

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 Уральского отделения Российской академии наук – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук.

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

Официальные оппоненты: **Сапожников Сергей Захарович**, доктор технических наук (05.16.08, 05.16.01, 05.16.02), 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, порождаемые интенсивными электромагнитными полями и большими протекающими электрическими токами, имеют место во многих современных технологических процессах, например, в металлургии и системах охлаждения на основе жидких металлов, а также в многообещающих технологиях, таких как жидкометаллические батареи и термоядерные реакторы. При этом большинство промышленных резервуаров представляют собой цилиндрические емкости, 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. для задач исследования колебаний границы жидкого металла, а также движения границы раздела твердой и жидкой фазы металла, разработан и применен бесконтактный индукционный датчик, позволяющий проводить измерения при высоких температурах через оптически непрозрачные электропрово-

дящие стенки контейнеров;

2. экспериментально показано, что внешнее вертикальное магнитное поле влияет на развитие электровихревого течения: при локализованной подаче тока в цилиндрическую ячейку наблюдается переходный режим, продолжительность которого зависит от величины магнитного поля. Во время этого режима интенсивность электровихревого течения меняется в несколько раз (возрастает, а затем убывает);

3. представлены эмпирические зависимости числа Рейнольдса от величины внешнего вертикального магнитного поля, описывающие процесс подавления полоидального электровихревого течения жидкого металла в цилиндрической ячейке при локализованном и коаксиальном токоподводах;

4. экспериментально реализована устойчивая круговая поверхностная волна в цилиндрической МГД-ячейке с центральным нижним и кольцевым верхним электродами в условиях аксиально приложенного постоянного магнитного поля. Получены эмпирические законы зависимости характерной частоты и амплитуды волны от силового параметра.

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 ее колебаний и определения положения границы раздела жидкой и твердой фаз металла в процессе кристаллизации. Результаты, изложенные во второй главе, могут быть востребованы для проектирования и использования 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 ее генерации, физическом механизме поддержания течения, пределах ее существования, характеристиках 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 надежность 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.

Положения, выносимые на защиту:

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

2. Экспериментально установленный факт существования переходных процессов при пропускании больших токов через заполненную жидким металлом цилиндрическую ячейку во внешнем однородном вертикальном магнитном поле, при которых энергия полоидального течения в начальные моменты времени в несколько раз превосходит энергию установившегося полоидального течения.

3. Экспериментальное обнаружение существенного ослабления полоидального электровихревого течения на фоне развивающегося азимутального движения при воздействии слабым внешним аксиальным магнитным полем на заполненную жидким металлом цилиндрическую ячейку с локальным или коаксиальным токоподводом.

4. Объяснение механизма поддержания устойчивой круговой поверхностной волны в цилиндрической МГД-ячейке и экспериментальное определение области ее существования.

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, численных и экспериментальных исследований других авторов.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: 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: 9 в журналах, являющихся рецензируемыми научными изданиями, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук [1–9] (входящие в перечень ВАК и/или индексируемые в Web of Science, Scopus); 1 статья в журнале, индексируемом системой РИНЦ и 23 тезисов докладов.

Личный вклад автора. Содержание работы и основные положения, выносимые на защиту, отражают личный вклад автора в опубликованные материалы. Изготовление, тестирование и калибровка индукционного датчика уровня на стационарных и нестационарных электропроводящих средах, сборка соответствующих лабораторных установок, обработка и анализ экспериментальных данных были проведены непосредственно автором [7–9]. В работах [1–6] автор содействовал разработке экспериментальных установок и составлению планов исследований, лично выполнил сборку и калибровку индукционной измерительной системы, с помощью которой провел измерения колебаний свободной поверхности жидкого металла. Измерения скоростей течений, выполненные с помощью ультразвукового доплеровского анемометра, написание программ по обработке данных осуществлены лично автором. Постановка задач, результаты исследований и их интерпретация обсуждались с научным руководителем П. Г. Фриком и И. В. Колесниченко. Подготовка и написание текстов статей выполнены совместно с соавторами.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 3 глав, заключения и библиографии. Общий объем работы составляет 148 страниц, включая 95 рисунков и 3 таблицы. Библиография содержит 158 наименований на 17 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 измерения скорости течения и определения уровня жидких металлов (ЖМ).

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 уровня электропроводящей среды.

Исследование выходного сигнала датчика в задаче измерения уровня электропроводной среды осуществлялось на экспериментальной установке, состоящей из проводящего дюралюминиевого цилиндра диаметром 172 мм и высотой 200 мм, параллельно боковой стенке которого располагался датчик уровня (см. рис. 1). Для точного позиционирования ИДУ, измерительная система размещалась на микрометрических платформах, которые позволяли с точностью 0.01 мм перемещать датчик вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений на расстояния до 50.00 мм по каждой из осей.

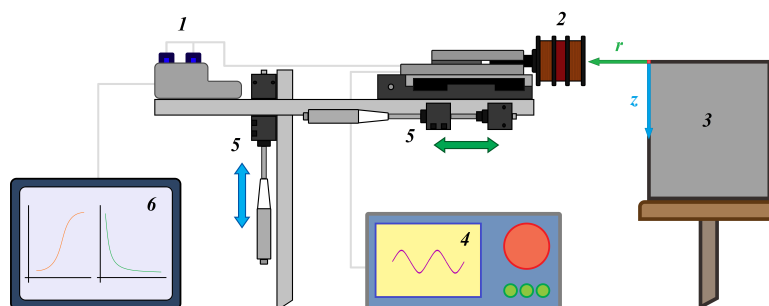


Рис. 1. Лабораторная установка: 1 – платы сбора данных, 2 – индукционный датчик уровня, 3 – дюралюминиевый цилиндр, 4 – генератор, 5 – микрометрические платформы, 6 – персональный компьютер.

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 непрозрачные электропроводящие контейнеры.

Исследование выходного сигнала датчика в задаче измерения нестационарной поверхности электропроводной среды осуществлялось на вращающемся относительно вертикальной оси дюралюминиевом цилиндре со скошенной верхней поверхностью, который моделировал колебания свободной поверхности жидкого металла. Угол скоса составлял 45 градусов. Цилиндр устанавливался на вращающейся платформе, соединенной с электродвигателем. Напротив цилиндра соосно с радиальной осью на высоте середины скоса был установлен ИДУ.

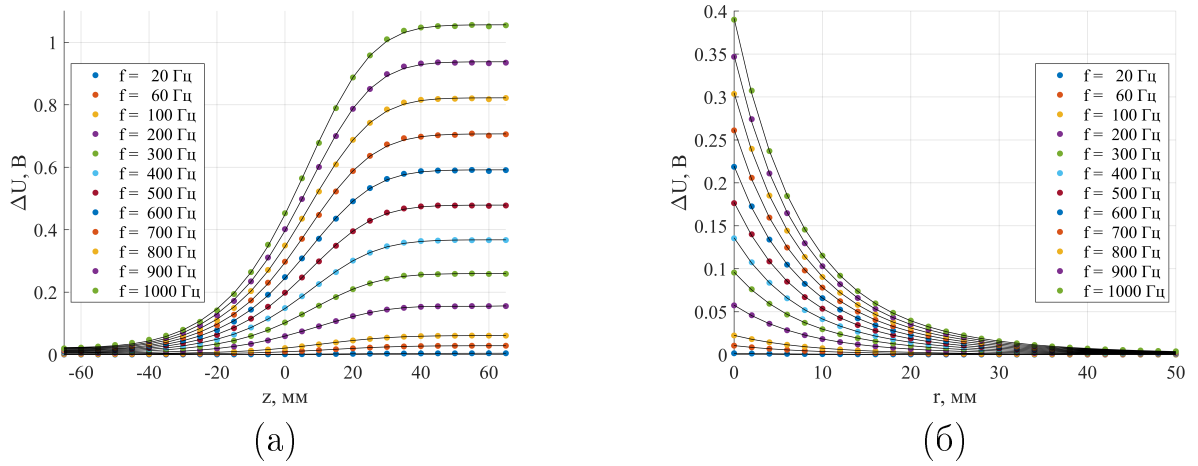


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала датчика от высоты (а) и расстояния между электропроводящим цилиндром и устройством (б).

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. Разработана методика для измерения частоты колебаний свободной границы жидкого металла.

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 твердой фазах. Экспериментальная установка состояла из управляемой подвижки, на каретке которой размещался ИДУ (см. рис. 3, (а)). Движение каретки осуществлялось за счет 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 анемометра (УДА) DOP 5000, Signal Processing, Switzerland. Пять датчиков УДА располагались вертикально друг над другом для измерения положения границы кристаллизовавшегося металла.

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

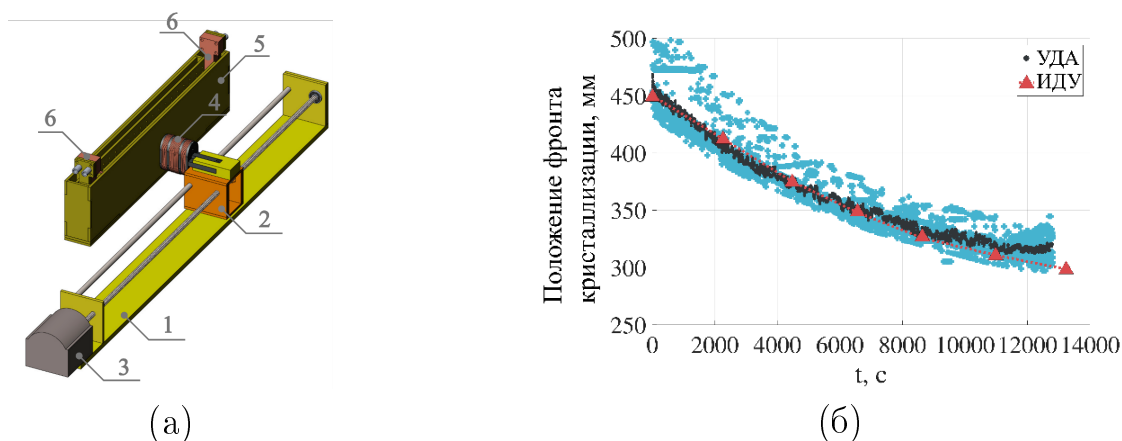


Рис. 3. Схема экспериментальной установки (а): 1 – дистанционно управляемая подвижка, 2 – каретка, 3 – двигатель, 4 – ИДУ, 5 – канал, заполненный рабочим металлом, 6 – теплообменники. Положение фронта кристаллизации по данным УДА и ИДУ (б).

На рисунке 3 (б) приведено изменение положения фронта кристаллизации в различные моменты времени по данным УДА и ИДУ. Синими точками отмечены показания пяти независимых датчиков УДА, черным – кривая, полученная усреднением 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 [7–9].

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 с радиусом $R = 100$ мм и высотой $H = 300$ мм, боковая стенка которой сделана из нержавеющей стали толщиной 5 мм, герметично соединенной с дном, выполненным из органического стекла (см. рис. 4, (а)). В ячейку до уровня $H_0 = 100$ мм от дна наливался галлиевый сплав $\text{Ga}_{86.3}\text{Zn}_{10.8}\text{Sn}_{2.9}$ (масс.%), жидкий при комнатной температуре. В центральной части дна располагался цилиндрический медный электрод радиусом 15 мм, зажатый бронзовой муфтой. Наружный электрод – боковая стенка ячейки – соединялся через систему контактов с медной трубкой, соосно расположенной вокруг центрального электрода. Ток подводился к концам медного стержня и трубки, что позволяло компенсировать магнитные поля от токоподводов. Ячейка помещалась во внешнее постоянное вертикальное магнитное поле, которое создавалось двумя катушками Гельмгольца.

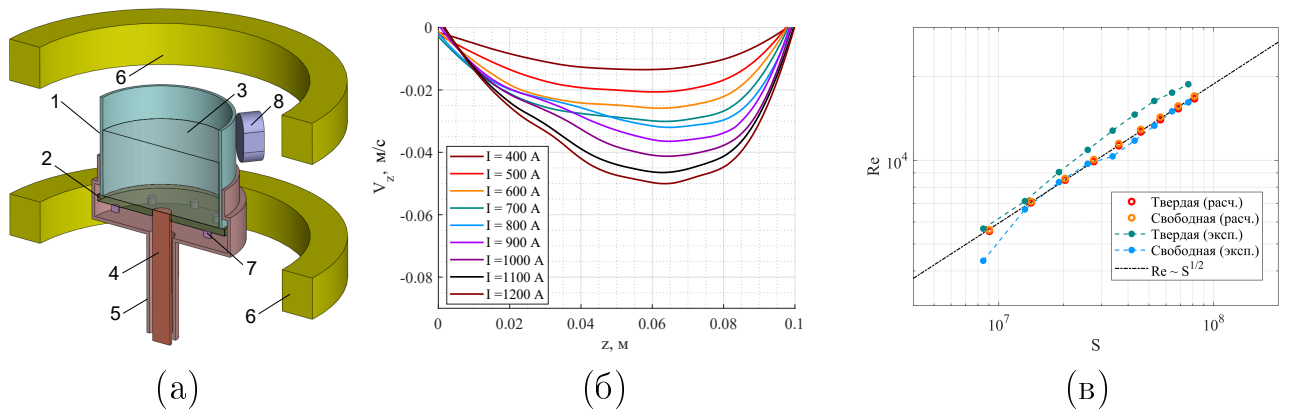


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для изучения ЭВТ со свободной верхней поверхностью (а): 1 – боковая стенка цилиндрической ячейки из нержавеющей стали; 2 – дно ячейки из органического стекла; 3 – жидкий металл; 4 – центральный медный электрод (катод); 5 – внешний медный электрод (анод); 6 – катушки Гельмгольца; 7 – датчики ультразвукового доплеровского анемометра; 8 – индукционный датчик уровня. Профили средней вертикальной скорости V_z , усредненные по датчикам УДА, при различных значениях протекающего электрического тока I (б). Число Рейнольдса Re в зависимости от ЭВТ-параметра S (в): твердая верхняя граница – зеленые точки (эксперимент) и красные кольца (расчет), свободная верхняя поверхность – синие точки (эксперимент) и желтые кольца (расчет).

Описанная выше экспериментальная установка является достаточно универсальной и позволяет изучать как течения со свободной верхней поверхностью, так и с твердой границей, а также с полностью вдвинутым внутрь слоя центральным медным электродом (случай коаксиального токоподвода).

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 изменения 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 тороидального вихря, который имеет чисто полоидальную структуру (имеет лишь вертикальную и радиальную компоненты скорости). 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 режиме.

Основным управляющим параметром ЭВТ, характеризующим соотношение сил Лоренца и вязкости, является 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 $Re = \langle |V_z| \rangle_{max} R / \nu$ от S , где $\langle |V_z| \rangle_{max}$ – максимум по высоте z модуля среднего профиля вертикальной скорости вдоль лучей УДА, следует, что скорость потока линейно зависит от тока, протекающего через ячейку (см. рис. 4, (в)).

При фиксированном токе $I = 1000$ А были проведены серии экспериментов с различными значениями внешнего вертикального магнитного поля $B_{Earth} < B_{ext} < 17$ мТл. Измерения выполнялись в установившемся режиме. 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 течения 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)).

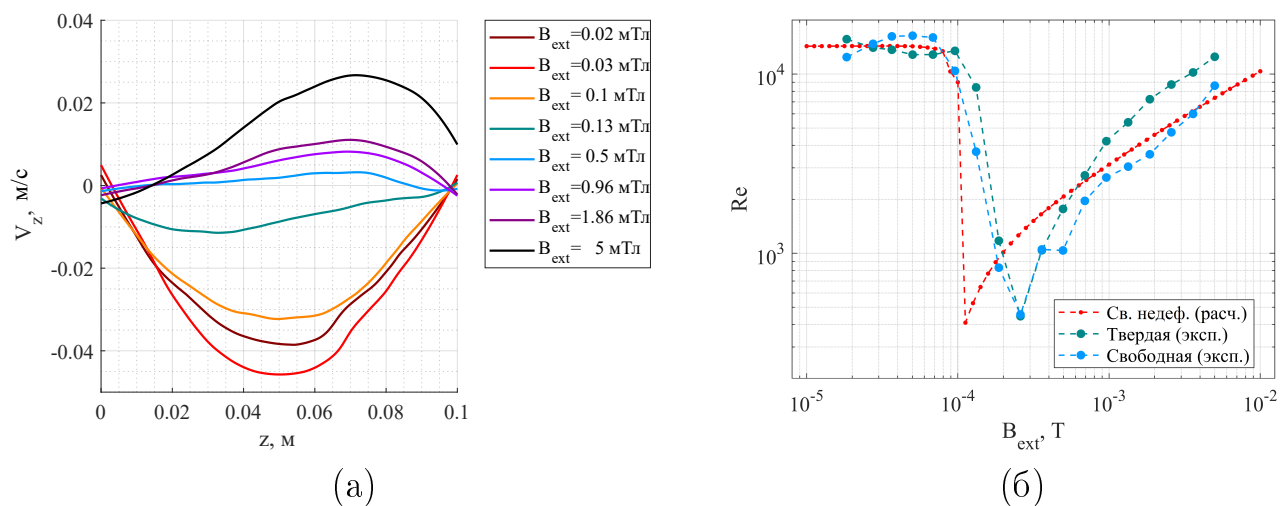


Рис. 5. Профили средней вертикальной скорости V_z , усредненные по датчикам УДА, при фиксированном электрическом токе $I = 1000$ А и различных магнитных полях B_{ext} (а). Число Рейнольдса в зависимости от приложенного вертикального магнитного поля B_{ext} при $I = 1000$ А (б). Экспериментальные данные 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.

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 поля ($B_{ext} = 1.00$ 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.

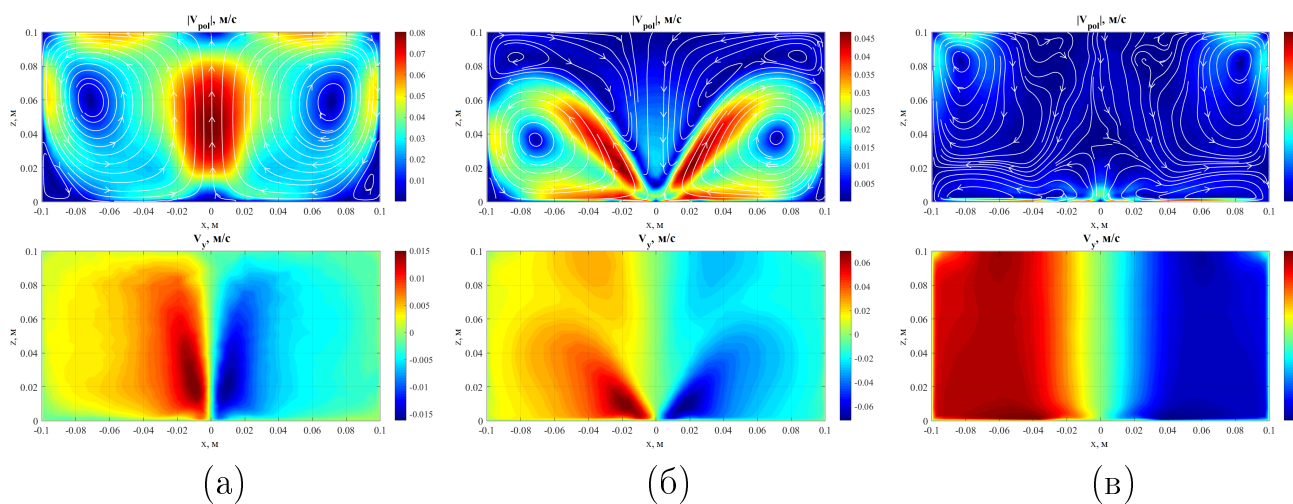


Рис. 6. Расчетные поля полоидальной (сверху) и азимутальной (снизу) компонент скорости в случае свободной недеформируемой верхней границы для различных магнитных полей: (а) – $B_{ext} = 0.02$ мТл, (б) – $B_{ext} = 0.10$ мТл, (в) – $B_{ext} = 1.00$ мТл.

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 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.

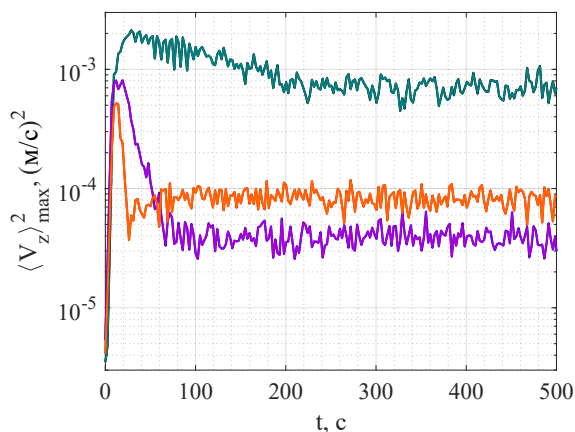


Рис. 7. Изменение со временем плотности энергии, усредненной по датчикам УДА при $I = 1000 \text{ А}$: $B_{\text{ext}} = B_{\text{Earth}}$ (зеленый), $B_{\text{ext}} = B_{\text{Earth}} + 0.1 \text{ мТл}$ (фиолетовый), $B_{\text{ext}} = B_{\text{Earth}} + 0.5 \text{ мТл}$ (оранжевый).

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

Результаты второй главы опубликованы в работах [2, 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. Сверху в ячейку непрерывно поступал аргон для минимизации окисления свободной поверхности жидкого металла (см. рис. 8).

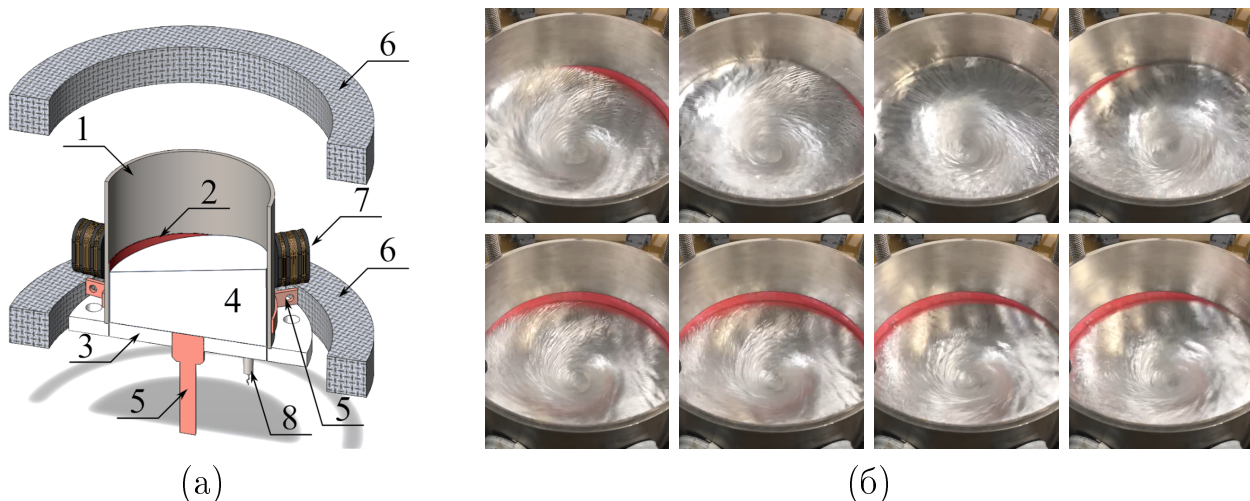


Рис. 8. Схема экспериментальной установки (а): 1 – цилиндрическая ячейка из нержавеющей стали, 2 – изоляционное покрытие, 3 – плексигласовое дно, 4 – жидкий галлиевый сплав GaZnSn, 5 – коаксиальные медные электроды, 6 – катушки Гельмгольца, 7 – индукционный датчик уровня, 8 – ультразвуковой датчик скорости.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

Уровень жидкого металла в ячейке заведомо ниже уровня кольцевого электрода, 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 начал 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 $S = IB_{ext}/\rho R^3 f_0^2$, где I – ток, протекающий через ячейку, B_{ext} – внешнее вертикальное магнитное поле, ρ – плотность галлиевого сплава, R – радиус ячейки, f_0 – собственная частота свободной азимутальной гравитационной волны в цилиндрической ячейке. 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 (параметра S). 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%.

Ключевым моментом в объяснении механизма поддержания волны является тот факт, что электрический ток, протекающий в жидком металле, попадает в ячейку через две строго локализованные области: центральный электрод на дне ячейки и гребень волны, где находится область контакта ЖМ с кольцевым электродом. Локальный подвод больших токов в жидкий металл приводит к

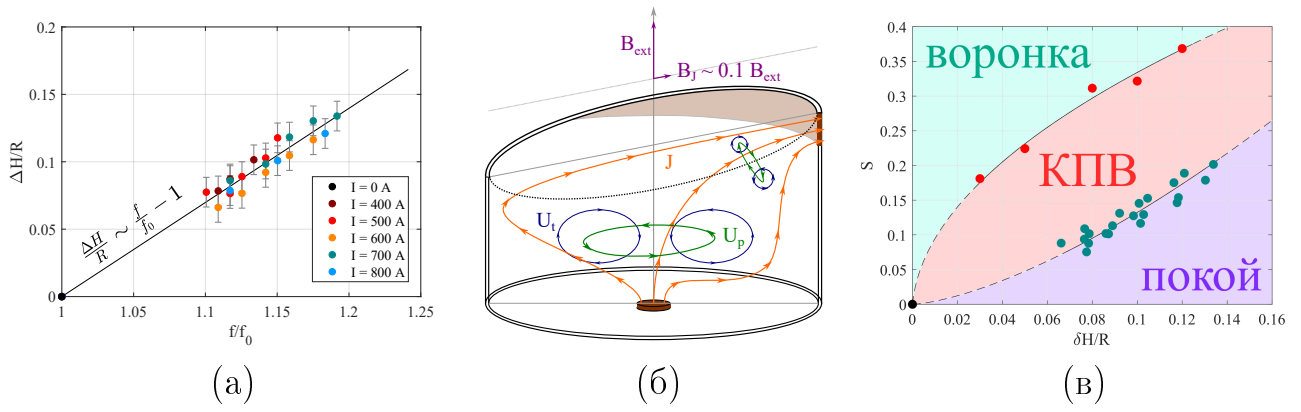


Рис. 9. Безразмерная амплитудно-частотная характеристика КПВ (а). Схематическое изображение механизма поддержания КПВ в МГД-ячейке (б). Область существования режима КПВ на плоскости параметров силового параметра S и относительной высоты электрода $\delta H/R$ (в).

образованию ЭВТ. В отсутствие внешних магнитных полей ЭВТ представляет собой тороидальный вихрь, в центре которого скорость направлена от электрода внутрь ячейки (как было показано в предыдущей главе). Магнитные поля могут кардинально изменить структуру течения. Ток, протекающий через электрод и взаимодействующий с магнитным полем, ортогональным к стенке, вызывает вращение жидкого металла. Когда энергия вращательного течения достигает энергии ЭВТ, происходит полная трансформация структуры течения и исходное ЭВТ практически подавляется. Необходимое для возникновения КПВ магнитное поле значительно превышает пороговое, обеспечивающее 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 осью, параллельной наклоненной поверхности ЖМ, в области локального контакта металла с кольцевым электродом. (см. рис. 9, (б)). Отличие заключается в том, что симметрия нарушена, так как область контакта представляет собой серповидную полоску, и только проекция внешнего поля B_{ext} 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 $B_J \leq 0.1 B_{ext}$. 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 (определяемой скоростью вращения основного вихря, создаваемого силой Лоренца на центральном электроде) и амплитудой (определяемой скоростью горизонтального вихря, создаваемого 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 су-

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 [1, 3].

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. При воздействии внешнего вертикального магнитного поля, в зависимости от его величины 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.

3. 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.

4. Экспериментально показано, что стационарная круговая поверхностная волна может существовать в заполненной жидким металлом цилиндрической ячейке с круговым верхним электродом. Объяснен 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 мо-

гут 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. **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.
2. 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.
3. **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.
4. 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.
5. **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.
6. **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.
7. **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.
8. Лосев Г., **Ельтищев В.** Индукционный метод локализации фронта кристаллизации // [Вестник Пермского университета. Физика](#). — 2023. — апр. — № 1. — С. 57–61.
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.

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 __.08.2025. Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$.
Отпечатано с готового оригинал-макета. Тираж 100 штук.