МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
**Пермский федеральный
исследовательский центр
Уральского отделения
Российской академии наук**
(ПФИЦ УрО РАН)

ул. Ленина, д.13А, г. Пермь, 614000
тел. (342) 212-60-08, факс 212-50-90
E-mail: psc@permsc.ru, http: //www.permsc.ru
ОКПО 48420579, ОГРН 1025900517378
ИНН 5902292103, КПП 590201001

28.09.2026 № 337/2115-451

на № _____ от _____

«У Т В Е Р Ж Д А Ю»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения на[ука] [Перм]ского
федерального исследов[ательского ц]
Уральского отделен[ия Росс]ийской [акад]емии наук
член-корреспонден[т РАН] [ФИО]

«28» [сентября] [2026] г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук на диссертацию Виноградова Дмитрия Андреевича «Электровихревое течение жидкого металла в полусферическом контейнере при воздействии внешнего магнитного поля», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Диссертационная работа Виноградова Дмитрия Андреевича посвящена исследованию электровихревого течения жидкого металла в полусферическом контейнере при воздействии внешнего магнитного поля. Основное внимание уделено особенностям гидродинамической структуры электровихревых течений (ЭВТ) в широком диапазоне значений внешнего осевого магнитного поля - от величин, сопоставимых с магнитным полем Земли, до сильных искусственных полей. В работе рассматриваются процессы азимутальной закрутки жидкого металла, формирования первичного и вторичного тороидальных вихрей, возникновения автоколебательных режимов, а также электромагнитного торможения течения. Исследование выполнено на основе взаимодополняющих экспериментальных и численных методов, что позволяет рассматривать полученные результаты как комплексное исследование магнитогидродинамических (МГД) процессов в электропроводящей жидкости.

Актуальность работы диссертанта обусловлена необходимостью совершенствования и модернизации промышленных электрометаллургических агрегатов, в которых электровихревые течения существенно изменяют гидродинамическую структуру потока и влияют на скорость плавки, интенсивность

и однородность перемешивания расплава. Существенный практический интерес представляет возможность целенаправленного управления структурой и интенсивностью ЭВТ посредством внешнего магнитного поля без значительного изменения конструкции установки. При этом влияние внешнего магнитного поля на структуру ЭВТ в широком диапазоне его величин ранее было исследовано фрагментарно, а вопросы нестационарности течения и границ применимости различных МГД приближений оставались изученными недостаточно полно. Рассматриваемая постановка воспроизводит характерные особенности ряда процессов электрошлаковой сварки, электродугового и электрошлакового переплава, что дополнительно определяет прикладную значимость выбранной тематики.

Объем и структура работы соответствуют поставленной цели и сформулированным задачам исследования. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, общий объем составляет 129 страниц; в тексте приведены 73 рисунка и 5 таблиц, библиографический список включает 102 наименования. Изложение построено последовательно: от анализа отечественных и зарубежных исследований и описания экспериментальной установки к математическому описанию процесса, численной методике и обсуждению результатов численно-экспериментальных исследований. Такое построение позволяет последовательно обосновать выбор методов, провести их проверку и сопоставить расчетные результаты с экспериментальными данными.

Во *введении* обоснована актуальность исследования электровихревых течений, сформулированы цель и задачи работы, приведена оценка степени разработанности темы, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов. Представлены методология и методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, сведения о достоверности и апробации результатов, публикациях и личном вкладе автора. Отдельно сформулировано соответствие работы паспорту специальности 1.3.14 в части экспериментальных и численных исследований закономерностей электровихревых течений электропроводящей жидкости при влиянии внешнего осевого магнитного поля. Цель работы логически согласуется с выявленными по результатам анализа литературы недостаточно исследованными вопросами и состоит в расширении информации о гидродинамической структуре ЭВТ в широком диапазоне внешних магнитных полей.

Первая глава посвящена литературному обзору численных, теоретических и экспериментальных исследований электровихревых течений как при отсутствии внешнего магнитного поля, так и при его воздействии. Рассмотрены закономерности формирования тороидального вихря и затопленной струи, влияние параметра электровихревого течения, формы рабочей области, свободной конвекции, условий токоподвода и внешнего продольного магнитного поля. Особое внимание уделено образованию азимутальной закрутки и вторичных противонаправленных течений. На основании анализа литературных источников показано, что исследование ЭВТ в

широком диапазоне внешних магнитных полей, включая магнитное поле Земли, а также анализ автоколебаний и применимости различных МГД приближений представляют собой недостаточно изученные задачи. В завершение главы эти положения конкретизированы в виде задач экспериментального и численного исследования.

Во *второй главе* приведены результаты исследования методической и экспериментальной базы работы: описаны экспериментальная установка, системы ее охлаждения, создания и подавления внешнего осевого магнитного поля, а также автоматическая система измерений. В качестве рабочей среды использован эвтектический сплав In-Ga-Sn в медном полусферическом контейнере. Для создания внешнего поля изготовлен соленоид, а для компенсации магнитного поля Земли - катушка Максвелла. Скорость жидкого металла определялась тремя независимыми способами: термокорреляционным зондом, волоконно-оптическим датчиком скорости и методом водородных меток. Выполнена оценка инструментальных и случайных погрешностей измерений, что является существенным элементом обоснования экспериментальных результатов. По итогам главы сформирована экспериментальная база, позволяющая исследовать как осевую и азимутальную компоненты скорости, так и нестационарные характеристики ЭВТ.

В *третьей главе* приведены математическое описание электровихревого течения и разработанная численная методика. Рассматривается система уравнений движения несжимаемой электропроводящей жидкости совместно с уравнениями Максвелла, законом Ома и законом сохранения заряда. Приведены используемые критерии подобия. Разработаны подходы к расчету плотности электрического тока, собственного и внешнего магнитных полей, электромагнитной силы, а также индуцированных токов и магнитных полей в различных МГД приближениях. Для вычисления магнитного поля по закону Био-Савара-Лапласа использована технология параллельного программирования NVIDIA CUDA, а моделирование гидродинамики выполнялось методом контрольного объема с использованием модели турбулентности k–ω SST. Сопоставление двумерных, трехмерных постановок и экспериментальных данных показало, что используемая осесимметричная модель удовлетворительно воспроизводит основные качественные особенности ЭВТ и обеспечивает приемлемое количественное согласие по ключевым характеристикам течения.

Четвертая глава посвящена результатам расчетно-экспериментальных исследований и их физическому анализу. Экспериментально показано, что магнитное поле Земли приводит к уменьшению осевой скорости жидкого металла в области струи примерно на 30-50% по сравнению с режимом компенсации геомагнитного поля. В диапазоне внешних полей порядка 10^{-4}...10^{-3} Тл исследованы формирование восходящего тороидального вихря и автоколебательные режимы, обусловленные взаимодействием первичного и вторичного вихрей. Получены зависимости периода автоколебаний и времени образования вторичного вихря от величины магнитного поля. Методом численного моделирования определена

граница раздела одновихревого и двувихревого режимов, а также установлен предел применимости электродинамического приближения: при Bz порядка $1.25*10^{-3}$ Тл и выше необходимо учитывать индуцированные токи. В широком диапазоне магнитных полей выявлены два механизма снижения интенсивности течения - перестройка вихревой структуры вследствие азимутальной закрутки и электромагнитное торможение, обусловленное индуцированными токами.

В *заключении* сформулированы основные результаты работы в соответствии с положениями, выносимыми на защиту. Подтверждено влияние магнитного поля Земли на осевую скорость ЭВТ, установлены закономерности автоколебательного режима и формирования вторичного тороидального вихря, определена граница одновихревого и двувихревого течения. Разработана и апробирована методика расчета ЭВТ в безындукционном приближении, определены условия, при которых электродинамическое приближение приводит к существенно завышенным значениям азимутальной скорости. В диапазоне внешнего магнитного поля от $5*10^{-5}$ до 1 Тл установлена последовательная перестройка структуры течения от одновихревого к двувихревому режиму и далее к режиму электромагнитного торможения с формированием застойной зоны.

Научная новизна состоит в том, что с использованием комплекса экспериментальных и численных методов получены новые данные о структуре электровихревого течения в полусферическом контейнере в широком диапазоне внешнего осевого магнитного поля. Впервые в рассматриваемой постановке экспериментально установлено уменьшение осевой скорости ЭВТ под действием магнитного поля Земли и исследованы характеристики автоколебаний, обусловленных взаимодействием первичного и вторичного тороидальных вихрей. Получена зависимость времени формирования восходящего тороидального вихря от внешнего магнитного поля и рассчитана граница раздела одновихревого и двувихревого режимов. Определена область применимости электродинамического приближения при наличии внешнего магнитного поля и выявлен эффект электромагнитного торможения ЭВТ под действием индуцированных электрических токов в сильных полях. Существенным результатом является также систематическое описание структуры ЭВТ на интервале внешних магнитных полей от величины, сопоставимой с полем Земли, до 1 Тл.

Теоретическая и практическая значимость диссертации определяется возможностью использования полученных закономерностей при моделировании и управлении электровихревыми течениями в лабораторных и промышленных установках. Продемонстрирована применимость корреляционного метода для измерения скорости жидкого металла при протекании электрического тока, что представляет интерес для диагностики высокотемпературных металлургических агрегатов. Установленный критерий перехода от электродинамического к безындукционному приближению позволяет обоснованно выбирать уровень математической модели и исключать существенное завышение расчетных скоростей при воздействии внешнего магнитного поля. Выявленные минимумы интенсивности

ЭВТ, связанные с перестройкой вихревой структуры и электромагнитным торможением, могут учитываться при выборе магнитного поля как средства управления гидродинамикой расплава. Полученные результаты представляют практический интерес для процессов электродугового и электрошлакового переплава, электрошлаковой сварки и иных технологий, в которых внешнее магнитное поле используется для регулирования движения жидкого металла. Такие процессы разрабатываются и используются, в частности, в Объединенном институте высоких температур РАН, ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», ПАО «Протон-ПМ», ООО «Электродуговые технологии», ОАО «Красцветмет», и др.

Достоверность результатов обеспечивается комплексным использованием экспериментального и численного подходов, оценкой погрешностей измерительных методик и сопоставлением результатов, полученных различными способами. Собственные программы и подключаемые вычислительные модули проверены на задачах, имеющих аналитические решения; численные расчеты исследованы на сеточную сходимость и устойчивость. Проведено сопоставление двумерных и трехмерных расчетных постановок, а также расчетов с учетом неоднородности магнитного поля и замыкания индуцированных токов; основные качественные закономерности при этом сохраняются. Экспериментальные данные качественно и в ряде режимов количественно согласуются с результатами численного моделирования, а установленные особенности течения сопоставлены с опубликованными результатами других авторов. Дополнительным подтверждением обоснованности работы является апробация результатов на российских и международных конференциях и их публикация в профильных научных изданиях.

Апробация работы. Материалы диссертации представлялись и обсуждались на российских и международных научных конференциях. Их список представлен в автореферате диссертации, содержит 10 наименований.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы представлены в материалах конференций и в 13 статьях в научных изданиях, 11 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК или входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus.

Содержание автореферата полностью соответствует основному содержанию диссертации.

Личный вклад автора. Автор внес решающий вклад в проведение исследований на всех этапах работы. Результаты исследований опубликованы в соавторстве. Все научные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично. Автором лично выполнены обработка, анализ, научное обобщение и формулирование результатов на основе экспериментальных и расчетных данных, полученных в большинстве случаев автором лично, либо при его непосредственном участии.

Замечания и вопросы по диссертационной работе.

1. Отсутствует учет температуры в математической постановке задачи. В модели предполагается, что физические свойства среды изотропны, однородны и не зависят от температуры. Однако в экспериментальной части прямо отмечается, что с увеличением электрического тока возрастает интенсивность температурных пульсаций вследствие тепловыделения в жидком металле и на малом электроде, а сама установка снабжена системой охлаждения для ограничения нагрева расплава. Насколько допустимо полностью исключать термогравитационную конвекцию? Имеются ли колебания температуры у системы охлаждения? Каков характерный диапазон температуры жидкого металла для основных режимов и какова оценка изменения физических свойств среды в этом диапазоне? Достаточно ли 600 секунд для охлаждения среды между измерениями?

2. Чем обосновывается использование осесимметричной постановки для исследования нестационарных вихревых режимов? Трехмерная проверка проведена лишь для ограниченного числа непредельных режимов. Насколько корректно численно описываются пристеночные и экмановские слои в использованной k–ω SST модели?

3. Граничное условие на свободной поверхности в расчете меняется между режимами и само по себе может значительно влиять на структуру течения. Насколько выводы о границе применимости МГД-приближений зависят от граничных условий на верхней поверхности?

4. Оценка влияния пульсаций электрического тока выглядит недостаточно доказательной. Реальный уровень пульсации тока составляет около 20% с частотой 300 Гц, хотя в расчетах ток считается постоянным. Диссертант ссылается на тестовые расчеты, показавшие отсутствие значительного влияния на гидродинамику, однако сами результаты этих тестов, величина отличия и используемый критерий "незначительности" не представлены. При нелинейной электромагнитной силе, зависящей от тока и магнитного поля, амплитуда 20% не выглядит настолько малой, чтобы ее можно было исключить без явной количественной оценки. Необходимо внести ясность в этот вопрос.

5. Корреляционный метод имеет достаточно большую и режимно-зависимую погрешность. Диссертант получает типичную полную погрешность 6-15%, но отмечает, что в отдельных режимах она достигает 35%. При этом один из центральных экспериментальных выводов - уменьшение осевой скорости под воздействием магнитного поля Земли на 30–50%. В большинстве режимов эффект превышает типичную погрешность, однако при худшей погрешности порядка 35% нижняя граница эффекта уже становится сопоставимой с неопределенностью измерения. Поэтому необходимо привести доверительные интервалы для рисунка 4.3 и провести статистическую проверку значимости различий между режимами с компенсацией и без компенсации магнитного поля Земли.

6. В тексте недостаточно подробно раскрыта повторяемость экспериментов. Какова повторяемость результатов? Сколько серий экспериментов проводилось по изучению каждого из режимов?

7. На какой глубине находился корреляционный зонд? В тексте указано z=20 мм (стр. 87), в то время как к подписи к рисунку 4.1 z=10 мм (стр. 88).

8. Волоконно-оптический датчик имеет очень большую относительную погрешность при малых скоростях. При значениях U~0.01 м/с относительная инструментальная погрешность составляет 100–200%, при U=0.05 м/с - до 10%, и лишь при больших скоростях становится малой. При этом тарировочная зависимость волоконно-оптического преобразователя получена для скоростей более 0.1 м/с, судя из рисунка 2.16, а дискретизация скорости при тарировке была малой. Также тарировка волоконно-оптического преобразователя выполнена в воздушной струе, а затем пересчитана на жидкий металл, что потенциально может являться дополнительным источником систематической неопределенности. Необходимо внести ясность в этот вопрос.

Заключение. Отмеченные выше недостатки не снижают общей оценки работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Виноградов Дмитрий Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Отзыв подготовлен заведующим лабораторией технологической гидродинамики «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» — филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ИМСС УрО РАН») доктором физико-математических наук Колесниченко Ильей Владимировичем.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научного семинара «ИМСС УрО РАН» под руководством д.т.н., академика РАН Матвеенко В.П. 16 сентября 2026 года, протокол № 17/26. Присутствовало на заседании: 20 человек, из них 4 доктора наук и 10 кандидатов наук. Результаты открытого голосования на [illegible]аботников «ИМСС УрО РАН»: «за» – 20 чел.; «против» – 0 чел.; «воздер[illegible]ть» – 0 [illegible].

Председатель научного семинара «ИМСС УрО РАН»
доктор технических наук, академик РАН
Матвеенко Валерий Павлович

Директор «ИМСС УрО РАН»
доктор физико-математических наук
Мизев Алексей Иванович

Заведующий лабораторией технологической гидродинамики «ИМСС УрО РАН»
доктор физико-математических наук
Колесниченко Илья Владимирович

614018, Пермский край, г. Пермь, ул. Академика Королев[а] 1[А]
тел. +7-342- 2378-381, kiv@icmm.ru

Подписи Матвеенко Валерия Павловича, Мизева А[лексе]я Ив[ановича], Колесниченко Ильи Владимировича удостоверяю:

Главный ученый секретарь ПФИЦ УрО РАН
кандидат физико-математических наук
Вотинова Анастасия Григорьевна

(подпись)

Составители отзыва дают согласие на обработку своих персональных данных, связанных с защитой диссертации и оформлением аттестационного дела Виноградова Д.А.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН).
Почтовый адрес: 614000, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13А
Телефон: +7 (342) 212-60-08
E-mail: psc@permsc.ru
Веб-сайт: https://www.permsc.ru

Сведения о ведущей организации
по диссертации **Виноградова Дмитрия Андреевича**
«Электровихревое течение жидкого металла в полусферическом контейнере при воздействии внешнего магнитного поля»
на соискание степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	ПФИЦ УрО РАН
Руководитель организации	Директор: д.ф.-м.н., чл.-корреспондент РАН Плехов Олег Анатольевич
Адрес организации	614000, г. Пермь, ул. Ленина, д.13А
Телефон	+7 (342) 212-60-08
E-mail	psc@permsc.ru
Web-сайт	http://www.permsc.ru
Полное наименование структурного подразделения, составляющего отзыв	Лаборатория технологической гидродинамики Института механики сплошных сред УрО РАН (филиал ПФИЦ УрО РАН)
Руководитель структурного подразделения, составляющего отзыв	Заведующий лабораторией: д.ф.-м.н. Колесниченко Илья Владимирович

Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, за последние 5 лет по теме диссертации)	
1.	Frick P., Mandrykin S., Eltischev V., Kolesnichenko I. Electro-vortex flows in a cylindrical cell under axial magnetic field // Journal of Fluid Mechanics. 2022. Vol. 949. P. A20. DOI: 10.1017/jfm.2022.746.
2.	Eltishchev V., Mandrykin S., Kolesnichenko I. The influence of a cylindrical cathode on the electro-vortex flow of liquid metal: Numerical simulations and laboratory experiments // Europhysics Letters. 2022. Vol. 137. Article No. 13001. DOI: 10.1209/0295-5075/ac45be.
3.	Eltishchev V., Losev G., Frick P. Maintenance mechanism of a circular surface wave in a magnetohydrodynamic cell and limits of its existence // Physical Review Fluids. 2024. Vol. 9, No. 8. Article No. 083702. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.9.083702.
4.	Poluyanov A., Kolesnichenko I. Experimental study of liquid metal flow for the development of a contact-less control technique // Fluid dynamics and materials processing. 2024. Vol. 20, No. 7. P. 1553–1564. DOI: 10.32604/fdmp.2024.050165.
5.	Kolesnichenko I., Okatev R. Equalisation the toroidal and poloidal kinetic energies of liquid metal stirring flow // The European Physical Journal Plus. 2024. Vol. 139. Article No. 846. DOI: 10.1140/epjp/s13360-024-05629-7.

6.	Losev G., Mamykin A., Kolesnichenko I. Rich vortex dynamic of liquid metal in T-shaped cylindrical cell under counter-rotating magnetic field action // Journal of Fluid Mechanics. 2025. Vol. 1023. P. A42. DOI: 10.1017/jfm.2025.10857.
7.	Kolesnichenko I., Ozernykh V. Interaction between counter-rotating azimuthal and axial liquid metal flows in cylindrical channel // Physical Review Fluids. 2025. Vol. 10. Article No. 113701. DOI: 10.1103/7bs3-xt8t.
8.	Бондаренко А.А., Першин К.А., Колесниченко И.В. Движение оси крупномасштабного вихревого течения жидкого металла в дисковой ячейке, вызванное азимутальной электромагнитной силой малой интенсивности с нелинейным радиальным профилем // Вестник Пермского университета. Физика. 2025. № 3. С. 13–21. DOI: 10.17072/1994-3598-2025-3-13-21.
9.	Eltishchev V., Losev G., Kolesnichenko I., Frick P. Circular surface wave in a cylindrical MHD cell // Experiments in Fluids. 2022. Vol. 63. P. 127–135. DOI: 10.1007/s00348-022-03469-8.
10.	Полуянов А., Колесниченко И. Пульсации течения жидкого металла, генерируемые переменным магнитным полем // Вычислительная механика сплошных сред. 2024. Т. 17, № 1. С. 24–32. DOI: 10.7242/1999-6691/2024.17.1.3.
11.	Хрипченко С.Ю., Тонков Е.Ю. Электродинамические процессы в спиральном магнитогидродинамическом насосе трансформаторного типа // Журнал технической физики. 2024. Т. 94, № 10. С. 1729–1737. DOI: 10.61011/JTF.2024.10.58868.181.
12.	Poluyanov A., Kolesnichenko I. Unsteady fluctuations of a liquid metal flow in a closed volume inside an alternating magnetic field // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2025. Vol. 89, No. 7. P. 1135–1140. DOI: 10.1134/S1062873825711821.
13.	Okatev R., Zikanov O., Krasnov D., Frick P. Inflection point instability in Hartmann channel flow with variable electric conductivity // Physics of Fluids. 2026. Vol. 38, No. 4. Article No. 044104. DOI: 10.1063/5.0319437.
14.	Bondarenko A., Kolesnichenko I. Occurrence and coexistence of secondary vortices in a rotating magnetic field driven axially symmetric flow of liquid metal in a double-section cylindrical cell // European Journal of Mechanics - B/Fluids. 2026. Vol. 119. Article No. 204536. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2026.204536.
15.	Митрополит И.Ю., Гольбрайх Е., Колесниченко И.В. Закрученное МГД-течение в замкнутом канале круглого сечения // Журнал [illegible]ческой [illegible]ки. 2026. Т. 96, № 2. С. 199–211. DOI: 10.61011/JTF.20[illegible].62279.

Директор ПФИЦ УрО РАН / Плехов О.А. /
(расшифровка подписи)

Учёный секретарь ПФИЦ УрО РАН [illegible] / Вотинова А.Г. /
(расшифровка подписи)

«10» июля 2026 г.