результатов.

Исходя из описанных результатов, можно сделать следующие выводы:

1. Рост фронта кристаллизации влияет на удельное усилие в жидкой фазе. При неравномерном распределении магнитного поля в реальных индукторах в центральной области концентрация электромагнитных сил выше и проход фронта через эту область ведет к затуханию удельных усилий. Следствием этого является снижение скорости расплава, что отмечается многими авторами, и преобладанием важности естественно конвективных потоков.

2. Контроль наклона и формы границы раздела сред позволит передавать электромеханическое усилие в жидкую фазу более эффективно. Например, при отрицательном наклоне или лунке твердой фазы, повышается объем жидкости в активной зоне скин слоя, что может привести к более интенсивным скоростям расплава.

3. Ввиду малого соотношения проводимостей твердой и жидкой фаз эвтектического сплава GaZnSn (1.2), влиянием перераспределения токов на электромагнитные усилия можно пренебречь и расчет вести только для одного случая. Для материалов с большим соотношением (около 10, как для сталей, полупроводников, и др.) требуется дополнительное исследование данных зависимостей.

4. Из пункта 3 следует, что по экспериментальному положению фронта и токам можно рассчитать усилия в расплаве, например для оценки правильности скоростей, если они известны.

В работе [33] отмечается, что помимо продвижения самого фронта, свой вклад в определение удельного электромагнитного усилия может внести со-

отношение электропроводностей σ_S/σ_L . Эта гипотеза также нуждается в дополнительных исследованиях.

Как известно, процедура точного масштабирования требует определения соответсвующих безразмерных чисел. Полученные безразмерные параметры могут быть полезны для масштабируемости установок электромагнитного перемешивания бегущим магнитным полем [155, 156].

1.7. Выводы к первой главе

В данной главе представлено исследование одностороннего электромагнитного перемешивателя бегущего магнитного поля, созданного и эксплуатируемого в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

На первом этапе, создана численная модель на основе метода конечных элементов. Данная модель протестирована и верифицирована путем сравнения с экспериментальными данными интегральных усилий во вторичном элементе. С помощью данной модели произведен анализ насыщения и выбор размеров магнитопровода ЛИМ.

Экспериментально обнаружено, что данный тип обмотки дает определенную несимметрию токов. Данное явление предположительно может влиять на характер гидродинамических течений. Путем сравнения с измеренными профилями магнитной индукции, были определены углы сдвига и амплитуды фазовых токов в обмотках ЛИМ. С учетом этого явления численная модель была дополнена модулем расчета электрической цепи.

Следующим этапом было исследование гидродинамических течений жидкого металла под воздействием рассматриваемой ЛИМ. Рассматриваемая модель дополнена модулем расчета однофазных течений, с использованием модели турбулентности. Результаты расчета скорости жидкого металла сравнивались с данными, полученными с помощью метода ультразвуковой доплеровской анемометрии. Обнаруженно, что поток носит турбулентный характер. Проанализирована возможность использования модуляции во времени бегущего магнитного поля индуктора.

Получены характеристики гидродинамических течений от питающего индуктор тока и от периода временной модуляции. Однако нужно отметить, что не для всех случаев численные данные имеют хорошую сходимость с экспериментальными, особенно при высоких значениях тока в катушках, когда значение числа Рейнольдса выше. Показано, как низкочастотные модуляции могут повысить интенсивность мелкомасштабных течений в расплаве, что может позитивно влиять на эффективность тепло- и массо-переноса.

Последним рассматриваемым вопросом является исследование влияния фронта кристаллизации на электромагнитные силы в жидкой фазе. Основную гипотезу этого исследования можно сформулировать как: "Продвижение и деформации границы раздела фаз может влиять на безразмерный параметр электромагнитного силового воздействия F на жидкую фазу кристаллизующегося слитка". В данном разделе сделана попытка описать влияние этого явления для случая горизонтальной кристаллизации под воздействием бегущего магнитного поля. Найденные аналитические зависимости могут быть полезными для предварительной оценки безразмерного параметра электромагнитного силового воздействия F и, следовательно, параметра N = F/Gr, который определяет условия взаимодействия свободно и вынужденно конвективных течений на разных этапах процесса кристаллизации.

Результаты, представленные во второй главе выполнены в соавторстве с коллективом лаборатории Технологической гидродинамики Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук под руководством Колесниченко И.В.. Также большой вклад внесли в проведении экспериментальных и численных исследований аспиранты Института механики сплошных сред Лосев Г.Л. и Уральского федерального университета Соколов И.В.

Глава 2

Исследование распределения примеси в двухстороннем перемешивателе бегущего магнитного поля

Необходимость в равномерном распределения примеси существует в производстве литий-борного композита, из которого изготавливаются аноды для термо-активируемых батарей [157,158]. Производственный процесс состоит из введения порошка бора непосредственно в расплавленный литий. Поскольку плотность примеси (2000 кг/м³) в несколько раз превышает плотность лития (500 кг/м³), в результате, распределение не будет равномерным, без какоголибо внешнего воздействия. Для решения этой проблемы была предложена технология электромагнитного перемешивания.

В этой главе рассматривается электромагнитный перемешиватель, который установлен и эксплуатируется в Институте высокотемпературной электрохимии УрО РАН. Данная установка была разработан ранее на кафедре электротехники и электротехнологических систем Уральского федерального университета и ее описание приведено в работах [49,52]. Однако в ходе эксплуатации были обнаружены некоторые ограничения (интенсивность перемешивания, производительность). Для того, чтобы в перспективе можно было повысить производительность установки данного типа, необходимо проанализировать процессы, протекающие в жидком металле, и определить наиболее эффективные режимы эксплуатации. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи, рассматриваемые в настоящей главе:

 анализ влияния схемы соединения обмоток индуктора на течения жидкого металла рассматривается в разделе 2.3;

- моделирование переноса частиц в двумерной постановке 2.4;
- трехмерный анализ динамики распределения частиц выполнен в разделе 2.5;
- определение влияния размеров емкости жидкого металла на эффективность отвода тепла и электромагнитного перемешивания показано в разделе 2.6;

В качестве инструмента исследования предложено численное моделирование. Полные трехмерные гидродинамические результаты расчетов позволят понять явления переноса примеси в присутствии бегущего магнитного поля и сформулировать рекомендации для проектирования машин данного типа с учетом существующего опыта эксплуатации.

2.1. Объект исследования

Обычно для перемешивания металлического расплава бегущим магнитным полем в цилиндрических емкостях или тиглях используется индуктор с катушками кольцевого типа, как в цилиндрических линейных индукционных машинах [10,159–161]. Под таким силовым воздействием образуется один вихрь тороидального типа [9, 132]. Однако для того, чтобы получить более сложные или интенсивные течения жидкого металла, используются другие конфигурации индукторов. Рассмотрим использование альтернативных методов повышения интенсивности перемешивания, например, использование двух индукторов БМП, расположенных по краям емкости [162]. Такое решение позволяет изменять направление магнитного поля отдельно для каждого из двух боковых индукторов и даже создавать противоположно и встречно направленные БМП. Конфигурация рассматриваемого электромагнитного перемешивателя показана на рис. 2.1. Он состоит из двух индукторов, которые расположены по бокам емкости с жидким литием. Эти индукторы состоят из 12 кольцевых катушек, которые размещены в пазах магнитопровода. Группа катушек питается от трехфазного источника и генерирует бегущее магнитное поле. Электрические токи в пазах индукторов имеют 60° фазную зону. Схема соединения обмоток может быть изменена, как будет рассмотрено в разделе 2.3. Катушки подключены к трехфазному источнику частотой 50 Гц. Между индукторами расположен сосуд с жидким литием, зазор между поверхностью индуктора и сосудом составляет 10 мм и этот зазор остается постоянным для всех рассматриваемых размеров емкости в данной главе.



Рис. 2.1. Внешний вид исследуемой установки электромагнитного перемешивания жидкого лития из работ [49, 52]. 1 и 2 – магнитопроводы; 3 – катушки; 4 – система нагрева; 5 – емкость с жидким металлом.

2.2. Метод исследования

Как показано в обзоре литературы, одним из наиболее эффективных методов исследования процессов в непрозрачных жидкостях является численное моделирование. В данной главе предлагается использовать численную модель, включающую в себя электромагнитный, гидродинамический расчет, а также дополненную расчетом траекторий сферических частиц в жидкости.

2.2.1. Электромагнитный расчет

Для расчета магнитного поля, индуцированного тока и распределения силы Лоренца используется интерфейс Magnetic Fields (mf). Он основан на решении уравнений Максвелла, которые формулируются с использованием магнитного векторного потенциала. Полная трехмерная геометрия соответствует рисунку 2.1, а ее основные параметры приведены в таблице 2.1. В областях, ближних к поверхности жидкого металла, сетка уплотняется с учетом скин-эффекта. Первым этапом вычислений электромагнитной части является анализ геометрии катушки, который используется для вычисления тока катушки. После этого предварительного расчета задача решается с помощью этапа расчета в частотной области.

Параметры	Значение	Единицы
Высота индуктора	310	MM
Ширина магнитопровода	70	MM
Ширина паза	12	MM
Высота зубца	65	MM
Ширина зубца	10	MM
Частота	50	Гц
Ток катушки	$0.25 \div 2$	А
Число витков	200	
Относительная магнитная	100	
проницаемость магнитопровода		

Таблица 2.1. Параметры для электромагнитного расчета

Трехмерные численные расчеты проводились методом конечных элемен-

тов с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics. На первом этапе были использованы уравнения Максвелла для электромагнитных расчетов, формулировке магнитного векторного потенциала в частотной области, с игнорированием тока смещения:

$$\nabla(\nabla \times \mathbf{A}) = \begin{cases} j\mu_r \mu_0 \omega \gamma - for \text{ nonconducting domains} \\ j\mu_r \mu_0 \omega \gamma + \mathbf{J}_{ext} - for \text{ conducting domains} \\ \mathbf{E} = -j\mu_r \mu_0 \omega \mathbf{A} \end{cases}$$
(2.1)

где **A** – векторный магнитный потенциал, μ_r – относительная магнитная проницаемость, μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость, ω – угловая частота, γ – электропроводность, **J**_{ext} – внешняя плотность тока и **E** – электрическое поле.

Распределение силы Лоренца, действующей на электропроводный объем жидкого металла при переменном магнитном потоке, определяется как $\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$.

В расчет электромагнитного поля были введены следующие допущения. Гармонический расчет основан на уравнениях Максвелла без учета переноса (адвекции) магнитного поля жидким металлом из-за низкого магнитного числа Рейнольдса ($Re_m \sim 0.087 < 0.1$ [163]). Потери в магнитопроводе не учитываются, поэтому электропроводность стали равна нулю. Граничные условия задаются в виде магнитной изоляции на внешней поверхности расчетной области модели. Сетка для расчета электромагнитного поля состоит из 443 299 тетраэдрических и 62 261 тетраэдных элементов.

2.2.2. Верификация расчета электромагнитного поля

Основным параметром, характеризующим интенсивность работы индукционных устройств, является магнитный поток, проникающий в электропроводящую среду. Для измерения нормальной компоненты магнитного потока была разработана измерительная система, представленная на рисунке 2.2. Измерительным органом в этой схеме является линейный датчик Холла SEC SS49E, в качестве вторичного преобразователя - плата сбора данных National Instruments USB - 6216, частота дискретизации - 50 кГц. Измерения действующих значений индукции магнитного поля производились по длине индуктора с шагом 10 мм.



Рис. 2.2. Схема установки для измерения магнитной индукции в перемешивателе: 1, 2 – индукторы перемешивателя №1 и №2, 3 – нагреватель, 4 – тигель из нержавеющей стали, 5 – датчик Холла, 6 - плата сбора данных, 7 – ПК.

На рисунке 2.3 представлено сравнение экспериментальных и полученных с помощью численной модели значений магнитной индукции на внутренней поверхности стенки тигля. Кривые 3 и 4 соответствуют значениям индукции у поверхности индукторов и можно отчетливо видеть влияние зубцово пазовой зоны на распределение индукции. А кривые 1 и 2 получены на внутренней поверхности емкости для жидкого металла, которые будут являться характерными значениями индукции для определение электромагнитной силы. Можно отметить, что достаточно большой технологических зазор вносит значительный вклад в снижение магнитного поля, непосредственно действующего на расплав. Данные имеют хорошую сходимость, исходя из чего можно сделать вывод о достоверности расчета электромагнитного поля.



Рис. 2.3. Распределение нормальной составляющей индукции магнитного поля с тиглем и без при токе 2 А: 1, 2 – на внутренней поверхности тигля, 3, 4 – в 3 мм от поверхности магнитопровода индуктора. Линии – расчет, точки – измерение.

2.2.3. Гидродинамический расчет

Следующим этапом моделирования является расчет потока жидкого металла, приводимого в движение бегущим магнитным полем. Гидродинамический поток рассчитывается только в объеме жидкого металла, который расположен между двумя индукторами БМП. Этот сосуд представляет собой эллиптический цилиндр, с размерами, указанными на рисунке 2.4. Выбор столь нетривиальной формы для исследований будет обоснован в разделе 2.6.

Возникающий однофазный поток описывается уравнениями Навье-Стокса для несжимаемых жидкостей. Сохранение массы определяется уравнением непрерывности:



Рис. 2.4. Качество сетки для гидродинамических расчетов и геометрия объема жидкого лития

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{2.3}$$

где ρ – плотность и **u** это вектор скорости.

Векторное уравнение, описывающее сохранение массы, выглядит следующим образом:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)) + \mathbf{F}$$
(2.4)

где *p* – давление; *µ* – динамическая вязкость и **F** – это вектор объемного усилия из ЭМ расчета.

В большинстве МГД приложений имеет место переходный от ламинарного к турбулентному режим потока или развитый турбулентный режим, особенно при электромагнитном перемешивании. В нашем случае число Рейнольдса составляет около $1 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^4$. В связи с этим была выбрана $k - \omega$ Shear Stress Transport (SST¹) модель турбулентности, которая показывает хорошую корреляцию с экспериментальными данными в условиях развито-

104

 $^{^1}$ интерфейс ${\rm spf}$

го электромагнитного перемешивания [164]. Силы Лоренца, полученные из электромагнитной части, являются источниковым членом для гидродинамической части модели. Для вычисления течений жидкости использовалась равномерная четырехугольная ² сетка с максимальным размером элемента 7 мм (рис. 2.4).

Граничное условие верхней поверхности - скольжение, на остальных стенках задано граничное условия прилипания. Параметры жидкости, принятые для расчета, показаны в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Параметры жидкого лития для гидродинамического расчета

Параметры	Значение	Единицы
Электропроводность	$5.8\cdot 10^6$	См/м
Динамическая вязкость	$0.53\cdot 10^{-3}$	Па•с
Плотность	500	Kr/m^3

Подготовка геометрии, построение сетки, численные расчеты траекторий гидродинамических (ГД), электромагнитных (ЭМ) процессов и их связь были выполнены с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics для моделирования методом конечных элементов в трехмерной постановке.

2.3. Анализ схем подключения обмоток индуктора и направления бегущего магнитного поля

Как было сказано выше, преимуществом установки, состоящей из двух индукторов с обмотками кольцевого типа, является возможность создания бегущих магнитных полей различной конфигурации. Для того, чтобы выбрать

 $^{^2}$ от англ. quadrilateral

наиболее эффективный режим эксплуатации, необходимо оценить как схема подключения обмоток влияет на интенсивность и характер течений.

При проведении исследования, в данном разделе, рассматриваются три конфигурации бегущего магнитного поля, схематически показанные на рис. 2.5. Первый представляет собой комбинацию БМП, направленного вверх с левой стороны и вниз с правой. Второй случай – это простое, двойное направленное вниз бегущее магнитное поле, которое эффективно при электромагнитном перемешивании, например, в процессе кристаллизации [136,162]. Для первых двух случаев фазная зона равна 60 градусам, число пазов на полюс и фазу двум, другими словами, длина волны БМП равна всей высоте индуктора (310 мм). И случай 3 представляет собой магнитное поле сбегающегося и разбегающегося направления [165,166]. Для третьего случая фазная зона также равна 60 градусам, число пазов на полюс и фазу равно единице, а длина волны БМП равна половине высоты индуктора (155 мм).



Рис. 2.5. Сечение ЭМ перемешивателя с жидким металлом и предлагаемые случаи направления БМП и течения жидкого металла.

Ранее режимы работы данного перемешивателя численно исследовались с помощью двумерного анализа с ламинарными стационарными моделями расчета гидродинамических течений [49], [52]. Однако такая формулировка не дает полной картины течений расплава из-за неучета нестабильности потока и конструктивных особенностей перемешивателя.

Результатом электромагнитного расчета является распределение силы Лоренца в жидком металле. Рисунок 2.6 показывает направление и интенсивность электромагнитных сил для разных режимов работы перемешивателя. Из-за поверхностного (скин) эффекта наибольшие силы Лоренца сосредоточены в пристеночной области, и их направление соответствует направлению БМП. В третьем случае величина индуцированного тока намного меньше. Это объясняется тем, что в этом режиме работы число пазов на полюс и фазу уменьшается вдвое.



Рис. 2.6. Плотность индуцированного электрического тока (цвет поверхности) и распределение силы Лоренца (стрелки) в жидком металле для различной конфигурации БМП (см. плоскость сечения на Рис. 2.5).

На рисунках 2.7 – 2.9 представлено качественное сравнение гидродинамических течений для рассматриваемых режимов электромагнитного перемешивания. Нестационарный режим гидродинамических течений наблюдается во всех случаях. Первая конфигурация БМП (Рис. 2.7) дает наибольшую интенсивность потока, фактически формируя вращение объема жидкости вокруг оси х. Большая скорость у правой стенки обусловлена несимметричностью, вызванной тем, что сосуд не полностью заполнен.



Рис. 2.7. Динамика потока расплава для случая 1 (см. сечение из Рис. 2.5)

Второй случай (Рис. 2.8) дает структуру двухвихревого потока, но из-за того, что направление поля в обоих индукторах одинаково (вниз), интенсивность потока ниже.



Рис. 2.8. Динамика потока расплава для случая 2 (см. сечение из Рис. 2.5)

Третья конфигурация (Рис. 2.9) дает картину потока жидкого металла
типа «восьмерка». Как видно из рисунка, в этом режиме верхний вихрь активно проникает в нижний и наоборот. Интенсивность течений также ниже чем в первом случае.



Рис. 2.9. Динамика потока расплава для случая 3 (см. сечение из Рис. 2.5)

Сравнивая результаты моделирования, можно заключить, что наибольшие интенсивности потока развиваются при конфигурации магнитного поля №1. Это также подтверждается исходя из опыта эксплуатации. В дальнейшем в этой главе будет использована только такая схема подключения обмоток индуктора.

Разработанная модель показала достаточно качественные результаты расчета, однако сопряжения электромагнитной и гидродинамической частей недостаточно для того чтобы качественно оценить эффективность выполняемой методом электромагнитного перемешивания технологической операции.

2.4. Моделирование переноса частиц в двумерной постановке

Для того чтобы была возможность оценить гомогенизацию примеси в расплаве, на данном этапе рассматриваемая модель была улучшена путем дополнением модуля трассировки частиц «Particle Tracing for Fluid Flow». Постановка задачи на данном этапе – двухмерная. Течение жидкости также описывается k- ω SST моделью турбулентности. Заданные свойства для расчета частиц представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Параметры модели для 2D расчета траекторий частиц

Параметр	Значение	
Материал частицы	бор	
Плотность	2000	${\rm K} \Gamma \big/ {\rm M}^3$
Диаметр	1 - 10	MKM
Количество частиц	1000	
Ток индуктора	2	А

Чтобы получить динамику распределения примеси, трассировка частиц для модуля потока жидкости (fpt) была реализована в существующей модели. Электромагнитная сила, действующая на частицу, не учитывается из-за низкой электропроводности частиц бора. Следующее уравнение Лагранжа было принято для описания движения электрически непроводящих частиц:

$$m_p \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_g, \qquad (2.5)$$

где m_p – масса частицы, \mathbf{v} – скорость частицы, \mathbf{F}_g – сила гравитации.

 \mathbf{F}_D – известна в англоязычной литературе как *drag force* и из-за отсутствия устоявшегося термина в отечественной литературе в настоящей работе предлагается использовать термины лобовая сила или вынуждающая поверхностная сила, действующая на частицу в потоке жидкости.

Вынуждающая поверхностная сила на частицу действует по закону Стокca:

$$\mathbf{F}_D = \frac{1}{\tau_p} m_p (\mathbf{u} - \mathbf{v}), \qquad (2.6)$$

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu},\tag{2.7}$$

где **u** – скорость жидкости, **v** – скорость частицы, ρ_p – плотность частицы, d_p – диаметр частицы, μ – динамическая вязкость жидкости, m_p – масса частицы.

Плавучесть, вызванная силой тяжести, действует вертикально и определяется следующим образом:

$$\mathbf{F}_g = m_p \mathbf{g} \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p},\tag{2.8}$$

где \mathbf{g} – гравитационная постоянная и ρ – плотность жидкости.

Численный эксперимент заключался в погружении частиц через верхнюю границу расчетной области жидкого металла, находящегося под воздействием электромагнитных сил. Частицы бора изначально расположены случайным образом на верхней поверхности жидкометаллического объема. Граничные условия на стенах задается как "отскок"³.

2.4.1. Результаты

Результатом расчета являются пространственные положения и траектории частиц в циркулирующем потоке жидкости. На рисунке 2.10 представлена динамика поля скоростей в объеме жидкого металла и позиции частиц.

 $^{^3}$ от англ. bounce

Магнитное поле направлено против «часовой стрелки» и скорость движения расплава также соответствует этому направлению. На первом этапе видно также, как частицы были погружены через верхнюю границу, затем они увлекаются течением в пристеночную область. После того как скопление было разбито на единичные частицы, они достаточно равномерно были распределены по объему жидкости. На 15 ... 60-й секунде видно, как окончательно сформировался один вихрь, захватывающий весь объем, однако при такой конфигурации течения возникает мертвая зона в центральной области. Из этой области частицы были вытеснены центробежными силами. Это явление представляет большую проблему для равномерного распределения примеси. Также стоит отметить, что размер частиц при заданной интенсивности перемешивания не оказывает значительного влияния на итоговое расположение или траекторию примеси, поэтому в дальнейшем будем рассматривать частицы одного диаметра.



Рис. 2.10. Динамика положения частиц разного диаметра (синий – 1 мкм; зеленый – 5 мкм; коричневый – 10 мкм) и поле скоростей (стрелки) в объеме жидкого металла.

Реверсивная модуляции бегущего магнитного поля

В разделе обзора литературы показано повышение эффективности перемешивания с помощью реверсивной и пульсирующей модуляции во времени магнитного поля индуктора. Некоторые работы отмечают, как низкочастотное (от 0,05 до 6 Гц) изменение БМП во времени может привести к увеличению турбулентной кинетической энергии и, следовательно, к повышению качества перемешивания [111]. Данная техника представляет определенный интерес для применения в перемешивании частиц. В данном разделе предлагается проанализировать численно влияние реверсивной модуляции во времени бегущего магнитного поля на распределение частиц в жидком метале.

При таком режиме электромагнитное усилие в объеме жидкого металла изменяется по заданной периодической функции, представленной на рисунке 2.11. Угловая частота принята равной 3 радианам в секунду.



Рис. 2.11. Функция изменения направления электромагнитных сил для случая реверсированного магнитного поля.

На рисунке 2.12 представлена динамика потока жидкого металла и переноса примеси под действием реверсивного бегущего магнитного поля. Как видно, по сравнению со стационарно приложенным магнитным полем распределение частиц имеет более равномерный характер, а мертвые зоны отсутствует. Это объясняется большей турбулентной кинетической энергией под воздействием реверсивного магнитного поля и нестационарными течениями в объеме жидкого металла.



Рис. 2.12. Динамика положения частиц (точки) и поле скоростей (стрелки) в объеме жид-кого металла под воздействием реверсивного магнитного поля.

Данный тип бегущего магнитного поля при одинаковом энергопотреблении позволяет повысить эффективность электромагнитного перемешивания. Но для более точного описания процесса переноса частиц необходимо полное трехмерное исследование, результаты которого будут показаны в следующем разделе.

2.5. Трехмерный анализ динамики распределения частиц

Поскольку аксиальные скорости и вторичные вихри все-таки существуют в цилиндрической емкости в двухстороннем индукторе бегущего магнитного поля, необходимо рассчитать полные трехмерные траектории частиц в жидком металле в рассматриваемом электромагнитном перемешивателе. Полученные результаты позволят более полно описать процесса массообмена в данных условиях.



Рис. 2.13. а – сечение перемешивателя с жидким металлом и схемой соединения обмоток бегущего поля; б – размеры расчетной области жидкого металла и объемы, принятые для вычисления параметра гомогенизации.

Конечно-элементная сетка на данном этапе была уточнена. Она состоит из 26 808 шестигранных и 8 124 четырехугольных элементов. Максимальный размер элемента ограничен размером 3 мм. Сетка дополняется двумя пристеночными слоями с коэффициентом растяжения⁴ 1.8 и коэффициентом регулировки толщины⁵ 2.7 в области границ расчетной области.

Как уже упоминалось, лобовая сила является важным фактором для определения траектории движения частиц в жидком металле. В предыдущем разделе для описания траектории частиц использовался закон Стокса, но он не совсем корректен для интенсивных скоростей потока. На рисунке 2.14 показана зависимость коэффициента лобового сопротивления C_D от числа Рейнольдса потока жидкости, из которого видно, что закон Стокса линейно

 $^{^4}$ от англ. stretching factor

 $^{^5}$ от англ. thickness adjustment factor

аппроксимирует кривую, тогда как закон Шиллера-Наумана более корректно учитывает влияние турбулентного потока на силу, действующую на частицу. Из-за относительно высокого числа Рейнольдса в рассматриваемом случае закон Стокса не даст должного результата, и закон Шиллера-Наумана был выбран для расчета лобового усилия, действующего на частицу [167].



Рис. 2.14. Зависимость коэффициента лобового усилия от числа Рейнольдса потока жид-кости. [167].

Коэффициент τ_p в таком случае будет зависеть не только от параметров частицы и жидкости, а также от относительного числа Рейнольдса Re_r :

$$\mathbf{F}_D = \frac{1}{\tau_p} m_p (\mathbf{u} - \mathbf{v}), \qquad (2.9)$$

$$\tau_p = \frac{4\rho_p d_p^2}{3\mu C_D R e_r},\tag{2.10}$$

$$C_D = \frac{24}{Re_r} (1 + 0.15Re_r^{0.687}), \qquad (2.11)$$

$$Re_r = \frac{\rho |\mathbf{u} - \mathbf{v}| d_p}{\mu},\tag{2.12}$$

где
и – скорость жидкости, ρ_p – плотность частицы,
 d_p – диаметр частицы,

116

 ρ – плотность окружающей жидкости
и μ – динамическая вязкость,
и – скорость частицы

В цилиндрическом сосуде с радиусом, намного меньшим высоты, осевая (вертикальная) гомогенизация представляет основной интерес. В случае моделирования индукционной тигельной печи представленной в работе Щепанского и др. [118] было предложено разделить емкость на 2 равных вертикальных объема и данный подход позволил оценить эффективность перемешивания. В данном случае, когда высота много больше радиуса, рассматриваемая емкость была разделена на четыре равных объема согласно рисунку 2.13 б. Каждый объем был дополнен функцией динамического счетчика частиц, чтобы вычислить количество частиц внутри каждой области N_i , где *i* - это номер объема (Рис. 2.13 б). В данном разделе мы предлагаем оценить степень вертикальной гомогенизации через параметр $\xi(t)$, который равен:

$$\xi(t) = \frac{\Delta N}{N} = \frac{\max(N_1, N_2, N_3, N_4) - \min(N_1, N_2, N_3, N_4)}{N}$$
(2.13)

где N_i – число частиц на каждый объем (см. Рис. 2.13 б), ΔN – разница между максимальным и минимальным количеством частиц в каждом объеме и N = 700 – общее количество частиц.

На данном этапе исследования диаметр частицы принят равным $2E^{-6}$ м, а число частиц равным 700.

Полученные численно электромагнитное поле, силы и поток расплава анализируются в предыдущем разделе 2.3, и на данном этапе рассматривается только динамика частиц в потоке, управляемом БМП. Рисунок 2.15 представляет численные результаты расчета траекторий частиц в расплаве под воздействием БМП с током катушки, равным 1 А. Как и в двумерном случае, в начале численного эксперимента все частицы размещаются на верхней поверхности объема и имеют нулевую скорость. Затем поток, направленный против часовой стрелки, вовлекает частицы вдоль левой стенки. Через 1 секунду основная часть частиц достигает дна сосуда и начинает двигаться вверх. Через 1,5 секунды скопления частиц практически исчезают, и процесс плавной гомогенизации по объему продолжается. Наконец, через 4 секунды мы имеем равномерное распределение частиц по всему объему. Распределение частиц в радиальном направлении, в отличие от двумерного случая (рис. 2.10), также является равномерным.



Рис. 2.15. Динамика распределения твердых включений в потоке расплава, под воздействием постоянно приложенного БМП. Цветовая легенда - это скорость частиц (м/с)

На рисунке 2.16 а мы можем видеть зависящие от времени данные счетчика частиц, которые соответствуют уравнению 2.13. Этот график очень похож на выравнивание градиентных температурных кривых из работ [119,121]. И из этого графика мы можем наблюдать, как происходит перенос частиц между четырьмя объемами. Эти кривые лежат в основе параметра вычисления гомогенизации, результаты расчета которого показаны на рисунке 2.16 б.

Следует отметить, что интенсивность потока достаточна, чтобы частицы не скапливались в нижней области сосуда из-за разницы между плотностью жидкости и частиц. Это связано с тем, что сила тяжести, действующая на



Рис. 2.16. а – подсчет количества частиц в динамике на каждый из объемов; б – параметр гомогенизации во времени для различных значений тока индуктора.

частицу, равна $6.16 \cdot 10^{-14}$ H, тогда как лобовая сила больше на несколько порядков.

Сравнивая полученные данные в двухмерной и трехмерной постановках можно отметить, что характер распределения частиц в расплаве под воздействием БМП отличается. Так в 2D образуется упомянутая ранее мертвая зона, откуда частицы вытесняются на периферию. В трехмерной постановке данное явление не наблюдается. К сожалению достоверных экспериментальных данных по положению частиц нет. Чтобы понять, какой из случаев более правдоподобен, можно обратиться к предыдущим исследованиям. Например, для 2D постановки в работе [132] данное явление наблюдается, и частицы также вытесняются из центральной области вихря. Однако если обратиться к ряду работ, в которых представлены результаты 3D расчета переноса частиц в циркулирующих потоках [59, 126, 128, 129], то данного явления там не отмечается. В связи с этим, можно сделать вывод о более достоверном результате, полученном с помощью полной трехмерной постановки.

Параметрическое исследование

Определенный интерес представляет влияние интенсивности магнитного поля на параметр гомогенизации. На данном этапе ток катушек варьируется в диапазоне от 0.25 до 2 А, при этом характерное значение магнитной индукции на поверхности расплава показано в таблице 2.4. Изменение тока катушки приводит к более интенсивному или слабому результирующему магнитному потоку и, следовательно, влияет на результирующее усилие в расплаве. Характер этих усилий не изменяется, однако гидродинамические течения становятся интенсивней и приводят к изменению кривой параметра гомогенизации.

Таблица 2.4. Характерное значение магнитной индукции на поверхности расплава

Ток катушки, А	0.25	0.5	1	1.5	2
Магнитная индукция, Тл	0.00177	0.00353	0.00705	0.0106	0.0141

Как видно из рисунка 2.16 (б) при наиболее высоком значении тока (2A), первое снижение кривой происходит раньше, и параметр гомогенизации быстро приближается к нулю. С другой стороны, уменьшение тока в катушке способствует снижению интенсивности потока. Снижение параметра гомогенизации в случае тока, равного 0.5 A, наступает через 1 секунду и ступенчато стремится к нулю. Таким образом настоящая модель обладает чувствительностью к интенсивности магнитного поля.

Вышеупомянутая ступенчатая кривая наблюдается во всех трех случаях. Это может быть объяснено переносом частиц сначала в нижнюю область и с небольшой задержкой времени, необходимой на "разворот"частиц, затем в верхнюю область и так далее. Как и ожидалось, большее значение тока в катушках индуктора способствует более быстрой гомогенизации примеси в расплаве. С другой стороны, представленных значений недостаточно для определения нижнего предела тока катушки, при котором все еще поддерживается полное перемешивание. Данное явление нуждается в дополнительном исследовании.

Однако, стоит отметить, что представленных значений недостаточно для определения нижнего предела тока катушки, при котором все еще поддерживается полное перемешивание. Данное явление нуждается в дополнительном исследовании.

2.5.1. Модулированное во времени магнитное поле

В дополнение к постоянно приложенному БМП предлагается рассмотреть случай модулированного во времени бегущего магнитного поля. Рассмотрим два варианта пульсирующего и реверсивного БМП с частотой $f_m = 1$ Гц. Численно полученная динамика распределения частиц в случае реверсивного БМП показана на рисунке 2.17. Движения частиц в первую секунду аналогичны случаю с постоянно приложенным БМП. Но затем во втором полупериоде (0.5 – 1 сек.) частицы останавливаются и затем, на начале второго периода, разворачиваются потоком жидкого металла в обратном направлении. Через 2 секунды распределение частиц становится равномерным.

Сравнение параметра гомогенизации для случаев с постоянно приложенным и модулированным БМП представлено на рисунке 2.7. Параметр гомогенизации в случае реверсивного магнитного поля (рис. 2.18 а) медленно стремится к нулю. Однако следует отметить, что реверсивное поле гораздо более эффективно для исключения скопления частиц. В обоих случаях величина тока катушки была равна 1А.

Для пульсирующего БМП параметр гомогенизации по сравнению с постоянно приложенным полем со значением тока 0.5 А показан на рисунке 2.18



Рис. 2.17. Динамика распределения частиц в потоке жидкого металла под воздействием реверсивного БМП. Цветовая шкала соответствует скорости частицы (м/с)

б. В первом периоде использование стационарного поля кажется более эффективным. Но затем второй импульс (через 2 секунды) заставляет кривую резко идти вниз и параметр гомогенизации устанавливается ниже значения 0.1.



Рис. 2.18. Параметр гомогенизации во времени для реверсивной (a) и пульсирующей (б) модуляций БМП. Величина тока для постоянного стационарного случая равна 1 А для графика (a) и 0.5А для (б).

Дополнительные данные, содержащие анимации результатов расчета, а

122

также кривые гомогенизации, показанные в этом разделе, расположены по ссылке [168].

2.6. Влияние размеров емкости жидкого металла на эффективность отвода тепла и электромагнитного перемешивания

Как было сказано выше, объектом исследования данной главы является установка электромагнитного перемешивания для получения литий-бор (Li-B) сплава, который используется для изготовления анодов для термически активированных батарей [157,158]. Добавление частиц бора в литий приводит к выделению энергии в ходе экзотермической химической реакции. Следовательно, необходимо обеспечить лучшую теплоотдачу с поверхности сосуда. Учитывая вышеизложенное, предлагается использовать эллиптический цилиндр в качестве сосуда (Puc. 2.19), так как в этом случае мы увеличиваем площадь боковой стенки и, следовательно, исходящий тепловой поток. Кроме того предполагается, что изменение соотношения размеров сосуда будет влиять на характер потока жидкого металла и на динамику гомогенизации. В этом разделе рассматривается вопрос, как улучшить отвод тепла, изменив геометрию сосуда с простого цилиндра на эллиптический, а также анализируется, как это влияет на эффективность перемешивания. На основании разработанной модели предлагается провести настоящее исследование.

Для получения динамики распределения примеси было реализовано трассирование частиц для модуля расчета потока жидкости, как и в предыдущей секции. Однако уравнение Лагранжа, описывающее движение электрически непроводящих частиц в жидкости, было дополнено учетом подъемных



Рис. 2.19. Предлагаемое изменение геометрии емкости.

сил⁶ \mathbf{F}_L [169]. Схематически все действующие на частицу в расплаве силы показаны на рисунке 2.20

$$m_p \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_L, \qquad (2.14)$$

где m_p – масса частицы, **v** – скорость частицы, **F**_D – лобовая сила, действующая на частицу, **F**_g – сила гравитации и **F**_L – подъемная сила. Учет данной силы позволит помочь описать движение частиц в поле сдвигового потока.



Рис. 2.20. Силы, действующие на частицу и коэффициент лобового усилия [167].

Так как в данном разделе предлагается изменение формы емкости, то необходимо рассматривать не только вертикальную гомогенизацию, но и радиальное распределение частиц. Емкость была разделена на восемь равных

 $^{^6}$ от англ. lift force

объемов, четыре по вертикали, два по радиусу (N_1 - N_8 на рисунке. 2.21). Для каждого объема *i* подсчитывается общее количество частиц N_i . Оценка степени гомогенизации производится через параметр $\xi(t)$, который равен:

$$\xi(t) = \frac{\Delta N}{N_{\Sigma}} = \frac{max(N_i) - min(N_i)}{N_{\Sigma}},$$
(2.15)

где N_i – число частиц в каждом объеме, ΔN – разница между максимальным и минимальным числом частиц в каждом объеме и N_{\sum} – общее число частиц.



Рис. 2.21. Конечно-элементная сетка в объеме жидкого металла. Цветовая легенда - это параметр асимметрии элементов.

Сетка дря расчета гидродинамических течений в емкости построена с использованием прямоугольных элементов и протяжки вдоль вертикальной оси, размер сетки был выбран после нескольких уменьшений размера и тщательного изучения сходимости решения (Рис. 2.21). Кроме того качество сетки оценивалось по параметру асимметрии⁷, который определяется как минимум следующей величины: $1 - max(\frac{\theta-\theta_e}{180-\theta_e}, \frac{\theta_e-\theta}{\theta_e})$, где θ это угол по краю элемента и θ_e это угол соответствующего ребра [170].

В результате численных расчетов мы имеем динамику частиц в циркулирующем потоке жидкого металла. Оценка эффективности смешивания

 $^{^7}$ от англ. skewness - мера равноосного перекоса

выполняется с использованием параметра гомогенизации (уравнение 2.15).

На рис. 2.22 - 2.24 представлены результаты моделирования для двух случаев отношения радиусов емкости a/b. На рис. 2.22 изображена магнитная индукция на поверхности жидкометаллического вторичного элемента. Интенсивность потока достигает 10 мТл. Этот переменный поток генерирует индуцированную плотность тока в расплаве, и взаимодействие между ними приводит к возникновению сил Лоренца, изображенных на рис. 2.23. Силы сосредоточены у боковой поверхности расплава и производят момент вокруг оси x. Как и ожидалось, при таком поле сил Лоренца один главный вихрь получен и показан на рис. 2.24 (лев.).



Рис. 2.22. Магнитная индукция на поверхности жидкого металла [Тл] для разных соотношений a/b.

Следующим этапом моделирования является определение траектории частиц. На рисунке 2.24 (прав.) показаны положения частиц через 4 с. времени перемешивания, и можно подтвердить, что в обоих случаях распределение частиц является равномерным.

Площадь поверхности сильно связана с отводом тепла от боковой стенки. В работе предпринимается попытка оценить теплоотвод относительно отношения полуосей *a* и *b* поперечного сечения цилиндрической емкости (Рис. 2.25).



Рис. 2.23. Электромагнитные усилия $[H/M^3]$.



Рис. 2.24. Линии тока скорости расплава и распределение частиц в потоке под воздействием БМП после 4 секунд.

В этом примере объем остается постоянным. Также результаты эффективного времени гомогенизации представлены на рис. 2.25 для различных отношений a/b, таких как 1, 2 и 3, на основе поиска зависимостей. Эффективное время гомогенизации здесь – это время, за которое параметр ξ снижается в 5 раз. Целые числа отношений a/b были выбраны, чтобы показать возможность увеличения площади поверхности и в то же время оценить, как это может повлиять на качество перемешивания.



Рис. 2.25. Зависимость площади боковой поверхности и параметра гомогенизации от соотношения размеров емкости.

Можно предварительно отметить, что при соотношении a/b = 2, эффективность перемешивания не сильно снижается, но затем этот параметр значительно ухудшается. Более детальное изучение отношения a/b и эффективности перемешивания не является целью настоящей работы. Однако он представляет особый интерес и может быть исследован дополнительно. (тоже в заключение о дальнейших исследований)

2.7. Выводы ко второй главе

Подводя итоги проделанных исследований в данной главе, в первую очередь необходимо сказать о созданной численной модели. Была разработана полная трехмерная модель электромагнитного перемешивателя с учетом движения частиц, которая позволяет проанализировать процессы массообмена в жидкометаллическом вторичном элементе. Также стоит отметить, что результаты численного анализа переноса частиц в электропроводной жидкости под действием БМП были представлены впервые. Данная модель является хорошим инструментом для широкого спектра задач, от исследования поведения единичной частицы в зависимости от комбинации усилий действующих на нее, до крупномасштабного моделирования процессов переноса примеси в различных технологических приложениях.

Однако в цели данной диссертационной работы входили конкретные требования для определения потенциалла увеличения эффективности и производительности установки, находящейся в эксплуатации в ИВТЭ УрО РАН. В этой связи были поставленны частные задачи, такие как определение влияния схемы соединения обмоток индукторов, режима модуляции во времени БМП и формы емкости на эффективность процесса электромагнитного перемешивания. Разумеется, этот список задач не претендует на полноту исследований, однако ограниченность во времени и вычислительных ресурсах подтолкнуло на данный выбор.

Так как рассматриваемый перемешиватель имеет возможность варьировать схемы соединений обмоток индуктора, было целесообразно оценить влияние трех случаев на характер и интенсивность течений жидкого металла. Было определено, что случай БМП «вверх-вниз» дает наибольшую интенсивность потоков, так как в таких условиях формируется один основной вихрь, в отличии от двух других рассматриваемых случаев, в которых возникают 2 более слабых вихря. Данный результат подтверждается, так же исходя из опыта эксплуатации перемешивателя.

Самым простым способом, с точки зрения капитальных затрат, увеличения эффективности процесса перемешивания было предположено использование модуляции во времени БМП. Рассматривалась реверсивная и пульсирующая периодическая модуляция с частотой 1 Гц. Результаты численного моделирования показали, что применение реверсивной модуляции способствует исключению скоплений частиц, а использование пульсирующей модуляции позволяет при одинаковом потреблении электрической энергии добиться более равномерного распределения примеси по объему жидкости. Однако, данные частоты модуляций возможно не являются оптимальными и необходимы дополнительные исследования о влиянии частоты модуляции на эффективность перемешивания в каждом технологическом приложении, так же как и определение нижнего, порогового значения тока индуктора.

Анализ влияния формы емкости показал возможность увеличения теплоотдачи с ее поверхности при помощи уплощения первоначальной цилиндрической формы до эллиптического цилиндра. Параметр эффективной гомогенизации снижается незначительно при соотношении радиусов a/b = 2, однако при дальнейшей деформации a/b = 3 эффективное время перемешивания снижается значительно. Данный эффект может быть связан с большим увеличение боковых зон емкости относительно ширины активной зоны индуктора.

В дальнейшем, исходя из полученных результатов, необходимо провести анализ их масштабируемости для того, чтобы можно было создать установку с большей производительностью.

В качестве недостатков полученных результатов в данной главе можно вынести 2 вопроса. Вопервых, это недостаточная достоверность данных, полученных в результате вычислений гидродинамических течений и переноса частиц. Случай с эллиптическим цилиндром в качестве емкости является нетривиальным решением и недостаточно широко представлен в литературе. Поэтому заключения о достоверности результатов сделаны исходя из результатов валидации выбранного метода в главе 1, раздел 1.5.1, а отсутствие данных о положении частиц оставляет возможность сравнивать полученные результаты только с работами других авторов.

Во вторых – отсутствует тестирование различных моделей турбулентности и выбор $k - \omega$ SST, в то время как уже более десятилетия применяется более продвинутый подход LES в подобных приложениях. Данный недостаток может быть объяснен поиском необходимого компромисса между точностью расчета и требуемой вычислительной мощностью при создании численной модели, так как расчеты были выполнены на вычислительной станции, а не на кластере. Однако представленная модель может быть легко улучшена изменением модели турбулентности и увеличением числа элементов расчетной сетки.

В целом, полученные результаты в данной главе позволяют лучше понять механизм переноса примеси турбулентными потоками, возбужденными бегущим магнитным полем. Они могут быть использованы как рекомендации для исследования и проектирования данного типа устройств.

Достигнутые результаты в представленной главе могут быть выделены в следующие тезисы:

- Определено влияния схемы соединения обмоток индуктора на гидродинамический поток. Выбрана схема соединения, дающая конфигурацию БМП «вверх-вниз», как способная развивать большую интенсивность течений жидкого металла.
- 2. Смоделирован перенос сферических частиц в жидком металле под воздействием бегущего магнитного поля как в двухмерной, так и в трехмерной постановке. Показанно влияние постановки на результат решения, полная 3D постановка дает более достоверный результат расчета.
- Численно показан способ повышения эффективности перемешивания с помощью модуляции во времени БМП. Как реверсивная, так и пульсирующая модуляции позитивно сказываются на исключениях скоплений частиц в расплаве.
- 4. Определено влияния изменения геометрии ВЭ на теплоотвод и эффективность перемешивания. Уплощение цилиндрической емкости до соотношения a/b = 2 увеличивает теплоотвод с боковой поверхности, и не приводит к значительному снижению эффективности перемешивания.

Исследование кристаллизации под действием бегущего магнитного поля

Одним из многообещающих применений технологии электромагнитного воздействия на расплавы является перемешивание жидкой фазы кристаллизующегося слитка. Управление конвективными потоками во время кристаллизации позволяет влиять на микро- и макроструктуру затвердевших расплавов [151]. Установление взаимосвязей между параметрами электромагнитного поля и процессом затвердевания является актуальной задачей. Ранее, используя метод нейтронной радиографии, было показано как бегущее магнитное поле влияет на форму границы раздела между жидкой и твердой фазами [103]. Определено влияние частоты пульсаций бегущего магнитного поля на кривизну границы раздела фаз. Однако, чтобы полностью понять взаимодействие параметров индукторов БМП и динамику процесса затвердевания, необходимы численные исследования, дополняющие эксперимент. В первой части главы для этого предлагается создать численную модель рассматриваемого процесса электромагнитного перемешивания с учетом фазового перехода. Вторая часть главы посвящена изучению параметров гидродинамических течений под воздействием модулированного во времени пульсирующей функцией БМП.

3.1. Объект исследования

Объектом исследования в данной главе является двухсторонний перемешиватель бегущего магнитного поля, используемый в работе [103]. Фотография и эскиз установки показаны на рисунке 3.1. Рассматриваемая установка представляет собой 2 индуктора бегущего магнитного поля, каждый из которых состоит из 6 медных катушек, размещенных в пазах магнитопровода. Эти катушки подключены к трехфазному силовому преобразователю Mitsubishi Electric Inverter D-700 SC. Частота тока была установлена равной 100 Гц. Катушки соединены таким образом, что они генерируют бегущее магнитное поле, то есть A (-C) B (-A) C (-B) или AZBXCY, что означает, что фазовый сдвиг между токами в соседних пазах равен 60° , а количество пазов на полюс и фазу равно 1. Более точно конфигурация заданная когнфигурация обмотки показана на рисунках 3.3 и 3.4. Таким образом, они генерируют бегущее магнитное поле, направленное вниз и длина волны составляет 0.162 м. Число витков в обмотках *n* равно 150. Магнитопроводы изготовлены из шихтованной электротехнической стали.



a

Рис. 3.1. Экспериментальная установка процесса затвердевания под воздействием бегущего магнитного поля из работы [103]

Прямоугольная стеклянная емкость с жидким металлом расположена между двумя индукторами. Ширина воздушного зазора равна 5 мм. Под дей-

ствием бегущего магнитного поля в жидком металле возникают силы Лоренца и приводят к его движению. Этот вынужденный поток представляет главный интерес настоящего исследования.

Другим важным моментом является исследование процесса затвердевания под воздействием БМП. Рассматриваемая экспериментальная установка имеет систему охлаждения, которая размещается под емкостью и создает температурный режим (15°C) на нижней поверхности металла, с помощью элементов Пельтье. В качестве рабочего металла используется галлий, температура плавления которого равна 29.85°C. При таких условиях фронт затвердевания возникает на нижней поверхности и продвигается вверх.

3.2. Метод исследования

Как упоминалось во введении, численное моделирование было выбрано в качестве основного инструмента для этого исследования. В дополнение к этому в данной главе используются экспериментальные измерения скорости расплава, а также верификация с помощью полученных ранее экспериментальных данных.

3.2.1. Численная модель

Моделирование процесса затвердевания под электромагнитным воздействием можно условно разделить на 3 части: электромагнитная, гидродинамическая и затвердевание. Упрощенная схема расчета показана на рисунке 3.2. Рассмотрим все части подробнее.

Электромагнитная часть

Электромагнитная часть была реализована в ANSYS Mechanical APDL, описание формулировки такое же как и в разделе 1.2.1.



Рис. 3.2. Упрощенная схема численной модели расчета кристаллизации под воздействием бегущего магнитного поля

Также вводится допущение безиндукционной постановки и пренебрежение переносом магнитного поля скоростью жидкого металла из-за низкого магнитного числа Рейнольдса ($Re_m = \mu_0 \sigma uL == 4\pi 10^{-7} \cdot 3.86 \cdot 10^6 \cdot 0.030 \cdot 0.12 = 0.0756 \ll 1$).

Геометрия. Первый шаг построения численной модели - это подготовка геометрии. Полная трехмерная геометрия состоит из 12 катушек, двух магнитопроводов, расплава и воздуха (скрыт). Все элементы показаны на рисунке 3.3, а также все необходимые размеры приведены в приложении Б

Конечно-элементная сетка для электромагнитного анализа показана на рисунке. 3.4. В магнитопроводах и воздухе сетка построена из тетраэдров с десятью узлами типа SOLID98, показанный на рисунке 1.3. В металле и катушках использовались гексаэдральные элементы. Размер элемента в металле был уменьшен по направлению к индукторам из-за учета скин-эффекта.

135





вид спереди

изометрия

Рис. 3.3. Внешний вид геометрии численной модели

Общее количество элементов модели составило 750 520.





Граничные условия. В качестве граничных условий магнитный векторный потенциал был установлен равным нулю на всех внешних поверхностях воздушного объема.

136

Гидродинамическая часть

Жидкий металл считается несжимаемым, а движение однофазного потока описывается уравнением неразрывности.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \tag{3.1}$$

и уравнением сохранения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\overline{\tau}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}$$
(3.2)

где p статическое давление, $\overline{\tau}$ тензор напряжений, $\rho \mathbf{g}$ и \mathbf{F} сила тяжести и сила внешнего воздействия. Внешняя сила, действующая на объем жидкости, в нашем случае представляет собой электромагнитную силу Лоренца из уравнения 1.12.

В большинстве случаев применения электромагнитного перемешивания имеет место турбулентный или переходный от ламинарного к турбулентному режим. В рассматриваемом случае исследуемое течение имеет $Re \sim 10^4$. С учетом турбулентности это уравнение рассчитывалось двумя способами. Описания моделирования турбулентности представлены ниже.

RANS моделирование В связи с тем, что кристаллизация занимает довольно много времени по сравнению с обычной практикой вычислительной гидродинамики, необходимо использовать простой, но надежный подход для моделирования турбулентных течений [101]. И для первой части этой главы: «затвердевание», была выбрана Realizable k- ε модель турбулентности. Этот вид усредненной по Рейнольдсу модели, основанной на двух параметрах (k – турбулентная кинетическая энергия; ε – турбулентная диссипация), может дать хороший результат средней скорости потока и не приводит к значительному увеличению необходимой вычислительной мощности. Усреднение по Рейнольдсу означает, что член скорости в уравнениях Навье-Стокса разлагается на среднюю \overline{u}_i и компоненты флуктуаций u'_i :

$$u_i = \overline{u}_i + u'_i \tag{3.3}$$

Далее выражений этого вида для переменных потока подставляются в уравнения неразрывности (3.1) и импульса (3.2). Осреднение по времени приводит к усредненным уравнениям импульса с дополнительными значениями напряжений Рейнольдса $-\rho \overline{u_i u'_i}$. Для нахождения напряжений Рейнольдса используется гипотеза Буссинеска:

$$-\rho \overline{u_i u_i'} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)$$
(3.4)

Эта модель решает два уравнения переноса и моделирует напряжения Рейнольдса с использованием метода вихревой вязкости. Решаются дополнительные уравнения для k и ε , а затем турбулентная вязкость μ_t вычисляется следующим образом:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3.5}$$

где $C_{\mu} = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}}$ отличается от стандартной модели k- ε тем, что не является константой. A_0 и A_s - постоянные, а S^* - функция средних скоростей деформации и вращения.

Тем не менее этот подход не может быть использован для случаев пульсирующего МП, и использовался только для первой части главы: постоянно действующее БМП в процессе затвердевания жидкого металла.

LES подход Во второй части главы, описывающей поведение течений в условиях пульсирующего магнитного поля, используется метод Large Eddy Simulation (LES). В LES подходе большие вихри разрешаются напрямую, а

малые моделируются. Следовательно, моделирование большого вихря происходит между прямым численным моделированием (DNS¹) и RANS. Временные затраты на вычисление, связанные с LES, обычно на порядки выше, чем для расчетов с RANS подходом. Для расчета подсеточных напряжений используется модель Смагоринского-Лилли [59].

Граничные условие В качестве граничных условий на верхней поверхности было задано скольжение, а на всех остальных скорость равна нулю. Для упрощения модели предполагается, что свободная поверхность остается плоской, то есть колебания и деформации свободной поверхности потоком жидкости и электромагнитными силами не учитываются.

Затвердевание

Процесс кристаллизации чистого галлия был решен с помощью хорошо известного метода энтальпии-пористости [97] с учетом тепловой плавучести. В этом методе энтальпия материала рассчитывается как сумма скрытой теплоты h и энтальпии ΔH :

$$H = h + \Delta H \tag{3.6}$$

Уравнение энергии для затвердевания:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S$$
(3.7)

где S - исходный член.

Переходная зона в методе энтальпия-пористость рассматривается как уравнение пористой среды и импульса, записываемое как:

$$S = \frac{(1-\beta)^2}{\beta^3 + 0.001} A_{mush} \mathbf{v}$$
(3.8)

¹ Direct Numerical Simulation

где β объемная доля жидкой фазы, $A_{mush} = 10^5$ постоянная квазиравновесной двухфазной зоны².

Граничные условия были следующими. На нижней поверхности была установлена постоянная температура 15°С, боковые стенки считаются адиабатическими, а на верхней поверхности установлен исходящий тепловой поток 0,5 Вт/м².

Конечно-объемная сетка Расчетная сетка состоит из $90 \times 84 \times 15 =$ 113 400 тетраэдрических конечных объемов. Распределение объемов по размерам производится таким образом, что вдоль направлений x и y в пристеночных областях размер объема уменьшается. Параметр y^+ для рассматриваемого случая равен 1 ... 0.05, поэтому размер элемента сетки составлял ~ 0.3 мм в пристеночной области и ~ 6 мм в центральной области объема. В направлении z распределение элементов было равномерным и равно размеру элемента 1.3 мм. Сетка для вычисления гидродинамических потоков и затвердевания показана на рисунке 3.5.

Параметры модели Расчеты гидродинамических потоков и процесса затвердевания были выполнены для прямоугольного контейнера размером $0.12 \times 0.10 \times 0.02$ м, заполненного жидким галлием, свойства которого перечислены в таблице 3.1. В настоящем исследовании $T_{liq} - T_s = 0.5^\circ$ С был выбран в соответствии с работой [96].

Моделирование динамики жидкости и процесса затвердевания проводилось с помощью коммерческого программного обеспечения ANSYS FLUENT методом конечных объемов. Схематический эскиз описанной численной модели показан на рисунке 3.2.

 $^{^2}$ от англ. mushy zone



передний план

изометрический вид

Рис. 3.5. Конечно-элементная сетка для гидродинамического расчета

		Свойство	Значение	
Ga (твердый)	ho	ПЛОТНОСТЬ	5910	Kr/m^3
298 < T[K] < 303	k	теплопроводность	$60.66 - 0.183 \cdot T$	Bт/м ·К
	C_p	теплоемкость	396	Дж/кг · К
Ga (жидкий)	T_s	температура плавления	303	Κ
303 < T[K]	ρ	ПЛОТНОСТЬ	$6262 - 0.000612 \cdot T$	Kr/m^3
	k	теплопроводность	$15.7 + 0.031 \cdot T$	$B T / M {\boldsymbol{\cdot}} K$
	C_p	теплоемкость	407	Дж/кг $\cdot K$
	μ	динамическая вязкость	$0.0156 - 1.053 \cdot T$	кг/м•с
	ΔH	скрытая теплота плавления	80200	Дж/кг· К
	σ	электропроводность	$3.86\cdot 10^6$	См/м

Таблица 3.1. Физические свойства галлия [99, 171].

3.2.2. Экспериментальные измерения и верификация модели

Следующие методы измерения были сделаны на представленной экспериментальной установке.

141

Измерения скорости жидкого металла

Для исследования потока жидкого галлия под электромагнитным воздействием использовался известный метод ультразвуковой допплеровской анемометрии (УДА). УДА датчики были расположены на верхней поверхности вблизи области боковой стенки и на центральной оси емкости, как показано на рисунке 3.10. Направление луча датчиков совпадает с осью *y* и, соответственно, была измерена *y*-компонента скорости расплава. В качестве анемометра был использован прибор DOP 2000 Signal Processing.

Визуализация методом нейтронной радиографии

Экспериментальные данные о динамическом положении и форме границы раздела фаз кристаллизующегося метала были получены ранее на установке радиографии тепловыми нейтронами NEUTRA и представлены в работе [103]. Метод нейтронной радиографии является перспективным и уникальным методом измерения. Принцип работы и экспериментальная установка подробно описаны в статье [103]. В нескольких словах, принцип действия заключается в том, что нейтронный пучок направляется на кристаллизующийся сплав, и пропускание нейтронов зависит от плотности материала. А, как известно, плотности жидкой и твердой фазы значительно отличаются. Затем этот нейтронный пучок, проходящий через материал, преобразуется в излучение света и является индикатором фазового перехода.

3.3. Результаты

Результатами электромагнитного расчета являются векторные поля магнитного потока, индуцированного тока и сил Лоренца.

Плотность тока в катушках индукторов

В катушках, лежащих в пазах магнитопроводов, была задана плотность тока. Предполагается, что катушки питаются от идеального трехфазного источника тока со сдвигом фазы 120°. Значение тока было 0.89 A, а число витков - 150.

На рисунке 3.6 показан ток в одной паре катушек. Направление в каждом «стержне» катушки повернуто на 90° соответственно. Распределение плотности равномерно и соответствует геометрии многовитковой катушки.



Рис. 3.6. Плотность и направление тока в одной группе катушек (A/м²)

Магнитная индукция

В результате прохождения тока по катушке, вокруг ее проводников появится результирующее магнитное поле. Магнитопроводы индукторов имеют магнитную проницаемость, заданную равной 30. На рисунке 3.7 показано пространственное распределение магнитного потока. Основные магнитные потоки сосредоточены в магнитопроводе индукторов. Активная часть тока направлена вдоль или против оси x. Следовательно, магнитный поток проходит вокруг оси z через зубцы и спинку части магнитопровода. Затем магнитный поток замыкается через воздушный зазор и жидкий металл.

Максимальное значение магнитной индукции на поверхности объема

жидкого металла составляет 25 мТл (Рис. 3.7 (б)). Интенсивность поля уменьшается по направлению к оси симметрии. Кроме того, следует отметить, что мы рассматриваем результат моделирования для нулевого времени, это означает, что ток катушки первой фазы максимален, а в двух оставшихся меньше в $\sqrt{2}$ раз.



Рис. 3.7. Магнитная индукция на поверхности индукторов перемешивателя (**a**) и объема жидкого металла (**б**)

Индуцированные токи

Частота питающего тока катушки составляет 100 Гц, а жидкий металл обладает электропроводностью. Согласно уравнению 1.10 в жидком металле появится вихревой ток. Из-за относительно низкой проводимости и воздушного зазора величина индуцированной плотности тока ниже, чем в катушках индуктивности (Рис. 3.8 а).

Этот ток в основном сконцентрирован на боковых поверхностях расплава, что можно увидеть на рисунке 3.8 **б**. В изометрическом виде мы можем наблюдать явно выраженный вихрь. Направление поля электрического тока также играет важную роль. Например, ток с направлением вдоль оси z


Рис. 3.8. Плотность тока в катушках и расплаве (A/м) в нулевой момент времени **a** и индуцированный ток в объеме жидкого металла **б** (A/м)

приводит к основным эффективным электромагнитным силам, но ток, совпадающий с осью *y*, будет генерировать силы в направлении *z*. Эти силы не выгодны и являются демонстрацией влияния краевого эффекта.

Электромагнитные усилия

Влияние переменного магнитного потока на электропроводящую среду, как известно, генерирует электромагнитные силы или силы Лоренца внутри нее. На рисунке 3.9 показано распределение усредненных по времени сил Лоренца в жидком металле. В связи с тем, что магнитное поле и вихревые токи в основном сосредоточены на боковых поверхностях расплава, силы Лоренца также действуют в этих зонах. К оси симметрии емкости их величина экспоненциально убывает. Направление сил совпадает с направлением бегущего магнитного поля - вниз. Это распределение векторов силы является источником внешнего силового воздействия в уравнениях Навье-Стокса (3.2).

145



Рис. 3.9. Силы Лорнеца в объеме жидкого металла (Н/м³)

Гидродинамические течения жидкого метала

Взаимодействие вихревых токов с магнитным полем индуктора создает силы Лоренца в жидком металле. Эти усилия являются исходным членом в уравнениях, описывающих гидродинамическое течение.

Как и ожидалось, при таком силовом воздействии мы получаем двухвихревую картину потока расплава, показанную на рисунке 3.10. В пристенных зонах с повышенной концентрацией силы жидкий металл развивает максимальную скорость около 30 мм/с. Затем жидкость протекает вдоль нижней поверхности и поднимается в зоне центральной оси уже с меньшей скоростью.

Проверка проводилась с помощью двух датчиков УДА, расположение которых схематически изображено на рисунке 3.10. А на рисунке 3.11 а показано сравнение численных (линия) и экспериментальных (точки) профилей средней скорости вдоль оси у. Можно отметить хорошую сходимость результатов. Динамика скорости также была проанализирована. Как видно из рисунка 3.11 б, модель турбулентности $k - \varepsilon$ не улавливает все пульсации скорости жидкости, но хорошо определяет ее интегральное значение.



Рис. 3.10. Поле скоростей жидкого металла при воздействии БМП и расположение датчиков УДА.



Рис. 3.11. **а** - профиль средней скорости; **б** - динамика скорости в точках на высоте 45 мм. Синий цвет соответствует области вблизи стенки, черный - центральной оси. Точки - экспериментальные, линии - численные; синий - пристеночная область, черный - центральная ось

3.3.1. Затвердевание под воздействием бегущего магнитного поля

Следующим этапом был смоделирован процесс затвердевания при силовом воздействии на поток жидкой фазы. На рисунке 3.12 показана динамика затвердевания. Основной тепловой поток должен проходить через нижнюю поверхность, поэтому затвердевание начинается с нее. Затем теплые объемы металла с помощью БМП спускаются вниз в пристеночной области. Это обстоятельство замедляет скорость кристаллизации. С другой стороны, в области центральной оси потоки охлажденного металла направлены вверх, что ускоряет вертикальную скорость кристаллизации в этой области. Таким образом получается менискообразный изгиб границы раздела жидкой и твердой фаз, как показано на рисунке. Нижний ряд изображений – это экспериментальные данные, полученные с помощью метода нейтронной радиографии. От синего до зеленого цветовая шкала соответствует уже затвердевшему металлу, а от красного до желтого – жидкой фазе. Следует отметить, что результаты численного моделирования находятся в хорошем качественном согласии с экспериментальными изображениями, и можно заключить, что эта модель является хорошим инструментом для дальнейших исследований. Полное затвердевания в таких условиях заняло около 2-х часов и можно заключить, что выбор $k - \varepsilon$ модели турбулентности полностью оправдал себя.

Еще один интересный вопрос – это изменение скорости во время затвердевания. Если мы посмотрим на жидкую фракцию на рисунке 3.12 в начале затвердевания, векторы скорости будут большими. Затем через 2400 секунд векторы скорости почти исчезают. Это говорит о значительном уменьшении скорости потока жидкой фазы в процессе кристаллизации. Для анализа этого явления сравнение профилей скорости на разных временных шагах показано на рисунке 3.13. Эти профили взяты из пристенной зоны согласно рисунку 3.10. Как мы видим, уменьшение начинается через 600 секунд, а когда поло-



Рис. 3.12. Динамика процесса затвердевания в присутствии бегущего магнитного поля. Векторы скорости наложены на снимки доли жидкой фазы (Liquid fraction) белыми стрелками. Анимация затвердевания располагается по ссылке [172]

вина объема затвердевает скорость уменьшается в 3 раза. Это явление может быть объяснено переносом квазиравновесной двухфазной зоны в жидкометаллический объем. Однако, при затвердевании происходит снижение параметра электромагнитного воздействия. Данное явление описывалось в разделе 1.6.3 и может повлиять на результирующий тепловой поток в объеме жидкости. Avnaim и др. [99] проделали такое исследование и предложили увеличить частоту питающего тока для сохранения параметра силового воздействия на протяжении всего времени затвердевания, чтобы сохранить постоянное условие конвекции.



Рис. 3.13. Уменьшение скорости расплава в процессе затвердевания.

3.3.2. Течения жидкого металла под действием пульсирующего БМП

Следующая часть посвящена пульсирующему воздействию БМП на расплав галлия. Для этого исследования мы использовали ту же экспериментальную установку, но без условий затвердевания. Пульсирующая модуляция во времени бегущего магнитного поля достигалось путем периодического прерывания питания индукторов с частотами пульсаций $f_p = 1$; 0.5; 0.3 и 0.1 Гц. Экспериментально реализовывалась при помощи простой коммутации контактора, через который подключались индукторы к источнику питания. Дополнительная информация по частотам приведена в приложении В.

Тестирование моделей турбулентности

Прежде всего была произведена проверка моделей турбулентности в режиме пульсирующего силового ЭМ воздействия на поток расплава. Результаты скорости при частоте пульсаций $f_p = 0.5$ Гц можно увидеть на рисунке 3.14. Серые столбцы означают паузы, а белые - активные полупериоды силового воздействия. Можно отметить, что все сравниваемые модели показывают хорошую сходимость, но модель LES в некоторых случаях немного отличается от моделей RANS и это может повлиять на результат расчета для других частот пульсаций. Кроме того, подход LES больше подходит для предсказания низкочастотных флуктуаций скорости в двух вихревых потоках [173]. Поэтому было решено использовать этот подход для исследования в данном разделе.



центральная ось

пристеночная область

Рис. 3.14. Тестирование моделей турбулентности для случая $f_p = 0.5$ Гц.

Анализ старта потока

Проведено исследование поведения потока жидкого металла на начальных этапах³ силового воздействия как численным, так и экспериментальным путем. Результаты для скорости при различных частотах модуляции f_p показаны на рисунке 3.15. Положительные скорости взяты в центральной области емкости, а отрицательные данные соответствуют пристеночной области, в соответствии с рисунком 3.10. Изначально расплав находился в покое, затем в момент времени 0 включалось магнитное поле. На первый взгляд все случаи выглядят одинаково. Для скорости в центральной области экспериментальные данные для всех частот пульсации аналогичны. На первом этапе идет линейное увеличение скорости, затем по достижению 15–40 секунд рост останавливается и значения становятся относительно постоянными. К сожалению, не представляется возможным сделать вывод, что в центральной

³ в англ. литературе известен как spin-up behaviour – раскрутка, стартовый период, разгон



Рис. 3.15. Скорости раскручивания жидкого металла при разных частотах пульсации. Точки - измерено; линии - рассчитано. Видеофайлы результатов моделирования можно найти в дополнительных данных [172]

области наблюдаются выраженные пульсации скорости как в численных, так и в экспериментальных данных.

Но если мы посмотрим на более интенсивные потоки вблизи боковой стенки, можно ясно увидеть периодическую пульсацию. Для численных данных наблюдаются выраженные периодические колебания, соответствующие частоте пульсаций. Экспериментальные данные, как представляется, не всегда показывают эти колебания, но количественно хорошо совпадают с численными данными.

152

Время разгона потока для пристеночной зоны достигается за 2–4 секунды, в то время как в центральной зоне потоку требуется 10–20 секунд для достижения рабочей скорости. Частота пульсаций практически не влияет на время разгона. Колебания после достижения рабочей скорости можно объяснить прямоугольной формой сосуда [174, 175].

Анализ пульсирующего потока

Для анализа влияния частоты пульсации на течение жидкого металла приведено сравнение скорости расплава в пристеночной области, результаты которого показаны на рисунке 3.16. Численные результаты остаются без изменений, а экспериментальные данные были обработаны FFT⁴ сглаживанием. Эта функция использует в качестве эффективной сглаженной ширины значение из поля фактора, равного двум. Такая обработка данных может помочь уменьшить «шум» и более четко увидеть экспериментально полученную частоту пульсации.

Прежде всего, стоит отметить из численных результатов, что частота пульсаций магнитного поля равна частоте пульсаций потока жидкого металла. На высоких частотах (1 и 0.5 Гц) поток не успевает развить большое значение максимальной скорости, поскольку начинается пауза второго полупериода функции модуляции магнитного поля и затухание потока. С другой стороны, при низкой частоте (0.1 Гц) первый (активный) полупериод периодической функции модуляции магнитного поля длится 5 секунд. За это время поток успевает достичь максимального значения скорости. Однако это не оптимальный режим, поскольку скорость потока начинает «насыщаться». Более того, на этой частоте, когда развивается поток, присутствуют небольшие колебания. Эти «вторичные» колебания могут быть результатом квадрат-

153

 $^{^4}$ Fast Fourier Transform или Быстрое преобразование Фурье





Рис. 3.16. Сравнение экспериментально и численно полученных скоростей (после сглаживания БПФ) при разных частотах пульсации. Анимации рассчитанной динамики скорости течений можно найти по ссылке [172].

ной формы сосуда, азимутального потока или взаимодействия двух вихрей и должны быть изучены более детально. Случай для $f_p = 0,3$ Гц является наиболее близким к оптимальному, согласно [102], из-за прерывания силового действия, выполняемого на колене кривой.

Численные и измеренные данные хорошо согласуются в трех последних случаях: 0.5; 0.3 и 0.1 Гц. Амплитуда измеренного значения на графиках меньше численной из-за сглаживания FFT. Экспериментальные данные даже показывают некоторые небольшие колебания в случае $f_p = 0.1$ Гц. Однако для случая измерений УДА не улавливает пульсацию потока должным образом. Для такой и большей частоты следует использовать другой подход, например, метод потенциального зонда.

Анализ

Чтобы оценить результаты, полученные во второй части этой главы: анализ пульсирующего потока жидкого металла, необходимо сравнить его с результатами других работ. Если мы обратимся к предыдущим исследованиям модулированного по времени магнитного поля, то увидим, что авторы предлагают множество различных критериев оптимальной частоты модуляции (см. таблицу 3). Наиболее подходящие для нашего случая работы [102] и [103,176] предлагают характерные частоты модуляции электромагнитного поля

$$f_m = \frac{1}{2t_s},\tag{3.9}$$

где время насыщения равно $t_s = \frac{a^2}{v_t}$, a - половина ширины емкости в направлении y, v_t - турбулентная вязкость.

И

$$f_{ch} = \frac{1}{T_{ch}} \tag{3.10}$$

где $T_{ch} = \frac{2\pi \frac{rr+r_z}{2}}{V_{ch}}; f_{ch}$ – характерная частота модуляции r_r и r_z – радиальный и осевой размеры вихря.

В пересчете для случая, рассмотренного в данной главе, эти частоты будут $f_m = 0,04$ и $f_{ch} = 0,321$ соответственно.

Для анализа влияния пульсации БМП на параметры потока расплава на рисунке 3.17 (a) обобщены результаты моделирования и измерений. Амплитуда пульсаций, как и ожидалось, сильно зависит от частоты пульсаций как для численного, так и для экспериментального случаев. Но для максимального значения скорости линейной зависимости не наблюдается. Экстремум, явный для численного, наблюдается при частоте пульсации 0.3 Гц. Однако этот экстремум не был получен экспериментально, и показана почти плоская область кривой между 0.1 и 0.3 Гц. Эти результаты хорошо коррелируют со значением МГД резонанса, рассмотренным в работах [103, 111]. Кроме того, применение пульсирующей функции к электромагнитным полям означает, что у нас будут перерывы в электропитании установки и, следовательно, мы будем потреблять меньше электроэнергии. Если время действующего полупериода равно паузе, энергопотребление будет в два раза меньше, тогда как данные о максимальной скорости в случае стационарно приложенном БМП (0 Гц) и для пульсирующих случаев различаются не так резко.



Рис. 3.17. а – зависимости параметров потока жидкого металла от частоты пульсации БМП; б – анализ Фурье скорости жидкости под воздействием пульсирующего БМП.

Дополнительно проведен анализ фурье экспериментальных данных, результаты которого изображены на рисунке 3.17 (б). Так, можно наблюдать явные пики, соответствующие частотам 0.1, 0.3, и 0.5 Гц, тогда как для частоты 1 Гц такой пик отсутствует. То есть пульсации вызванные модуляцией БМП, незначительны относительно собственных пульсаций потока. Полученные характеристики также подтверждают экспоненциальное снижение амплитуды пульсаций от частоты.

3.4. Выводы к главе

Разработана численная модель процесса затвердевания чистого Ga в присутствии БМП. Эта модель проверена сравнением с измерениями скоростей и переходными снимками положения границы раздела жидкость / твердое тело. Разработанная модель может быть использована для дальнейших исследований

Проведен анализ импульсного воздействия БМП на течение жидкого металла. Исследование проведено как численными, так и экспериментальными методами и показало хорошее согласие для частот пульсации от 0.5 до 0.1 Гц. Получены зависимости максимального значения скорости и амплитуды от частоты пульсации. Экстремум для числовой максимальной скорости составляет 0.3 Гц, и это коррелирует с другими работами. Импульсная обработка жидких металлов БМП может снизить потребление электроэнергии с минимальными потерями в эффективности. Этот подход может быть использован не только для воздействия в процессе затвердевания, но и для многочисленных металлургических процессов.

Дальнейшие исследования должны быть посвящены моделированию процесса затвердевания при воздействии БМП с временной модуляцией. Это моделирование позволит лучше понять механизм взаимодействия между нестационарной электромагнитно-принудительными конвективными потоками и поверхностью раздела жидкой и твердой фаз, а также получить зависимости формы поверхности раздела жидкость / твердое тело и макроструктурных свойств от частоты модуляции. Другим интересным моментом является исследование макросегрегации (пятнистые сегрегации, каналы и т.д.), при описанном воздействии импульсного потока и переход от дендритной к ячеистой или от столбчатой к равноосной структуре отлитого металла.

Достигнутые результаты в представленной главе могут быть выделены в следующие тезисы:

- Разработана и верифицирована численная модель кристаллизации однокомпонентного сплава под воздействием БМП.
- 2. Численно и экспериментально исследованы частоты пульсирующей модуляции БМП. Экстремума в характеристиках потока соответствующих явлению МГД резонанса, получено не было.
- Показано, что пульсирующая модуляция может при двукратном снижении энергопотреблении сохранять 80% от максимальной скорости в обычном режиме.

Дополнительные данные, связанные с этой главой, можно найти по ссылкам: [177](данные измерений УДА) и [172] (видеофайлы результатов численного моделирования)

Результаты, представленные в третьей главе выполнены во время стажировки в Институте электротехнологии Ганноверского университета им. Лейбница под руководством проф. Бааке Э.

Заключение

Целью представленной диссертационной работой было исследование процессов электромагнитного перемешивания жидкого металла под воздействием бегущего магнитного поля.

В работе рассмотрено три объекта: односторонний перемешиватель с БМП (глава 1), двусторонние перемешиватели с БМП для получения Li-B композита (глава 2) и исследования кристаллизации Ga (глава 3).

Был разработан и систематизирован надежный и эффективный набор численных моделей на основе методов конечных элементов и объемов в коммерческих библиотеках ANSYS и COMSOL, и адаптирован для трехмерного моделирования связанных электромагнитных и гидродинамических явлений с учетом переноса сферических частиц и фазового перехода в приложении к электромагнитному перемешиванию бегущим магнитным полем. Экспериментальные измерения для верификации выполнялись методами: измерением индукции магнитного поля гауссметром, скорости гидродинамических течений ультразвуковым допплеровским анемометром и с использованием данных о форме и положении границы раздела фаз, полученных с помощью метода нейтронной радиографии.

Проведены исследования, определяющие влияние параметров питания индукторов БМП на гидродинамические характеристики течений жидкого металла. В частности, для всех рассматриваемых объектов исследованы влияние модуляции во времени БМП на течения а также процессы переноса примеси и кристаллизации.

Полученные результаты позволяют лучше понять процессы, происходящие в жидкометаллическом вторичном элементе индукционных МГД машин с бегущим магнитным полем в режиме перемешивания. Они могут быть интересны как исследователям, так и проектировщикам устройств данного типа. Несмотря на модели и анализ, представленные в этой диссертации, автор понимает, что многие вопросы относительно процессов тепло- и массобомена в жидких металлах под воздействием переменных магнитных полей остаются открытыми. Перспективы дальнейшей разработки темы исследования можно разделить на две части: вопросы дополнительного усложнения связанных моделей и инженерные исследования.

К первой категории относится дополнительное улучшение численных моделей МГД процессов. Чтобы понимать более полно явления происходящие в жидком металле, встает актуальная задача разработки моделей, сочетающих в себе не только кристаллизацию и учет переноса частиц и включений по отдельности, а также совмещение этих процессов. Исследование затвердевания двух и более компонентных сплавов имеет определенный интерес для моделирования формирования макросегрегаций, а так же переход от столбчатой к равноосной структуре в условиях взаимодействия свободных и вынужденных конвективных потоков [178]. Более того, использование мультимасштабного моделирования (такие методы как cellular automata или phase-field), которые позволят учитывать мезо- и микромасштабные процессы при фазовом переходе, откроет большие перспективы в исследовании таких явлений как ориентация и измельчение зерна, а также переход от столбчатой к равноосной структуре при кристаллизации в условиях электромагнитного перемешивания.

С инженерной же точки зрения представляют большой интерес, во-первых, вопрос масштабируемости, а во вторых, оптимизации. Так как полученные результаты исследований электромагнитного перемешивания, показанные в литературе и, в частности, в настоящей работе, получены на экспериментальных установках в лабораторных условиях. И для того, чтобы можно было точно масштабировать полученные эффекты и явления до индустриального масштаба, необходимо получить аналитические функции и безраз-

160

мерные параметры, описывающие данные процессы.

Развите, с одной стороны, прикладных методов оптимизации и, с другой стороны, вычислительных мощностей делает возможным параметрическую оптимизацию магнитогидродинамических устройств с учетом связанных полевых процессов в них а также, режимы и условия их питания.

Обобщая результаты полученные в представленной диссертационной работе можно сделать следующие выводы:

- 1. Проведенный анализ методов электромагнитного перемешивания бегущим магнитным полем и модулированными полями показал способ повышения эффективности устройств электромагнитного перемешивания.
- 2. Построенные в диссертационной работе численные модели были верифицированы путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными измерениями магнитной индукции, усилий, скоростей гидродинамических течений, и границы раздела твердой и жидкой фаз.
- 3. Были определены характеристики электромагнитных усилий и гидродинамических течений под воздействием бегущего магнитного поля, с помощью представленных численных моделей.
- 4. Впервые численно, в трехмерной постановке исследовано распределение частиц под действием БМП. Проанализировано влияние интенсивности магнитного поля, а также реверсивного и пульсирующего поля на эффективность перемешивания. Показана возможность увеличения теплоотвода с боковой поверхности металла при сохранении эффективности перемешивания.
- Смоделирован и верифицирован процесс затвердевания галлия в БМП, а также исследовано влияние периодически импульсного БМП разной частоты на скорость гидродинамического потока.

- 6. Представленная работа позволяет лучше понять процессы тепло- и массообмена в жидком металле под действием бегущего магнитного поля.
- 7. Сформулированы рекомендации для проектирования и эксплуатации устройств электромагнитного перемешивания с БМП.

Список литературы

- 1. Shvydkiy E., Zaharov V., Bolotin K. et al. Numerical modeling of the travelling magnetic field stirrer for liquid lithium // Magnetohydrodynamics. 2017. Vol. 53, no. 4. P. 707–713.
- Швыдкий Е. Л., Сокунов Б. А., Бычков А. С., Соколов И. В. Электромагнитное перемешивание кристаллизующегося слитка индуктором с неравномерной линейной нагрузкой // Вопросы электротехнологий. 2018. № 1. С. 20–26.
- Сидоров О. Ю., Сарапулов Ф. Н., Бычков С. А., Швыдкий Е. Применение методов конечных элементов и конечных разностей для моделирования кристаллизации расплавов в переменном магнитном поле // Известия высших учебных заведений.
 ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. 2018. по. 3. Р. 80–84.
- Shvydkii E. L., Bychkov S. A., Zakharov V. V. et al. Impurity Distribution in a Two-Sided Electromagnetic Stirrer // Russian Metallurgy (Metally). 2019. Vol. 2019, no. 6. P. 570–575.
- Shvydkiy E., Bolotin K., Sokolov I. 3D simulation of particle transport in the double-sided travelling magnetic field stirrer // Magnetohydrodynamics. 2019. Vol. 55, no. 1. P. 185–192.
- Losev G., Shvydkiy E., Sokolov I. et al. Effective stirring of liquid metal by a modulated travelling magnetic field // Magnetohydrodynamics. 2019. Vol. 55, no. 1. P. 107–114.
- Evgeny S., Sokolov I., Bolotin K., Zakharov V. Influence of vessel dimensions on particles homogenization and heat removing in TMF stirrer // COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. 2020. Vol. 39, no. 1. P. 125–132.
- Shvydkiy E., Baake E., Köppen D. Liquid Metal Flow Under Traveling Magnetic Field—Solidification Simulation and Pulsating Flow Analysis // Metals. 2020. Vol. 10, no. 4.
- 9. Shvidkiy E., Sokunov B., Uskov I., Smolyanov I. Simulation of continuous casting process with electromagnetic influence to the ingot liquid phase // Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIConRusNW 2016. 2016.
- Shvydkiy E. L., Smolyanov I. A., Sarapulov F., Bolotin K. E. Calculation methods of tubular linear induction motor // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2017. — Feb. P. 1579–1580.

- Shvydkiy E., Kolesnichenko I. 3D numerical simulation of the linear induction motor, considering magnetic saturation // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2018. — Январь. Р. 777–779.
- Shvydkiy E., Kolesnichenko I., Khalilov R. et al. Effect of travelling magnetic field inductor characteristics on the liquid metal flow in a rectangular cell // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 424.
- Losev G., Pavlinov A., Shvydkiy E. etal. Stirring flow of liquid metal generating by low-frequency modulated traveling magnetic field in rectangular cell // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 581. 2019.
- Sokolov I., Shvydkiy E., Losev G. etal. The influence of traveling magnetic field inductor asymmetric power supply on the liquid metal flow // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 581. 2019.
- Shvydkiy E., Baake E. Three-Dimensional Numerical Model of a Double-Sided Electromagnetic Stirrer of a Traveling Magnetic Field // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). 2019. — Sep. P. 249–251.
- Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields / Ed. by Dmitry G. Eskin, and Jiawei Mi. Springer, Cham, 2018. Vol. 273. ISBN: 978-3-319-94841-6.
- 17. Окороков Н. В. Электромагнитное перемешивание металла в дуговых сталеплавильных печах. 1961.
- 18. Кирко И. М. Жидкий металл в электромагнитном поле. 1964.
- 19. Вольдек А. И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Энергия, 1970.
- Брановер Г. Г., Цинобер А. Б. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред. Наука, 1970.
- 21. Верте Л. А. Магнитная гидродинамика в металлургии. Металлургия, 1975.
- 22. Бояревич В. В. Электровихревые течения. Знание, 1985.
- 23. Тир Л. Л. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией металла в электропечах. Металлургия, 1991. ISBN: 5-229-00554-8.
- Сарапулов Φ. Н. Магнитогидродинамические машины с бегущим или пульсирующим магнитным полем. УГТУ, 1994. ISBN: 5-230-17143-X.
- Moffatt H. K. Electromagnetic stirring // Physics of Fluids A: Fluid Dynamics. 1991.
 Vol. 3, no. 5. P. 1336–1343.
- 26. Цаплин А. И. Теплофизика внешних воздействий при кристаллизации стальных ма-

шинах непрерывного литья. 1995.

- Davidson P. A. MAGNETOHYDRODYNAMICS IN MATERIALS PROCESSING // Annual Review of Fluid Mechanics. 1999. Vol. 31, no. 1. P. 273–300.
- Davidson P. A. An Introduction to Magnetohydrodynamics. Cambridge Texts in Applied Mathematics. Cambridge University Press, 2001.
- 29. Molokov S., Moreau R., Moffatt K. Magnetohydrodynamics. Springer Netherlands, 2007.
- Кирко И. М., Кирко Г. Е. Магнитная гидродинамика. Современное видение проблем. УГТУ, 2009. ISBN: 978-5-93972-752-5.
- Хрипченко С. Ю. Электровихревые течения в каналах МГД-устройств. УрО РАН, 2009. ISBN: 978-5-7691-2025-1.
- Сидоров О. Ю., Сарапулов Ф. Н., Сарапулов С. Ф. Методы конечных элементов и разностей в электромеханике и электротехнологии. Энергоатомиздат, 2010. ISBN: 5-88151-529-3.
- Nikrityuk P. A. Computational Thermo-Fluid Dynamics. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011. URL: https://doi.org/10.1002/9783527636075.
- 34. Asai S. Electromagnetic Processing of Materials. Springer Netherlands, 2012. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-007-2645-1.
- 35. Rezin M. Advances in electromagnetic stirring of liquid metals // Magnetohydrodynamics. 1965. Vol. 1, no. 2. P. 130-138. URL: http://www.mhd.sal.lv/authors/Rezin_M_G. html.
- 36. Резин М. Разработка и исследование устройств для электромагнитного воздействия на жидкие металлы // дис. д-ра техн. наук / Резин Михаил Григорьевич. 1966. – Свердловск. Уральский политехнический институт.
- Sokunov B. A., Krivonishchenko I. A., Prudnikov Y. S., Rezin M. G. Effect of electromagnetic stirring on the ingot structure during semicontinuous casting // Magnetohydrodynamics. 1977. Vol. 13, no. 3. P. 361–364.
- Tokar' V. S., Sokunov B. A., Skryl'nikov A. I. The use of electromagnetic stirring in the casting processes // Litejnoe Proizvodstvo. 1995. no 4-5. P. 11.
- Sidorov O. Y., Sarapulov F. N., Pirumyan N. M., Bendeberi N. S. Cooling of liquid tin a travelling magnetic field // Magnitnaya Gidrodinamika. 1996. Vol. 32, no 1. P. 89–93.
- Sarapulov F. N., Sarapulov S. F., Sokunov B. A. Operation of a linear magnetohydrodynamic induction pump // Russian Electrical Engineering. 2005. Vol. 76, no 9. P. 69–73.
- 41. Sarapulov S. F., Sokunov B. A. Three-phase linear-induction magnetohydrodynamic

pump // Russian Electrical Engineering. 2006. Vol. 77, no 1. P. 7–12.

- Tarasov F. E., Bychkov S., Nazarov S. L., Frizen V. E. InductionMHD-pump with flat coils // Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved). 2015. Vol. 60, no 1. P. 71–79.
- 43. Sarapulov F., Smolyanov I., Tarasov F. etal. Numerical simulation of double side linear induction pump for liquid magnesium // Magnetohydrodynamics. 2017. Vol. 53, no 4. P. 603–609.
- 44. Sarapulov F. N., Sarapulov S. F., Frizen V. E. Use of detailed equivalent circuitmethod for investigation of electromagnetic, thermal and hydrodynamic processes in induction electric engineering units // Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved). 2015. Vol. 60, no 2. P. 131–153.
- 45. Идиятулин А. А. Разработка индукционного вращателя жидкометаллической загрузки плавильного агрегата и исследование его электромагнитных и гидродинамических характеристик // Дисс. канд. техн. наук / Идиятулин Алексей Александрович. 2010. – Екатеринбург. Уральский федеральный университет. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01004875723.
- 46. Бычков С. А. Исследование электромагнитного перемешивателя цветных металлов и сплавов в процессе кристаллизации // Дисс. канд. техн. наук / Бычков Сергей Алексеевич. 2011. – Екатеринбург. Уральский федеральный университет. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01004994527.
- 47. Фаткуллин С. М. Формирование энергоэффективных режимов работы индукционного плавильного агрегата // Дисс. канд. техн. наук / Фаткуллин Салават Мирдасович. 2011. – Екатеринбург. Уральский федеральный университет. URL: https: //search.rsl.ru/ru/record/01005392575.
- Koal K. Strömungsbeeinflussung in Flüssigmetallen durch rotierende und wandernde Magnetfelder. 2011. URL: http://slubdd.de/katalog?TN_libero_mab215624965.
- 49. Сарапулов С. Ф. Индукционные магнитогидродинамические машины технологического назначения для электромеханического воздействия на металлические расплавы. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01005091119.
- 50. Хацаюк М. Ю. Индукционная установка с МГД воздействием на высоколегированные алюминиевые сплавы в процессе их приготовления и разливки // Дисс. канд. техн. наук / Хацаюк Максим Юрьевич. 2013. – Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина. URL: https://lib.ideafix.co/ rus/inquiry/disser/defence_arch/?dnid=878.

- 51. Hachani L. Study of the influence of natural and forced convection on the solidification of a binary metal alloy.: Theses / Université de Grenoble. 2013. URL: https://tel. archives-ouvertes.fr/tel-00949060.
- 52. Фризен В. Э. Индукционные комплексы для инновационных электрометаллургических технологий // Дисс. докт. техн. наук / Фризен Василий Эдуардович. 2014. – Екатеринбург. Уральский федеральный университет. URL: https://mpei.ru/Science/ Dissertations/dissertations/Dissertations/FrizenVE_diss.pdf.
- 53. Авдулов А. А. Электромагнитный модификатор слитка в роторной литейной машине // Дисс. канд. техн. наук / Авдулов Антон Андреевич. 2015. – Красноярск. Сибирский федеральный университет. URL: http://research.sfu-kras.ru/node/11662.
- 54. Garrido Pacheco M. Electromagnetic processing of molten light alloys reinforced by micro/nanoparticles: Theses / Université Grenoble Alpes. 2017. URL: https://tel. archives-ouvertes.fr/tel-01688866.
- 55. Павлинов А. М. Экспериментальное исследование турбулентных потоков жидких металлов // Дисс. канд. физ.-мат. наук / Павлинов Александр Михайлович. 2016. – Пермь. Институт механики сплошных сред УрО РАН. URL: https: //www.icmm.ru/dissertatsionnyj-sovet/arkhiv-zashchit/zashchity-2016/ 610-zashchita-dissertatsii-pavlinova-aleksandra-mikhajlovicha.
- 56. Болотин К. Е. Повышение эффективности индукционных магнитогидродинамических машин металлургического назначения // Дисс. канд. техн. наук / Болотин Кирилл Евгеньевич. 2018. – Екатеринбург. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина. URL: http://lib.urfu.ru/mod/data/ view.php?d=51&rid=278276&filter=1.
- 57. Хацаюк М. Ю. Теория и моделирование магнитогидродинамических процессов в электротехнологических комплексах металлургического назначения // Дисс. докт. техн. наук / Хацаюк Максим Юрьевич. 2020. – Красноярск. Санкт-Петербургский государственный электротехнических университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). URL: https://etu.ru/assets/files/nauka/dissertacii/2019/hacayuk/ dissertaciya_hacayuk-myu.pdf.
- 58. Umbraško A. Heat and mass transfer in electromagnetically driven recirculated turbulent flows: Ph. D. thesis / University of Latvia. 2011. URL: https://dspace.lu.lv/dspace/ handle/7/5076.
- 59. Ščepanskis M. The modelling of the behaviour of solid inclusions in the EM induced

recirculated turbulent flows of liquid metal: Ph.D. thesis / University of Latvia. 2014. URL: https://dspace.lu.lv/dspace/handle/7/5209.

- 60. Spitāns S. Investigation of turbulent free surface flow of liquid metal in electromagnetic field: Ph.D. thesis / University of Latvia. 2015.-08. URL: https://dspace.lu.lv/dspace/handle/7/31308.
- 61. Мусаева Д. А. Экспериментальное и численное исследование переноса импульса и энергии при вынужденной конвекции проводящей жидкости в поле низкочастотных импульсных электромагнитных сил // дис. канд. техн. наук / Мусаева Диана Абдуллаевна. 2017. – Казань. Казанский государственный энергетический институт.
- 62. Ковальский В. В. Цилиндрический МГД насос для силового воздействия на расплав алюминия в процессе литья из стационарного миксера // Дисс. канд. техн. наук / Ковальский, Виктор Васильевич. 2010. – Красноярск. Сиб. федер. ун-т. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01004828431.
- 63. Чайка П. Ю. Исследование ресурса магнитогидродинамических машин с жидкометаллическим рабочим телом // Дисс. канд. техн. наук / Ковальский, Виктор Васильевич. 2012. – Санкт-Петербург. Науч.-исслед. ин-т электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01005488567.
- 64. Тарасов Φ. Е. Индукционный МГД-насос с одноплоскостной концентрической обмоткой индуктора для транспортировки магния // Дисс. канд. техн. наук / Тарасов Федор Евгеньевич. 2015. – Екатеринбург. Уральский федеральный университет. URL: http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=240504&filter=1.
- 65. Goldsteins L. Experimental and numerical analysis of behavior of electromagnetic annular linear induction pump: Theses / Université Grenoble Alpes. 2015. URL: https://tel. archives-ouvertes.fr/tel-01232570.
- 66. Горемыкин В. А. Численное и физическое моделирование электромагнитного лотка для транспортировки расплавов алюминия // Дисс. канд. техн. наук / Горемыкин Виталий Андреевич. 2015. – Екатеринбург. Уральский федеральный университет. URL: http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=250354&filter=1.
- 67. Martin Lopez E. Study of MHD instabilities in high flowrate induction electromagnetic pumps of annular linear design: Theses / Université Grenoble Alpes. 2018. URL: https: //tel.archives-ouvertes.fr/tel-02055466.
- Miao X. Numerical study of a continuous casting process with electromagnetic brake: Ph.D. thesis. 2014. URL: https://www.semanticscholar.

org/paper/Numerical-study-of-a-continuous-casting-process-Miao/ eee212d76fe8273076487665563f0d4c07d19f59.

- 69. Marioni L. Computational Modelling and Electromagnetic-CFD Coupling in Casting Processes.: Ph.D. thesis. 2017.-11. URL: https://pastel.archives-ouvertes.fr/ tel-01774582.
- 70. Kratzsch C. Liquid Metal Flow in Continuous Casting Molds: A Numerical Approach on Electromagnetic Flow Control, Turbulence and Multiphase Phenomena: Ph. D. thesis. 2018. – 12.
- 71. Beinerts T. MHD sistēmu ar rotējošiem magnētiskiem dipoliem radīto hidrodinamisko plūsmu izpēte: Ph. D. thesis / University of Latvia. 2019. URL: https://dspace.lu.lv/ dspace/handle/7/46703.
- Dadzis K. Modeling of directional solidification of multicrystalline silicon in a traveling magnetic field: Ph. D. thesis / Technischen Universitat Bergakademie Freiberg genehmigte. 2012.
- Geža V. Investigation of Stratified Electromagnetically Driven Flows in Electrically Conducting Fluids: Ph.D. thesis / University of Latvia. 2015. URL: https://dspace.lu. lv/dspace/handle/7/31306.
- 74. Хлыбов О. А. Влияние вращающегося магнитного поля на тепломассообмен при выращивании полупроводниковых кристаллов методами направленной кристаллизации // Дисс. канд. физ.-мат. наук / Хлыбов Олег Анатольевич. 2016. – Пермь. Институт механики сплошных сред УрО РАН. URL: https://www.icmm.ru/dissertatsionnyj-sovet/arkhiv-zashchit/ zashchity-2016/554-zashchita-dissertatsii-khlybova-olega-anatolevicha.
- Rebei F., Sand U., J. E., Hongliang Y. A stirring history // ABB review. 2016. Vol. 3. P. 45–48.
- Timofeev V., Khatsayuk M. Theoretical Design Fundamentals for MHD Stirrers for Molten Metals // Magnetohydrodynamics. 2016. Vol. 52, no. 4. P. 495–506.
- 77. Teng L., Meador M., Ljungqvist P. Application of New Generation Electromagnetic Stirring in Electric Arc Furnace // steel research international. 2016. aug. Vol. 88, no. 4. P. 1600202.
- Geža N. B., V. Numerical simulation of core-free design of a large electromagnetic pump with double stator // Magnetohydrodynamics. 2016. Vol. 52, no. 3. P. 417–431.
- 79. Khalilov R. K. I. Annular linear induction pump for liquid sodium // Magnetohydrody-

namics. 2015. Vol. 51, no. 1. P. 95–104.

- Abdullina K., Bogovalov S., Zaikov Y. 3D numerical modeling of liquid metal turbulent flow in an annular linear induction pump // Annals of Nuclear Energy. 2018. — jan. Vol. 111. P. 118–126.
- Denisov S., Dolgikh V., Khripchenko S. et al. The effect of traveling and rotating magnetic fields on the structure of aluminum alloy during its crystallization in a cylindrical crucible // Magnetohydrodynamics. 2014. Vol. 50, no. 4. P. 407–422.
- Dropka N., Miller W., Menzel R., Rehse U. Numerical study on transport phenomena in a directional solidification process in the presence of travelling magnetic fields // Journal of Crystal Growth. 2010. — apr. Vol. 312, no. 8. P. 1407–1410.
- 83. Wang X., Fautrelle Y., Etay J., Moreau R. A Periodically Reversed Flow Driven by a Modulated Traveling Magnetic Field: Part I. Experiments with GaInSn // Metallurgical and Materials Transactions B. 2008. – oct. Vol. 40, no. 1. P. 82.
- 84. Avnaim M., Mikhailovich B., Azulay A., Levy A. Numerical and experimental study of the traveling magnetic field effect on the horizontal solidification in a rectangular cavity part 1: Liquid metal flow under the TMF impact // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2018. — feb. Vol. 69. P. 23–32.
- 85. Losev G., Kolesnichenko I. Solidification front shape control through modulating the traveling magnetic field // Journal of Crystal Growth. 2019. Vol. 528. P. 125249.
- 86. Hachani L., Zaidat K., Fautrelle Y. Experimental study of the solidification of Sn-10wt.%Pb alloy under different forced convection in benchmark experiment // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. — jun. Vol. 85. P. 438–454.
- Ben-David O., Levy A., Mikhailovich B. et al. Impact of traveling permanent magnets on low temperature metal melting in a cuboid // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. — aug. Vol. 99. P. 882–894.
- Ben-David O., Levy A., Mikhailovich B., Azulay A. Impact of rotating permanent magnets on gallium melting in an orthogonal container // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 81. P. 373–382.
- Dzelme V., Ščepanskis M., Geža V. et al. Modelling of liquid metal stirring induced by four counter-rotating permanent magnets // Magnetohydrodynamics. 2016. Vol. 52, no. 4. P. 461–470.
- 90. Dzelme V., Jakovics A., Vencels J. et al. Numerical and experimental study of liquid metal stirring by rotating permanent magnets // IOP Conference Series: Materials Science and

Engineering. 2018.

- Dzelme V., Jakovičs A., Bucenieks I. Numerical modelling of a real rotating permanent magnet based electromagnetic induction pump // Magnetohydrodynamics. 2017. Vol. 53, no. 4. P. 731–738.
- 92. Dadzis K., Lukin G., Meier D. et al. Directional melting and solidi fi cation of gallium in a traveling magnetic fi eld as a model experiment for silicon processes // Journal of Crystal Growth. 2016. Vol. 445. P. 90–100.
- 93. Losev G., Shvydkiy E., Sokolov I. et al. Effective stirring of liquid metal by a modulated travelling magnetic field // Magnetohydrodynamics. 2019. Vol. 55, no. 1/2. P. 107–114.
- 94. Losev G. L., Kolesnichenko I. V., Khalilov R. I. Control of the metal crystallization process by the modulated traveling magnetic field // Journal of Physics: Conference Series. 2018. — nov. Vol. 1128. P. 012051.
- 95. Shvydkiy E., Kolesnichenko I., Khalilov R. et al. Effect of travelling magnetic field inductor characteristics on the liquid metal flow in a rectangular cell // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 424. P. 012012.
- 96. Ben-David O., Levy A., Mikhailovich B., Azulay A. 3D numerical and experimental study of gallium melting in a rectangular container // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 67. P. 260–271. arXiv:1012.5461v2.
- 97. Brent A. D., Voller V. R., Reid K. J. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal // Numerical Heat Transfer. 1988. Vol. 13, no. 3. P. 297–318.
- 98. Avnaim M. H., Levy A., Mikhailovich B. et al. Comparison of Three-Dimensional Multidomain and Single-Domain Models for the Horizontal Solidification Problem // Journal of Heat Transfer. 2016.
- 99. Avnaim M., Mikhailovich B., Azulay A., Levy A. Numerical and experimental study of the traveling magnetic field effect on the horizontal solidification in a rectangular cavity part 2: Acting forces ratio and solidification parameters // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2018. — feb. Vol. 69. P. 9–22.
- 100. Zaidat K., Sari I., Boumaaza A. et al. Experimental investigation of the effect of travelling magnetic field on the CET in Sn-10wt.%Pb alloy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. — oct. Vol. 424. P. 012052.
- 101. Wang T., Hachani L., Fautrelle Y. et al. Numerical modeling of a benchmark experiment on equiaxed solidification of a Sn–Pb alloy with electromagnetic stirring and natural

convection // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 151. P. 119414.

- 102. Wang X., Moreau R., Etay J., Fautrelle Y. A Periodically Reversed Flow Driven by a Modulated Traveling Magnetic Field: Part II. Theoretical Model // Metallurgical and Materials Transactions B. 2009. Vol. 40, no. 1. P. 104–113.
- 103. Musaeva D., Baake E., Köppen A., Vontobel P. Application of neutron radiography for in-situ visualization of gallium solidification in travelling magnetic field // Magnetohydrodynamics. 2017. Vol. 53, no. 3.
- 104. Köppen D., Baake E., Gerstein G. et al. Resonant pulsed electromagnetic stirring of melt for effective grain fragmentation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. — oct. Vol. 424. P. 012036.
- 105. Sčepanskis M., Sarma M., Vontobel P. et al. Assessment of Electromagnetic Stirrer Agitated Liquid Metal Flows by Dynamic Neutron Radiography // Metallurgical and Materials Transactions B. 2017. Vol. 48, no. 2. P. 1045–1054.
- 106. Oborin P., Khripchenko S., Golbraikh E. Influence of conventional and reverse travelling magnetic fields on liquid metal stirring in an asymmetric cavity // Magnetohydrodynamics. 2014. Vol. 50, no. 3. P. 291–301.
- 107. Eckert S., Nikrityuk P., Räbiger D. et al. Efficient Melt Stirring Using Pulse Sequences of a Rotating Magnetic Field: Part I. Flow Field in a Liquid Metal Column // Metallurgical and Materials Transactions B. 2007. — nov. Vol. 38, no. 6. P. 977–988.
- 108. Willers B., Eckert S., Nikrityuk P. A. et al. Efficient Melt Stirring Using Pulse Sequences of a Rotating Magnetic Field: Part II. Application to Solidification of Al-Si Alloys // Metallurgical and Materials Transactions B. 2008. — apr. Vol. 39, no. 2. P. 304–316.
- 109. Dropka N., Frank-Rotsch C. Enhanced VGF-GaAs growth using pulsed unidirectional TMF // Journal of Crystal Growth. 2014. — jan. Vol. 386. P. 146–153.
- Dropka N., Frank-Rotsch C. Enhanced VGF growth of singleand multi-crystalline semiconductors using pulsed TMF // Magnetohydrodynamics. 2015. Vol. 51, no. 1. P. 149–156.
- 111. Musaeva D., Ilin V., Baake E., Geža V. Numerical simulation of the melt flow in an induction crucible furnace driven by a Lorentz force pulsed at low frequency // Magnetohydrodynamics. 2015. Vol. 51, no. 4. P. 771–784.
- Musaeva D., Baake E., Ilin V., Jarczyk G. Analysis of the AlMgSi-alloy structure formed under the influence of low-frequency pulsed Lorentz force // Magnetohydrodynamics. 2017. Vol. 53, no 2. P. 245–254.
- 113. Räbiger D., Eckert S., Gerbeth G. et al. Flow structures arising from melt stirring by

means of modulated rotating magnetic fields // Magnetohydrodynamics. 2012. Vol. 48, no. 1. P. 213–220.

- 114. Wang B., Wang X., Etay J. et al. Flow Driven by an Archimedean Helical Permanent Magnetic Field. Part I: Flow Patterns and Their Transitions // Metallurgical and Materials Transactions B. 2016. — Apr. Vol. 47, no. 2. P. 1369–1377.
- Li M., Tamura T., Omura N. et al. Grain refinement of AZCa912 alloys solidified by an optimized electromagnetic stirring technique // Journal of Materials Processing Technology. 2016. Vol. 235. P. 114 – 120.
- 116. Li M., Omura N., Murakami Y. et al. A comparative study of the primary phase formation in Al-7 wtelectromagnetic stirring processing // Materials Today Communications. 2020. P. 101146. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S2352492819313042.
- 117. Khripchenko S., Denisov S., Dolgikh V. et al. Structure of solidified aluminum melt in crucibles of circularandsquare cross-sections in reverse regimes of rotating magnetic field // Magnetohydrodynamics. 2019. Vol. 55, no. 4. P. 437–445.
- 118. Ščepanskis M., Jakovičs A., Baake E., Nacke B. A model for homogenization of solid alloying admixtures in an induction crucible furnace // Steel Research International. 2015. Vol. 86, no. 2. P. 169–174.
- 119. Khripchenko S., Denisov S., Dolgikh V., Pavlinov F. Use of a travelling magnetic field "ROD"inductor for stirring molten metal in an aluminum bath // Magnetohydrodynamics. 2016. Vol. 52, no 3. P. 407–416.
- 120. Бааке Э., Барглик Д., Якович А. и др. МГД технологии в металлургии. Интенсивный курс Специализация IV. СПб: Издательство СПбГЭТУ "ЛЭТИ 2013. 233 с. С. 233. ISBN: 978-5-7629-1410-9.
- 121. Bolotin K., Smolyanov I., Shvydkiy E. etal. Numerical simulation of the electromagnetic stirrer adapted by using magnetodielectric composite // Magnetohydrodynamics. 2017. Vol. 53, no 4. P. 723–730.
- 122. Bolotin K., Shvydkiy E., Sokolov I. Experimental investigation of the bottom MHD stirrer with the working gap compensated by magnetodielectric composite // Magnetohydrodynamics. 2019. Vol. 55, no. 1-2. P. 23–30.
- 123. Stiller J., Koal K., Nagel W. E. et al. Liquid metal flows driven by rotating and traveling magnetic fields // The European Physical Journal Special Topics. 2013. Vol. 220, no. 1. P. 111–122.

- 124. Dadzis K., Vizman D., Friedrich J. Unsteady coupled 3D calculations of melt flow, interface shape, and species transport for directional solidification of silicon in a traveling magnetic field // Journal of Crystal Growth. 2013. Vol. 367. P. 77 – 87.
- 125. Оборин П. А., Хрипченко С. Ю. Генерация течения жидкого металла и перенос пассивной примеси в прямоугольной полости бегущим магнитным полем // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. — июл. Vol. 6, no. 2. P. 207–213.
- 126. Kirpo M., Jakovičs A., Nacke B., Baake E. Particle transport in recirculated liquid metal flows // COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. 2008. Vol. 27, no. 2. P. 377–386.
- 127. Ščepanskis M., Jakovičs A., Baake E., Nacke B. Solid inclusions in an electromagnetically induced recirculated turbulent flow: Simulation and experiment // International Journal of Multiphase Flow. 2014. Vol. 64. P. 19 – 27.
- 128. Asad A., Kratzsch C., Dudczig S. et al. Numerical study of particle filtration in an induction crucible furnace // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2016. Vol. 62. P. 299 – 312.
- 129. Barati H., Wu M., Kharicha A., Ludwig A. Assessment of Different Turbulence Models for the Motion of Non-metallic Inclusion in Induction Crucible Furnace // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 143. P. 012026.
- Pavlovs S., Jakovičs A., Baake E. et al. LES modelling of turbulent flow, heat exchange and particle transport in industrial induction channel furnaces // Magnetohydrodynamics. 2011. Vol. 47, no. 4. P. 399–412.
- 131. Golak S., Przylucki R. Homogenization of Electromagnetic Force Field During Casting of Functionally Graded Composites // IEEE Transactions on Magnetics. 2011. — Dec. Vol. 47, no. 12. P. 4701–4706.
- 132. Garrido M., National F. Travelling magnetic field mixing for particle dispersion in liquid metal // Magnetohydrodynamics. 2015. Vol. 51, no. September 2016. P. 249–255.
- 133. Флемингс М. Процессы затвердевания. Мир, 1977.
- Li Q., Shen J., Qin L. et al. Effect of traveling magnetic field on freckle formation in directionally solidified CMSX-4 superalloy // Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 274. P. 116308.
- 135. Jie J., Zou Q., Sun J. et al. Separation mechanism of the primary Si phase from the hypereutectic Al–Si alloy using a rotating magnetic field during solidification // Acta Materialia. 2014. Vol. 72. P. 57 – 66.

- 136. Metan V., Eigenfeld K., Räbiger D. et al. Grain size control in Al–Si alloys by grain refinement and electromagnetic stirring // Journal of Alloys and Compounds. 2009. Vol. 487, no. 1. P. 163 – 172.
- 137. Noeppel A., Ciobanas A., Wang X. D. et al. Influence of Forced/Natural Convection on Segregation During the Directional Solidification of Al-Based Binary Alloys // Metallurgical and Materials Transactions B. 2010. Vol. 41, no. 1. P. 193–208.
- 138. Dubke M., Tacke K.-H., Spitzer K.-H., Schwerdtfeger K. Flow fields in electromagnetic stirring of rectangular strands with linear inductors: Part I. theory and experiments with cold models // Metallurgical Transactions B. 1988. Vol. 19, no. 4. P. 581–593.
- Копылов И. Электрические машины. учебник для вузов. Энергоатомиздат, 1986.
 ISBN: 978-5-9916-0904-3.
- 140. Azulay A., Mikhailovich B., Levy A., Yakhot A. Magnetic field advection in a rotating magnetic field driven flow induced by a non-ideal inductor // Physics of Fluids. 2018. Vol. 30, no. 7. P. 075104.
- 141. Stiller J., Koal K. A numerical study of the turbulent flow driven by rotating and travelling magnetic fields in a cylindrical cavity // Journal of Turbulence. 2009. Vol. 10. P. N44.
- 142. Stiller J., Koal K., Nagel W. E. et al. Liquid metal flows driven by rotating and traveling magnetic fields // The European Physical Journal Special Topics. 2013. — Mar. Vol. 220, no. 1. P. 111–122.
- 143. Cramer A., Pal J., Koal K. et al. The sensitivity of a travelling magnetic field driven flow to axial alignment // Journal of Crystal Growth. 2011. Vol. 321, no. 1. P. 142 – 150.
- 144. Yamamura S. Theory of Linear Induction Motors. Halsted Press book. Wiley, 1972. ISBN: 9780470970904.
- 145. Sarapulov F. N., Frizen V. E., Shvydkiy E. L., Smol'yanov I. A. Mathematical Modeling of a Linear-Induction Motor Based on Detailed Equivalent Circuits // Russian Electrical Engineering. 2018. — Apr. Vol. 89, no. 4. P. 270–274.
- 146. Бычков С. А., Назаров С. Л., Тарасов Ф. Е., Фризен В. Э. Обмотки индукционных машин вращательного и поступательного движения: учебное пособие. 2017. URL: http://hdl.handle.net/10995/56196.
- 147. Веселовский О. Н., Коняев А. Ю., Сарапулов Ф. Н. Линейные асинхронные двигатели. Энергоатомиздат, 1991. ISBN: 5-283-00559-3.
- 148. Smolyanov I., Sarapulov F., Tarasov F. Calculation of linear induction motor features by detailed equivalent circuit method taking into account non-linear electromagnetic and

thermal properties // Computers and Mathematics with Applications. 2019. - 11. Vol. 78, no 9. P. 3187–3199.

- 149. Kolesnichenko I., Khalilov R., Khripchenko S., Pavlinov A. MHD-stirrer for cylindrical molds of continuous casting machines fabricated aluminium alloy // Magnetohydrodynamics. 2012. Vol. 48, no. 1. P. 221 - 234.
- 150. Wang X., Moreau R., Etay J., Fautrelle Y. A periodically reversed flow driven by a modulated traveling magnetic field: Part II. Theoretical model // Metall. Mater. Trans.
 B. 2009. Vol. 40. P. 104–113.
- 151. Eckert S., Nikrityuk P. A., Willers B. et al. Electromagnetic melt flow control during solidification of metallic alloys // The European Physical Journal Special Topics. 2013. Vol. 220, no. 1. P. 123–137.
- 152. Dubke M., Tacke K.-H., Spitzer K.-H., Schwerdtfeger K. Flow fields in electromagnetic stirring of rectangular strands with linear inductors: Part II. computation of flow fields in billets, blooms, and slabs of steel // Metallurgical Transactions B. 1988. Vol. 19, no. 4. P. 595–602.
- 153. Grants I., Gerbeth G. Stability of melt flow due to a traveling magnetic field in a closed ampoule // Journal of Crystal Growth. 2004. Vol. 269, no. 2. P. 630 – 638.
- 154. Hamzaoui I., Millet S., Botton V. et al. A 2D1/2 model for natural convection and solidification in a narrow enclosure // International Journal of Thermal Sciences. 2019. Vol. 140. P. 167 – 183.
- 155. Dadzis K., Niemietz K., P?tzold O. et al. Non-isothermal model experiments and numerical simulations for directional solidification of multicrystalline silicon in a traveling magnetic field // Journal of Crystal Growth. 2013. Vol. 372. P. 145 – 156.
- 156. Dadzis K., Ehrig J., Niemietz K. et al. Model experiments and numerical simulations for directional solidification of multicrystalline silicon in a traveling magnetic field // Journal of Crystal Growth. 2011. Vol. 333, no. 1. P. 7 – 15.
- 157. Guidotti R. A., Masset P. J. Thermally activated ("thermal") battery technology: Part IV. Anode materials // Journal of Power Sources. 2008. Vol. 183, no. 1. P. 388 – 398.
- 158. Volkova O. V., Zakharov V. V. Electroreduction of Chromium(III) Chloride and Molybdenum(VI) Oxide Mixtures in a Thermally Activated Battery // Russian Metallurgy (Metally). 2018. Vol. 2018, no. 2. P. 201–204.
- 159. Khalilov R., Kolesnichenko I. Annular linear induction pump for liquid sodium // Magnetohydrodynamics. 2015. - 01. Vol. 51. P. 95–104.

- 160. Бычков С. А., Батов Н. Г., Сокунов Б. А. Воздействие электромагнитного поля на расплав в процессе кристаллизации // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2010. по 2. Р. 67–71.
- 161. Бычков С. А. Применение устройств электромагнитного перемешивания при отливке слитков на основе меди // Промышленная энергетика. 2010. no 5. P. 25–27.
- 162. Zhang L., Yu J., Wang W. et al. The Effect of Electromagnetic Stirring on the Microstructure Evolution of Cu-15Metals. 2018. – 10. Vol. 8. P. 869.
- 163. Azulay A., Mikhailovich B., Levy A., Yakhot A. Magnetic field advection in a rotating magnetic field driven flow induced by a non-ideal inductor // Physics of Fluids. 2018. Vol. 30, no. 7. P. 075104.
- 164. Spitans S., Jakovics A., Baake E., Nacke B. Numerical Modeling of Free Surface Dynamics of Melt in an Alternate Electromagnetic Field: Part I. Implementation and Verification of Model // Metallurgical and Materials Transactions B. 2013. Vol. 44, no. 3. P. 593–605.
- 165. Коняев А. Ю., Сокунов Б. А., Абдуллаев Ж., Швыдкий Е. Л. Линейные индукционные машины со встречно бегущими магнитными полями для энергоэффективных технологий // Промышленная энергетика. 2017. по 4. P. 2–7.
- 166. Кривонищенко И. А. Исследование устройств для электомагнитного перемешивания жидких металлов // дис. канд. техн. наук. 1968. – Свердловск. Р. Уральский политехнический институт.
- 167. Clift R., Grace J., Weber M. Bubbles, Drops, and Particles. 1978. -01.
- 168. Shvydkiy E. 3D Simulation of Particles Transport in Double Sided Traveling Magnetic Field Stirrer. 2018. URL: https://data.mendeley.com/datasets/ggrvykh2g3/1.
- 169. Saffman P. G. The lift on a small sphere in a slow shear flow // Journal of Fluid Mechanics.1965. Vol. 22, no. 2. P. 385–400.
- 170. COMSOL Multuphysics Reference Manual. Meshing. COMSOL Multiphysics ® v. 5.5. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. 2019.
- 171. Dobosz A., Plevachuk Y., Sklyarchuk V. et al. Thermophysical properties of the liquid Ga–Sn–Zn eutectic alloy // Fluid Phase Equilibria. 2018. Vol. 465. P. 1 – 9.
- 172. Shvydkiy E. Video files of pure Ga electromagnetic stirring. 2020. URL: https://data. mendeley.com/datasets/7fmy5kh278/1.
- 173. Umbrashko A., Baake E., Nacke B., Jakovics A. Modeling of the turbulent flow in induction furnaces // Metallurgical and Materials Transactions B. 2006. Vol. 37, no. 5.

P. 831–838.

- 174. Galindo V., Nauber R., Räbiger D. et al. Instabilities and spin-up behaviour of a rotating magnetic field driven flow in a rectangular cavity // Physics of Fluids. 2017. Vol. 29, no. 11. P. 114104.
- 175. Räbiger D., Eckert S., Gerbeth G. Measurements of an unsteady liquid metal flow during spin-up driven by a rotating magnetic field // Experiments in Fluids. 2010. Vol. 48, no. 2. P. 233–244.
- 176. Kirpo M. Modeling of Turbulence Properties and Particle Transport in Recirculated Flows: Ph. D. thesis / University of Latvia. 2009. URL: https://dspace.lu.lv/dspace/ handle/7/5031.
- 177. Shvydkiy E. UDV measurements of liquid metal flow driven by pulsed TMF. 2020. URL: https://data.mendeley.com/datasets/fnb6drkf93/1.
- 178. Ludwig A., Wu M., Kharicha A. Simulation in Metallurgical Processing: Recent Developments and Future Perspectives // JOM. 2016. Vol. 68, no. 8. P. 2191–2197. URL: https://doi.org/10.1007/s11837-016-1992-0.

Приложение А

Кривая намагничивания листовой электротехнической стали (холоднокатаной) марки 3413.

В,	0	0,01	0,02	0.03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
Тл	Н, А/м									
0,6	81	83	85	87	89	91	93	95	97	99
0,7	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128
0,8	130	132	134	136	138	140	142	144	146	149
0,9	152	155	158	161	164	167	170	173	176	179
1,0	182	185	188	192	195	198	201	204	207	210
1,1	213	216	219	222	225	228	231	234	237	240
1,2	243	246	249	252	255	258	261	264	267	271
1,3	275	279	283	287	291	295	300	305	310	315
1,4	320	326	332	338	344	350	358	366	374	383
1,5	390	402	414	426	438	450	464	478	492	506
1,6	520	544	566	588	610	632	665	698	732	766
1,7	800	840	890	940	990	1040	1132	1224	1316	1408
1,8	1500	1542	1700	1922	2144	2366	2588	2820	3080	3450
1,9	3825	4200	4600	5200	5800	7000	8200	9400	10900	13400
2,0	16000	20000	25000	30000	—	_	_	_	_	—

Приложение Б

Основные размеры экспериментальной установки, рассматриваемой в главе 3


Приложение В

Частоты пульсаций БМП для главы 3

Частота	Период Т	$\frac{1}{2}T$	time steps for
			execute commands
1 Гц	1 сек	$0.5 \mathrm{sec}$	
0.5 Гц	2 сек	1 sec	$10/20 \ (0.1 \text{ sec time step})$
0.3 Гц	3.33 сек	1.67sec	17/34 (0.1 sec time step)
0.1 Гц	10 сек	5 sec	50/100 (0.1 sec time
			step)