

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Перминова Анатолия Викторовича

на диссертационную работу Швыдкого Евгения Леонидовича

**«Исследование гидродинамических процессов в жидкокометаллическом вторичном
элементе индукционных МГД машин»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по

специальности

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация Швыдкого Е.Л. посвящена численному исследованию процессов протекающих в непрозрачном жидкокометаллическом вторичном элементе индукционных МГД машин (МГД перемешивателей). Наряду с этим, много внимания в работе уделено способам оптимизации работы самих МГД машин. Полученные в работе результаты, способны дать более полное представление процессах перемешивания расплавов металлов, повысить эффективность технологических операций и улучшить конструкцию электромеханических преобразователей данного типа. Диссертантом сформулирована **цель работы**, которая заключается в «в описании процессов тепло- и массообмена в жидкокометаллическом вторичном элементе МГД машины с бегущим магнитным полем».

Научная новизна диссертации связана, в первую очередь, с численной реализацией ряда математических моделей, описывающих процессы электромагнитного перемешивания металлического расплава бегущим магнитным полем (БМП). **Впервые** было изучено влияние положения и формы фронта кристаллизации на электромагнитное усилие в жидкой фазе, порождаемое бегущим магнитным полем. Получены **новые** зависимости интенсивности гидродинамических течений расплава от электрических параметров и характера питания обмоток для случая с односторонним индуктором. Изучена, **не рассматривавшаяся ранее**, динамика распределения нерастворенных, твердых частиц в объеме жидкого металла под действием бегущего магнитного поля. Выполнена оценка влияния параметров индуктора и размеров емкости на эффективность перемешивания. Представлены **новые** результаты по экспериментальному и численному исследованию процесса затвердевания чистого металла под воздействием бегущего магнитного поля. Выполнен анализ влияния пульсаций поля на параметры течений расплава.

Возбуждение течений жидкого металла и управление этими течениями посредством электромагнитного поля широко применяется в металлургии. Электромагнитные воздействия позволяют, например, интенсифицировать процессы тепло- и массообмена в расплавах и контролировать свойства материалов в процессе кристаллизации. Перемешивание переменным электромагнитным полем многократно показало свою эффективность в различных технологических приложениях. Исследования процессов в электропроводящей жидкости под воздействием переменных магнитных полей являются **актуальными**, о чем свидетельствует большое количество научных коллективов, как России, так и за рубежом, занимающихся этой проблематикой. Построение математических моделей процессов, протекающих в МГД машинах, и в непрозрачном жидкокометаллическом вторичном элементе являются необходимым звеном в исследованиях. Такие модели, верифицированные с помощью доступных лабораторных экспериментов, способны дать более полное представление о рассматриваемых процессах и в перспективе повысить эффективность промышленных МГД машин. В настоящее время ведутся исследования по влиянию электромагнитного перемешивания на макро- и микроструктуру сплавов при кристаллизации, распределение пассивной примеси и температуру в объеме расплава, чистоту и свойства,

выращиваемых из расплавов, полупроводниковых кристаллов. Бегущее магнитное поле в ряде случаев может оказаться наиболее оптимальным для реализации электромагнитного перемешивания в технологической или лабораторной установке, поэтому **актуальным** становится более глубокое понимание физических процессов, протекающих при таком воздействии.

Теоретическая и практическая значимость диссертации заключается в создании численных моделей, адекватно отображающих физические процессы в жидком металле при электромагнитном перемешивании. **Достоверность численных результатов** определяется реализацией этих моделей в коммерческих пакетах COMSOL Multiphysics, ANSYS Mechanical APDL и Fluent, которые хорошо зарекомендовали себя в электродинамических и гидродинамических расчетах. С помощью численных моделей выполнен анализ процессов тепло- и массообмена в жидком металле под действием бегущих магнитных полей. Результаты, изложенные в диссертации, **могут быть использованы** для исследования процессов электромагнитного перемешивания, а также для оптимизации эксплуатации и проектирования магнитогидродинамических машин с бегущим магнитным полем. **Верификация численных расчетов** и, как следствие, численных моделей заключалась в сравнении с результатами лабораторных экспериментов, а так же в сопоставлении с расчетными данными других исследователей. Положение фронта кристаллизации **верифицировалось** посредством сравнения со снимками, полученными методом нейтронной радиографии. Качественное и количественное сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными является **достоинством диссертации** и позволяет сделать вывод об **адекватности** построенных моделей.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 3 глав, заключения, списка литературы объемом в 179 наименований и трех приложений. Общий объем диссертации 181 страница. Результаты численных расчетов проиллюстрированы на 87 рисунках.

В введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована её цель и научная новизна, показана практическая и теоретическая значимость результатов, представлены выносимые на защиту научные положения. **В обзоре литературы** проведен достаточно подробный анализ современного состояния вопроса электромагнитного воздействия бегущим магнитным полем на расплав металла.

В первой главе представлено исследование электромагнитного перемешивания односторонним индуктором бегущего магнитного поля. Индуктор представляет собой линейную индукционную машину, создающую магнитное поле, проникающее в расположенный над его поверхностью контейнер с жидким расплавом. Созданная численная модель электромагнитных и гидродинамических полей, верифицирована путем сравнения расчетных значений магнитной индукции, электромагнитных усилий и скорости гидродинамических течений с экспериментальными данными. В главе изучены гидродинамические потоки под действием одностороннего индуктора бегущего магнитного поля. Получены зависимости скорости жидкого металла от тока в катушках индуктора. Проанализировано влияние периодической модуляции магнитного поля на движение в расплаве. Для изучения влияния положения и формы фронта кристаллизации на удельное электромагнитное усилие в жидкой фазе была проведена серия электромагнитных расчетов. Показано, что величина электромагнитного усилия существенно зависит от формы и положения фронта кристаллизации в пространстве. Результаты первой главы могут быть использованы при оценке электромагнитного усилия в процессе кристаллизации, величина которого влияет на соотношение электромагнитных и свободно-конвективных сил при генерации течений в расплаве.

Во второй главе представлено исследование распределения примеси в двухстороннем перемешивателе бегущего магнитного поля, состоящем из двух индукторов. В главе описана созданная и верифицированная автором численная модель двухстороннего перемешивателя. Выполнено сравнение эффективности трех типов соединения обмоток и выбрана наиболее оптимальная, позволяющая развивать наиболее интенсивное одновихре-

вое течение. Показана возможность применения модуля пакета Comsol Multiphysics для расчета траекторий частиц и оценки эффективности перемешивания. Введен параметр вертикальной равномерности распределения частиц и найдены его зависимости от величины тока в индукторе и режимов модуляции БМП. Показано, что увеличение тока приводит к интенсификации перемешивания и быстрой гомогенизации частиц. В главе проанализирована возможность управления теплоотводом от рабочей емкости перемешивателя путем изменения её формы без потери эффективности электромагнитного воздействия. Так, изменение сечения рабочей емкости с круговой на эллиптическую при сохранении объема расплава приводит к усилению теплоотвода от её боковой поверхности. Это может быть полезно для приложений с экзотермической реакцией перемешиваемого расплава.

В третьей главе представлено численное моделирование кристаллизации чистого галлия в БМП. Созданная численная модель, верифицирована путем сравнения динамики и формы фронта кристаллизации с данными, полученными методом нейтронной радиографии. В главе проанализировано использование пульсирующего БМП для перемешивания жидкого галлия и проведено численное и экспериментальное исследование влияния частоты пульсаций на амплитуду и максимальное значение скорости. Результаты хорошо коррелируют с экспериментальными данными и с проведенными исследованиями других авторов для случая с пульсирующим и реверсивным магнитными полями.

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертации, а также обозначены перспективы дальнейшей разработки темы диссертации.

К достоинствам диссертации следует отнести, приведенный автором, литературный обзор. Численные результаты подробно проанализированы, из них выделены основные положения, которые лаконично сформулированы в конце каждой главы и в заключение к диссертации. Диссертант показал хорошее владение современными численными методами и вычислительными модулями пакетов COMSOL Multiphysics, ANSYS Mechanical APDL и Fluent. Результаты, полученные в диссертации, имеют практическую значимость, могут быть полезны при проектировании технологических систем.

К работе можно высказать ряд замечаний.

1. Во всех главах физико-математическая постановка задач описана весьма скучно. Автор уделил не достаточное внимание анализу, решаемых МГД уравнений движения сред, а так же граничных условий для гидродинамических и магнитных полей. При описании течений расплавов использовались различные модели турбулентности, уравнения для которых не приводятся в работе. Названия этих моделей лишь упоминаются в диссертации. Приведена достаточно слабая аргументация выбора той или иной модели турбулентности для описания конкретных течений. Использование модели турбулентности в третьей главе работы для описания крупномасштабного течения конвективного течения кажется не совсем оправданным.
2. К сожалению, работа изобилует стилистическими, орфографическими, пунктуационными ошибками и опечатками. Не все сокращения и аббревиатуры, применяемые автором, расшифровываются перед или сразу после их первого использования. При большом количестве сокращений рекомендуется оформлять приложение со списком, используемых в работе сокращений. В работе присутствует ряд рисунков и формул, например, рисунки 1.17 и 1.23, формулы 1.23, 1.24 и 2.1, 2.2, которые плохо описаны в тексте или их описание отстоит от рисунков и формул на несколько страниц. Такие погрешности в оформлении портят впечатление от работы и затрудняют её понимание.
3. В первой части первой главы рассматривается задача, где вторичным элементов, очевидно, является твердая пластина. Хочется понять, каков характер движения этой пластины? На чем основан выбор характерных значений скорости и размера пластины при оценке магнитного числа Рейнольдса на стр. 43? Значения геометрических параметров линейной индукционной машины приводятся на стр. 45 в таб. 1.1. Не один из них не совпадает с характерным размером, использованным в оценке магнитного чис-

ла Рейнольдса. Оценка магнитного числа Рейнольдса приводится и в главе 3. Возникает тот же вопрос. Чем определяется выбор характерных числовых значений для этой оценки?

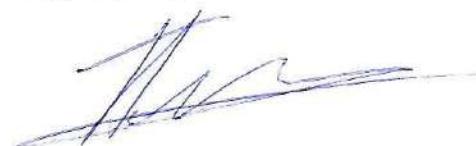
4. В главе 2 для описания движения твердой частицы в потоке жидкости предлагается использовать уравнение (2.14), где в ряду сил, действующих на частицу, учитывается подъемная сила, природа которой не обсуждается. Есть основания полагать, что эта сила определяется разницей давлений со стороны потока жидкости на разные стороны частицы. Размер частиц мал, скорости движения жидкости, определяющие разность давлений, не велики. Хотелось бы увидеть аргументацию, позволяющую оценить необходимость учета этой силы. Насколько эта сила сравнима с силой тяжести и силой сопротивления со стороны жидкости?

Приведенные замечания не снижают **общего положительного впечатления** от работы. Автореферат отражает содержание диссертации.

Заключение. Диссертационная работа Швыдкого Евгения Леонидовича выполнена на хорошем научном уровне, она представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем критериям «п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ», предъявляемым к кандидатским диссертациям. Швыдкий Евгений Леонидович заслуживает присуждения степени **кандидата технических наук** по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты.

Доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры общей физики факультета Прикладной математики и механики ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

614990, Пермский край, г. Пермь - ГСП, Комсомольский проспект, д. 29, а. 251,
perminov1973@mail.ru, +7 (342) 2-198-025



Перминов Анатолий Викторович
01.10.2020



ЗАВЕРЯЮ:

Главный секретарь ПНИПУ

В.И. Макаревич

10 2020