

На правах рукописи

Ельтищев Владислав Андреевич

**СТРУКТУРА ПОТОКОВ И ДИНАМИКА ПОВЕРХНОСТИ
ПРИ МГД ТЕЧЕНИЯХ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕМАХ**

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2025

Работа выполнена в Институте механики сплошных сред УрО РАН – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: **Фрик Петр Готлобович**, доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Сапожников Сергей Захарович**, доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы атомной и тепловой энергетики Института энергетики ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (г. Санкт-Петербург);

Соколов Дмитрий Дмитриевич, доктор физико-математических наук (01.04.02), профессор, профессор кафедры математики физического факультета ФГБОУ ВО "Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова" (г. Москва).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Объединенный институт высоких температур Российской академии наук", г. Москва.

Защита состоится **22 октября 2025 г.** в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук" (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « ____ » сентября 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент

 / А.Л. Зуев

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Течения жидких металлов, вызываемые интенсивными электромагнитными полями и большими протекающими токами, имеют место во многих современных технологических процессах, например, в металлургии и жидкометаллических системах охлаждения, а также в перспективных технологиях, таких как жидкометаллические батареи и термоядерные реакторы. При этом большинство промышленных резервуаров представляют собой цилиндрические ёмкости, поскольку такая геометрия обеспечивает высокую прочность, способствует более эффективному перемешиванию содержимого и лучшему теплообмену с окружающей средой.

Наличие свободной поверхности вносит дополнительные сложности в изучении физики процессов. Стабильность поверхностей жидких металлов является существенной проблемой крупномасштабных технологических жидкометаллических устройств, таких как алюминиевые электролизеры. Сильные токи, протекающие в электролизерах, генерируют поверхностные волны, которые могут приводить к коротким замыканиям. В последние годы устойчивость поверхности жидких металлов под действием сильного электрического тока стала широко обсуждаемой проблемой в контексте создания жидкометаллических накопителей энергии, которые разрабатываются как перспективный кандидат для хранения электроэнергии в масштабах энергосети. В таких устройствах протекание больших электрических токов ($\sim 100 \text{ кА/м}^2$) через границу раздела создает сильную поверхностную волну, которая может привести к короткому замыканию. В этих случаях колебание границы жидкого металла является крайне нежелательным процессом.

Цели и задачи диссертационной работы. Целью работы является экспериментальное изучение динамики поверхности и структуры течений жидкого металла, возникающих в цилиндрических объемах со свободной и твердой верхней границей для различных конфигураций токоподвода при наличии и в отсутствие внешнего магнитного поля. В рамках поставленной цели решаются задачи:

1. о применении индукционных методов для измерения характеристик колебательных процессов свободной поверхности электропроводных сред;
2. об электровихревом течении жидкого металла в цилиндрической ячейке и влиянии внешнего магнитного поля на его структуру;
3. о генерации устойчивой круговой поверхностной волны в неподвижной цилиндрической полости, заполненной жидким металлом.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые

1. разработан, изготовлен и исследован индукционный датчик для измерения положения свободной поверхности жидкого металла, характеристик её колебаний, и регистрации положения границы раздела жидкой и твердой фаз металла в процессе кристаллизации.

2. впервые экспериментально показано существование переходных процессов при пропускании больших токов через цилиндрическую ячейку, заполненную жидким металлом, во внешнем однородном вертикальном магнитном поле. Установлено существенное ослабление полоидального электровихревого течения в заполненной жидким металлом цилиндрической ячейке с локальным токоподводом при воздействии слабым внешним аксиальным магнитным полем.

3. впервые экспериментально реализована устойчивая круговая поверхностная волна (КПВ) в цилиндрической МГД-ячейке с центральным нижним и верхним кольцевым электродами в условиях аксиально приложенного постоянного магнитного поля. Предложен физический механизм поддержания устойчивой КПВ, определены границы существования волны в пространстве параметров и получены эмпирические законы зависимости характерной частоты и амплитуды волны от силового параметра.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика бесконтактного определения уровня и границ раздела электропроводящих сред, помещенных в оптически непрозрачные контейнеры.

2. Экспериментально установленный факт существования переходных процессов при пропускании больших токов через цилиндрическую ячейку, заполненную жидким металлом, во внешнем однородном вертикальном магнитном поле, при которых энергия полоидального течения на два порядка превосходит полоидальную энергию установившегося течения. Экспериментально определено, что при воздействии слабым внешним аксиальным магнитным полем на заполненную жидким металлом цилиндрическую ячейку с локальным токоподводом наблюдается существенное ослабление полоидального электровихревого течения на фоне развивающегося азимутального движения.

3. Экспериментальная реализация круговой поверхностной волны в цилиндрической МГД-ячейке. Объяснение механизма поддержания устойчивой КПВ и экспериментальное определение области её существования.

Теоретическая и практическая значимость.

Результаты, полученные в рамках диссертационной работы, углубляют понимание механизмов генерации течений в жидких металлах, которые создаются под действием электромагнитных сил и дают количественные данные для верификации численных моделей. Материалы первой главы развивают индукционные методы в задачах бесконтактного измерения положения свободной поверхности жидкого металла, определения характеристик её колебаний и определения положения границы раздела жидкой и твёрдой фаз металла в процессе кристаллизации. Результаты, изложенные во второй главе, могут быть востребованы для проектирования и использования крупномасштабных жидкометаллических накопителей электроэнергии, поскольку полученные результаты показывают возможность существования таких режимов течения, которые способны критическим образом повлиять на их работу. Материалы третьей главы дают представление о круговой поверхностной волне, методах её генерации, физическом механизме поддержания течения, пределах её существования, ха-

рактиках возникающего течения и динамике свободной поверхности.

Методология и методы диссертационного исследования. Основным подходом исследования, применяемым в диссертационной работе, выступает физический эксперимент. Все измерения проводились с использованием высокоточных методов и современного измерительного оборудования, обеспечивающие высокую чувствительность и надёжность измерений, а также воспроизводимость получаемых данных. Проведены апробация методов измерений и алгоритмов обработки данных на тестовых задачах перед началом исследований. Разработаны методы автоматизации экспериментальных исследований, гарантирующие стабильность и достоверность данных.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается тщательной разработкой экспериментальных методик, проведением тестовых опытов, использованием поверенного измерительного оборудования и калиброванных датчиков, а также сравнением полученных результатов с данными теоретических и экспериментальных исследований других авторов.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: V Всероссийская конференция «Пермские гидродинамические научные чтения», 26–29 сентября 2018, Пермь; XXI Зимняя Школа по механике сплошных сред, 18–22 февраля 2019, Пермь; XXVIII Всероссийская конференция «Математическое моделирование в естественных науках», 2–5 октября 2019, Пермь; VI Всероссийская конференция «Пермские гидродинамические научные чтения», 28–29 ноября, 2019, Пермь; VII Всероссийская конференция «Пермские гидродинамические научные чтения», 22–24 октября, 2020, Пермь; XXII Зимняя Школа по механике сплошных сред, 22–26 марта 2021, Пермь; International Symposium Non-Equilibrium Processes in Continuous Media, 16–18 сентября, 2021, Пермь; The Fourth Russian Conference on Magnetohydrodynamics, 20–22 сентября 2021, Пермь; XXIII Зимняя Школа по механике сплошных сред, 13–17 февраля 2023, Пермь; The Fifth Russian Conference on Magnetohydrodynamics, 24–28 июня 2024, Пермь; XXIV Зимняя Школа по механике сплошных сред, 24–28 февраля 2025, Пермь.

Представленные исследования частично выполнены при поддержке Фонда содействия инновациям (договор № 14835ГУ/2019, код 0056778, конкурс УМНИК 19 (б)), при финансовой поддержке гранта РНФ (проект №18-41-06201), в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024), а также в рамках государственного задания (тема АААА-А19-119012290101-5).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 33 печатных работах, из них: 8 в журналах, являющихся рецензируемыми научными изданиями, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук [1–8], 2 статьи в сборниках трудов конференций [9, 10] и 23 тезисов докладов [11–33].

Личный вклад автора. Содержание работы и основные положения, выносимые на защиту, отражают личный вклад автора в опубликованные материалы. Автор лично участвовал в подготовке, сборке и наладке экспериментальных установок. Экспериментальные результаты, приведенные в работе, получены преимущественно автором. Постановка задач, результаты исследований и их интерпретация обсуждались с научным руководителем П. Г. Фриком и И. В. Колесниченко.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 3 глав, заключения и библиографии. Общий объем работы XXX страниц, из них XX страниц текста, включая XX рисунков. Библиография включает XXX наименования на XX 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** представлены наиболее значимые и актуальные работы, связанные с темой диссертации: о магнитогидродинамических течениях жидких металлов, в частности об электровихревых, возникающих в цилиндрических объемах; о МГД-неустойчивостях, встречающихся в современных технологических устройствах; об экспериментальных методах определения уровня жидких металлов.

В **первой главе** представлены результаты разработки и исследования индукционного датчика уровня (ИДУ) – устройства для бесконтактного измерения положения свободной поверхности жидкого металла, помещенного в оптически непрозрачный контейнер. ИДУ представляет собой систему из трех катушек, расположенных соосно: центральная катушка генерирует переменное магнитное поле, а две крайние катушки являются измерительными. Если около одной из измерительных катушек находится электропроводящая среда, то из-за возникающих в этой среде вихревых токов будет создаваться встречное переменное магнитное поле. Таким образом разность потенциалов в измерительной катушке, расположенной рядом с электропроводящей средой, будет меньше, чем разность потенциалов в противоположной измерительной катушке. В отсутствие проводящей среды напряжения на обеих катушках эквивалентны. Это явление используется для определения наличия электропроводящей среды вблизи устройства.

Исследование выходного сигнала датчика в задаче измерения уровня электропроводной среды осуществляется на экспериментальной установке (см. рис. 1), состоящей из проводящего дюралюминиевого цилиндра диаметром 172 мм и высотой 200 мм, параллельно боковой стенке которого располагается датчик

уровня. Для точного позиционирования ИДУ, измерительная система размещается на микрометрических платформах, которые позволяют с точностью 0.01 мм перемещать датчик вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений на расстояния до 50.00 мм по каждой из осей.

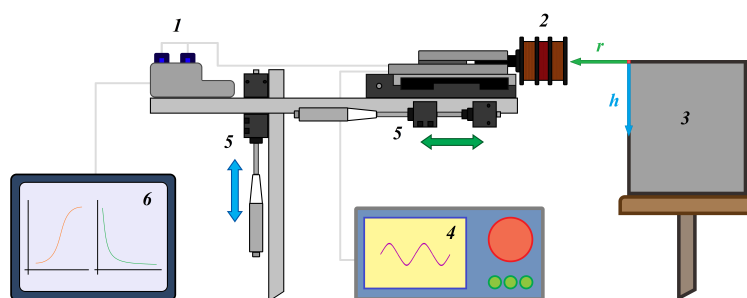


Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 – платы сбора данных, 2 – индукционный датчик уровня, 3 – дюралюминиевый цилиндр, 4 – генератор, 5 – микрометрические платформы, 6 – персональный компьютер.

Для набора частот переменного электрического тока, питающего генерирующую катушку ИДУ были получены зависимости выходного сигнала датчика от расстояния между электропроводящим цилиндром и устройством, а также зависимости от высоты (уровня электропроводной среды), которые аппроксимировались экспоненциальной функцией и сигмоидой соответственно (см. рис. 2). Подобный набор кривых был получен и для жидких металлов (галлий, натрий), помещенных в цилиндрические контейнеры.

Исследование выходного сигнала датчика в задаче измерения колебаний поверхности электропроводной среды осуществлялось на дюралюминиевом цилиндре со скошенной верхней поверхностью, который служил моделью вращения свободной поверхности жидкого металла. Угол скоса составлял 45 градусов. Цилиндр устанавливался на вращающейся платформе, соединенной с электро-

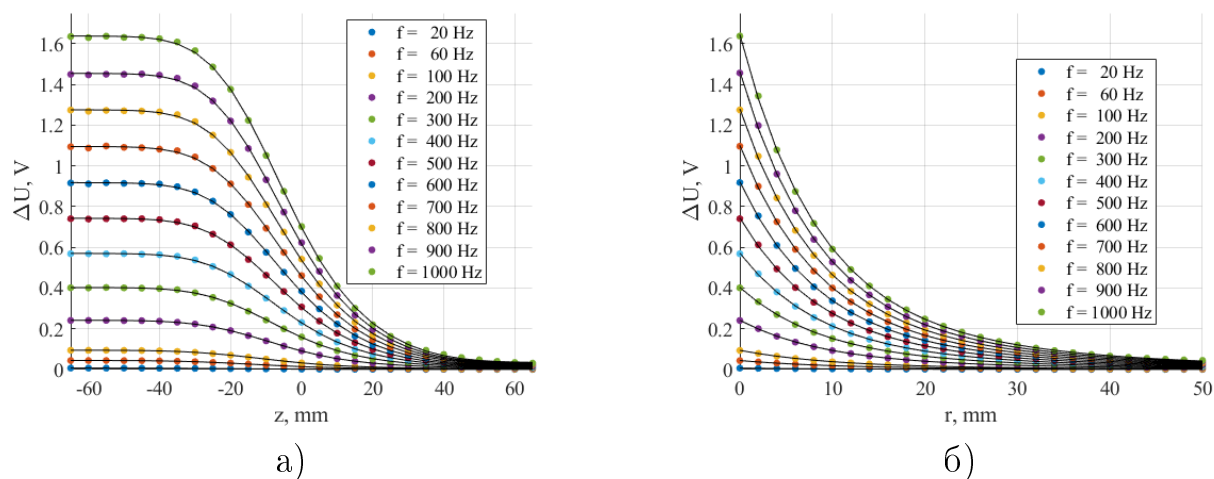


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала датчика от высоты (а) и расстояния между электропроводящим цилиндром и устройством (б).

двигателем. Напротив цилиндра соосно с радиальной осью на высоте середины скоса был установлен индукционный датчик уровня.

Были проведены измерения сигналов датчика для вращающегося цилиндра со скошенной верхней границей для разных частот переменного тока, питающего генерирующую катушку и различных скоростей вращения цилиндра. Получены семейства калибровочных кривых, с помощью которых можно на основании измеренного сигнала определить азимутальный угол, на который был повернут цилиндр со скошенной внешней границей. Разработанная методика может быть применена для измерения частоты колебания свободной границы жидкого металла.

Разработанный индукционный датчик уровня был применен для исследования процессов фазовых превращений в металлических расплавах, а именно для определения положения фронта и темпа кристаллизации жидкого металла в силу существенных различий электропроводностей металлов в жидкой и твёрдой фазах. Экспериментальная установка состояла из управляемой подвижки, на каретке которой размещался ИДУ (см. рис. 3, (а)). Движение каретки осуществлялось за счёт дистанционно управляемого сервопривода вдоль стенки кюветы, заполненной металлическим расплавом. На торцах кюветы располагались медные теплообменники, задающие горизонтальный градиент температуры в слое, определяющий процесс направленной кристаллизации. Рабочая полость кюветы представляла собой прямоугольный параллелепипед, заполненный эвтектическим сплавом галлия $\text{Ga}_{86.3}\text{Zn}_{10.8}\text{Sn}_{2.9}$ (масс. %). Нагреватель был оборудован пазами для установки датчиков ультразвукового доплеровского анеометра (УДА) DOP 5000, Signal Processing, Switzerland. Пять датчиков УДА располагались вертикально друг над другом для измерения положения границы кристаллизовавшегося металла.

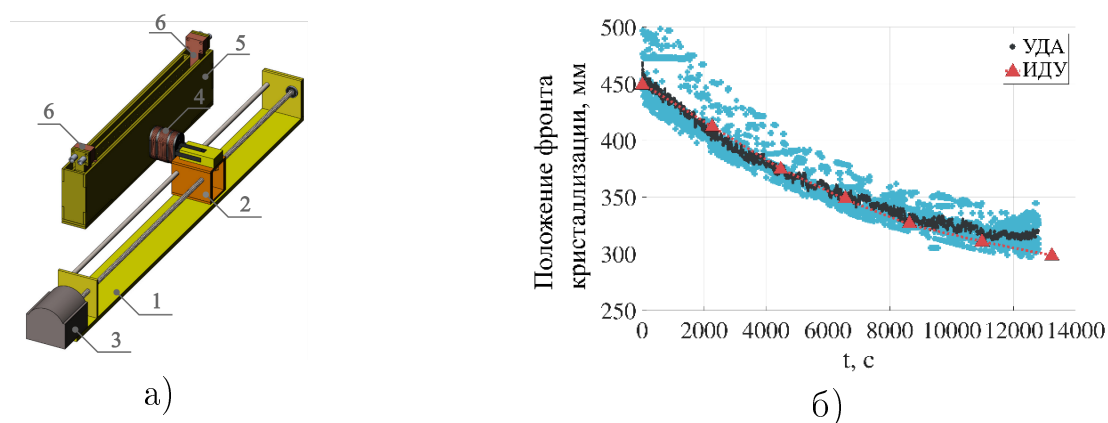


Рис. 3. (а) – схема экспериментальной установки: 1 – дистанционно управляемая подвижка, 2 – каретка подвижки, 3 – двигатель подвижки, 4 – индукционный датчик, 5 – канал, заполненный рабочим металлом, 6 – теплообменники; (б) – изменение фронта кристаллизации по данным УДА и ИДУ.

В ходе эксперимента происходила направленная кристаллизация металлического расплава вдоль слоя, во время которой производились измерения поло-

жения фронта кристаллизации при помощи датчиков УДА и ИДУ. Поскольку в эксперименте жидкий металл претерпевал фазовый переход первого рода, то на границе раздела фаз происходило скачкообразное изменение главных параметров среды, в том числе и электропроводности.

На рисунке 3 (б) приведено изменение положения фронта кристаллизации в различные моменты времени по данным УДА и ИДУ: синие точки – показания пяти независимых датчиков УДА, черные – усредненные по данным пяти датчиков в каждый конкретный момент времени. Красная кривая отображает положение фронта кристаллизации по показаниям ИДУ. Усреднение данных УДА было проведено для более корректного сравнения результатов измерений, поскольку индукционный датчик является интегральным в том смысле, что его эффективная область измерений сопоставима с высотой слоя металла. Наблюдается хорошее согласие результатов измерений двумя методами.

Результаты первой главы опубликованы в работах [2, 7, 9, 10].

Во **второй главе** экспериментально и численно исследуются электровихревые течения (ЭВТ) жидкого металла в цилиндрической ячейке в отсутствие и под действием внешнего вертикального магнитного поля для случая свободной и твердой верхней границы. ЭВТ возникают в электропроводящих жидкостях в результате взаимодействия электрического тока, протекающего через среду, с собственным магнитным полем.

Экспериментальная установка состояла из цилиндрической ячейки радиуса $R = 100$ мм и высотой $H = 150$ мм, боковая стенка которой сделана из нержавеющей стали, герметично соединенной с дном, выполненным из плексигласа (см. рис. 4, (а)). В ячейку до уровня $H_0 = 100$ мм от дна наливался галлиевый сплав, жидкий при комнатной температуре. На оси ячейки располагались цилиндрические коаксиальные электроды для компенсации собственных магнитных полей подводных частей. Торец внутреннего электрода находился в контакте с жидким металлом. Наружный электрод соединялся с боковой стенкой через систему контактов. Электроды подключались к выпрямителю трехфазного тока, соединенного с ЛАТРОм. Ячейка помещалась во внешнее постоянное магнитное поле, которое создавалось двумя катушками Гельмгольца.

Для исследования течений, возникающих в ячейке, использовался ультразвуковой доплеровский анемометр, который способен измерять скорость в оптически непрозрачных жидкостях. Для этого плексигласовое дно имело гнезда для установки датчиков УДА, которые измеряли вдоль вертикального луча в пристеночной области вертикальную компоненту скорости течения и профиль эха. ИДУ, рассмотренный в предыдущей главе диссертационной работы, регистрировал изменение свободной поверхности жидкого металла, если последняя не закрывалась твердой крышкой. Для этого вокруг внешней стороны ячейки вплотную был установлен ИДУ таким образом, что ось датчика находилась на одном уровне с жидкостью в невозмущенном состоянии.

Экспериментальное исследование ЭВТ в отсутствие внешнего магнитного поля показало существование в цилиндрической ячейке крупномасштабного

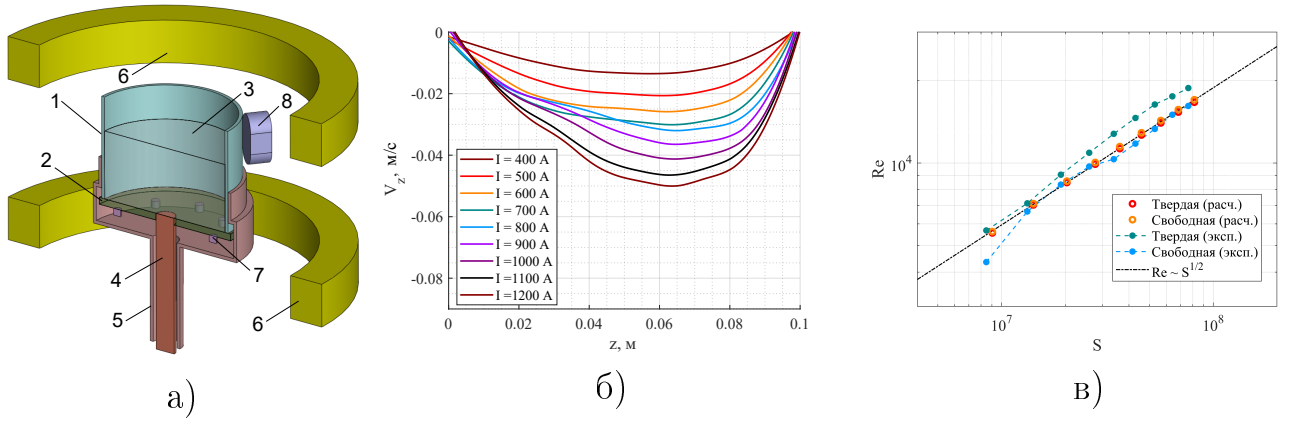


Рис. 4. (а) – схема экспериментальной установки для изучения ЭВТ со свободной поверхностью: 1 – боковая стенка цилиндрической ячейки из нержавеющей стали; 2 – дно ячейки из органического стекла; 3 – жидкий металл; 4 – центральный медный электрод (катод); 5 – внешний медный электрод (анод); 6 – катушки Гельмгольца; 7 – датчики ультразвукового доплеровского анемометра; 8 – индукционный датчик уровня; (б) – профили средней вертикальной скорости V_z , усредненные по датчикам УДА, при различных значениях электрического тока I ; (в) – число Рейнольдса Re в зависимости от ЭВТ-параметра S . Для сплошной верхней границы экспериментальные данные показаны зелеными точками, расчетные данные – красные кружки; для свободной поверхности синие точки – эксперимент, желтые кружки – расчет.

тороидального вихря, который имеет чисто полоидальную структуру. Это видно из профилей вертикальной компоненты скорости вдоль вертикального луча, которые демонстрируют общее нисходящее течение на периферии ячейки (см. рис. 4, (б)). Эксперименты были проведены для различных значений постоянного тока (от $I = 400$ А до $I = 1200$ А), протекающего через цилиндрическую ячейку. Скорость регистрировалась в течение 500 секунд в установившемся (не переходном) режиме.

Основным управляющим параметром ЭВТ, характеризующим соотношение сил Лоренца и вязкости, является так называемый ЭВТ-параметр $S = \mu_0 I^2 / 4\pi^2 \rho \nu^2$, где μ_0 – магнитная постоянная, ρ и ν – плотность и кинематическая вязкость жидкого металла соответственно. Из зависимости числа Рейнольдса $Re = \langle |V_z| \rangle_{max} R / \nu$, где $\langle |V_z| \rangle_{max}$ – максимум модуля средней вертикальной скорости вдоль лучей УДА, следует, что скорость потока линейно зависит от тока, протекающего через ячейку (см. рис. 4, (в)).

Для фиксированного электрического тока $I = 1000$ А были проведены серии экспериментов для различных значений величины внешнего вертикального магнитного поля $0 < B_{ext} < 17$ мТл. Измерения проводились в состоянии насыщения. Наложение дополнительного внешнего поля показало, что при малых значениях вертикального магнитного поля структура течения не менялась до некоторого порогового значения, при этом скорость течения уменьшалась (см. рис. 5, (а)). При последующем повышении значений внешнего магнитного поля происходила перестройка течения, в результате которой направление те-

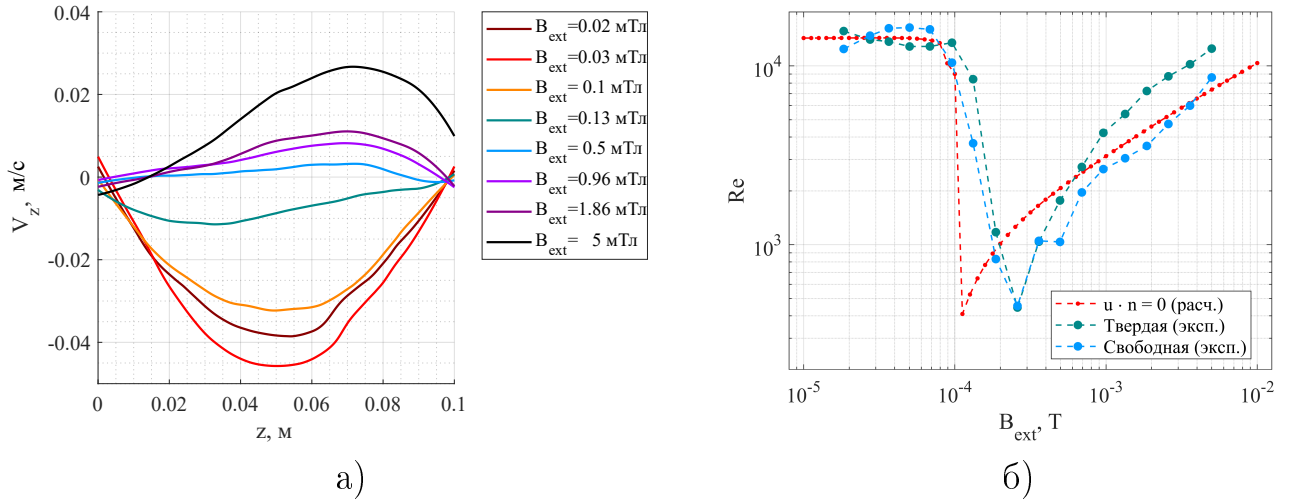


Рис. 5. (а) – профили средней вертикальной скорости V_z , усредненные по датчикам УДА, при фиксированном электрическом токе $I = 1000$ А и различных магнитных полях B_{ext} ; (б) – число Рейнольдса в зависимости от приложенного вертикального магнитного поля при $I = 1000$ А. Экспериментальные данные показаны зелеными точками для сплошной верхней границы и синими точками для свободной поверхности. Данные численного моделирования обозначены красными точками для случая свободной недеформируемой верхней границы.

чения жидкого металла менялось на противоположное, при этом наблюдалось азимутальное вращение жидкого металла. Таким образом, при определенном значении внешнего вертикального магнитного поля можно полностью подавить полоидальное течение.

Количественно и качественно процесс подавления полоидального течения можно пронаблюдать на зависимости числа Рейнольдса Re от величины внешнего вертикального магнитного поля B_{ext} (см. рис. 5, (б)).

Численное моделирование данной задачи для случая свободной недеформируемой верхней границы в математическом пакете COMSOL Multiphysics показало (см. рис. 6), что при малых магнитных полях ($B_{ext} = 0.02$ мТл) в ячейке существует вращающийся относительно оси цилиндра вихрь в форме тора, аналогичный ЭВТ в отсутствии внешнего магнитного поля. Вращение локализовано преимущественно в центральной придонной области цилиндра, то есть неоднородное распределение тока обеспечивает сильное осевое и радиальное дифференциальное вращение. Азимутальное вращение жидкости с сильным уменьшением угловой скорости по высоте цилиндра приводит к образованию области с пониженным давлением над центральным электродом. Вертикальный перепад давления обеспечивает нисходящий поток вдоль оси цилиндрической ячейки и приводит к возникновению крупномасштабного полоидального конусообразного вихря в верхней центральной части ячейки, который расширяется в стороны к внешней стенке цилиндра ($B_{ext} = 0.10$ мТл). Интенсивность полоидального течения уменьшается в два раза. Максимум азимутальной скорости увеличивается в 4 раза, а само течение сосредоточено вблизи центрального электрода, растягиваясь вдоль оси цилиндра. При дальнейшем увеличении магнитного по-

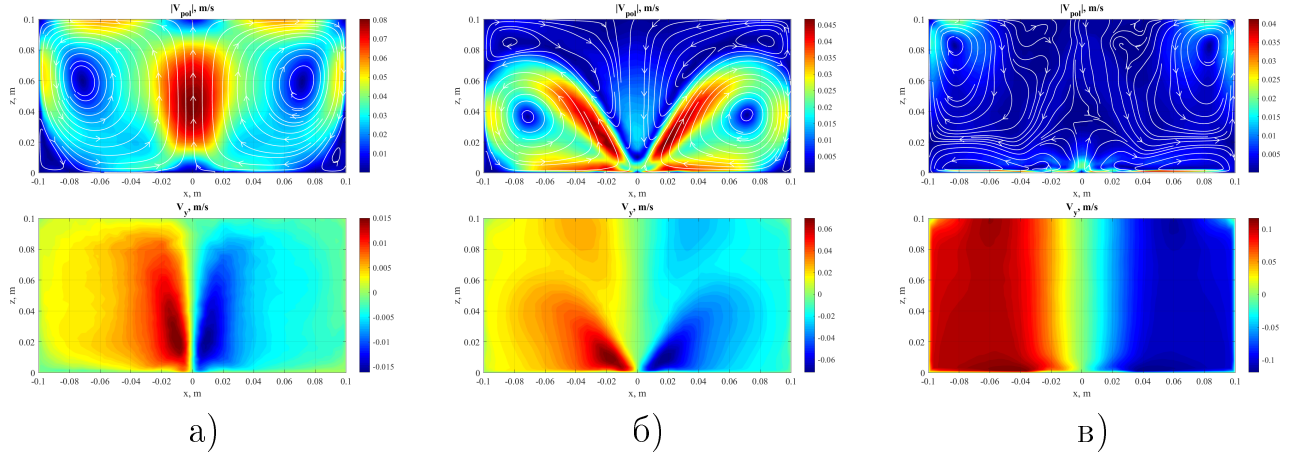


Рис. 6. Расчетные поля полоидальной (сверху) и азимутальной (снизу) компонент скорости в случае свободной недеформируемой верхней границы для различных магнитных полей: (а) – $B_{ext} = 0.02$ мТл, (б) – $B_{ext} = 0.10$ мТл, (в) – $B_{ext} = 1.00$ мТл.

ля ($B_{ext} = 1.00$ мТл) в ячейке начинает доминировать верхний тороидальный вихрь, а азимутальная скорость становится практически однородной по высоте и радиусу, за исключением тонких пограничных слоев около твердых стенок. Вблизи дна сохраняется слабый остаточный тороидальный вихрь, возникший в результате подкачки Экмана.

Экспериментальное исследование электровихревых течений жидкого металла в цилиндрической ячейке для твердой верхней границы в случае локализованного и коаксиального токоподводов при наличии и в отсутствие внешнего вертикального магнитного поля показало качественное и количественное (с отклонениями, не превышающими 20%) совпадение с экспериментальными данными, полученными для случая свободной верхней границы.

Изучение течения жидкого металла со свободной поверхностью в цилиндрическом объеме с локализованным подводом тока показало, что наличие

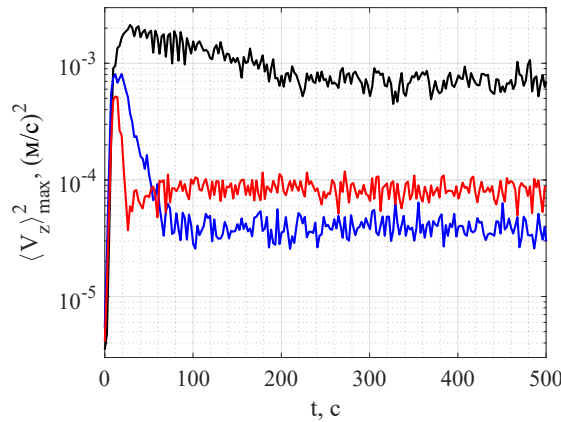


Рис. 7. Изменение со временем максимальной плотности энергии, усредненной по датчикам УДА $\langle V_z \rangle_{\max}^2$ при $I = 1000$ А, полученная в эксперименте. $B_{ext} = B_{Earth}$ (черный), $B_{ext} = B_{Earth} + 0,1$ мТл (синий), $B_{ext} = B_{Earth} + 0,5$ мТл (красный).

внешнего постоянного магнитного поля существенно влияет на развитие ЭВТ. При подаче тока, протекающего через находящуюся под действием вертикального постоянного магнитного поля ячейку, наблюдался переходный режим, в течение которого интенсивность ЭВТ вначале нарастала, а затем падала (см. рис. 7). Продолжительность этого процесса зависела от величины внешнего вертикального магнитного поля.

С помощью индукционного датчика уровня были исследованы колебания свободной верхней поверхности жидкого металла в зависимости от величины внешнего магнитного поля. Спектральный анализ выходного сигнала ИДУ показал наличие двух низкочастотных колебаний с частотами $\nu \sim 0.2$ Гц и $\nu \sim 1$ Гц, большая из которых связана со скоростью вращения жидкого металла, а меньшая обусловлена колебаниями полоидального течения внутри ячейки.

Результаты второй главы опубликованы в работах [1, 3, 4, 6].

В **третьей главе** экспериментально исследовалась круговая поверхностная волна (КПВ), возникающая в цилиндрической МГД-ячейке с центральным нижним и верхним кольцевым электродами в условиях аксиально приложенного постоянного магнитного поля. Экспериментальная установка представляла собой модификацию установки, описанной в предыдущей главе диссертации. Главное отличие – внутренняя часть боковой стенки ячейки была изолирована от дна на высоту 80 мм. Цилиндрический объем заполнялся галлиевым сплавом GaZnSn на 6 мм ниже верхнего уровня изоляции. Вокруг внешней стороны боковой стенки ячейки были установлены 8 индукционных датчиков уровня, которые регистрировали положение границы жидкого металла в пристеночной области. В ячейку непрерывно поступал аргон для минимизации окисления верхней границы жидкого металла (см. рис. 8).

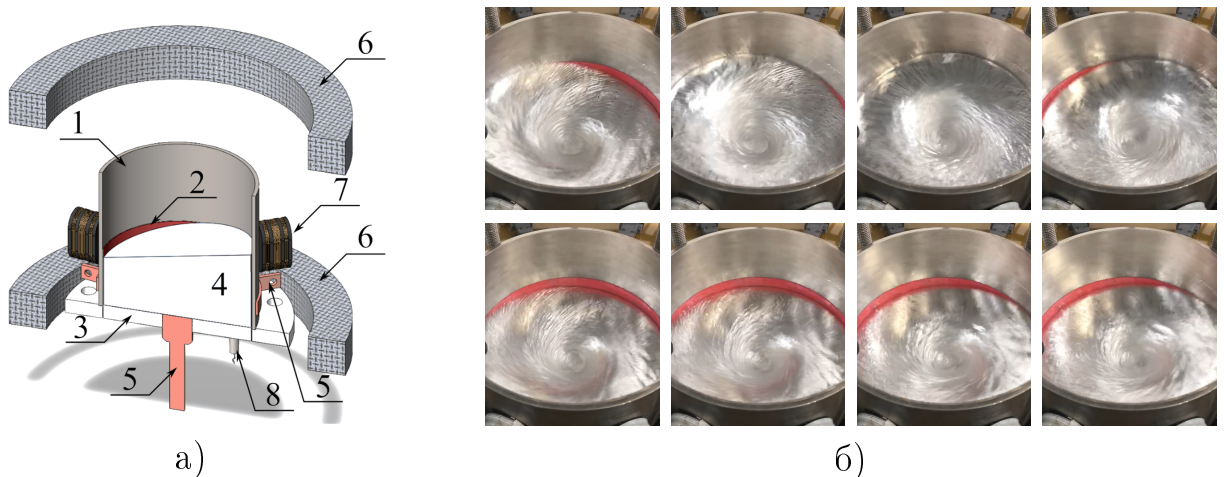


Рис. 8. (а) – схема экспериментальной установки: 1 – цилиндрическая ячейка из нержавеющей стали, 2 – изоляционное покрытие, 3 – плексигласовое дно, 4 – жидкий галлиевый сплав GaZnSn, 5 – коаксиальные медные электроды, 6 – катушки Гельмгольца, 7 – индукционный датчик уровня, 8 – ультразвуковой датчик скорости; (б) – поверхность жидкого металла во время стационарного режима КПВ (раскадровка видео, шаг по времени ~ 66.6 мс).

Уровень жидкого металла в ячейке заведомо ниже уровня кольцевого элект-

трода, в результате чего в состоянии покоя ток через ячейку не протекал. При внесении возмущения на поверхность среды возможна была ситуация, когда жидкий металл соприкасался с кольцевым электродом, в результате чего начинал течь электрический ток через ячейку, который, взаимодействуя с внешним магнитным полем, приводил к возникновению азимутальной компоненты электромагнитной силы – возникала КПВ.

Экспериментально определены амплитуды и частоты колебаний круговой волны в зависимости от силового параметра. Все данные укладываются на одну кривую, которая хорошо аппроксимируется степенной зависимостью с показателем $\gamma = 0.68$. Амплитудно-частотная характеристика имеет линейный вид (см. рис. 9, (а)), что указывает на одинаковую функциональную зависимость амплитуды и частоты КПВ от внешней силы, определяющейся параметром $S = IB_0/\rho R^3 f_0^2$, где I – ток, протекающий через ячейку, B_0 – внешнее вертикальное магнитное поле, ρ – плотность галлиевого сплава, R – радиус ячейки, f_0 – собственная частота свободной азимутальной гравитационной волны в цилиндрической ячейке. Черной точкой отмечено значение амплитуды и частоты при отсутствии силового воздействия. Экспериментально получено значение собственной частоты колебаний поверхности жидкого металла в цилиндрической ячейке, которое отличается от теоретического значения меньше чем на 1%.

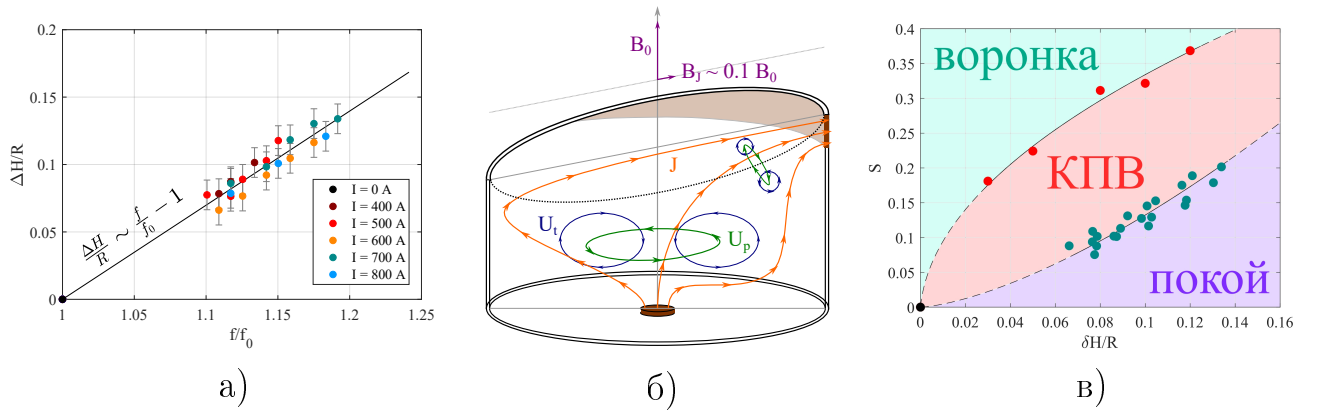


Рис. 9. Безразмерная амплитудно-частотная характеристика КПВ (а), схематическое изображение механизма поддержания КПВ в МГД-ячейке (б) и область существования режима КПВ на плоскости параметров силового параметра S и относительной высоты электрода $\delta H/R$ (в).

Ключевым моментом в объяснении механизма поддержания волны является тот факт, что электрический ток, текущий в жидком металле, попадает в ячейку через две строго локализованные области: центральный электрод на дне ячейки и гребень волны, где находится область контакта жидкого металла с кольцевым электродом. Локальная подача больших токов в жидкий металл приводит к образованию ЭВТ. В отсутствие внешних магнитных полей ЭВТ представляет собой тороидальный вихрь, в центре которого скорость направлена от электрода внутрь ячейки. Магнитные поля кардинально меняют струк-

туру потока. Ток, протекающий через электрод и взаимодействующий с нормальным к стенке магнитным полем, вращает жидкий металл. Когда энергия вращательного потока достигает энергии ЭВТ, происходит полная трансформация структуры течения и начальное ЭВТ практически подавляется. Магнитное поле, необходимое для возникновения КПВ, значительно превышает порог, обеспечивающий переход от тороидального ЭВТ к аксиальному вихрю. В ячейке развивается сильное азимутальное вращение, на фоне которого существует слабый тороидальный вихрь с нисходящим потоком в центре. Аналогичным образом происходит образование вихря с горизонтальной осью (см. рис. 9, (б)). Отличие состоит в том, что симметрия нарушена, так как область контакта представляет собой серповидную полоску, и только проекция внешнего поля B_0 на направление вектора плотности тока вблизи области контакта обеспечивает вихревое течение. Из оценки наклона поверхности вблизи стенки получается, что соответствующая компонента магнитного поля находится в пределах $B_J \leq 0.1B_0$. Таким образом, оба вихря возникают под действием силы Лоренца, суммарная работа которой пропорциональна произведению полного тока на внешнее магнитное поле, что объясняет линейную зависимость между частотой колебаний (определяется скоростью вращения основного вихря, генерируемого силой Лоренца на центральном электроде) и амплитудой (определяется скоростью горизонтального вихря, генерируемого силой Лоренца вблизи контакта со стенкой на гребне волны).

Экспериментально было определено, что увеличение параметра S приводит к значительному искажению свободной поверхности и перерождению КПВ во вращающуюся воронку (см. рис. 9, (в)). То есть колебательный режим существует в ограниченном диапазоне параметров задачи, которыми являются силовой параметр S и относительная разница между уровнем изоляции боковой стенки и уровнем невозмущенной поверхности металла $\delta H/R$.

Были проведены экспериментальные исследования формы свободной поверхности вращающейся жидкости после перехода КПВ в течение типа воронка. Предложена упрощенная математическая модель, описывающая форму свободной поверхности жидкости при заданном силовом параметре S . Достигнуто хорошее согласие результатов математического моделирования с экспериментальными данными.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [5, 8].

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы:

1. Разработан, изготовлен и исследован индукционный датчик для бесконтактного измерения положения свободной поверхности жидкого металла, помещенного в оптически непрозрачный контейнер. Реализована методика определения частоты колебаний свободной границы электропроводящей среды. Успешно протестировано использование индукционного датчика уровня в задаче определения положения границы раздела жидкой и твердой фаз металла в процессе кристаллизации.

2. Экспериментальное и численное исследование ЭВТ жидкого металла в

цилиндрической ячейке с локализованным подводом тока показало, что во всей области существует тороидальный вихрь с восходящим вдоль оси цилиндра и с нисходящим на периферии течением. В зависимости от величины внешнего вертикального магнитного поля возможно качественное и количественное изменение структуры течения: от вращающегося относительно оси цилиндра интенсивного тороидального вихря при малых магнитных полях (порядка магнитного поля Земли $B_{ext} = 0.02$ мТл), к интенсивно вращающемуся крупномасштабному тороидальному вихрю с обратным направлением течения (при $B_{ext} > 0.1$ мТл). Перестройка течения происходит в результате вертикального перепада давления, возникающего из-за дифференциального по высоте вращения жидкого металла. Экспериментально показано существование переходных процессов при пропускании больших токов через цилиндрическую ячейку, заполненную жидким металлом, во внешнем однородном вертикальном магнитном поле, время которых сильно зависит от величины магнитного поля.

3. Экспериментально показано, что стационарная круговая поверхностная волна может существовать в заполненной жидким металлом цилиндрической ячейке с круговым верхним электродом. Предложен механизм поддержания устойчивой КПВ в МГД-ячейке. Проведены измерения собственной частоты колебаний поверхности ЖМ в ячейке. На основании полученных результатов определена зависимость характеристик КПВ от безразмерного силового параметра S . Показано, что как частота, так и амплитуда колебаний растут с ростом параметра по степенному закону с показателем степени $\gamma = 0.68$. В зависимости от силового параметра и геометрических характеристик ячейки в последней могут реализовываться три режима: покой, КПВ или аксиальное вращение с глубокой воронкой на поверхности. На плоскости параметров $(\delta H/R, S)$ построена карта режимов, показывающая границы существования КПВ.

Список публикаций

1. Kolesnichenko I., Frick P., **Eltishchev V.**, Mandrykin S., Stefani F. Evolution of a strong electrovortex flow in a cylindrical cell // [Physical Review Fluids](#). — 2020. — Dec. — Vol. 5, no. 12. — P. 123703.
2. Лосев Г., **Ельтищев В.** Электромагнитные измерения уровня и проводимости цветных металлов // [Вестник Пермского университета. Физика](#). — 2020. — no. 4. — P. 63–68.
3. **Eltishchev V.**, Losev G., Kolesnichenko I. Oscillations of free surface of rotating liquid metal in a cylindrical cell // [Magnetohydrodynamics](#). — 2021. — mar. — Vol. 57, no. 1. — P. 41–50.
4. **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. — Jan. — Vol. 137, no. 1. — P. 13001.

5. **Eltishchev V.**, Losev G., Kolesnichenko I., Frick P. Circular surface wave in a cylindrical MHD cell // [Experiments in Fluids](#). — 2022. — Aug. — Vol. 63, no. 8.
6. Frick P., Mandrykin S., **Eltishchev V.**, Kolesnichenko I. Electro-vortex flows in a cylindrical cell under axial magnetic field // [Journal of Fluid Mechanics](#). — 2022. — Sep. — Vol. 949. —
7. **Ельтищев В.**, Лосев Г. Индукционный метод локализации фронта кристаллизации // [Вестник Пермского университета. Физика](#). — 2023. — апр. — no. 1. — P. 57–61.
8. **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. — Aug. — Vol. 9, no. 8. —
9. **Eltishchev V.**, Dimov I., Pavlinov A., Khalilov R., Kolesnichenko I. Inductive methods of detection the boundary of electrically conductive media in experiment // [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering](#). — 2019. — Vol. 581. — P. 012004.
10. **Eltishchev V.**, Mandrykin S., Kolesnichenko I. Inductive level sensor: experiment and calculation // [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering](#). — 2020. — oct. — Vol. 950, no. 1. — P. 012014.
11. Ельтищев В., Павлинов А., Халилов Р., Колесниченко И., Фрик П. Экспериментальное исследование эволюции границы электропроводной среды // Тезисы докладов XXI Зимней Школы по механике сплошных сред, Пермь, 18–22 февраля. — 2019. — P. 107.
12. Kolesnichenko I., Frick P., Stefani F., Weber N., Mandrykin S., Eltishchev V., Ozernykh V., Khalilov R. Electrovortex Liquid Metal Flows in Cells with Localized Current Supply // The 11-th PAMIR International Conference on Fundamental and Applied MHD, July 1–5, Reims (France). — 2019.
13. Фрик П., Ельтищев В., Лосев Г., Мандрыкин С., Колесниченко И., Халилов Р., Стефани Ф., Вебер Н. Электровихревые течения в контексте проблемы создания жидкометаллических батарей // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Уфа, 20–24 августа. Аннотации докладов. — 2019. — P. 128.
14. Колесниченко И., Мандрыкин С., Озерных В., Ельтищев В., Халилов Р., Павлинов А., Лосев Г. Фрик П. Структура и поведение нестационарного электровихревого течения в цилиндрической ячейке // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Уфа, 20–24 августа. Аннотации докладов. — 2019. — P. 117.
15. Ельтищев В., Колесниченко И. Влияние осциллирующей границы электропроводной среды на локализованное переменное магнитное поле // Тезисы XXVIII Всероссийской конференции "Математическое моделирование в естественных науках". Пермь. 2–5 октября. — 2019. — P. 33.
16. Колесниченко И., Ельтищев В., Мандрыкин С., Лосев Г., Озерных В.,

- Фрик П. Гидродинамические процессы в ячейке с локализованным подводом тока в контексте проблемы создания жидкометаллических батарей // II International conference «Problems of Thermonuclear Power and Plasma Technology», Moscow, MPEI. October 7–9. — 2019. — Р. 110.
17. Ельтищев В., Колесниченко И. Электровихревое течение жидкого металла в цилиндрическом объеме с локализованным подводом тока // ПЕРМСКИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ Сборник материалов VI Всероссийской конференции, посвященной памяти профессоров Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкого и Д.В. Любимова. Ответственные редакторы М.И. Петухов, М.А. Кашина. — 2019. — Р. 61–63.
 18. Ельтищев В., Колесниченко И. Индукционный метод измерения уровня свободной границы жидкого металла // Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения. Сборник тезисов докладов VII Всероссийской конференции с участием зарубежных учёных. Институт вычислительного моделирования СО РАН, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Сибирский федеральный университет. — 2020. — Р. 82–83.
 19. Мандрыкин С., Ельтищев В., Колесниченко И. Подавление полоидальных электровихревых течений жидкого металла внешним магнитным полем // МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ Тезисы XXIX Всероссийской школы-конференции. — 2020. — Р. 71.
 20. Ельтищев В., Колесниченко И. Развитие электровихревого течения жидкого металла в цилиндрическом объеме под действием внешнего магнитного поля // ПЕРМСКИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ материалы VII всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти профессоров Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкого и Д. В. Любимова. Пермь. — 2020.
 21. Лосев Г., Ельтищев В., Колесниченко И. Ультразвуковые измерения положения границы раздела фаз в жидких металлах // Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения. Сборник тезисов докладов VII Всероссийской конференции с участием зарубежных учёных. Институт вычислительного моделирования СО РАН, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Сибирский федеральный университет. — 2020. — Р. 146–147.
 22. Колесниченко И., Мандрыкин С., Ельтищев В., Фрик П. Течения в цилиндрической ячейке, вызванные электромагнитными силами, исследуемые при разработке жидкометаллических батарей // СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОФИЗИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ материалы III международной конференции. Москва. — 2020. — Р. 131–133.
 23. Ельтищев В., Павлинов А., Колесниченко И. Турбулентные характеристики ЭВТ в цилиндрическом канале: эксперимент // Тезисы докладов XXII Зимней школы по механике сплошных сред 22–26 марта 2021 г. Пермь. Россия. — 2021.

24. Мандрыкин С., Ельтищев В., Колесниченко И. Влияние стержня-катода на электровихревое течение: расчет и эксперимент // Тезисы докладов XXII Зимней школы по механике сплошных сред 22–26 марта 2021 г. Пермь. Россия. — 2021.
25. Eltishchev V., Losev G., Kolesnichenko I. Metal pad rotation instability in a cylindrical cell // International Symposium NON-EQUILIBRIUM PROCESSES IN CONTINUOUS MEDIA PROGRAM AND BOOK OF ABSTRACTS Perm, September 16th–18th. — 2021.
26. Eltishchev V., Losev G., Kolesnichenko I. Metal pad rotation instability experimental model // Book of Abstracts Russian Conference on Magneto Hydrodynamics. 2021. Russian Conference on Magneto Hydrodynamics. 20–22 September 2021. Perm. Russia. — 2021.
27. Frick P., Kolesnichenko I., Mandrykin S., Eltishchev V., Stefani F. Evolution of string electrovortex flow under external magnetic field in cylindrical cell // Book of Abstracts Russian Conference on Magneto Hydrodynamics. 2021. Russian Conference on Magneto Hydrodynamics. 20–22 September 2021. Perm. Russia. — 2021.
28. Kolesnichenko I., Mandrykin S., Pavlinov A., Eltishchev V., Frick P. Electrovortex flows in cylindrical cell and external magnetic field // Book of Abstracts Russian Conference on Magneto Hydrodynamics. 2021. Russian Conference on Magneto Hydrodynamics. 20–22 September 2021. Perm. Russia. — 2021.
29. Бондаренко А., Ельтищев В., Колесниченко И. Анализ границы расплавленной электропроводной среды на основе индукционных принципов // Тезисы докладов XXIII Зимней школы по механике сплошных сред 13–17 февраля 2023 г. Пермь. Россия. — 2023.
30. Ельтищев В., Лосев Г., Мамыкин А. Индукционный датчик измерения концентрации примесей в электропроводящих средах // Тезисы докладов XXIII Зимней школы по механике сплошных сред 13–17 февраля 2023 г. Пермь. Россия. — 2023.
31. Bondarenko A., Eltishchev V., Kolesnichenko I. Mathematical simulation of inductive level sensor response to conductivity change // Book of Abstracts V Russian Conference on Magneto Hydrodynamics. 24–28 June 2024. Perm. Russia. — 2024.
32. Eltishchev V., Losev G. Amplitude-frequency characteristics of a circular surface wave // Book of Abstracts V Russian Conference on Magneto Hydrodynamics. 24–28 June 2024. Perm. Russia. — 2024.
33. Ельтищев В., Лосев Г. Форма свободной поверхности вращающейся жидкости в цилиндрической полости // Тезисы докладов XXIV Зимней школы по механике сплошных сред 24–28 февраля 2025 г. Пермь. Россия. — 2025.

Научное издание

Ельтищев Владислав Андреевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук на тему:
Структура потоков и динамика поверхности при МГД течениях в
цилиндрических объемах

Подписано в печать хх.хх.2025. Формат 60 × 90 1/16. Тираж 100 экз. Заказ 256.