ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **Виноградова Дмитрия Андреевича** на тему «*Электровихревое течение жидкого металла в полусферическом контейнере при воздействии внешнего магнитного поля* » на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника

Вводная часть. Диссертационная работа Виноградова Д.А. посвящена численному и экспериментальному исследованию электровихревого течения (ЭВТ) жидкого металла в полусферическом объеме при воздействии внешнего магнитного поля (МП) различной интенсивности. В работе рассмотрены влияние магнитного поля Земли на расплав, автоколебательный режим, определено время формирования противонаправленного вихря, изучены применимость магнитогидродинамических приближений, и электромагнитное торможение течения металла внешним магнитным полем.

Работа интересна как с теоретической точки зрения, так и с точки зрения прикладного значения. В ней показаны границы применимости магнитогидродинамических приближений, что дает возможность экономить вычислительные ресурсы при моделировании электровихревых течений в подходящем диапазоне значений силы электрического тока и напряженности магнитного поля. Полученные экспериментальные и расчетные данные о структуре течения могут послужить отправной точкой в проектировании металлургических агрегатов с системой воздействия на расплав внешнего аксиального магнитного поля.

Диссертация состоит из 129 страниц машинописного текста и содержит 73 рисунка и 5 таблиц, список литературы включает в себя 102 источника. Работа включает в себя введение, четыре главы и заключение.

Во введении (стр. 4–18) описано прикладное применение электровихревых течений, методы измерения скорости жидкого металла и обоснована актуальность работы. Сформулированы её цель и задачи, научная новизна, приведено обоснование достоверности полученных результатов и сформулированы положения, выносимые на защиту. Описаны личный вклад автора, а также практическая и теоретическая значимость работы.

Первая глава (стр. 19–40) посвящена обзору литературы. Рассмотрены теоретические и экспериментальные работы, посвящённые электровихревым течениям в отсутствие внешнего магнитного поля и при его наличии.

Проведенный обзор показал, что в настоящее время достаточно подробно изучена структура ЭВТ при отсутствии внешнего магнитного поля. В то же время влияние внешнего магнитного поля на гидродинамическую структуру ЭВТ в широком диапазоне его значений, начиная от естественного магнитного поля Земли и заканчивая сильными искусственными полями, исследовано фрагментарно. На основе проведённого обзора сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе (стр. 41–61) проведено описание экспериментальной установки и методики экспериментов, рассмотрена, система охлаждения элементов установки, системы создания и компенсации осевого магнитного поля. Описаны экспериментальные методики измерения скорости жидкого металла корреляционным зондом, волоконно-оптическим преобразователем скорости и скорости закрутки на поверхности жидкого металла с использованием водородных меток. Приведены оценки погрешностей измерений для каждого метода.

В третьей главе (стр. 62–86) описана математическая модель и методика численного моделирования электровихревых течений. Описаны различные методы расчета плотности тока, магнитного поля и объемной электромагнитной силы в металлической ванне при использовании различных МГД приближений. Показано использование технологии NVIDIA CUDA для расчета магнитного поля. В конце главы обсуждается правомерность применения различных численных методик расчета. Отмечается, что под решением полной МГД задачи понимается постановка, в которой в уравнении движения учитываются индуцированные токи и индуцированное магнитное поле.

В четвертой главе (стр. 87–112) приведены результаты численно-экспериментальных исследований ЭВТ. Описано влияние магнитного поля Земли на осевую скорость жидкого металла под центральным электродом. Приведена структура ЭВТ при различных значениях внешнего МП. Обсуждены результаты по автоколебательному режиму и времени формирования противонаправленного вихря. В зависимости от силы тока и магнитной индукции получены границы раздела зон одновихревого и двувихревого течения. Исследована применимость МГД приближений в присутствии внешнего магнитного поля. Описан режим электромагнитного

торможения электровихревого течения и получена карта режимов течения в диапазоне от значения магнитного поля Земли 50 мкТл до 1 Тл.

В заключении сформулированы общие выводы по результатам исследования, даны рекомендации по их использованию. Содержание глав полностью соответствует выносимым на защиту положениям.

Актуальность работы определяется тем, что электровихревые течения встречаются при работе различных металлургических агрегатов и в ряде природных явлениях.

Электровихревые течения имеют место в сильноточных технологических процессах с использованием больших электрических токов, протекающих через ванну расплава. Прежде всего, дуговые и плазменные печи, установки электрошлакового и вакуумно-дугового переплава, рудотермические и рудовосстановительные печи, электролизеры для получения алюминия и магния. Внешние магнитные поля, воздействующие на расплав, широко применяются в сортовых кристаллизаторах машин непрерывного литья заготовок для повышения качества слитков, в вакуумно-дуговых печах для стабилизации горения дуги, а также при кондуктивном электромагнитном перемешивании металла в ванне дуговой печи постоянного тока.

Необходимо отметить, что теоретические и многие практические аспекты поведения электровихревых течений под действием внешних магнитных полей в жидкометаллической токонесущей ванне остаются малоизученными. Отсутствует теоретическое понимание механизмов развития гидродинамических структур ЭВТ, нет обоснованных способов управления ими и инженерных методов расчета. Все перечисленные проблемы приводят к сдерживанию развития ряда агрегатов для широкого использования электровихревого и кондукционного способов воздействия на расплав в различных отраслях металлургии. В частности недостаточно изученными остаются вопросы, связанные с взаимодействием токонесущего расплава в ванне дуговой печи постоянного тока с собственными и внешними магнитными полями и характером возникающих объемных электромагнитных сил и течений.

Описание сложных МГД течений в жидких металлах актуально и для прогнозирования целого ряда природных явлений, например эндогенных геологических процессов во внутренних слоях планет. Отсюда работа Д.А.

Виноградова по экспериментальному и теоретическому изучению механизмов ряда сложных ЭВТ при воздействии внешнего магнитного поля, несомненно, является **актуальной**.

Научная новизна

1. На основе литературного анализа найдены малоисследованные значения параметров воздействия внешнего магнитного поля на структуру ЭВТ в жидком металле. Для проводимых в работе численно-экспериментальных исследований выбраны новые области безразмерных параметров.
2. Впервые проведено исследование и анализ электровихревых течений при компенсации осевой компоненты магнитного поля Земли.
3. Впервые проведены измерения корреляционным методом скорости потока жидкого металла при наличии электрического тока и оценена погрешность измерения.
4. Для нового исследованного диапазона безразмерных параметров установлены закономерности автоколебаний жидкого металла в электровихревом течении в зависимости от величины внешнего магнитного поля.
5. Впервые посредством компьютерного моделирования получена граница раздела зон одновихревого и двувихревого течения жидкого металла в координатах зависимости индукции вертикального магнитного поля от тока через ванну.
6. Обнаружен режим электромагнитного торможения течения при увеличении МП. Максимальные компоненты осевой и азимутальной скорости начинают уменьшаться, что связанно с действием индуцированных токов.
7. Найден диапазон безразмерных параметров, которые соответствуют максимуму полной кинетической энергии течения металла.

Теоретическая значимость.

1. Установлено, что при численном моделировании ЭВТ в присутствии внешнего магнитного поля электродинамическое приближение корректно описывает течение до некоторой пороговой величины внешнего МП, при превышении которой следует решать полную МГД задачу. Для сплава In-Ga-Sn электродинамическое приближение справедливо для внешнего МП $B_z<1.25\times10^{-3}$Тл.

2. Установлено, что при возрастании МП начиная с некоторого значения, возникает эффект электромагнитного торможения течения. При этом восходящий вихрь радиально сжимается, а в остальном объеме формируется застойная зона с минимальной интенсивностью течения.

Практическая значимость.

1. В работе продемонстрирована возможность измерения корреляционным методом скорости потока жидкого металла при наличии электрического тока. Предлагаемый корреляционный метод может быть использован для измерения скорости жидкого металла в высокотемпературных промышленных агрегатах.
2. Существуют диапазоны параметров магнитного поля и тока при которых имеются два минимума интенсивности ЭВТ. Первый минимум связан с азимутальной закруткой течения и возникновением возвратного течения, а второй минимум – с электромагнитным торможением, вызванным электрическими токами, индуцированными движением электропроводящей среды. Это следует учитывать при проектировании промышленных агрегатов, где внешнее МП используется как метод управления структурой ЭВТ.
3. Результаты диссертации можно рекомендовать для использования в ФГБОУ ВПО НИЯУ МИФИ, Акционерном обществе «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», ФГБУН Институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Национальном исследовательском университете «Московский энергетический институт» (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН), ФГБУН Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЕ РАН), ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), ФГБУН Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИТФ УрО РАН), Институте механики МГУ им М. В. Ломоносова, ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН), в профильных отраслевых НИИ и предприятиях атомной энергетики и электрометаллургии.

Апробация работы и публикации. Содержание диссертационной работы Д.А Виноградова достаточно полно освещено в 13 научных публикациях, в том числе в 11 публикациях в журналах, включенных в перечень ВАК или индексируемых в системах WOS, Scopus. Работы апробированы на 10 научных конференциях различного уровня. В автореферате достаточно полно отражается содержание всей диссертации.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность обеспечивается использованием современных экспериментальных методов исследований с детальной проработкой методических вопросов, поверенной измерительной аппаратуры и тщательным анализом погрешности измерений. Применение апробированных методов численных исследований и общепринятых методов обработки данных.

Важным результатом работы является высокая достоверность полученных данных, прежде всего за счет тщательного сопоставления результатов вычислений с экспериментальными данными и известными данными других авторов.

Личный вклад автора. Автором выполнена обработка, анализ, научное обобщение и формулирование результатов на основе экспериментальных и расчетных данных, полученных в большинстве случаев автором лично, либо при его непосредственном участии.

К **достоинствам** диссертации стоит отнести:

1. Сконструирована система для создания и подавления внешнего осевого магнитного поля (соленоид и катушка Максвелла). Получена очень наглядная диаграмма магнитного поля в катушках Максвелла и Гельмгольца (рис. 2.4). Проведено оригинальное исследование ЭВТ при наличии и компенсации осевой компоненты магнитного поля Земли.
2. Вызывает уважение применение для ускорения расчетов магнитного поля в жидком металле технологии параллельных вычислений CUDA с использованием графического процессорного устройства GPU NVIDIA. Оригинальная разработка координатного устройства и программы по управлению зондом.
3. Визуализация карты режимов для разделения на одновихревую и двухвихревую структуру течения, по которой можно судить, какой режим

течения реализуется при данных значениях силы электрического тока и магнитного поля.

4. Даны рекомендации по применимости электродинамического и безындукционного приближений и возможность понять, какое приближение можно использовать в рамках входных параметров, чтобы провести оптимальную границу между экономией ресурсов и достоверностью полученных результатов.
5. Обнаружение режима электромагнитного торможения течения и его описание численно и экспериментально, что дает информацию о поведении течения при наличии сильного внешнего магнитного поля.

Изучение диссертационной работы и анализ полученных результатов позволяют вынести для обсуждения в диссертационном совете **следующие вопросы.**

1. Непонятно для чего было использовать в экспериментальной установке три однофазных трансформатора, позволяющих регулировать амплитуду каждой фазы отдельно? Ведь далее эти токи попадали на трехфазный трансформатор и далее – в выпрямитель, собранный по схеме Ларионова. Использованные трансформаторы не обеспечивают стабилизации напряжения (рис. 2.1).
2. Как изготавливались термопары собственного производства (стр. 49) для корреляционного зонда? Диаметр проводов составлял 0,08 мм, а диаметр чувствительного королька горячего спая 0,3 мм.
3. Непонятно почему математическая модель (2.24) - (2.32) для расчета распределения электрического потенциала, плотности тока и вектора магнитного поля в рабочей ванне приведена с использованием декартовой и цилиндрической системы координат? Более разумно для полусферической ванны и полусферического верхнего электрода применить сферическую систему координат и, используя осевую симметрию и принцип суперпозиции, проще найти искомые выше функции.
4. Чем методика водородных меток для измерения скорости закрутки жидкого металла на его поверхности оказалось лучше, чем использование поверхностных «маячков»? Серная кислота не очень комфортный экспериментальный материал.

По диссертационной работе можно сделать следующие з**амечания.**

5. В научной новизне надо было более четко выделить, какие новые данные были получены о структуре и характеристиках электровихревого течения в полусферическом контейнере при воздействии внешнего осевого магнитного поля. Чем они отличаются от уже известных данных и рассматриваемых диапазонах исследования (табл. 3.1). То, что вертикальное магнитное поле вызывает азимутальную закрутку жидкого металла, может формировать двухвихревую структуру, и автоколебания жидкого металла было само по себе известно.
6. Недостаточно четко указан скоростной диапазон, в котором применимы измерения корреляционным методом скорости потока жидкого металла. Как погрешность измерений зависит от скорости и турбулизации потока? Почему, по мнению диссертанта, этот метод можно использовать при высоких температурах.
7. Нет описания, как контролировалась индукция магнитного поля магнетометром LakeShore DSP475 (стр. 87). Измерялось ли МП в жидком металле.
8. В 3 главе правильно записаны общие уравнения в векторной форме (3.1–3.10), после этого приведены упрощения и ограничения и далее нужно было записать исходные уравнения с учетом этих допущений. Логика дальнейшего изложения была потеряна.

Необходимо сделать **несколько мелких замечаний** относительно выполнения всей работы.

9. Есть несколько некорректных предложений, например «Для измерения осциллограмм температуры и осевой скорости жидкого металла использовался корреляционный зонд» (стр. 87).
10. Не везде указаны единицы измерения в эмпирических зависимостях, например формулы (2.1), (2.2) (стр. 53).

Все указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации Д.А. Виноградова. Вне всякого сомнения, диссертант проявил высокую эрудицию и грамотность. Надо отметить его высокую квалификацию при проведении экспериментальных исследований и обработке их результатов, а также проведение сложных теоретических расчетов.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям,

установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Виноградов Дмитрий Андреевич **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,
профессор кафедры информационно-измерительной
техники Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»,
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76,
телефон: +7 (906) 899-24-0
https://www.susu.ru/, iac kovm

д.т.н., профессор Ячиков Игорь Михайлович

21.09.2026

Ученый секретарь Федерального
государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»,
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76,
+7 (351) 267-91-2 ru/, khelalil@susu.ru

к. филолог. Хелал Ядвига Леонидовна

СВЕДЕНИЯ ОБ ОФФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

диссертационной работы **Виноградова Дмитрия Андреевича** «*Электровихревое течение жидкого металла в полусферическом контейнере при воздействии внешнего магнитного поля*», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Фамилия, имя, отчество	Ячиков Игорь Михайлович
Гражданство	РФ
Ученая степень	Доктор наук
Отрасль науки	Технические науки
Специальность	5.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
Ученое звание	Профессор
Должность	Профессор
Место работы	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»
Организационно-правовая форма	ФГАОУ
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования РФ
Структурное подразделение	Кафедра «Информационно-измерительная техника»
Адрес электронной почты	jachikov@mail.ru, iachikovim@susu.ru
Телефон	+7-906-899-24-07

СПИСОК

опубликованных работ в рецензируемых научных изданиях
официального оппонента по защите диссертации Виноградова Дмитрия Андреевича
на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему:
«Электровихревое течение жидкого металла в полусферическом контейнере при воздействии внешнего магнитного поля»,
по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

№	Название публикации	Тип	Соавторы	Выходные данные	Перечень ВАК
1	Effect of Rotation of a Consumable Electrode on the Hydrodynamics of the Slag Bath during Electroslag Remelting	Научная статья	Chumanov I. V., Matveeva M. A., Sergeev D. V., Yachikov, M.I.	Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2024. No. 6. P. 1291–1297 (2024).	Да
2	Математическое моделирование влияния места доставки капель электродного металла на глубину металлической ванны при электрошлаковом переплаве	Научная статья	Вяткин Г. П., Матвеева М. А., Чуманов И. В.	Черные металлы. № 10. С. 10–14. (2023)	Да

№	Название публикации	Тип	Соавторы	Выходные данные	Перечень ВАК
3	Mathematical Model for the Thermal State of the Liquid Metal Bath in an ESR Plant for Producing a Hollow Ingot	Научная статья	Chumanov I. V., Sergeev D. V., Yachikov, M.I.	Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2021. No. 6. P. 689–695. (2021)	Да
4	Использование электромагнитного тормоза в кристаллизаторе МНЛЗ при воздействии на жидкий металл постоянного магнитного поля	Научная статья	Шахов С. И., Феоктистов Н. А., Вдовин К. Н.	Электрометаллургия № 1. С. 27–32 (2021)	Да
5	Влияние вращения расходуемого электрода при электрошлаковом переплаве на гидродинамику шлаковой ванны	Научная статья	Чуманов И. В., Ячиков М.И., Матвеева М. А., Сергеев Д. В.	Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. № 73. С. 121–134. (2021)	Да

Официальный оппонент
д.т.н., профессор кафедры
информационно-измерительной техники
ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ) И.М. Ячиков