

## ОТЗЫВ

официального оппонента Казакова Юрия Борисовича на диссертацию Соколова Игоря Владимировича на тему «Влияние структуры магнитного поля на характер магнитогидродинамических течений в электромагнитных перемешивателях расплавов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика

### **На отзыв представлены:**

- Диссертация «Влияние структуры магнитного поля на характер магнитогидродинамических течений в электромагнитных перемешивателях расплавов», содержащая введение, четыре главы, заключение, список использованной литературы из 114 наименований и 1 приложение, общим объемом 116 страниц, включая 62 рисунка и 3 таблицы.

- Автореферат диссертации.

### **Актуальность темы диссертации**

Перемешивание расплавов электромагнитным полем чрезвычайно актуально в металлургии, так как позволяет эффективно выравнивать градиенты температур и примесей в объеме расплава. Обычно для этих целей используются индукторы, создающие бегущее магнитное поле с помощью питания смещенных в пространстве фазных обмоток переменными токами с временным сдвигом, что приводит к перемещению максимума индукции магнитного поля вдоль индуктора. В проводящих жидкостях под воздействием этого поля наводятся токи, создающие, в свою очередь, усилия в расплаве. Основное преимущество подобного подхода, в отличие от механических или кондукционных устройств, – отсутствие контакта с расплавом, а также большие удельные тяговые усилия и возможность управления потоками расплава. В целях повышения эффективности управления расплавом представляет интерес исследование возбуждения магнитного поля несимметричной системой токов, создающих разные топологии структуры магнитного поля. Подобные исследования проводятся в России, Германии, Латвии.

Основное направление современных исследований – описание процессов тепломассообмена в жидком вторичном элементе при различных способах формирования структуры электромагнитного поля. Исследование этих процессов позволяет обеспечить заданные параметры в технологических режимах, например, распределение примесей в объеме расплава, желаемую



скорость движения расплава, выравнивание формы фронта кристаллизации слитка и, как следствие, его равномерность свойств в объеме.

В связи с этим, актуальность диссертации Соколова И.В., посвященной, исследованию влияние структуры магнитного поля, формируемой несимметричной системой токов индуктора, на характер магнитогидродинамических течений в электромагнитных перемешивателях расплавов, не вызывает сомнений.

**Цель диссертации** – исследование структуры магнитного поля при различных режимах питания индуктора линейной индукционной машины, её влияние на характер течения в жидкометаллическом вторичном элементе под действием бегущего магнитного поля, а также на изменение эффективности перемешивания.

При решении поставленных в диссертации задач использованы **современные методы исследований** и распространенные программные комплексы. Для анализа режимов работы перемешивателя применен метод симметричных составляющих с анализом отдельных составляющих токов индуктора. Расчетные исследования мультифизической задачи магнитогидродинамического движения расплава проведены на разработанной конечно-элементной модели перемешивателя с разделением магнитной и гидродинамической составляющих. Численный анализ проведен в среде COMSOL Multiphysics 6.0. Для расчетов гидродинамических процессов использован программный модуль «Turbulent Flow» на основе уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Опытные исследования проведены на экспериментальной установке лаборатории технологической гидродинамики института механики сплошных сред Уральского отделения РАН.

**Оценка содержания и оформления диссертации.** Диссертация написана ясно, использованная терминология и стиль соответствуют общепринятым нормам. Структура диссертации традиционная, имеет внутреннее единство, по каждой главе и диссертации в целом сделаны выводы, которые отражают результаты работы. При использовании в тексте диссертации результатов других авторов сделаны соответствующие ссылки.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, выполнен анализ научных разработок в рассматриваемой области, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи исследования, перечислены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен обзор литературы по теме диссертации, приведены уравнения, описывающие магнитогидродинамические явления,



проведен анализ методов исследований линейных индукционных машин с жидкометаллическим вторичным элементом. Показана необходимость учета несимметрии фаз токов индуктора, вызывающая искажение симметричной структуры магнитного поля. Отмечена эффективность метода симметричных составляющих для анализа влияния несимметричности токов индуктора. Предложена методика исследования электромагнитных процессов и процессов массопереноса в расплаве на основе метода конечных элементов с учетом разложения токов индуктора на составляющие. Приведено описание численных методов моделирования и используемых программных пакетов.

**Во второй главе** рассматриваются численные модели электромагнитных и гидродинамических процессов в электромагнитном перемешивателе на основе линейной индукционной машины с жидкометаллическим вторичным элементом из сплава эвтектики GaSnZn и разделением магнитной и гидродинамической частей, т.к. экспериментальные и прогнозируемые значения магнитного числа Рейнольдса для исследуемого объекта не превышают 0,1. Электромагнитный анализ проведен в трехмерной постановке задачи в программном пакете COMSOL Multiphysics с учетом краевых эффектов, зубчатости индуктора в безындукционной постановке. Расчеты гидродинамических процессов введены в двумерной ламинарной или турбулентной  $k-\epsilon$  моделях, в зависимости от режима течения, желаемой скорости и точности расчета, с определением установившихся усредненных скоростей течения расплава. Режимы работы индуктора задавались изменениями симметричных составляющих токов с допущением линейности магнитной характеристики магнитопровода.

**Третья глава** посвящена исследованию влияния фазовых сдвигов питающих токов в линейной индукционной машине. Показано, что несимметрия токов изменяет характер течений в расплаве. Исследовано изменение структуры магнитного поля при изменении звезды питающих токов с переменными амплитудами и фазовыми сдвигами. Показано, что изменение фазовых углов изменяет распределение усилий в расплаве, может вызывать разнонаправленные усилия и вихри в расплаве. Управление фазовым сдвигом позволяет изменять усилие в расплаве, число вихрей в расплаве и перераспределять скорости его течения, что позволяет реализовывать разные режимы перемешивания.

**В четвертой главе** методом симметричных составляющих исследовано влияние несимметрии токов индуктора на электродинамические усилия в расплаве с формированием решения в целом в виде суммы трех частных решений. Зависимость сил от параметров токов индуктора упрощается и



преобразуется от многопараметрической зависимости к зависимости с разделением переменных и линейными масштабирующими коэффициентами. Отмечено, что обобщение результатов, полученных с использованием метода симметричных составляющих, применимо в случае линейности процессов, т.е. при магнитном числе Рейнольдса много меньше 1 и отсутствии насыщения магнитопровода. Показано, что наличие обратной составляющей тока индуктора пропорционально ослабляет электродинамические усилия, создаваемые прямой составляющей тока индуктора, а наличие нулевой составляющей тока приводит к возникновению экстремумов распределения усилий. Пояснено, что для формирования стабильного одновихревого течения следует исключать нулевую составляющую токов индуктора. Для создания сложных течений следует напротив, усиливать пульсирующее поле, либо вносить изменения в конструкцию индуктора, например, либо добавляя дополнительные обмотки, либо изменять режимы питания индуктора. Показано, что основной вклад в несимметрию структуры магнитного поля и асимметрию течений расплава вносит взаимодействие бегущего и пульсирующего магнитных полей, тогда как по отдельности они создают единственный вихрь или незначительные пульсации. Положение экстремумов линейно зависит от угла между нулем и прямой/обратной последовательностью токов. Выявлено, что наличие нулевого проводника в электромагнитных перемешивателях с ярко выраженной несимметрией магнитной системы приводит к возникновению дополнительного пульсирующего поля, которое, в свою очередь, создает пульсации усилия и скорости и может приводить к изменению структуры течений в расплаве. Дополнительная инжекция токов нулевой последовательности приводит к резкому изменению характера течений, причем изменения зависят от начальной фазы токов нулевой последовательности.

Исследовано влияние симметричных составляющих токов на распределение пассивной примеси. Учитывались диффузионный и конвекционный механизмы перемешивания. Выявлено, что изменение параметров питания изменяет скорость перемешивания до двух раз. В диапазоне изменения фазовых углов токов  $20-200^\circ$  число Рейнольдса увеличивается, а в диапазоне  $200-360^\circ$  уменьшается. Это связывается с изменением числа вихрей.

При увеличении соотношения амплитуд нулевой и прямой составляющих токов линейного индуктора увеличивается нормальная составляющая скорости расплава, усиливается перемешивание верхних и нижних слоев расплава.

Оценка степени перемешивания проводится с использованием коэффициента неоднородности расплава и эффективного времени



перемешивания, которое определяется как время, за которое коэффициента неоднородности снижается с 1 до 0.1. Получены карты зависимостей чисел Рейнольдса для нормальной и тангенциальной составляющей скоростей расплава, карты зависимостей времени эффективного перемешивания от управляющих параметров (соотношения амплитуд нулевой составляющей токов линейного индуктора к прямой составляющей и фазового сдвига нулевой составляющей тока индуктора). Выявлено наличие режимов, при которых эффективность перемешивания увеличиваются до двух раз по сравнению с перемешиванием одиночным бегущим магнитным полем. Показано, что для управления содержанием примеси в расплаве возможно применять инъекцию токов нулевой последовательности.

### **Научная новизна результатов**

1. Выявлено влияние изменения амплитуд и углового сдвига фазных токов линейного индуктора на характер течения в жидкометаллическом вторичном элементе перемешивателя расплава.

2. Определено, что существенный вклад в возникновение разнонаправленных усилий, формирующих характер течений в расплаве перемешивателя с линейным индуктором, вносит взаимодействие бегущего и пульсирующего магнитного поля, вызываемых наличием прямой, обратной и нулевой симметричных составляющих токов индуктора.

3. Определена зависимость скорости и равномерности распределения примеси в жидкометаллическом вторичном элементе электромагнитного перемешивателя от соотношения и фазового сдвига симметричных составляющих токов линейного индуктора.

### **Теоретическая и практическая значимость результатов**

Предложенный автором подход к определению влияния структуры магнитного поля на характер магнитогидродинамических течений в электромагнитных перемешивателях расплавов с использованием метода симметричных прямой, обратной и нулевой составляющих токов линейного индуктора с созданием бегущего магнитного поля в прямом направлении, бегущего магнитного поля в обратном направлении и пульсирующего магнитного поля имеет теоретическую значимость так как позволяет обосновано анализировать эффективность электромагнитного перемешивания расплавов с определением распределения скоростей течения расплава, наличия в них вихрей. Такой подход снижает требования к вычислительным ресурсам, упрощает



расчеты режимов работы так как результирующее поле может быть определено как сумма предрешений при единичных токах симметричных составляющих, домноженных на амплитуду токов симметричных составляющих в конкретном случае; во-вторых, упрощает анализ, позволяя выделить зависимости усилий от отдельных параметров симметричных составляющих, таких как амплитуда и фазовый сдвиг.

Практическая значимость результатов обусловлена возможностью использования разработанных численных моделей мультифизических полей в расплаве, учитывающих влияние несимметрии токов индуктора на процессы во вторичном жидкометаллическом элементе при воздействии на него неравномерного бегущего магнитного поля индуктора, для формирования многовихревых течений сложной конфигурации, для управления распределением примеси в объеме и ускорения процессов теплообмена.

Выработаны рекомендации по выбору возможных режимов работы электромагнитных перемешивателей с бегущим магнитным полем, учитывающие соотношение симметричных составляющих токов индуктора. Полученные результаты могут быть использованы при разработке линейных индукционных машин с жидкометаллическим вторичным элементом и источников питания к ним.

**Достоверность основных выводов и результатов работы** обеспечена использованием строгих математических методов и компьютерным моделированием в распространенных программных комплексах. Разработанные численные модели магнитогидродинамических процессов в перемешивателе валидированы на основе соответствия с результатами измерений распределения магнитного поля в зазоре перемешивателя датчиками Холла, усилий – тензодатчиками, скорости течений в расплаве - доплеровскими ультразвуковыми анемометрами. Полученные результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

**Соответствие диссертации направлениям исследований паспорта научной специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика:**

Пункт 1. Развитие теории физических явлений, протекающих при воздействии ... электромагнитных, электрофизических, ... электромеханических процессов на физические тела, вещества, макро - и микрочастицы, ... процессов в ... жидкостях и твердом веществе.

Пункт 2. Изучение и совершенствование механизмов взаимодействия физических тел, веществ и частиц с электрическим, магнитным и электромагнитным полями в различных средах и вакууме, совершенствование



существующих и создание новых методов и принципов использования электрофизических явлений в технических и технологических приложениях ... и других электротехнологий.

Пункт 3. Разработка и развитие научных основ проектирования, создания ... электромагнитных, электрофизических, ... электромеханических устройств и их компонентов, и систем их эффективного управления.

Пункт 4. Разработка аналитических и компьютерных моделей расчета рациональных ... электромагнитных, электрофизических режимов работы электротехнологических, электрофизических ... устройств и процессов.

Пункт 5. Разработка новых электротехнологических и электрофизических процессов для получения и обработки металлов, сплавов, композиционных и других материалов с заданными физическими, химическими и механическими свойствами, в том числе для нужд металлургической, металлообрабатывающей, строительной, нефтегазовой, атомной, химической, электротехнической, электронной, авиационной промышленности, предприятий ВПК и других отраслей промышленности.

**Основные результаты по теме диссертации опубликованы** в трех научных работах в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, и входящих в международные базы цитирования Scopus и WoS, докладывались и обсуждались на конференциях по теме исследований

**Соответствие автореферата содержанию диссертации.** Автореферат в компактном виде отражает содержание и основные положения диссертации.

#### **Замечания по диссертации:**

1. Не учитывается насыщение магнитопровода при разложении токов индуктора на симметричные составляющие и определении сопротивлений для токов прямой, обратной и нулевой составляющих. Отмечено, что область применения такого подхода – установки с ненасыщенными магнитопроводами, расплавов с малым магнитным числом Рейнольдса и ламинарным характером течений.

2. Не представлен анализ влияния симметричных составляющих токов индуктора и структуры магнитного поля на тепловое состояние расплава, распределение поля температур в нем.

3. Не представлен алгоритм учета взаимного влияния распределений электромагнитного, теплового и гидродинамического полей в перемешивателе (учет нелинейных реологических характеристик расплава – влияние скорости



течения на вязкость расплава, индукции магнитного поля на выделяемые потери в расплаве, температуру и вязкость расплава, температуры на вязкость расплава, скорости течения на потери в расплаве, др.).

4. Не определена возможность применения результатов диссертации для оценки режимов работы перемешивателя при других числах подобия помимо числа Рейнольдса гидродинамического и магнитного.

5. Не оценена погрешность использования упрощенной аппроксимации результатов численного моделирования с исключением высокочастотных составляющих (рис. 4.6-4.9).

6. Несмотря на хорошее оформление диссертации и автореферата в целом встречаются неточности и погрешности, например: орфографические погрешности: (стр. 12 «пульсирующие», стр. 14 «...изменено на противоположное за изменения...», стр. 73 «расчитано»); пунктуационные и стилистические погрешности, не связанность предложений: (последний абзац стр. 15, второй абзац стр. 16, стр. 18 «Данные явления (какие?) особенно заметны..», стр. 28 «В частности, в [91] сдвига фаз..», стр. 32 «...обратную последовательность фаз (обратная последовательность – ), а в третьем наборе векторов,  $B$  и  $C$  синфазны» др.).

Указанные недостатки имеют частный характер и не снижают научной ценности диссертации в целом.

### **Заключение**

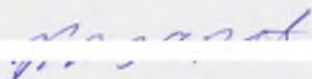
Диссертация Соколова Игоря Владимировича «Влияние структуры магнитного поля на характер магнитогидродинамических течений в электромагнитных перемешивателях расплавов» является законченной научно-квалификационной работой, которая по содержанию, объекту и направлению исследований, полученным новым научно обоснованным результатам соответствует паспорту научной специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика.

Диссертационная работа выполнена лично, на актуальную тему, имеет научную новизну, теоретическую и практическую значимость, содержит решение актуальной задачи разработки и исследования электромагнитных перемешивателей расплавов электротехнологических установок, режимов их работы, влияния структуры магнитного поля на характер магнитогидродинамических течений в расплаве. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, установленным в пункте 9 Положения о присуждении ученых



степеней ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Соколов Игорь Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика.

Официальный оппонент, доктор технических наук (докторская диссертация защищена по специальности 05.09.01 – Электромеханика), профессор, профессор кафедры «Электромеханика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».



Казиков Юрий Борисович

Дата составления отзыва «19» сентября 2022 г.

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, ИГЭУ, корп. А, ауд. 149.

Телефон: +7 (4932) 269-706

E\_mail: elmash@em.ispu.ru

Подпись Ю.Б. Казакова заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета ИГЭУ



Вылгина Юлия Вадимовна