

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

На правах рукописи



Швыдкий Евгений Леонидович

**Исследование гидродинамических процессов в
жидкометаллическом вторичном элементе
индукционных МГД машин**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена на кафедре электротехники Уральского энергетического института
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина»,

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
САРАПУЛОВ Федор Никитич

Официальные оппоненты: **ТИМОФЕЕВ Виктор Николаевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск,
заведующий кафедрой электротехнологий и электротехники;
ПЕРМИНОВ Анатолий Викторович,
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
профессор кафедры общей физики;
ЯКОВИЧ Андрис Таливалдович,
кандидат физико-математических наук,
Латвийский университет, г. Рига,
заведующий кафедрой электродинамики и механики сплошных сред.

Защита состоится 21 октября 2020 г. в 14:15 на заседании диссертационного совета УрФУ
05.01.02 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «УрФУ имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1344>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Болотин Кирилл Евгеньевич

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы

Электромагнитное управление и контроль потоков электропроводной жидкости широко применяются в металлургии. Возбуждение течений жидкого металла позволяет интенсифицировать процессы тепло- и массообмена 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 дать более полное представление о данных процессах и в перспективе повысить эффективность технологических операций и устройств электромеханических преобразователей данного типа.

Вопросами исследования процессов в электропроводящей жидкости под воздействием переменных магнитных полей занимаются 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). Также в Уральском федеральном университете с 60-х годов двадцатого века существует школа, исследующая электромагнитное перемешивание.

вание 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. Это 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 тепло- и 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 экспери-

ментально полученными данными;

- анализ влияния параметров бегущего магнитного поля на потоки, массообмен, и затвердевание жидкого металла;
- анализ влияния пульсирующей и реверсивной во времени модуляции 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;
- численно исследован 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 тепло- и 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 траектории 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 измеренными значениями магнитной индукции и электромагнитного усилия. На втором этапе проводилось измерение скорости жидкого металла при помощи Доплеровского измерителя скорости и сопоставление с расчетными данными. Положение фронта кристаллизации верифицировалось посредством сравнения со снимками, полученными методом нейтронной радиографии.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. 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.
3. Исследование и анализ применения модулированного во времени (пульсирующего и реверсивного) бегущего магнитного поля на процесс электромагнитного перемешивания.

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], в том числе 6 статей в журналах, входящих в международные базы данных и системы цитирования, а также 7 публикаций в сборниках трудов конференций [9–15].

Стипендии и премии. Стендовый доклад автора по материалам, представленным в разделе 2.6, был удостоен премии Best Poster Award на Inter-national Conference Heating by Electromagnetic Sources - HES 2019, Padua, Italy.

Третья глава диссертации выполнена в рамках стипендии Президента Российской Федерации для обучения за рубежом.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 3 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 181 страница, из них 160 страниц текста, включая 87 рисунков.

Библиография включает 179 наименований на 16 страницах.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В обзоре литературы проведен анализ современного состояния вопроса электромагнитного перемешивания бегущим магнитным полем. Отмечаются активные исследования в данной области в особенности в приложении к кристаллизации. Анализ выявил следующие неисследованные вопросы:

- Изменение удельного электромагнитного усилия в жидкой фазе металла при продвижении фронта кристаллизации представлен в литературе только для случая с вращающимся магнитным полем. Случай с бегущим полем является открытым вопросом. Более того, влияние формы фронта кристаллизации на величину удельного объемного усилия также не исследовано.
- Рядом коллективов экспериментально показана возможность повышения эффективности перемешивания путем применения пульсаций и реверса БМП, однако необходимы численные исследования для дополнения представления об этом процессе.
- Распределение пассивной примеси играет важную роль в современной металлургии, однако случай транспорта частиц в БМП не представлен в литературе.
- Процессы тепло- и массообмена механизма затвердевания расплава под

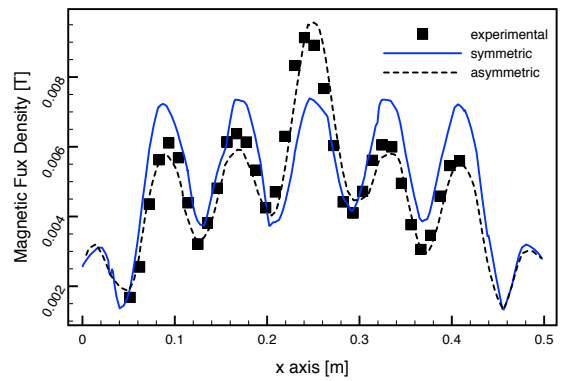
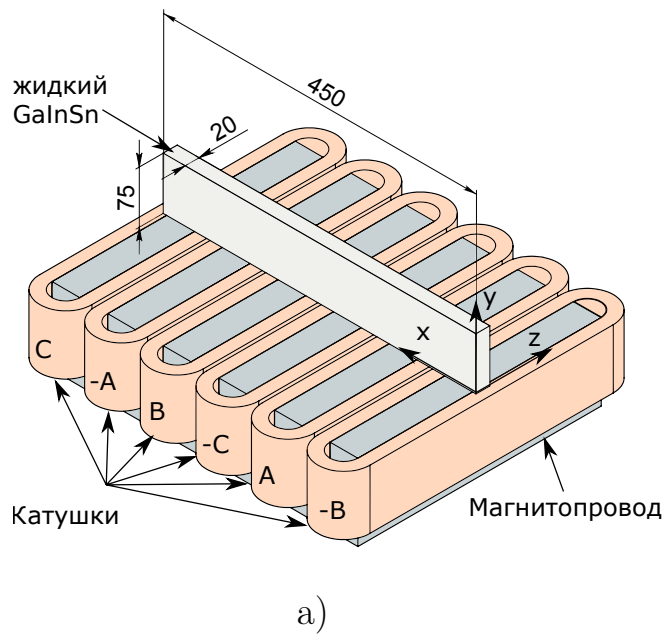


Рис. 1. Линейная индукционная машина для электромагнитного перемешивания. а – внешний вид устройства; б – тангенциальная составляющая магнитной индукции над поверхностью ЛИМ.

воздействием пульсирующего магнитного поля также нуждаются в дополнительном численном описании.

В первой главе представлено исследование электромагнитного перемешивания односторонним индуктором бегущего магнитного поля. Индуктор представляет собой линейную индукционную машину (ЛИМ) с двухрядной шаблонной обмоткой, представленную на рисунке 1 а. Этот индуктор создаст бегущее магнитное поле, которое проникает в расположенный над его поверхностью контейнер с жидким низкотемпературным расплавом (GaInZn). В нижних слоях объема расплава индуцируются электромагнитные силы, преимущественно сонаправленные с бегущим магнитным полем. Такое силовое воздействие приводит в движение жидкий металл, который образует одноконтурное перемешивание.

Создана численная модель электромагнитных и гидродинамических полей, на основе метода конечных элементов. Данная модель верифицирова-

на путем сравнения рассчитанных значений с экспериментальными данными измерения значений магнитной индукции, электромагнитных усилий и скорости гидродинамических течений. На рисунке 1 б представлены значения тангенциальной компоненты магнитной индукции, рассчитанной и измеренной над поверхностью индуктора. Как видно из графиков, в данном случае имеется значительная несимметрия, вызванная отличным от 120° угла сдвига между фазами. Достижение схождения между экспериментальными и численными данными получено путем учета этой несимметрии.

Исследованы гидродинамические потоки под действием одностороннего индуктора бегущего магнитного поля. Результаты верифицированы путем сравнения с данными, полученными Доплеровским анемометром, датчики были расположены на 4 разных высотах объема жидкого металла, Получены зависимости скорости жидкого металла от тока в катушках индуктора. Проанализировано использование периодической модуляции магнитного поля, как реверсивной, так и пульсирующей. Построены зависимости средней по времени скорости и амплитуды пульсаций от периода модуляции магнитного поля.

Другим исследованием этой главы было определение влияния продвижения и формы фронта кристаллизации на удельное электромагнитное усилие в жидкой фазе. Для этого были проведена серия электромагнитных расчетов, выявленная зависимость для сплава GaInZn представлена на рисунке 2. Из графика видно, что при затвердевании с плоской, перпендикулярной границей раздела фаз удельное электромагнитное усилие затухает. Однако не только продвижение фронта оказывает воздействие на результирующее усилие. Наклон фронта также может как положительно, так и отрицательно повлиять на него. Данные результаты могут быть использованы при оценке электромагнитного усилия в процессе кристаллизации. Изменение данного параметра может повлиять на соотношение электромагнитных сил и сво-

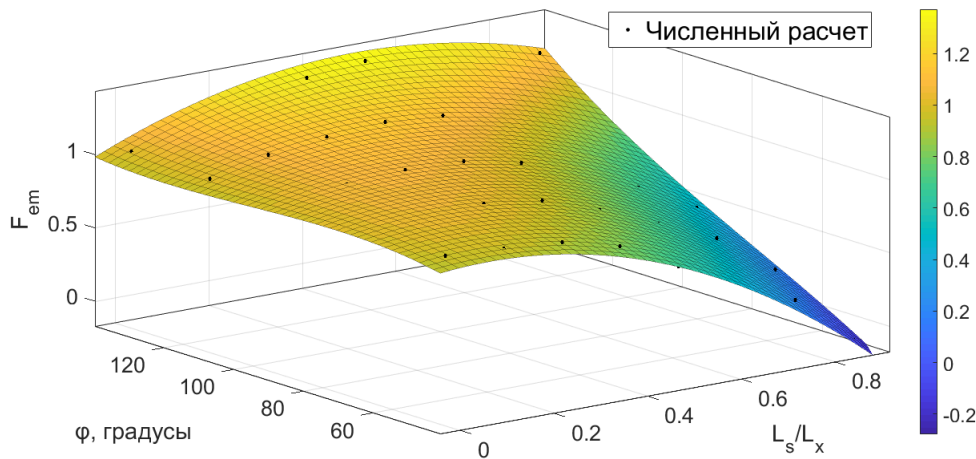


Рис. 2. Зависимость удельного электромагнитного усилия в объеме жидкой фазы кристаллизующегося слитка под действием БМП от продвижения и наклона границы раздела фаз.

бодно-конвективных, и, как следствие, на результирующий характер течений и форму фронта кристаллизации.

Данная глава выполнена под руководством заведующего лабораторией технологической гидродинамики Института механики сплошных сред УрО РАН Колесниченко И.В. Результаты первой главы опубликованы в статье [6].

Во второй главе представлено исследование распределения примеси в двухстороннем перемешивателе бегущего магнитного поля, представленном на рисунке 3 а. Данный перемешиватель состоит из двух индукторов бегущего магнитного поля с уложенной в их пазы однорядной обмоткой кольцевого типа с 60° фазной зоной .

На основании ранее верифицированной модели была создана численная модель двухстороннего перемешивателя. Сравнены три типа соединения обмоток и выбрана позволяющая получить конфигурацию магнитного поля с направлением "вниз-вверх". Такая конфигурация магнитного поля позволяет развивать наиболее интенсивные течения, образуя один вихрь циркуляции.

Показана возможность применения модуля расчета траекторий частиц в Comsol Multyphysics для оценки эффективности перемешивания как в двумер-

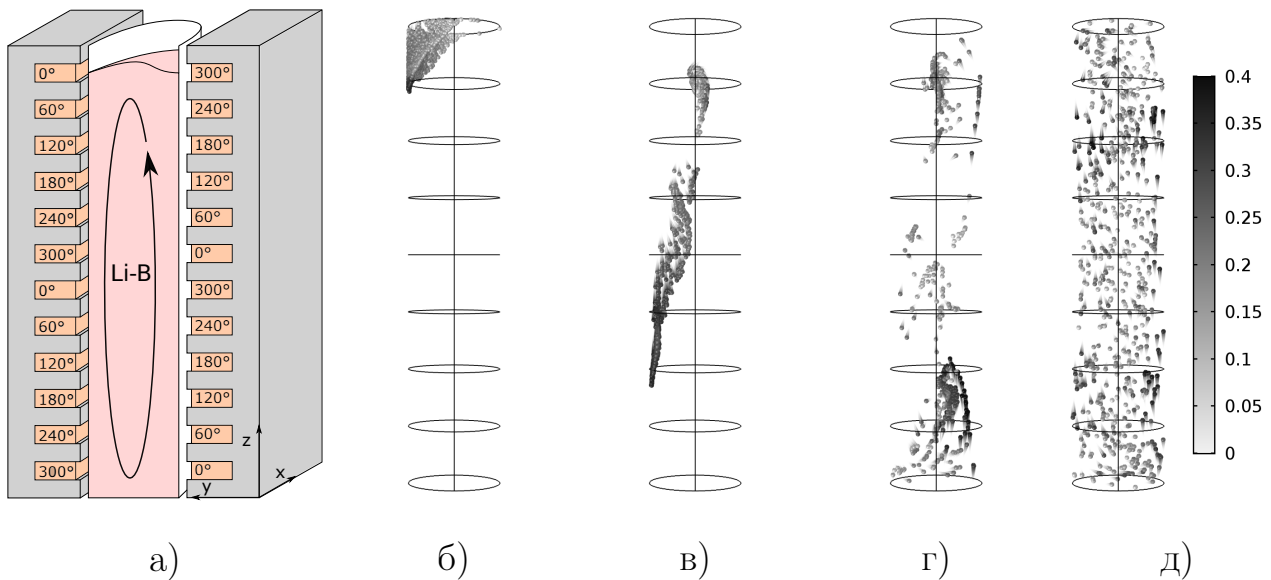


Рис. 3. а – внешний вид двустороннего индуктора бегущего магнитного поля и перемешиваемый расплав между индукторами; б - д – результат расчета динамики траекторий частиц бора в расплаве лития под действием БМП. Цветовая шкала соответствует скорости частицы (м/с)

ной, так и в трехмерной постановке. Результат расчета распределения частиц в объеме жидкого металла после 4 секунд электромагнитного перемешивания показан на рисунке 3 д. Как видно, частицы распределены достаточно равномерно, застойные зоны отсутствуют.

Введен параметр вертикальной равномерности распределения частиц и найдены его зависимости от величины тока в пазах индуктора и режимов модуляции БМП. Данный параметр представляет собой отношение разности между максимумом и минимумом количества частиц в равных частях емкости к общему числу частиц. Чем ближе этот параметр к нулю, тем более равномерный состав частиц в 4 равных объемах емкости. Например, на рисунке 4 показаны динамика этого параметра в зависимости от тока в обмотке индуктора. Из результатов видно, что большие значения тока ведут к более интенсивному перемешиванию и, как следствие, более быстрой гомогенизации частиц.

Проанализирована возможность увеличения теплоотвода с боковой по-

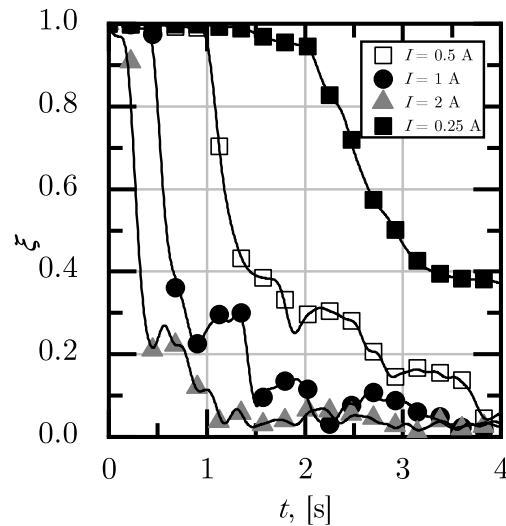


Рис. 4. Динамика параметра, характеризующего равномерность распределения частиц для разных значений тока в обмотке индуктора.

верхности емкости путем изменения ее формы без потери эффективности ЭМ перемешивания. Так, с переходом от формы простого цилиндра к эллиптическому, боковая площадь емкости увеличивается и, следовательно, увеличивается тепловой поток при прежнем объеме. Это может быть полезно для приложений с экзотермической реакцией перемешиваемого материала, как в рассмотренном случае (Li – В композит).

Исследования данной главы выполнены совместно с Институтом высокотемпературной электрохимии УрО РАН. Результаты второй главы опубликованы в следующих статьях [1, 4, 5, 7].

В третьей главе представлено численное исследование кристаллизации чистого галлия в бегущем магнитном поле. Данный раздел выполнен под руководством профессора Эгберта Бааке в Институте электротехнологии Ганноверского университета (Германия).

Создана численная модель на основе МКЭ и МКО в соответствии с экспериментальной установкой, представленной на рисунке 5 а. Проведена

верификация данной модели путем сравнения динамики и формы фронта кристаллизации с данными, полученными методом нейтронной радиографии, результаты показаны на рисунке 6.

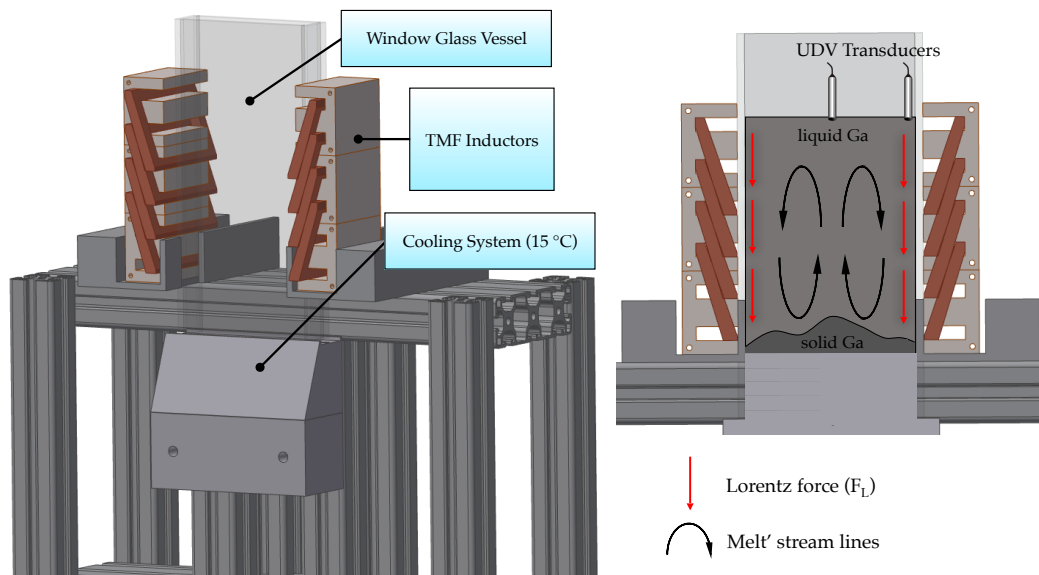


Рис. 5. Экспериментальная установка и принцип действия двустороннего электромагнитного перемешивателя БМП с возможностью направленной кристаллизации

Проанализировано использование пульсирующего БМП для перемешивания жидкого галлия. Проведено численное и экспериментальное исследование влияния частоты пульсаций на амплитуду и максимальное значение скорости жидкого расплава 7. Полученные результаты хорошо коррелируют с экспериментальными данными и с проведенными ранее исследованиями других авторов для случая с пульсирующим и реверсивным магнитными полями. Однако, на частоте пульсаций 1 Гц скорость расплава, полученная с помощью численного моделирования, не совпадает качественно с экспериментальными данными. Данное явление можно объяснить принятым пренебрежением постоянной времени электрического тока.

Результаты, представленные в третьей главе, опубликованы в статье [8].

В Заключение представлены основные результаты и выводы диссертации:

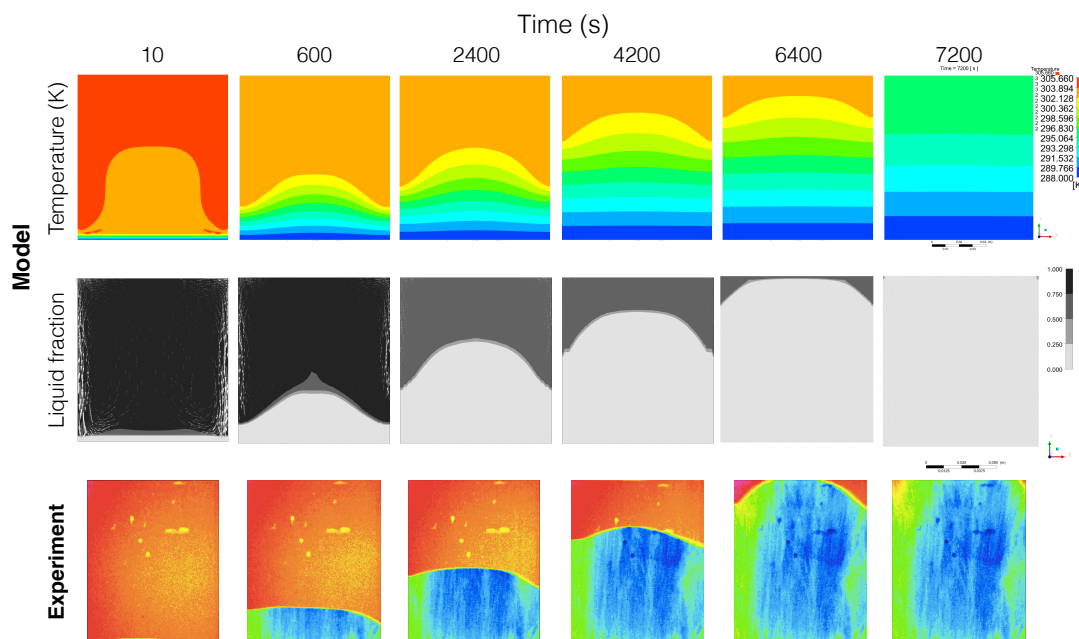


Рис. 6. Сравнение результатов эксперимента и расчета затвердевания галлия под действием бегущего магнитного поля. Верхний ряд – температура (числено); средний ряд – доля жидкой фазы (числено); нижний ряд – доля жидкой фазы (эксперимент)

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 с экспериментальными измерениями магнитной индукции, усилий, скоростей гидродинамических течений, и динамики фронта затвердевания расплава.
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 в под действием БМП. Проанализировано влияние интенсивности магнитного поля, а также реверсивного и пульсирующего поля на

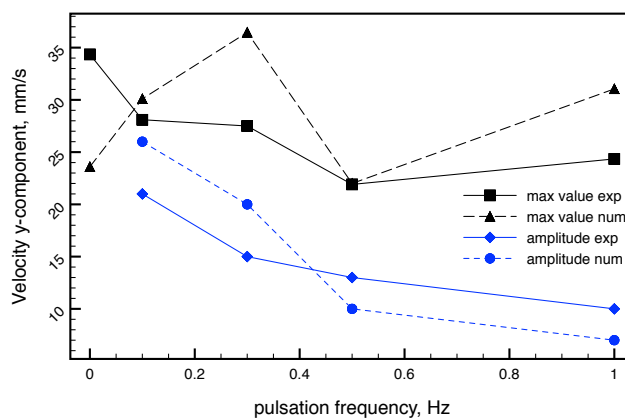


Рис. 7. Зависимости максимального значения и амплитуды скорости жидкого металла от частоты пульсаций магнитного поля.

эффективность перемешивания. Показана возможность увеличения теплоотвода с боковой поверхности металла при сохранении эффективности перемешивания.

5. 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.

Перспективами дальнейшей разработки темы является:

1. Численное моделирование затвердевания металла под действием модулированного БМП.
2. Определение оптимальной частоты модуляции для создания максимально плоского фронта кристаллизации.

3. Моделирование затвердевания в БМП совместно с расчетом траекторий частиц.
4. Исследование влияния соотношения электромагнитных усилий в жидкой фазе к интенсивности свободно-конвективных течений на образование макросегрегаций и образование перехода от столбчатой к равноосной структуре затвердевающего слитка.
5. Исследование влияние схем соединения обмоток, длины фазной зоны, угла сдвига на полюс и фазу на характер, интенсивность течений жидкого металла и, как следствие, эффективность перемешивания.

Основное содержание диссертационной работы

изложено в следующих публикациях:

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и аттестационным советом УрФУ:

1. **Shvydkiy E.**, Zaharov V., Bolotin K., Smolyanov I., Sarapulov S. Numerical modeling of the travelling magnetic field stirrer for liquid lithium // [Magnetohydrodynamics](#). 2017. Vol. 53, no. 4. P. 707–713 (Web of Science, Scopus) 0.61 п.л. / 0.3 п.л.
2. **Швыдкий Е.Л.**, Сокунов Б., Бычков А., Соколов И. Электромагнитное перемешивание кристаллизующегося слитка индуктором с неравномерной линейной нагрузкой // [Вопросы электротехнологий](#). 2018. № 1. С. 20–26. 0.29 п.л. / 0.14 п.л.
3. Сидоров О. Ю., Сарапулов Ф. Н., Бычков С. А., **Швыдкий Е.Л.** Применение методов конечных элементов и конечных разностей для моделирования кристаллизации расплавов в переменном магнитном поле // [Известия высших учебных заведений. ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА](#). 2018. no. 3. P. 80–84. 0.34 п.л. / 0.09 п.л.
4. **Shvydkii E. L.**, Bychkov S. A., Zakharov V. V., Sokolov I. V., Tarasov F. E. Impurity Distribution in a Two-Sided Electromagnetic Stirrer // [Russian Metallurgy \(Metally\)](#). 2019. Vol. 2019, no. 6. P. 570–575 (Scopus) 0.33 п.л. / 0.26 п.л.
5. **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 (Web of Science, Scopus) 0.42 п.л. / 0.33 п.л.
6. Losev G., **Shvydkiy E.**, Sokolov I., Pavlinov A., Kolesnichenko I. Effective stirring of liquid metal by a modulated travelling magnetic field // [Magnetohydrodynamics](#). 2019. Vol. 55, no. 1. P. 107–114 (Web of Science, Scopus) 0.17 п.л. / 0.07 п.л.
7. **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 (Web of Science, Scopus) 0.38 п.л. / 0.2 п.л.
8. **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 (Web of Science, Scopus) 0.9 п.л. / 0.45 п.л.

Другие публикации:

9. **Shvidkiy E.L.**, 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, EIConRus NW 2016. 2016. P. 685–688 0.18 п.л. / 0.09 п.л.
10. **Shvydkiy E.L.**, Smolyanov I., Sarapulov F., Bolotin K. [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 0.22 п.л. / 0.1 п.л.
 11. **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. P. 777–779 0.14 п.л. / 0.07 п.л.
 12. **Shvydkiy E.**, Kolesnichenko I., Khalilov R., Pavlinov A., Losev G. 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 0.24 п.л. / 0.15 п.л.
 13. Losev G., Pavlinov A., **Shvydkiy E.**, Sokolov I., Kolesnichenko I. [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 0.30 п.л. / 0.1 п.л.
 14. Sokolov I., **Shvydkiy E.**, Losev G., Bolotin K., Bychkov S. [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 0.19 п.л. / 0.07 п.л.
 15. **Shvydkiy E.**, Baake E. [Three-Dimensional Numerical Model of a Double-Sided Electro magnetic Stirrer of a Traveling Magnetic Field](#) // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). 2019. — Sep. P. 249–251 0.1 п.л. / 0.05 п.л.