



Колесниченко Илья Владимирович

**Фундаментальные аспекты магнитной  
гидродинамики жидких металлов в области  
значений параметров, характерных для  
технологических приложений**

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

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.

**Официальные оппоненты:** **Ивочкин Юрий Петрович**, д.т.н. (01.04.14), главный научный сотрудник, заведующий лабораторией теплообмена в энергетических установках, ФГБУН «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук», г. Москва.

**Исаев Сергей Александрович**, д.ф.-м.н. (01.02.05), профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией фундаментальных исследований, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. А.А. Новикова», г. Санкт-Петербург.

**Кривилев Михаил Дмитриевич**, д.ф.-м.н. (05.13.18), доцент, заведующий лабораторией физики конденсированных сред Института математики, информационных технологий и физики, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», г. Ижевск.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Защита состоится **18 октября 2024 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: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: [www.icmm.ru](http://www.icmm.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук ([www.icmm.ru](http://www.icmm.ru)).

Автореферат разослан «\_\_\_» сентября 2024 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 004.036.01,  
доктор физико-математических наук, доцент

А.Л. Зюев

# Общая характеристика работы

## Актуальность и разработанность темы исследования

Интенсивные течения расплавленных металлов, которые генерируются сильными электромагнитными полями или значительными перепадами температуры, играют важную роль в современных технологических приложениях. Изучение этих течений и процессов в реальных условиях их существования либо затруднено, либо невозможно, даже с использованием современных методов и подходов. Это служит причиной проведения исследований моделей этих процессов в лабораторных масштабах при существенно более низких значениях реальных параметров и размеров. Вопрос возможности распространения полученных результатов на реальные масштабы процессов остается открытым. Поэтому в данной работе основной упор делается на изучение процессов в жидких металлах, происходящих в области значений параметров, характерных для технологических приложений, т.е. при интенсивных силовых воздействиях и высоких температурах.

Генерация течений электромагнитными силами, их взаимодействие с магнитными полями, свойства и влияние на другие процессы изучает магнитная гидродинамика (МГД). Жидкий металл редко находится в изотермическом состоянии, поэтому его течения подвержены действию сил плавучести. Металлы в расплавленном состоянии имеют высокую электропроводность и теплопроводность, и, как следствие, низкое число Прандтля. Возможность детального изучения МГД-явлений и конвекции в жидкостях с низким числом Прандтля появилась сравнительно недавно благодаря развитию вычислительной техники, так как эти расчеты требуют использования мелких сеток. Сложности экспериментальных исследований МГД-процессов и конвекции в жидких металлах (например, натрия) обусловлены их химической активностью и высокой температурой.

Объектами исследования диссертационной работы выступают гидродинамические и термодинамические процессы в жидких металлах. Они происходят при нелинейных взаимодействиях между электромагнитными и температурными полями, и созданными ими вихревыми течениями. Изучается их влияние на процессы теплопереноса, кристаллизации генерации и измерения транзитных потоков. Адекватное описание указанных явлений и процессов требует разработки новых теоретических и экспериментальных подходов.

Практический интерес к магнитогидродинамическим и теплофизическим процессам в жидких металлах обусловлен задачами металлургии и энергетики. В сфере энергетики электровихревые течения возникают в жидкометаллических батареях с локализованным подводом тока. Применение жидкого металла как теплоносителя в атомных станциях на быстрых нейтронах и в разрабатываемых термоядерных реакторах вызывает интерес к изучению конвективного теплообмена в натрии и взаимодействию разнотемпературных потоков с целью определения опасных с точки зрения термоциклической усталости частот. В

металлургии электромагнитные силы нашли применение благодаря возможности создания течения без прямого контакта с расплавами, находящимися при высоких температурах. Электромагнитные насосы активно используются для перекачивания жидкого металла как на литейном производстве, так и на атомных станциях, а электромагнитные перемешиватели позволяют гомогенизировать состав и размер зерна слитка. Исследования возникающих физических эффектов в данных процессах еще далеки от завершения.

В физических экспериментах наиболее часто применяют такие металлы, как галлий, ртуть, оловянно-свинцовые сплавы, натрий. Их непрозрачность исключает возможность применения широко используемых оптических полевых и лазерных методов для изучения течений. Поэтому используются такие способы измерения, как термопарные и оптоволоконные зонды, кондукционные датчики и ультразвуковой доплеровский анемометр, который активно использовался в диссертационном исследовании. Эти методы подходят для относительно низко-температурных металлов, таких, как галлий и ртуть. Жидкий натрий широко применяется в научных исследованиях из-за удачного сочетания его физических свойств. К тому же, только результаты, полученные в экспериментах с жидким натрием, можно использовать для верификации расчетных кодов, с помощью которых ведется разработка атомных станций с натриевым теплоносителем. При этом речь идет о процессах, происходящих при высоких температурах. Работы с натрием требуют создания установок и стендов повышенной безопасности. Это вызывает необходимость развития и совершенствования методов эксперимента с жидкими металлами.

Теоретические, численные и экспериментальные исследования теплофизических и МГД-процессов в жидких металлах активно велись и ведутся учеными разных стран. Рост числа публикаций свидетельствует о важности и актуальности исследований по этой теме. Здесь и далее упомянуты фамилии лишь некоторых, далеко не всех ученых, которые внесли существенный вклад в развитие данного направления исследований, а также некоторые научные организации.

Электровихревые течения и связанные с ними приложения изучались такими учеными, как Щербинин, Бояревич, Чудновский, Жилин (СССР), Ивочкин, Казак (Россия), Kelley, Sadoway, Zikanov (США), Wier, Stefani, Weber (Германия), Davidson (Великобритания), Nore, Herreman (Франция). Течения, вызванные воздействием переменных магнитных полей, турбулентность этих течений, и их влияние на процессы перемешивания и кристаллизации изучали Повх, Чекин, Капуста, Гельфгат, Цинобер (СССР), Борисов, Тимофеев, Цаплин, Хрипченко, Кривилев, Любимова (Россия), Branover, Golbraikh (Израиль), Moffat, Pericleous (Великобритания), Asai, Yasuda, Ozoe, Tagawa (Япония), Gerbeth, Eckert, Cramer, Naske (Германия). Конвективные течения и конвективный теплообмен изучали Гершуни, Жуховицкий, Зимин (СССР), Фрик, Генин, Свиридов (Россия), Grossman, Schumacher (Германия), Cioni, Sommeria (Франция), Verzicco (Италия). Генерация транзитных течений, их взаимодействие с вихревыми течениями и связанные с ними приложения изучали Кирко, Верте, Вольдек, Цинобер, Охременко, Лиелпетер, Колесников (СССР), Кириллов, Преслицкий (Россия), Thess,

Büler (Германия), Westin (Швейцария), Cuevas (Мексика), Fautrelle, Etay, Moreau, Chopart (Франция), Kenjeres (Нидерланды), Hosseni, Kimura (Япония).

Наиболее активно в исследования термодинамических и МГД-процессов в жидких металлах вовлечены такие научные институты, как Institute of Fluid Dynamic (г. Дрезден-Россендорф, Германия), НИУ Московский энергетический институт (г. Москва), University of Göttingen (г. Геттинген, Германия), ОИВТ РАН (г. Москва), Сибирский Федеральный университет (г. Красноярск), Technische Universität Ilmenau (г. Ильменау, Германия), ИМСС УрО РАН (г. Пермь), НИИЭФА им Ефремова (г. Санкт-Петербург), Institute of Electrotechnology (г. Ганновер, Германия), Ben-Gurion University (г. Беер-Шева, Израиль), LIMSI CNRS (г. Париж, Франция) и др.

Таким образом, научная актуальность темы исследования обусловлена как развитием фундаментальных знаний о поведении магнитогидродинамических и конвективных течений жидкого металла, так и практическими задачами металлургической и энергетической промышленности по совершенствованию существующих и созданию новых МГД-технологий.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является разработка единого магнитогидродинамического подхода и решение с его помощью группы задач исследования течений жидкого металла и их влияния на процессы кристаллизации, теплообмена, регистрации расхода и генерации перепада давления в контексте проблем металлургии и энергетики. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи.

1. Выяснение особенностей поведения крупномасштабных полоидальных и азимутальных течений в цилиндрических ячейках с локализованным подводом электрического тока во внешнем магнитном поле.

2. Определение характеристик и измерение свойств турбулентности течений, созданных бегущими и вращающимися магнитными полями в цилиндрических ячейках, а также поиск конфигураций этих полей, создающих наиболее развитое азимутальное и полоидальное течение.

3. Определение влияния воздействия течений, созданных бегущими и вращающимися магнитными полями, на процесс направленной кристаллизации и распределение свойств затвердевшего металла.

4. Анализ в физическом эксперименте поведения крупномасштабной конвективной циркуляции жидкого натрия в короткой цилиндрической ячейке при разных углах наклона его оси относительно вертикали.

5. Определение зависимости характеристик турбулентного конвективного теплообмена путем экспериментов в цилиндрических ячейках с жидким натрием, имеющих различные отношения длины к диаметру, от угла наклона их оси относительно вертикали.

6. Определение характеристик процессов обтекания магнитного препятствия и генерации транзитных течений в цилиндрических каналах, а также разработка методик и устройств для создания и контроля интенсивных потоков.

7. Анализ температурных пульсаций в области течения и на стенке цилиндрического канала в физическом эксперименте по смешению разнотемпературных потоков жидкого натрия.

### **Научная новизна**

1. Впервые объяснены причины потери интенсивности крупномасштабного полоидального течения во внешнем магнитном поле, а также экспериментально получены характеристики этого течения.

2. Впервые показана возможность определения с помощью кросс-корреляционного вейвлет-анализа достоверной части турбулентных спектров течений, созданных бегущими или вращающимися магнитными полями, а также возможность создания развитого в объеме ячейки течения путем чередования направления вращающегося поля по высоте.

3. Впервые в эксперименте исследовано, что использование совокупности бегущего и вращающегося магнитных полей существенно улучшает и гомогенизирует распределение свойств цилиндрических слитков, а управление характеристиками полей позволяет влиять на поведение границы твердой и жидкой фазы.

4. Впервые обнаружено наличие интенсивных колебаний крупномасштабной конвективной циркуляции в коротком канале при углах наклона его оси относительно вертикали вплоть до 40 градусов.

5. Впервые экспериментально получены зависимости характеристик турбулентного конвективного теплообмена в цилиндрических каналах с различным аспектным соотношением от угла их наклона относительно вертикали и осевого перепада температуры.

6. Впервые определены характеристики пульсаций течения, возникающих при обтекании магнитного препятствия в цилиндрическом канале, а также предложена методика контроля электропроводности среды на основе поиска экстремума на характеристиках электромагнитного индуктора бегущего поля.

7. Впервые получены экспериментальные характеристики процесса смешения разнотемпературных потоков натрия с оценкой частоты пульсации температуры на наружной поверхности канала.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Общая теоретическая значимость результатов работы заключается в получении систематических теоретических и экспериментальных знаний, необходимых для понимания эволюции крупномасштабных течений жидкого металла, а также влияния этих течений на процессы кристаллизации, теплопереноса и генерации перепада давления. Значимость в плане методов и подходов состоит в разработке и создании комплексных верифицированных математических моделей и экспериментальных установок для изучения этих процессов, что создает задел для проведения дальнейших исследований.

1. Результаты исследования вихревых течений, их взаимодействия, устойчивости, турбулентности вносят существенный вклад в теорию магнитогидродинамических течений, а разработанные методы и подходы развивают теорию физического эксперимента.

2. Результаты экспериментального исследования конвективного и вынужденного теплообмена в жидком натрии и разработанные экспериментальные методики существенно дополняют теорию теплофизических процессов в средах с низким числом Прандтля.

3. Результаты изучения вихревых течений жидких металлов существенно развивают теорию магнитогидродинамического воздействия на расплавленные металлы и сплавы, и ее приложения к процессам перемешивания, кристаллизации, генерации и контроля транзитных потоков.

Общая практическая значимость результатов работы состоит в совершенствовании существующих технологий и создании заделов для перехода к технологиям следующего поколения в энергетической и металлургической промышленности в рамках инновационного развития экономики и импортозамещения.

1. На основе результатов, полученных при изучении математических моделей и физических экспериментов, разработаны и созданы новые высокотемпературные электромагнитные насосы, перемешиватели, расходомеры со 2-3 уровнем готовности технологии для предприятий металлургии и атомной промышленности; жидкометаллический натриевый стенд используется для проведения приемо-сдаточных испытаний аппаратов для атомных станций.

2. Результаты исследования поведения электровихревых течений во внешних магнитных полях необходимо учитывать при разработке и конструировании жидкометаллических батарей, дуговых печей, аппаратов дуговой сварки.

3. Результаты изучения конвективного теплообмена в цилиндрическом объеме и теплообмена при смешении разнотемпературных потоков жидкого натрия использованы для верификации расчетных кодов при конструировании новых электростанций с жидкометаллическими теплоносителями.

### **Методология и методы исследования**

Исучаемые в работе математические модели основаны на уравнениях магнитной гидродинамики. В большинстве случаев применялось электродинамическое приближение, позволяющее отдельно решать задачу поиска электромагнитных сил и задачи гидродинамики и теплопереноса. Часть задач решена в безындукционном приближении. Все задачи исследовались в трехмерной постановке. Численная реализация была выполнена автором в лицензионной программной среде Ansys Emag на языке APDL (электромагнитная часть), Ansys Fluent с применением подпрограмм UDF, написанных на языке C (гидродинамическая и теплофизическая части), Ansys Fluent с MHD модулем (процессы в безындукционном приближении). Расчеты выполнены на многопроцессорных компьютерах с использованием параллельных вычислений. Для переноса полей

с электромагнитной на гидродинамическую сетку применялись программы, написанные на языках Matlab и Python. Все расчеты проверялись на сеточную сходимость и устойчивость.

Обработка результатов вычислений, экспериментов, построение графиков и полей проводилась с помощью программ, написанных на языках Matlab и Python. Используемые в работе Фурье, вейвлет и кросскорреляционный анализы были тщательно протестированы на модельных сигналах. Для локализации на фотографиях зерен в задачах кристаллизации, а также для обработки изображений тепловизора в задачах теплообмена, использовались оригинальные программы, написанные автором на языке Matlab, прошедшие тестирование.

Экспериментальные исследования выполнены на созданных оригинальных установках, которые разработал автор в лицензионной конструкторской среде SolidWorks. В большинстве исследований в качестве жидкого металла использовалась галлиевая эвтектика, жидкая при комнатной температуре. Для получения информации о поведении профиля скорости применялись уникальные в РФ ультразвуковые доплеровские анемометры (DOP-2000 и DOP-5000). Измерительные системы дополнялись оригинальными кондукционными датчиками скорости для изучения турбулентности. Термопары использовались для получения температуры и восстановления профилей скорости с помощью кросс-корреляционного анализа. Для получения распределения температуры на стенках каналов использовалась высокоскоростная тепловизионная камера FLIR SC5000. Существенная часть работ выполнена на жидком натрии, что вызвало необходимость создания целого комплекса основных и вспомогательных установок и систем для обеспечения мер повышенной безопасности.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Причиной потери интенсивности крупномасштабного полоидального течения в цилиндрической ячейке с локализованным подводом электрического тока является формирование дополнительного полоидального течения вследствие появления аксиального градиента центробежной силы.

2. С помощью кросс-корреляционного вейвлет-анализа можно выделить достоверную часть турбулентных спектров течения, созданного бегущими или вращающимися магнитными полями, а чередование направления вращающегося магнитного поля по высоте цилиндрической ячейки приводит к наиболее развитому азимутальному и полоидальному течениям.

3. Одновременное воздействие бегущего и вращающегося магнитных полей в ходе процесса кристаллизации существенно улучшает и гомогенизирует распределение свойств слитков.

4. В короткой цилиндрической ячейке пульсации конвективной крупномасштабной циркуляции натрия сохраняются вплоть до 40 градусов наклона относительно вертикали, а использование в эксперименте теплообменников с индукторами повышает однородность граничных условий на торцах канала.

5. В цилиндрических ячейках с жидким натрием с различным отношением длины к диаметру зависимости интенсивности теплообмена от угла наклона



близки по форме и имеют экстремум при наклоне около 60 градусов, при этом характеристики пульсаций скорости при малых углах показывают существенное отличие поведения течений в короткой и длинной ячейках.

6. В цилиндрическом канале неизотермическое обтекание локализованного магнитного препятствия порождает слабозатухающие по потоку пульсации, а положение экстремума на характеристиках электромагнитного индуктора бегущего поля определяется электропроводностью среды.

7. В зоне смещения разнотемпературных потоков натрия возникают неизотермические пульсации скорости, приводящие к появлению на наружной стенке канала областей с пульсирующей температурой.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Результаты работы получены путем математического моделирования либо физического эксперимента. Численные исследования и обработка результатов расчетов и экспериментов выполнялись в коммерческих проверенных научным сообществом пакетах программ («Ansys», «Matlab»). В большинстве работ выполнена верификация математических моделей путем сравнения результатов расчетов и экспериментов. Верификация показала качественное, а в большинстве случаев и количественное, согласие результатов. В экспериментах использована измерительная аппаратура, произведенная фирмами, имеющими высокую репутацию в мировом научном сообществе («Signal Processing», «Lakeshore», «National Instruments», «Agilent», «FLIR»), при этом методики были тестированы в специальных экспериментах, а результаты измерений воспроизводились в однотипных реализациях.

Результаты лично докладывались автором и обсуждались на следующих конференциях: Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (2011 г., Нижний Новгород; 2019 г., Уфа; 2023 г., Санкт-Петербург); Российская конференция по магнитной гидродинамике (2012, 2015, 2018, 2021, 2024 гг., Пермь); International conference on fundamental and applied magnetohydrodynamics «PAMIR» (2011 г., Борго, Франция; 2019 г., Реймс, Франция); Зимняя школа по механике сплошных сред (2013, 2015, 2017, 2019, 2023 гг., Пермь); International symposium on ultrasonic doppler methods for fluid mechanics and fluid engineering «ISUD» (2012 г., Дрезден-Россендорф, Германия); Российская национальная конференция по теплообмену «РНКТ» (2018, 2022 гг., Москва); Международная конференция «Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии» (2019, 2022 гг., Ижевск); International conference on electromagnetic processing of materials «EPM» (2003 г., Лион, Франция); Международная конференция «Advanced problems of electrotechnology» (2020 г., Екатеринбург); Всероссийская конференция «Пермские гидродинамические научные чтения» (2023 г., Пермь); European fluid mechanics conference «EFMC» (2012 г., Рим, Италия); Международная конференция «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (2021 г., Москва; 2023 г., Нижний Новгород); Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (2020 г., Москва); Международная конференция «Проблемы

термоядерной энергетики и плазменные технологии» (2019 г., Москва); семинар Института механики сплошных сред УрО РАН под руководством академика РАН В.П. Матвеевко.

Представленные исследования частично выполнены при поддержке грантов РФФИ (проекты 18-41-06201, 22-19-20106), РФФИ (проекты 10-08-96048, 11-08-00416, 13-01-96042, 14-08-96014, 17-48-590539, 16-01-00459, 17-48-590539, 20-48-96015), проектов правительства Пермского края МИГ (проекты С-26/251, С-26/564), в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024), а также в рамках государственных заданий (темы АААА-А19-119012290101-5, АААА-А19-119021490135-0, 122030200191-9).

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.1.9 (01.02.05) – «Механика жидкости, газа и плазмы».

### **Публикации**

Всего по теме диссертации опубликовано 85 печатных работ. Из них 30 публикаций – это статьи [1–30] в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов докторских диссертаций и реферативные базы «Scopus» или «Web of Science». Также опубликовано 55 работ в трудах и тезисах всероссийских или международных конференций. Среди 30 статей 7 опубликованы в изданиях К1 либо Q1: [1–3, 8, 15, 19, 20], 6 опубликованы в изданиях К2 либо Q2: [5, 6, 17, 21, 23, 26].

### **Личный вклад автора**

Математические модели и вычислительные коды были разработаны и созданы автором самостоятельно в работах [1–5, 7, 9–12, 18, 24, 27–30]. Многовариантные вычисления в этих исследованиях были проведены автором самостоятельно. Автор разработал и создал большинство наиболее трудоемких программ обработки вычислительных данных в работах [9–11, 14, 16, 18, 27, 30] и данных экспериментов по анализу результатов, полученных ультразвуковым доплеровским анемометром [9, 14, 16], кондукционными датчиками скорости [8], термопарами [19], тепловизором [26], микроскопом [18]. В постановке задач в большинстве исследований вклад автора является определяющим [1–5, 9–14, 16–18, 24, 26–30], либо существенным в работах [6–8, 15, 18–23, 25]. Автор активно участвовал в обобщении результатов и формировании выводов всех исследований, а также написании всех статей. Автор внес значительный вклад в разработку экспериментальных установок и методик экспериментов в работах [1–3, 5, 6, 8–10, 12, 14, 16, 17, 19–27, 29, 30]. Чертежи экспериментальных установок выполнены автором лично, а установки собраны и налажены при его активном участии. Ряд экспериментов выполнен при непосредственном участии автора [8, 14, 16, 19–27, 29], часть экспериментов проведена под руководством автора [1–3, 5, 6, 9, 10, 12, 14, 16, 30]. Значительная часть результатов расчетов и экспериментов обрабатывалась автором лично [8, 14, 16, 18, 19, 24, 26, 29, 30], или под руководством автора, или при его непосредственном участии [1–6, 8–13, 15, 17, 20–23, 25].

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 345 страниц с 232 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 336 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В **первой главе** изложены результаты исследований крупномасштабных вихревых течений в цилиндрических ячейках с локализованным подводом электрического тока. В параграфе **1.1** описываются условия возникновения вихревых течений в случае локализованного подвода электрического тока и их особенности. Электромагнитная сила возникает в результате взаимодействия электрического тока и собственного магнитного поля. Неоднородность растекания электрического тока приводит к появлению завихренности электромагнитной силы, что вызывает развитие электровихревого течения (ЭВТ). Действие внешнего магнитного поля, даже такого слабого, как магнитное поле Земли, способно существенно изменить картину течения. Причиной является появление азимутальной компоненты электромагнитной силы и дополнительного закрученного течения, что значительно усложняет процесс, вызывая существенные искажения ЭВТ<sup>1</sup>. Для того, чтобы подробно разобраться в причинах этого явления, выполняется данное исследование. Мотивация обусловлена важной ролью этих течений в перспективных системах накопления энергии<sup>2</sup>.

В параграфе **1.2** описано исследование электровихревых течений в цилиндрических ячейках. В экспериментальной установке (рис. 1а) ячейка со стенкой из нержавеющей стали была заполнена галлиевой эвтектикой  $\text{Ga}_{86.3}\text{Zn}_{10.8}\text{Sn}_{2.9}$  (масс. %). Ток подводился с помощью коаксиального токоподвода к центру и боковой поверхности ячейки. Положение торца центрального стержня-катода было выровнено с уровнем дна ячейки. Для измерения скорости в жидком металле использовалась система датчиков ультразвукового доплеровского анемометра (УДА), расположенных снаружи дна ячейки. Применение датчиков, установленных снаружи плексигласовых стенок ячейки с жидкой галлиевой эвтектикой, является наилучшей комбинацией, обеспечивающей наименьшее акустическое сопротивление на границе раздела<sup>3</sup>. Отдельный вопрос связан с влиянием геометрии стенки на качество сигнала. Он потребовал проведения отдельного

<sup>1</sup> Davidson P., Kinnear D., Lingwood R., Short D., He X. The role of Ekman pumping and the dominance of swirl in confined flows driven by Lorentz forces // Eur. J. Mech. B/Fluids. 1999. Vol. 18. P. 693–711.

<sup>2</sup> Kelley D., Weier T. Fluid mechanics of liquid metal batteries // Applied Mechanics Reviews. 2018. P. 70:020801.

<sup>3</sup> Poelma C. Ultrasound Imaging Velocimetry: a review // Experiments in fluids. 2017. P. 58:3.

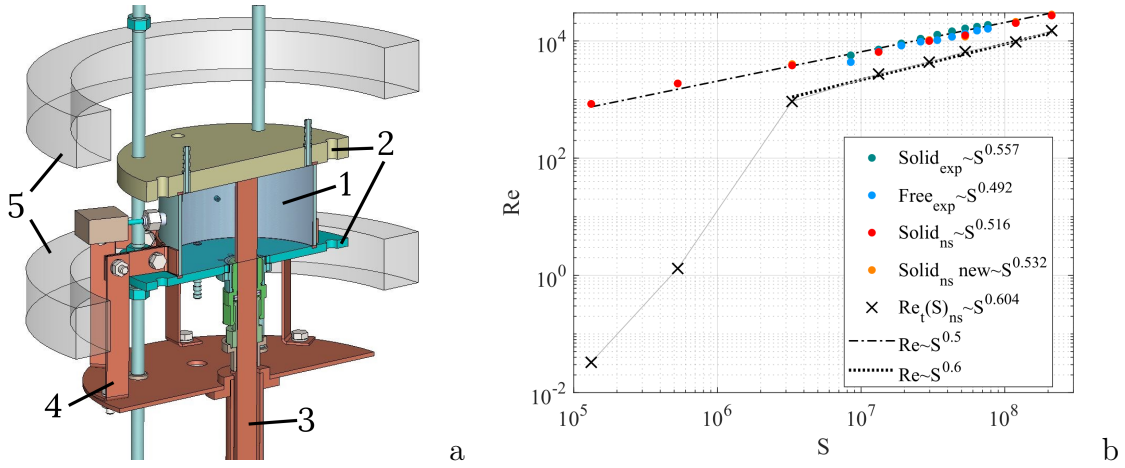


Рис. 1. (а) – схема экспериментальной установки: 1 – жидкий металл, 2 – торцы ячейки, 3 – катод, 4 – анод, 5 – катушки Гельмгольца; (б) – зависимости крупномасштабного  $Re$  (точки) и турбулентного  $Re_t$  (черные крестики) чисел Рейнольдса от параметра ЭВТ  $S$ : экспериментальные данные для  $Re$  показаны зелеными точками для твердой верхней границы и синими точками для свободной поверхности, численные данные показаны красными точками ( $Re$ ) и черными крестиками ( $Re_t$ )

экспериментального исследования на галлиевом контуре, в ходе которого были выработаны рекомендации по выбору параметров стенки. Математическая модель основана на уравнениях МГД в электродинамическом приближении. Интенсивность силового воздействия описывается безразмерным параметром  $S = \mu_0 I^2 / 4\pi^2 \rho \nu^2$ , где  $I$  – сила тока,  $\rho$  и  $\nu$  – плотность и вязкость. Расчеты и эксперименты показали, что ЭВТ демонстрирует пороговую неустойчивость (рис. 1b), которая проявляется в осцилляции крупномасштабного течения. В данном случае вводятся два числа Рейнольдса  $Re = U_{max} R / \nu$  и  $Re_t = u_{r.m.s.} R / \nu$ . Первое число  $Re$  определяется через максимальную среднюю скорость вдоль луча УДА,  $U_{max}$  (где  $R$  – радиус ячейки) и характеризует крупномасштабное течение в ячейке. Второе число  $Re_t$  определяется через среднеквадратичное отклонение флуктуаций вертикальной скорости и характеризует интенсивность пульсаций. Эксперименты позволили верифицировать математическую модель. Численно изучено влияние высоты слоя и интенсивности электромагнитной силы на колебательные характеристики течения и построены кривые, отделяющие область параметров, обеспечивающих устойчивость.

Параграф 1.3 посвящен изучению воздействия внешних магнитных полей на электровихревое течение. В эксперименте постоянное внешнее магнитное поле создавалось катушками Гельмгольца. Действие внешнего магнитного поля приводит к возникновению переходного колебательного режима, после которого течение переходит в стационарное состояние. Исследования показали, что существует интервал значений индукции внешнего поля, при которых кинетическая энергия полоидальной компоненты скорости существенно уменьшается. Обнаружено, что это происходит и для свободной, и для твердой верхней границы одинаково. Численные исследования позволили найти причину, заключающуюся

в формировании дополнительного полоидального течения вследствие аксиального градиента центробежной силы (рис. 2). Поэтому увеличение значения индукции магнитного поля приводит к изменению направления вихревого течения (рис. 3b). Найдены интервалы значений внешнего магнитного поля, при которых полоидальная энергия снижается (рис. 3b).

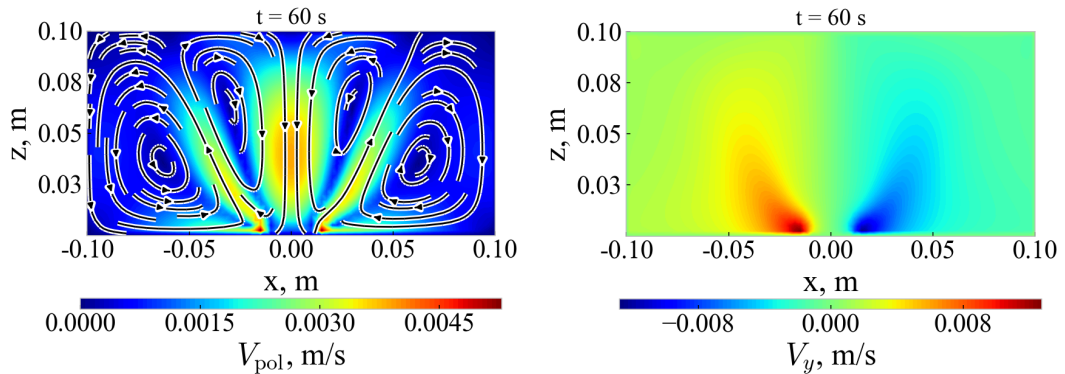


Рис. 2. Примеры вертикального сечения мгновенного поля полоидальной (слева) и азимутальной (справа) компонент скорости

Параграф 1.4 посвящен изучению влияния дополнительных факторов, связанных с электромагнитными силами, на вихревые течения. Численно установлено, что на появление зоны снижения полоидальной энергии никак не влияет ни время, за которое электромагнитные силы достигнут максимального значения, ни последовательность подключения магнитного поля тока или внешнего магнитного поля. Следующая серия расчетов и экспериментов была посвящена изучению влияния растекания тока на ход процесса. В данном случае центральный стержень-катод полностью пронизывал ячейку по высоте (как показано на рис. 1a). Ожидалось, что это приведет к выравниванию интенсивности радиальной компоненты тока по высоте ячейки. Однако, расчеты и эксперименты показали, что результаты с локализованным катодом и коаксиальным токоподводом оказались близки (рис. 3b), несмотря на более чем десятикратную разницу в электропроводности твердой меди и галлиевой эвтектики. Результаты вычислений подтверждают, что при использовании существующих металлов градиент тока всегда возникает. Чтобы этот градиент не возникал, электропроводности коаксиальных токоподводов и жидкого металла должны различаться на несколько порядков. Именно этот случай приводит к чистому вращению жидкого металла с генерацией полоидальных вихрей вследствие экмановской подкачки. В данном случае отсутствуют области снижения полоидальной энергии (рис. 3b). Наконец, численные исследования показали, что только добавление в систему магнитного поля, которое генерируется подводными токовыми шинами, способно существенно повлиять на положение и глубину области подавления полоидальной энергии течения.

Параграф 1.5 посвящен обсуждению результатов, а затем следуют выводы. Результаты первой главы опубликованы в работах [1–6].

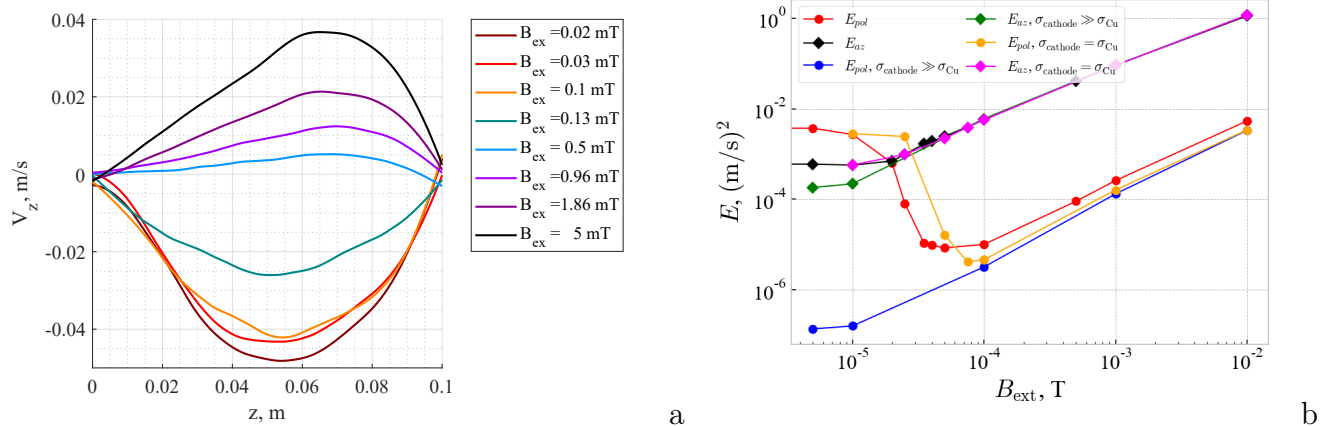


Рис. 3. (а) – осредненные профили, полученные ультразвуковым доплеровским анемометром; (б) – энергия полоидального (точки) и азимутального (ромбы) течений в равновесном состоянии в зависимости от внешнего магнитного поля; цвета соответствуют: красный и черный – локализованный катод, синий и зеленый – коаксиальный токоподвод с катодом, имеющим высокую электропроводность, оранжевый и розовый – коаксиальный токоподвод с медным катодом

Во **второй главе** исследуются течения в цилиндрических ячейках, вызванные действием бегущих и вращающихся полей. В параграфе **2.1** описываются задачи, связанные с генерацией развитых во всем объеме течений и их влиянием на физические процессы в жидком металле. Бегущее и вращающееся магнитные поля реализуют бесконтактный индукционный способ генерации электромагнитной силы в объеме электропроводящей среды<sup>4</sup>. Действие только вращающегося поля создает крупномасштабное азимутальное течение, на фоне которого возникают слабые вторичные полоидальные течения при наличии твердых торцевых стенок. Исследования данной главы вызваны необходимостью повышения интенсивности полоидальных течений для генерации наиболее развитого поля скорости в ячейке. Одним из важных в контексте этой проблемы критериев является характеристика турбулентности возникающих течений, что также потребовало изучения. Существуют разные способы повышения интенсивности полоидального течения, например, с помощью варьирования по времени интенсивности электромагнитной силы<sup>5</sup>. В работе рассматриваются два способа. Первый заключается в дополнительном воздействии бегущим магнитным полем, которое создает крупномасштабное полоидальное течение. Второй способ заключается в чередовании вдоль оси ячейки направления вращающегося магнитного поля.

Параграф **2.2** посвящен исследованию течений, вызванных отдельным и совместным действием бегущих и вращающихся магнитных полей. Применяется описанная ранее математическая модель МГД-процессов в электродинамическом

<sup>4</sup> Moffatt H. K. Electromagnetic stirring // *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*. 1991. Vol. 3, no. 5. P. 1336–1343.

<sup>5</sup> Vogt T., Grants I., Rabiger D., Eckert S., Gerbeth G. On the formation of Taylor-Görtler vortices in RMF-driven spin-up flows // *Experiments in Fluids*. 2012. Vol. 52. P. 1–10.

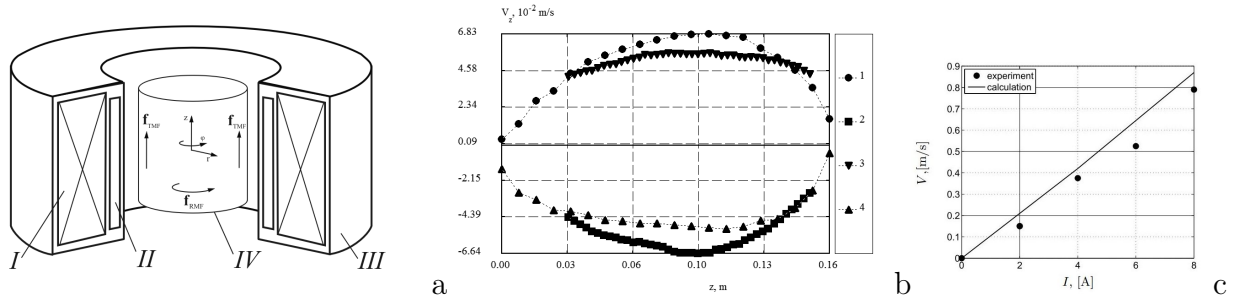


Рис. 4. (а) – схема:  $I$  – индуктор для генерации бегущего и вращающегося магнитных полей с теплоизоляцией  $II$  и корпусом  $III$ ,  $IV$  – ячейка с электропроводной средой; (б) – верификация на галлиевой эвтектике для случая бегущего магнитного поля: расчет (1,4) и эксперимент (2,3); (с) – верификация на алюминии для случая вращающегося магнитного поля

приближении. Генерация полей производится внешним индуктором (рис. 4а), представляющим собой систему с обмотками и единым ферромагнитным сердечником сложной формы. По обмоткам течет переменный ток определенной частоты и силы, а сами обмотки включены в трехфазную конфигурацию, реализующую бегущее либо вращающееся магнитное поле. Ячейка с жидким металлом помещена внутрь индуктора. Это приводит к генерации азимутальной или полоидальной электромагнитной силы вследствие действия вращающегося или бегущего магнитного поля, соответственно. Для верификации расчетов выполнены экспериментальные исследования действия вращающегося и бегущего магнитных полей на твердое металлическое тело цилиндрической формы. Обнаружено наличие экстремума на зависимости момента электромагнитной силы от частоты тока обмоток, создающих вращающееся магнитное поле. Экспериментальное исследование аксиальной компоненты поля скорости течения проводилось с помощью УДА в ячейке, заполненной галлиевой эвтектикой (рис. 4б). Исследование скорости в жидком алюминии с помощью датчика-турбины позволило определить характеристики азимутальной компоненты скорости (рис. 4с). Верификация результатов расчетов и экспериментов доказала надежность математического моделирования. В ходе цикла исследований выяснены основные характеристики и особенности крупномасштабных колебательных режимов течений.

В параграфе 2.3 описано исследование течений, вызванных действием вращающихся магнитных полей с чередованием направления вращения. Во вращающемся магнитном поле формируется квази-твердотельное вращение со слабым полоидальным течением (рис. 5а). Это же демонстрирует эволюция кинетической энергии. Если вращающееся магнитное поле меняет направление по высоте индуктора, то сначала формируются вихри, масштаб которых соответствует размеру каждого кольца индукторов вращающегося поля (рис. 5б). Затем формируется нестационарное колебательное течение сложной формы. В данном случае полоидальное и азимутальное течения являются одинаково развитыми. Этот результат подтверждает эволюция кинетической энергии. При увеличении

интенсивности электромагнитной силы картина течения остается нестационарной, а интенсивность увеличивается. Изучен начальный этап развития течения и получена зависимость времени развития течения от интенсивности электромагнитной силы. Исследовано влияние течения на гомогенизацию пассивной примеси. Разработан индуктор нового типа, реализующий описанный способ генерации электромагнитных сил.

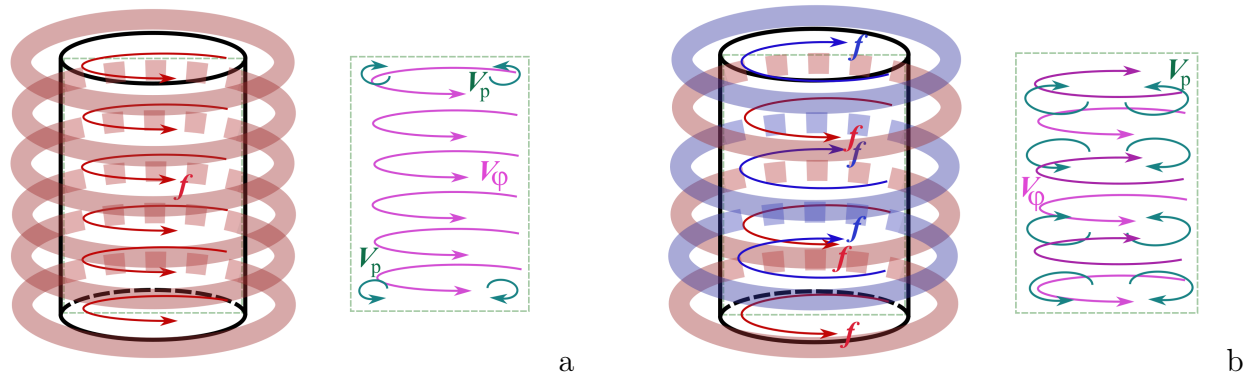


Рис. 5. Схема действия сонаправленных (а) и чередующихся по направлению (б) вращающихся магнитных полей

Параграф 2.4 посвящен экспериментальному определению характеристик турбулентности течений, измеренных в условиях действия переменных магнитных полей. Характеристики турбулентных пульсаций скорости, а также наклоны спектров, необходимы для оценки способности течения гомогенизировать температуру и включения по всему объему жидкого металла. В данном случае метод УДА не подходит, т.к. он не позволяет проводить измерения с высокой частотой. Для получения информации о течении в локализованной области жидкого металла в данном случае лучше всего подходят кондукционные датчики скорости<sup>6</sup> (КДС). Другие методики не могут быть использованы из-за ограниченности пространства для размещения датчика внутри индуктора. КДС располагались на разных расстояниях по высоте ячейки и регистрировали сигналы  $v(t)$  вблизи ее внутренней поверхности. Проблема заключается в том, что на их показания оказывают влияние электрические и магнитные поля от индуктора, которые и создают эти течения. Чтобы понять, на какую часть турбулентного спектра скорости это оказывает влияние, в ходе измерений также регистрировался сигнал  $b(t)$  от холловского датчика магнитного поля, и применялся вейвлет-анализ. Определялись вейвлет-коэффициенты  $W_v(f, t)$ ,  $W_b(f, t)$  и спектры  $M_v(f)$ ,  $M_b(f)$  для сигналов КДС и магнитного поля, соответственно, где  $f$  – частота. Далее, для определения влияния внешнего магнитного поля на показания КДС вычислялась вейвлет кросс-корреляция  $r_w(f) = \int W_v(f, t)W_b^*(f, t)dt / (M_v(f)M_b(f))^{1/2}$ . Найдены интервалы частот, в которых информация о спектре турбулентных пульсаций является достоверной. Это те интервалы, где уровень  $r_w$  существенно меньше единицы (рис. 6а). Показано, что с изменением частоты магнитного

<sup>6</sup> Cramer A., Varshney K., Gundrum T., Gerbeth G. Experimental study on the sensitivity and accuracy of electric potential local flow measurements // Flow Measurement and Instrumentation. 2006. Vol. 17, no. 1. P. 1–11.



поля при неизменной его интенсивности, характеристики турбулентного течения существенно не изменяются. Таким образом, для получения достоверных характеристик турбулентного течения необходимо использовать максимально возможные для данной задачи частоты внешнего магнитного поля. Анализ спектров турбулентных пульсаций для различных параметров процесса показал, что во вращающемся магнитном поле свойства турбулентности вблизи стенки зависят от скорости вращения и расстояния от стенки. При малых скоростях вращения вихри Тейлора достаточно велики, что приводит к тому, что турбулентность сохраняется анизотропной достаточно далеко от стенки. С увеличением скорости вращения размер вихрей уменьшается, что приводит к уменьшению расстояния от стенки, на котором турбулентность анизотропна. В случае бегущего магнитного поля турбулентность вблизи стенки практически изотропна, а ее интенсивность зависит от скорости. Однако на малых масштабах спектр отличается от колмогоровского. Возможно, это отличие связано с наличием средней спиральности в потоке. При совместном действии полей поведение турбулентности сильно меняется. Она практически всегда изотропна (рис. 6b), но с увеличением амплитуды бегущего поля и фиксированного вращающегося поля ее интенсивность сильно уменьшается. Это открывает возможность управления пристеночной турбулентностью путем изменения действующих полей, что является важным в практических приложениях.

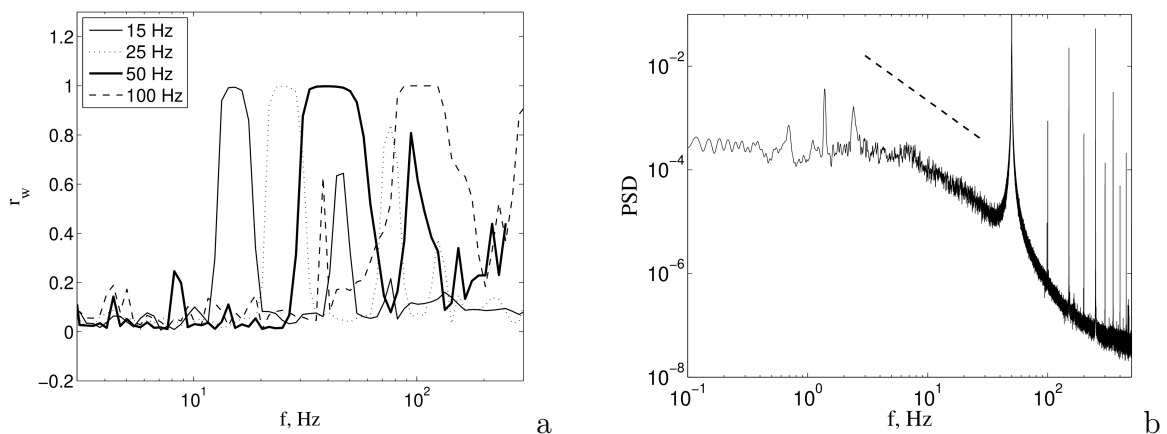


Рис. 6. (a) – вейвлет кросс-корреляция сигналов скорости и магнитного поля для разных частот в катушках индуктора, создающего магнитное поле; (b) – пример спектра вертикальной компоненты скорости под совместным действием бегущего и вращающегося полей

Параграф 2.5 посвящен обсуждению результатов, а затем следуют выводы по главе. Результаты второй главы опубликованы в работах [7–12].

В **третьей главе** описано исследование влияния вихревых течений на процесс кристаллизации жидких металлов и сплавов. В параграфе 3.1 разобраны особенности, связанные с воздействием вихревых течений на темп кристаллизации и кристаллическую структуру. Усиление неоднородности течения за счет варьирования интенсивности электромагнитных сил существенно влияет на

процесс кристаллизации<sup>7</sup>. В диссертационном исследовании изучено влияние как вращающегося, так и бегущего магнитных полей, так и их комбинации на процесс направленной кристаллизации.

В параграфе **3.2** изучено влияние течений, вызванных действием локализованных и бегущих магнитных полей, на направленную кристаллизацию в плоских слоях. Течения созданы электромагнитной силой, возникающей из-за взаимодействия переменного магнитного поля от С-образного электромагнита и индуцированного им в слое жидкого металла вихревого электрического тока. Экспериментально исследовано как само вихревое течение, так и его влияние на процесс направленной кристаллизации (рис. 7). Для этого был разработан алгоритм локализации границы раздела твердой и жидкой фазы на основе анализа уровня эха, полученного УДА. Экспериментально изучено влияние варьирования питания бегущего магнитного поля на темп кристаллизации и форму границы раздела фаз, что в основном изучалось для вращающихся магнитных полей<sup>8</sup>. Определены параметры бегущего магнитного поля, при которых достигается наиболее плоский фронт кристаллизации.

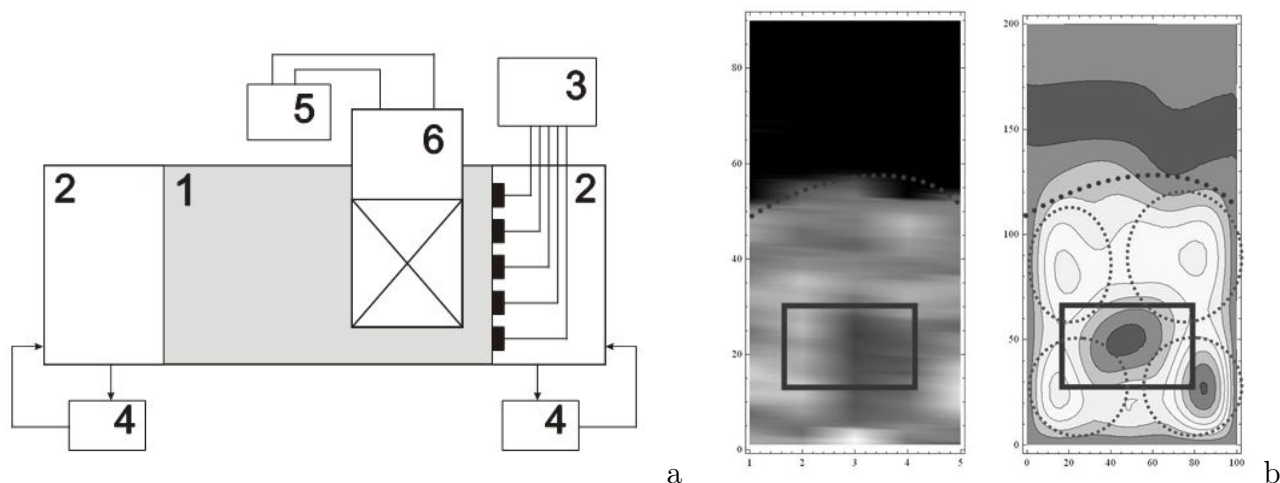


Рис. 7. (а) – схема экспериментальной установки: 1 – ячейка, 2 – медные теплообменники, 3 – УДА датчики, 4 – термостаты, 5 – источник питания переменного тока, 6 – С-образный индуктор; (б) – вихревая структура течения в процессе кристаллизации, восстановленная по показаниям УДА

Параграф **3.3** посвящен экспериментальному изучению влияния течений, вызванных действием бегущих и вращающихся полей, на темп кристаллизации в цилиндрической ячейке (рис. 8а). Помимо вращающегося магнитного поля<sup>9</sup> было изучено действие бегущего магнитного поля для сопоставления результатов.

<sup>7</sup> Willers B., Eckert S., Nikrityuk P. A., Rübiger D., Dong J., Eckert K., Gerbeth G. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part II. Application to solidification of Al-Si alloys // Metallurgical and materials transactions B: Process metallurgy and materials processing science. 2008. Vol. 39, no. 2. P. 304–316.

<sup>8</sup> Eckert S., Nikrityuk P. A., Rabiger D., Eckert K., Gerbeth G. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part I. flow field in a liquid metal column // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. 2007. Vol. 38. P. 977–988.

<sup>9</sup> Cramer A., Eckert S., Galindo V., Gerbeth G., Willers B., Witke W. Liquid metal model experiments on casting and solidification processes // Journal of Materials Science. 2004. Vol. 39, no. 24. P. 7285–7294.

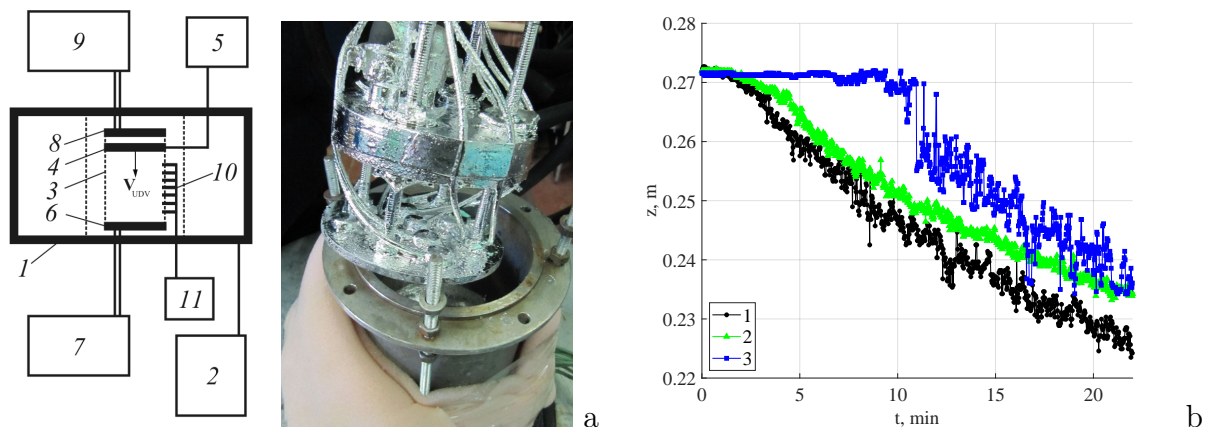


Рис. 8. (а) – схема и фото ячейки и УДА для изучения течения и кристаллизации в галлиевой эвтектике: 1 – индуктор, 2 – источник тока, 3 – ячейка, 4 – перегородка с датчиками УДА, 5 – УДА, 6,7 – охлаждаемое дно с термостатом, 8,9 – крышка с термостатом, 10 – термопары и КДС, 11 – система сбора данных; (б) – эволюция положения фронта кристаллизации галлиевой эвтектики: 1 – без воздействия, 2 – действует только вращающееся магнитное поле, 3 – действует только бегущее магнитное поле

В экспериментах с помощью УДА была определена зависимость положения границы раздела фаз от времени для разных интенсивностей вихревых течений. Результаты экспериментов показали, что с увеличением интенсивности потока перемешивания как с помощью бегущего, так и с помощью вращающегося магнитных полей, темп кристаллизации снижается (рис. 8b). Различие в результатах обусловлено тем, что чисто вращающееся магнитное поле создает слабую полойдальную компоненту течения, что было продемонстрировано в предыдущей главе, но форма границы раздела твердой и жидкой фаз становится более гладкой. Чисто бегущее магнитное поле создает именно полойдальную компоненту течения, которая существенно влияет на теплоперенос в вертикальном направлении, но приводит к менее гладкой форме границы раздела фаз.

В параграфе 3.4 описано исследование влияния течений, вызванных раздельным и совместным действием бегущих и вращающихся полей, на процесс кристаллизации и структуру цилиндрических слитков. Математическая модель дополнялась термодинамическими уравнениями, а для описания затвердевания использовался широко применяемый подход энтальпии-пористости. Расчеты позволили определить форму границы раздела фаз и отследить ее эволюцию для разных видов течений и их интенсивностей. В серии экспериментов исследовалось влияние вихревых течений, создаваемых в ходе процесса направленной кристаллизации, на свойства и структуру получающихся слитков (рис. 9а). В ячейку помещался алюминиевый сплав при заданной начальной температуре, который затвердевал в ходе эксперимента при воздействии бегущими и/или вращающимися магнитными полями. Изучались сплавы АК9ч и Al-4.5%Zn. Для проведения металлографического анализа изготавливались шлифы вертикального осевого разреза каждого слитка (рис. 9b). Анализ поля распределения

размеров зерен по шлифу и содержания эвтектической фазы (рис. 9с) выполнялся с помощью разработанного алгоритма. Получены зависимости физических и кристаллических свойств цилиндрических слитков от параметров бегущего и вращающегося магнитных полей. Показано значительное измельчение зеренного строения слитка – размер зерен уменьшается на порядок, а дендритная структура превращается в равноосную мелкозернистую структуру (рис. 9b). При чисто азимутальном течении, возникающем под действием вращающегося магнитного поля, увеличение интенсивности течения приводит к измельчению зерна и повышению твердости, при этом в слитке происходит уменьшение пространственного развития нижней и верхней зон столбчатых кристаллов. Чисто полойдальное течение умеренной интенсивности, возникающее под действием бегущего магнитного поля, приводит к лучшему соотношению размера зерна и твердости. Наибольшее повышение твердости, однородности и наиболее сильное измельчение зерна достигается при совмещенном режиме воздействия – и бегущим, и вращающимся полями.

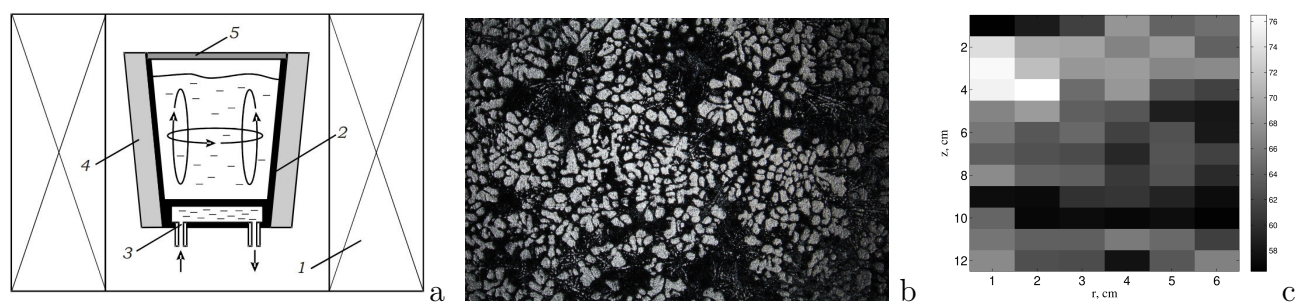


Рис. 9. (а) – схема установки по исследованию влияния бегущего и вращающегося магнитных полей на структуру алюминиевых слитков: 1 – индуктор, 2 – кристаллизатор, 3 – водоохлаждаемое дно, 4, 5 – теплоизоляция; (b) – микроструктура сплава при воздействии вращающегося поля умеренной интенсивности; (с) – пример распределения эвтектической фазы (в %) в слитке, затвердевшем под совместным действием бегущего и вращающегося магнитных полей

Параграф 3.5 посвящен обсуждению результатов, а затем следуют выводы по главе. Результаты третьей главы опубликованы в работах [13–18].

В четвертой главе описываются исследования конвективного теплообмена в цилиндрических ячейках различным соотношением длины  $L$  и диаметра  $D$ , заполненных жидким металлом. В параграфе 4.1 описываются особенности конвективного теплообмена в цилиндрических ячейках с жидким металлом. Разница температуры между торцами ячейки приводит к возникновению крупномасштабной циркуляции (КМЦ). Этот процесс широко изучается как теоретически, так и экспериментально. Определены карты режимов<sup>10</sup>. Конвекция в жидкостях с низким числом Прандтля, к которым относятся расплавленные металлы, изучена гораздо менее подробно для коротких ячеек. Конвективный теплообмен в длинных ячейках с жидким металлом практически не изучен. В экспериментах

<sup>10</sup> Ahlers G., Grossmann S., Lohse D. Heat transfer and large scale dynamics in turbulent Rayleigh-Benard convection // Rev. Modern Physics. 2009. Vol. 81. P. 503–537.

на ртути получено, что КМЦ в короткой цилиндрической ячейке является нестабильной, но даже небольшой наклон ячейки относительно вертикали приводит к существенному снижению уровня пульсаций. При этом численные исследования<sup>11</sup> предсказывают возможность сохранения пульсаций при существенных наклонах. Для того, чтобы подробно разобраться в этом явлении, проведены серии экспериментальных исследований КМЦ и теплообмена в жидком натрии.

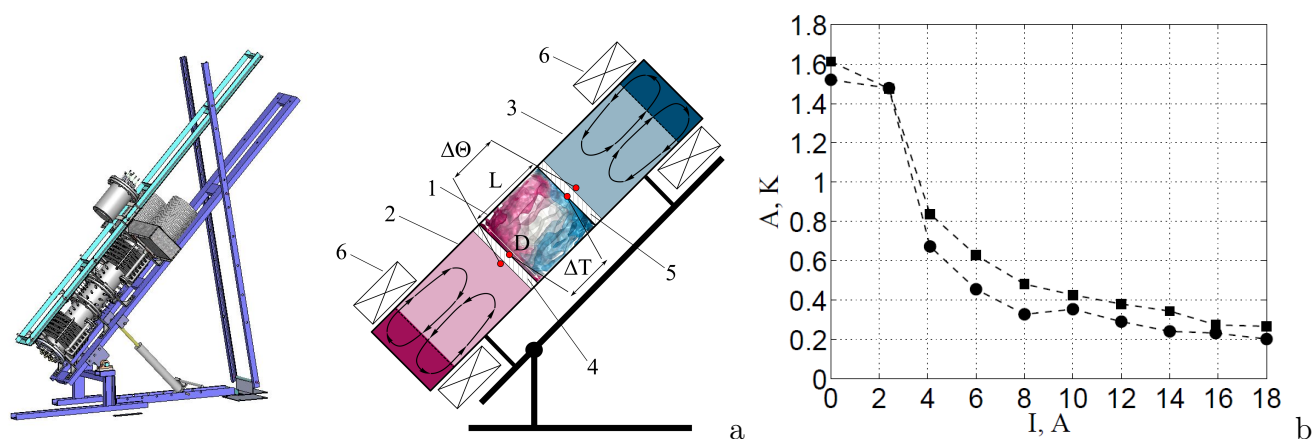


Рис. 10. (а) – схема экспериментальной установки: 1 – канал, 2,3 – теплообменники, 4,5 – торцы, 6 – индуктор; (б) – зависимость степени однородности температуры  $A$  от тока  $I$ , питающего обмотки индуктора

В параграфе 4.2 описываются экспериментальные установки для изучения конвективного теплообмена. Они состоят из цилиндрических ячеек со стенкой из нержавеющей стали, на торцах которых установлены теплообменники. Устройства размещены на поворотных рамах, позволяющих располагать исследуемые объемы с натрием под разными углами наклона к вертикали. В случаях  $L = 5D$  и  $L = 20D$ , когда длина  $L$  больше диаметра  $D$ , торцы ячеек представляют собой толстые медные пластины, соединенные с системами нагрева и охлаждения. Существует проблема, связанная с тем, что применение толстых медных торцевых пластин в качестве теплообменников не приводит к однородному распределению температуры на них. Это возникает из-за того, что холодный возвратный поток КМЦ натрия локально охлаждает пластину<sup>12</sup>. Для длинных ячеек это не является столь критичным, как для коротких. Поэтому в короткой установке  $L = D$  использовались тонкие пластины на торцах конвективной ячейки, к которой присоединялись еще две цилиндрические камеры для теплообменников с жидким натрием (рис. 10а). В одной располагается нагреватель, другая охлаждается. На эти дополнительные камеры установлены индукторы бегущего магнитного поля, которые создают перемешивающее течение. В отдельном исследовании изучено влияние крупномасштабного вихревого течения, созданного бегущим магнитным полем, на гомогенизацию температуры в цилиндрических камерах

<sup>11</sup> Shishkina O., Horn S. Thermal convection in inclined cylindrical containers // Journal of fluid mechanics. 2016. Vol. 790. P. 790 R3–1–12.

<sup>12</sup> Foroozani N., Krasnov D., Schumacher J. Turbulent convection for different thermal boundary conditions at the plates // Journal of fluid mechanics. 2021. Vol. 907. P. A27.

теплообменников с жидким натрием. Наборы распределенных по объему термопар позволяли контролировать степень однородности температуры по параметру  $A = \langle |\langle T \rangle_t - \langle \langle T \rangle_t \rangle_v | \rangle_v$ , где  $\langle \dots \rangle_t$  – усреднение по времени, а  $\langle \dots \rangle_v$  – усреднение по объему. Параметры индуктора были подобраны с помощью математического моделирования. В ходе экспериментов получена зависимость степени однородности температуры от интенсивности вихревого перемешивающего течения, определяемого током обмоток бегущего поля (рис. 11b). Показано, что умеренное воздействие позволяет добиться существенного выравнивания температуры в камерах теплообменников. Это существенно повышает однородность граничных условий на торцах конвективной ячейки.

Параграф 4.3 посвящен описанию эволюции крупномасштабной циркуляции в короткой ячейке ( $L = D$ ) для различных углов наклона ее оси от вертикали (рис. 10a). Ячейка снабжена набором малоинерционных термопар, позволяющих с помощью корреляционного анализа восстановить значения средней скорости между термопарами, а также изучить поведение вихря КМЦ с помощью маломодового анализа. Для этого выделяется первая мода  $T = \langle T \rangle + \delta \cos(\theta - \theta_0)$  в виде единичного вихря и определяются мгновенные значения ориентации его оси  $\theta_0$  и интенсивности  $\delta$ . Исследование показало, что наиболее интенсивные колебания оси вихря происходят при наклоне  $\beta = 0..40^\circ$ , а при больших углах существенно снижаются (рис. 11a). Вейвлет-диаграммы при этом свидетельствуют о близости этих колебаний к гармоническим, чего не наблюдается при других углах наклона. Обнаружено наличие сильной антикорреляции флуктуаций в верхней и нижней половинах цилиндра. Это указывает на торсионный характер колебания формы вихря КМЦ, либо на наличие слошинга – колебания центральной плоскости симметрии вихря, ортогональной его оси. Таким образом, найдено первое свидетельство существования сильных флуктуаций вихря КМЦ в конвективном течении с низким числом Прандтля при умеренном наклоне ячейки.

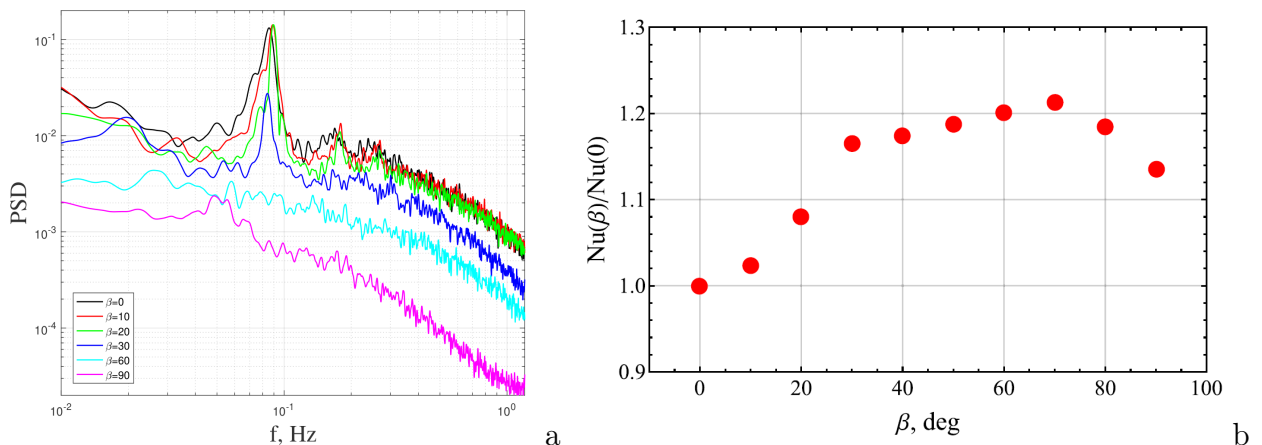


Рис. 11. (a) – спектры осцилляции ориентации оси вихря КМЦ для некоторых углов наклона ячейки; (b) – зависимость нормированного числа Нуссельта от угла наклона ячейки

В параграфе 4.4 описывается цикл экспериментальных исследований теплообмена в ячейках с жидким натрием с разными соотношениями длины и

диаметра. Результаты показали, что теплообмен в длинных ячейках ( $L = 5D$  и  $L = 20D$ ) в основном обеспечивается вихрем КМЦ, который отсутствует в вертикальном положении, быстро интенсифицируется при отклонении от вертикали с сильным максимумом при наклоне  $\beta \approx 60^\circ$ . Мелкомасштабная турбулентность, на которую указывает энергия колебаний температуры, снижает эффективный теплообмен, так как усиливает смешение восходящего и нисходящего потоков. Турбулентные флуктуации увеличивались при отклонении от вертикали и имели максимум при  $\beta \approx 30^\circ$ . Таким образом, при малых  $\beta$  они замедляли рост числа Нуссельта с углом наклона. В короткой ячейке ( $L = D$ ) вихрь КМЦ наиболее интенсивный при  $\beta = 0^\circ$  и уменьшается с увеличением наклона, но наиболее сильные флуктуации возникают при  $\beta = 0^\circ$  и уменьшаются с отклонением от вертикали, особенно в плоскости основного потока. Число Нуссельта не зависит ни от скорости вихря КМЦ, ни от интенсивности турбулентных флуктуаций и немного увеличивается с наклоном, достигая максимального значения при  $\beta \approx 70^\circ$  (рис. 11а). Таким образом, объяснение зависимости теплового потока от поведения вихря КМЦ и турбулентности для длинных наклонных ячеек не подходит для короткой ячейки. В ней связь переноса тепла со структурой потока гораздо сложнее. В ходе исследования для всех ячеек получены зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея (рис. 12). Эти результаты важны для разработки каналов с натриевым теплоносителем.

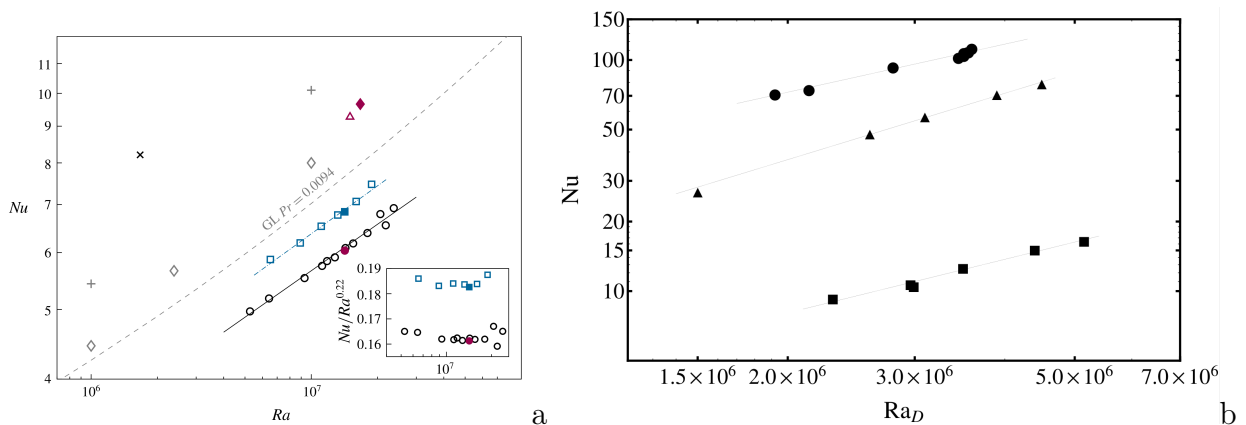


Рис. 12. (а) – зависимость нормированного числа Нуссельта (а) и числа Рейнольдса (б) от значения угла наклона цилиндра  $L = D$ ,  $Ra = 1.7 \cdot 10^7$ ,  $Pr = 0.009$ : кружки – эксперимент, ромбы – DNS, треугольники – LES; для сравнения показаны результаты DNS расчетов для случая  $Ra = 10^9$ ,  $Pr = 1$  (квадраты) и  $Ra = 1.5 \cdot 10^7$ ,  $Pr = 0.09$  (кресты); (б) – зависимость числа Нуссельта от числа Рэлея для вертикального (квадраты), наклонного (треугольники) и горизонтального (кружки) положения ячейки  $L = 20D$

Параграф 4.5 посвящен обсуждению результатов, а затем следуют выводы по главе. Результаты четвертой главы опубликованы в работах [19–24].

**Пятая глава** посвящена изучению генерации и взаимодействия вихревых и транзитных течений в цилиндрических каналах. В параграфе 5.1 описываются исследования процессов генерации и взаимодействия вихревых и транзитных течений в цилиндрических каналах. Основная особенность изучаемых в главе

процессов связана с тем, что только электромагнитные силы могут полностью бесконтактно создавать транзитные течения, либо вызывать локализованные вихревые течения в транзитных потоках жидких металлов. В главе описан комплекс исследований, потребовавших разработку стендов для жидкого натрия, содержащих электромагнитные установки. Научные постановки мотивированы задачами атомной промышленности, связанными с процессами в жидкометаллическом натриевом теплоносителе.

В параграфе **5.2** описано исследование взаимодействия вихревых и транзитных течений. В данном случае вихревое течение вызвано действием т.н. «магнитного препятствия» в транзитном потоке<sup>13</sup>. Оно обусловлено генерацией локализованной электромагнитной силы, которая имеет направление навстречу потоку. Такая сила возникает при протекании жидкого металла через область с магнитным полем, направленным поперечно транзитному течению. Эксперименты выполнены на разработанном натриевом стенде, который также использовался при изучении процессов взаимодействия транзитных потоков, описанных ниже. Обнаружено, что неизотермическое обтекание магнитного препятствия в транзитном потоке жидкого металла в цилиндрическом канале приводит к генерации локализованного вихревого течения. Оно порождает неизотермические пульсации вследствие того, что вихрь взаимодействует с более холодными стенками канала. Вопрос заключался в том, насколько долго такие пульсации могут существовать в транзитном течении. В экспериментах и численных расчетах получено, что пульсации без существенной потери интенсивности распространяются на значительное расстояние по потоку. В эксперименте это было показано с помощью обработки сигнала от последовательно расположенных в канале термопар. Корреляционный анализ сигналов термопар (рис. 13а), а также расчетных сигналов, позволил восстановить значение расхода (рис. 13б). Это дает возможность разработать методику измерения расхода жидкого металла с помощью магнитного препятствия.

Параграф **5.3** посвящен изучению характеристик процесса генерации транзитного течения в коаксиальных каналах. С помощью математического моделирования исследовано влияние геометрических и физических параметров индуктора магнитного поля и каналов на величину созданной электромагнитной силы. Математическая модель была верифицирована на экспериментах с твердотельным имитатором электропроводной среды, а также на экспериментах, проводимых на гидравлическом галлиевом контуре. В ходе расчетов и экспериментов на галлиевой эвтектике обнаружено, что зависимость перепада давления от частоты фиксированного тока, полученная в закрытом или слаборасходном режимах, содержит экстремум (рис. 14а). Вычисления показали, что расчетная частота, обеспечивающая этот экстремум, совпадает с экспериментальной только в том случае, если в расчетах бралась электропроводность галлиевой эвтектики (рис. 14б). Таким образом, частота, обеспечивающая этот экстремум,

---

<sup>13</sup> Votyakov E. V., Kassinos S. C. On the analogy between streamlined magnetic and solid obstacles // *Physics of Fluids*. 2009. Vol. 21, no. 9. P. 097102.



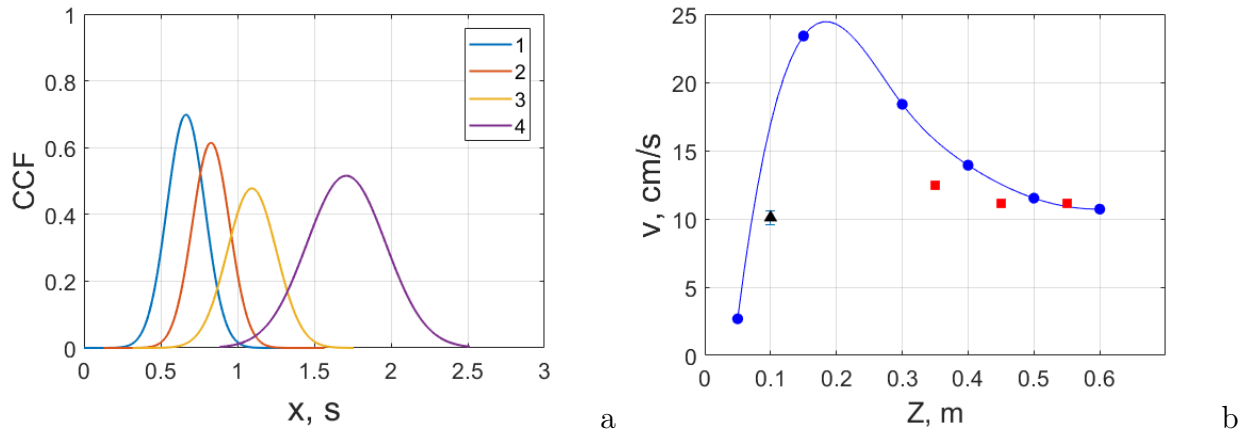


Рис. 13. (а) – примеры функции кросс-корреляции для различных расходов натрия:  $\{1.04, 0.84, 0.63, 0.41\} \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ; (б) – осредненные по времени профили скорости вдоль канала, полученные непосредственно из численного расчета (синие точки и линии) из кросс-корреляционного анализа температурных сигналов численного расчета (красные квадраты) и эксперимента (черный треугольник): (б) –  $v = 0.1 \text{ м/с}$ ,  $Re = 11300$ ,  $Q = 0.36 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

определяется величиной электропроводности жидкого металла. Это позволило разработать методику определения неизвестной электропроводности жидкого металла с помощью поиска максимального значения в эксперименте и сопоставления с расчетными экстремумами для разных электропроводностей. Например, электропроводность натриевого теплоносителя изменяется вследствие появления в нем нежелательных окислов, что можно оперативно отслеживать данной методикой. Также путем математического моделирования найдены параметры, обеспечивающие требуемую производительность цилиндрических электромагнитных насосов для натриевого теплоносителя АЭС, в составе которых есть изученные индукторы бегущего магнитного поля.

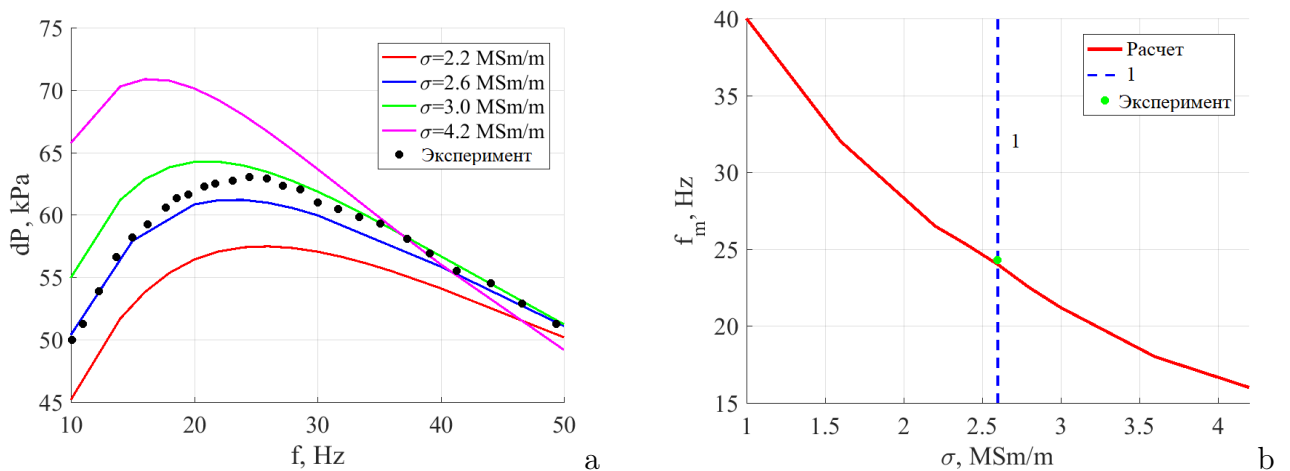


Рис. 14. (а) – зависимости перепада давления от частоты тока, (б) – зависимость частоты  $f_m$ , обеспечивающей экстремум перепада давления, от электропроводности, расчет и эксперимент, 1 – истинная электропроводность эвтектики

В параграфе 5.4 описаны экспериментальные исследования взаимодействия вихревых и транзитных течений, которые возникают при смешении двух разнотемпературных потоков жидкого натрия в тройниковом соединении. Задача мотивирована поиском способов устранения проблемы разгерметизации натриевых трубопроводов АЭС на быстрых нейтронах. Она возникает из-за термоциклической усталости в каналах, где смешиваются разнотемпературные потоки. Эта проблема настолько серьезна, что на ее изучение были направлены значительные вычислительные ресурсы как в РФ, так и за рубежом<sup>14</sup>. При этом для требуемой верификации вычислительных программ практически отсутствовали экспериментальные данные на натрии, за исключением одного эксперимента со смешивающимися затопленными струями<sup>15</sup>, что отдаленно относится к изучаемой проблеме. Поэтому выполнено экспериментальное исследование на двухтемпературном натриевом стенде, в котором электромагнитные насосы создают два потока в двух трубопроводах (рис. 15а). В одном натрий нагревался, в другом – охлаждался, после чего они смешивались в тройниковом соединении. Разное соотношение расходов приводило к возникновению

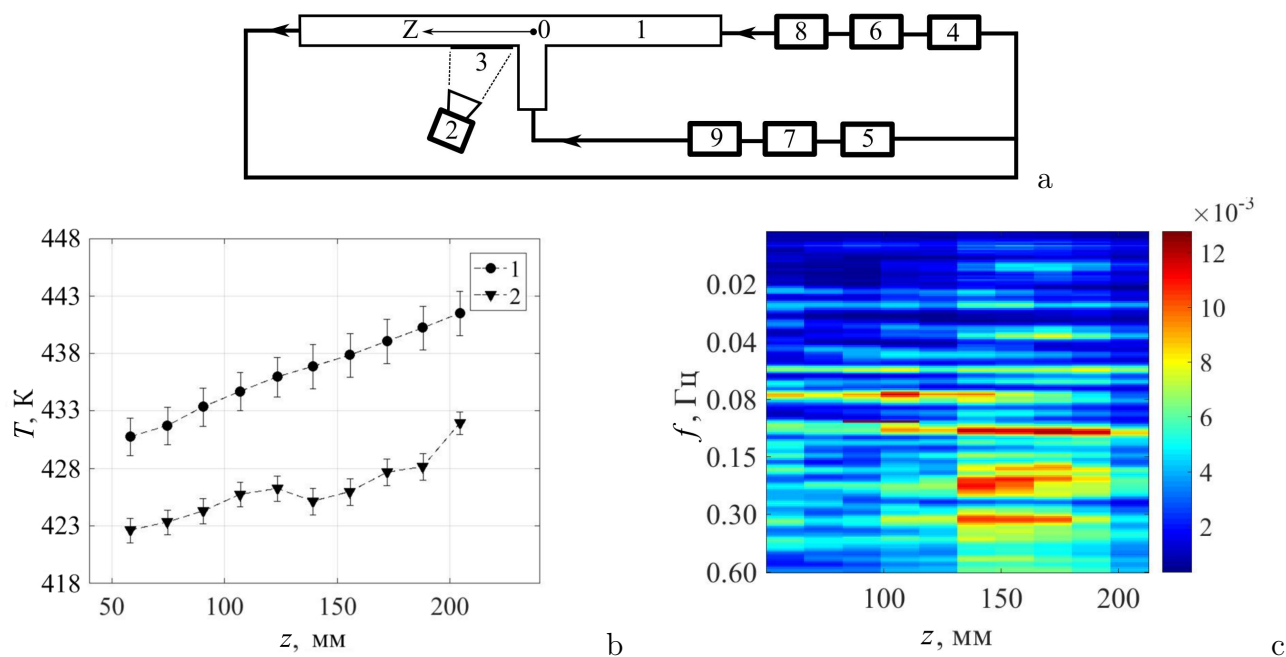


Рис. 15. (а) – схематическое изображение экспериментальной установки 1 – тройник, 2 – тепло-визор, 3 – область для измерения пульсаций температуры наружной поверхности тройника, 4 – нагреватель, 5 – холодный теплообменник, 6 – насос горячей ветки, 7 – насос холодной ветки, 8 – электромагнитный расходомер на горячей ветке, 9 – электромагнитный расходомер на холодной ветке, 0 – точка пересечения трубопроводов тройника; (б) – распределение средней температуры на поверхности тройника для двух режимов; (с) – карты вейвлет-спектров для десяти выбранных точек вдоль исследуемой области

<sup>14</sup> Validation of fast reactor thermomechanical and thermohydraulic codes. Final report of co-ordinated research project. International atomic energy agency, Vienna, IAEA-TECDOC-1318, 2002.

<sup>15</sup> Kimura N., Miyakoshi H., Kamide H. Experimental investigation on transfer characteristics of temperature fluctuation from liquid sodium to wall in parallel triple-jet // International journal of heat and mass transfer. 2007. Vol. 50. P. 2024–2036.

разных типов вихрей в зоне смешения. С помощью тепловизора «FLIR SC5000» получены поля температуры на поверхности трубопровода в зоне смешения, которые были проанализированы (рис. 15b). Вейвлет-анализ пульсаций этих температур позволил определить область их характерных частот, а также их пространственную локализацию на наружной поверхности канала в зоне смешения потоков (рис. 15c). Результаты использованы для верификации расчетных кодов, используемых организациями Росатома для конструирования реакторов нового поколения.

Параграф 5.5 посвящен обсуждению результатов, а затем следуют выводы по главе. Результаты пятой главы опубликованы в работах [25–30].

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

1. Крупномасштабное электровихревое течение при отсутствии внешнего магнитного поля совершает колебания с частотой, зависящей от величины силового параметра. Действие внешнего магнитного поля приводит к возникновению переходного колебательного режима, после которого течение переходит в стационарное состояние. Существует интервал значений индукции внешнего поля, в котором происходит подавление энергии полоидальной компоненты скорости. Найдена причина, заключающаяся в формировании дополнительного полоидального течения вследствие аксиального градиента центробежной силы. На стационарное состояние этого процесса не влияет ни тип локализованного подвода тока, ни временной период развития электромагнитных сил, но магнитное поле от внешних источников оказывает существенное воздействие.

2. Параметры бегущего и вращающегося магнитных полей существенно влияют на форму, средние и турбулентные характеристики создаваемого ими крупномасштабного вихревого течения в цилиндрической ячейке с жидким металлом. Применена методика кросс-корреляционного вейвлет-анализа для определения интервала турбулентного спектра, на котором индуктор воздействует на измерения. Это позволяет выделить интервалы частот, при которых результаты достоверны. Экспериментально с помощью кондукционных датчиков скорости получены спектры пульсаций течений, позволяющие характеризовать турбулентные процессы. Показано, что чередование направления вращающегося магнитного поля по высоте приводит к наиболее развитому азимутальному и полоидальному течениям. На основе результатов разработан, изготовлен и изучен лабораторный образец электромагнитного перемешивателя жидкого металла.

3. Воздействие бегущего и вращающегося магнитных полей существенно влияет на темп кристаллизации жидкого металла в цилиндрической ячейке. С помощью экспериментов на модельном галлиевом сплаве и ультразвукового доплеровского анемометра определены характеристики влияния параметров магнитного поля на темп кристаллизации. Разработана методика получения эволюции границы раздела фаз из показаний датчиков ультразвукового доплеровского анемометра. Определены зависимости формы межфазного профиля и темпа кристаллизации от типа бегущего магнитного поля. Численные исследования позволили определить эволюцию формы границы раздела жидкой и

твердой фаз при воздействии бегущего либо вращающегося магнитных полей. На основе анализа результатов серии экспериментов по кристаллизации алюминиевых сплавов получены зависимости свойств слитков от параметров бегущего и вращающегося магнитных полей.

4. Получены экспериментальные результаты при изучении колебания крупномасштабной конвективной циркуляции жидкого натрия в цилиндрическом канале при разных углах наклона его оси относительно вертикали. В коротком канале ось вихря совершает интенсивные колебания при наклоне вплоть до 40 градусов. Этот факт существенно отличается от полученных ранее другими авторами результатов для жидкостей с большими числами Прандтля, показавших сильную стабилизацию вихря при малых углах наклона. Исследование зависимости степени гомогенизации температуры в теплообменниках с перемешиванием от параметров бегущего магнитного поля показало, что даже умеренное воздействие выравнивает температуру в ячейках теплообменников. Это приводит к повышению точности задания граничных условий, при этом не влияя на показания термопар.

5. В экспериментах получены характеристики процесса теплообмена в цилиндрических ячейках с жидким натрием на специально разработанных экспериментальных установках. Определены зависимости характеристик турбулентного конвективного теплообмена в цилиндрических ячейках с различным аспектным соотношением от угла их наклона относительно вертикали и осевого перепада температуры. Обнаружено, что наибольшая интенсивность турбулентного конвективного теплообмена в цилиндрических ячейках с жидким металлом достигается при углах их наклона близких к 60 градусам относительно вертикали.

6. Обнаружено, что неизотермическое обтекание магнитного препятствия транзитным потоком жидкого металла в цилиндрическом канале приводит к генерации локализованного вихревого течения. Это вихревое течение порождает пульсации, которые без существенной потери интенсивности распространяются на значительное расстояние по потоку. Получен набор характеристик процесса генерации транзитного течения в коаксиальных каналах, которое создается с помощью индуктора бегущего магнитного поля. Обнаружено, что наличие экстремума на зависимости перепада давления от частоты тока, питающего обмотки электромагнитного насоса бегущего поля, позволяет определить электропроводность среды, что легло в основу разработанной методики контроля ее степени чистоты. На основе результатов разработан и изготовлен расходомер, который измеряет скорость на основе корреляционного анализа пульсаций, а также электромагнитные насосы для исследовательских стендов и атомной станции с жидкометаллическим теплоносителем.

7. Экспериментально получены характеристики процесса смешения двух разнотемпературных потоков жидкого натрия в Т-образном тройнике, в котором горячий натрий течет по основной (прямой) трубе, а холодный поступает из боковой патрубка. Течение является турбулентным, о чем свидетельствуют спектры сигналов термопар в потоке. Поле температуры на боковой стенке в области смешения, полученное тепловизором, оказалось нестационарным.

Области с пульсирующей температурой течения развиваются в зоне смешения и двигаются вдоль потока. Колебания температуры не являются периодическими. Изучение нерегулярных пульсаций и определение оценки их характерной частоты выполнено с помощью вейвлет-анализа. Анализ экспериментальных данных показал, что значение этой частоты лежит в диапазоне 0.2–0.5 Гц, что является опасным с точки зрения термоциклической усталости.

Дальнейшая разработка темы может вестись по трем направлениям. Во-первых, можно создать более совершенные математические модели на основе опыта и результатов, полученных в данной работе. Это касается моделей электромагнитных процессов в однофазных и многофазных средах, моделей кристаллизации в условиях электромагнитного воздействия, моделей турбулентного теплопереноса и теплообмена в жидких металлах. Во-вторых, созданные экспериментальные установки и стенды, а также методики экспериментов могут быть использованы для проведения экспериментальных исследований по магнитогидродинамическим процессам в жидких металлах, турбулентности, конвекции в жидких металлах условия электромагнитного воздействия, взаимодействию интенсивных спиральных потоков жидкого металла при больших магнитных числах Рейнольдса в условиях действия спиральных магнитных полей. И, наконец, в третьих, развитая в работе методология и опыт могут быть использованы для совершенствования существующих и разработки новых технологий и аппаратов для металлургии, энергетики и транспорта, таких, как электромагнитные насосы, перемешиватели, расходомеры, сепараторы, жидкометаллические батареи, магнитогидродинамические движители и генераторы.

## Основные публикации по теме диссертации

1. Kolesnichenko I., Frick P., Eltishchev V., Mandrykin S., Stefani F. Evolution of a strong Electro-vortex flow in a closed cell // [Physical Review Fluid](#). 2020. Vol. 5, no. 12. P. 123703.
2. 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. A–20.
3. Kolesnichenko I., Mandrykin S. Spin-up of electro-vortex flows under external magnetic field // [The European Physical Journal Plus](#). 2022. Vol. 137, no. 8. P. 988.
4. Mandrykin S., Ozernykh V., Kolesnichenko I. Electro-vortex flow of liquid metal in a cylindrical cell with localized current supply and variable aspect ratio // [Magnetohydrodynamics](#). 2020. Vol. V. 56, no. 2/3. P. 215–224.
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. Vol. 137, no. 1. P. 13001.
6. Losev G., Kolesnichenko I. The influence of the waveguide on the quality of measurements with ultrasonic Doppler velocimetry // [Flow measurement and](#)

- [instrumentation](#). 2020. Vol. 75. P. 101786.
7. Denisov S., Dolgikh V., Kolesnichenko I., Khalilov R., Khripchenko S., Verhille G., Plihon N., Pinton J. F. Flow of liquid metal in a cylindrical crystallizer generating two-directional MHD stirring // [Magnetohydrodynamics](#). 2010. Vol. 46, no. 1. P. 69–78.
  8. Kolesnichenko I., Pavlinov A., Golbraikh E., Frick P., Kapusta A., Mikhailovich B. The study of turbulence in MHD flow generated by rotating and traveling magnetic fields // [Experiments in Fluids](#). 2015. Vol. 56. P. 1–11.
  9. Kolesnichenko I., Khalilov R., Khripchenko S., Pavlinov A. MHD stirrer for cylindrical molds of continuous casting machines fabricated aluminium alloy // [Magnetohydrodynamics](#). 2012. Vol. 48, no. 1. P. 221–233.
  10. Колесниченко И., Мамыкин А., Халилов Р. Электромагнитный перемешиватель жидкого металла: верификация электромагнитной части задачи // [Вестник Пермского университета. Физика](#). 2022. № 4. С. 45–51.
  11. Халилов Р., Мамыкин А., Окадьев Р., Колесниченко И. Влияние течения, вызванного действием вращающихся магнитных полей, на процессы в расплавленной электропроводной среде // [Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures](#). 2023. № 3. С. 6–16.
  12. Озерных В., Лосев Г., Голбрайх Е., Колесниченко И. Начальная стадия формирования вихревого течения в индукторе с вращающимися встречно магнитными полями // [Вычислительная механика сплошных сред](#). 2023. Т. 16, № 4. С. 493–503.
  13. Losev G., Kolesnichenko I. Structure of MHD vortex flows in a thin layer of liquid metal // [Magnetohydrodynamics](#). 2019. Vol. 55, no. 1-2. P. 97–105.
  14. Oborin P., Kolesnichenko I. Application of the ultrasonic doppler velocimeter to study the flow and solidification processes in an electrically conducting fluid // [Magnetohydrodynamics](#). 2013. Vol. 49, no. 1. P. 231–236.
  15. Shvydkiy E., Sokolov I., Kolesnichenko I., Losev G. The influence of liquid-solid interface position and shape on the electromagnetic forcing parameter during horizontal solidification // [Metallurgical and Materials Transactions B](#). 2021. Vol. 52, no. 4. P. 1997–2007.
  16. Kolesnichenko I., Pavlinov A., Khalilov R. Movement of the solid-liquid interface in gallium alloy under the action of rotating magnetic field // [Magnetohydrodynamics](#). 2013. Vol. 49, no. 1. P. 191–197.
  17. Losev G., Kolesnichenko I. Solidification front shape control through modulating the traveling magnetic field // [Journal of crystal growth](#). 2019. Vol. 528. P. 125249.
  18. Denisov S., Dolgikh V., Khripchenko S., Kolesnichenko I., Nikulin L. The effect of traveling and rotating magnetic fields on the structure of aluminum alloy during its crystallization in a cylindrical crucible // [Magnetohydrodynamics](#). 2014. Vol. 4, no. 4. P. 407–422.
  19. Khalilov R., Kolesnichenko I., Pavlinov A., Mamykin A., Shestakov A., Frick P. Thermal convection of liquid sodium in inclined cylinders // [Physical Review Fluid](#). 2018. Vol. 3. P. 043503.

20. Zwirner L., Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Pavlinov A., Mandrykin S., Shestakov A., Teimurazov A., Frick P., Shishkina O. The influence of the inclination angle on the heat transport and large-scale circulation in liquid metal convection // [Journal of Fluid Mechanics](#). 2020. Vol. 884. P. A18–1–37.
21. Frick P., Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Pakholkov V., Pavlinov A., Rogozhkin S. Turbulent convective heat transfer in a long cylinder with liquid sodium // [Europhysics Letters](#). 2015. Vol. 109, no. 1. P. 14002.
22. Васильев А. Ю., Колесниченко И. В., Мамыкин А. Д., Фрик П. Г., Халилов Р. И., Рогожкин С. А., Пахолков В. В. Турбулентный конвективный теплообмен в наклонной трубе, заполненной натрием // [Журнал технической физики](#). 2015. Т. 85, № 9. С. 45–49.
23. Колесниченко И. В., Мамыкин А. Д., Павлинов А. М., Пахолков В. В., Рогожкин С. А., Фрик П. Г., Халилов Р. И., Шепелев С. Ф. Экспериментальное исследование свободной конвекции натрия в длинном цилиндре // [Теплоэнергетика](#). 2015. № 6. С. 31–39.
24. Kolesnichenko I., Khalilov R., Teimurazov A., Frick P. On boundary conditions in liquid sodium convective experiments // [IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering](#). 2017. Vol. 891. P. 012075.
25. Kolesnichenko I., Khalilov R., Shestakov A., Frick P. ICMC's two-loop liquid sodium facility // [Magnetohydrodynamics](#). 2016. Vol. 52, no. 1. P. 87–94.
26. Колесниченко И., Халилов Р., Шестаков А., Крылов А., Пахолков В., Павлинов А., Мамыкин А., Васильев А., Рогожкин С., Фрик П. Перемешивание разнотемпературных потоков жидкого натрия в трубопроводе за тройником // [Теплоэнергетика](#). 2023. № 3. С. 49–57.
27. Kolesnichenko I., Mamykin A., Golbraikh E., Pavlinov A. Temperature correlation method application to the problem of measuring the flow rate of liquid sodium // [Magnetohydrodynamics](#). 2021. Vol. 57, no. 4. P. 547–557.
28. Мамыкин А., Халилов Р., Голбрайх Е., Колесниченко И. Применение магнитного препятствия для генерации пульсаций при расходомерии жидкометаллического теплоносителя на принципе температурных корреляций // [Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures](#). 2023. № 3. С. 17–28.
29. Khalilov R., Kolesnichenko I. Annular linear induction pump for liquid sodium // [Magnetohydrodynamics](#). 2015. Vol. 51, no. 1. P. 95–103.
30. Колесниченко И., Халилов Р. Экстремум зависимости напора электромагнитного насоса для жидкого металла от частоты питающего тока // [Вычислительная механика сплошных сред](#). 2022. Т. 15, № 4. С. 495–506.

*Научное издание*

Колесниченко Илья Владимирович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук на тему:  
Фундаментальные аспекты магнитной гидродинамики  
жидких металлов в области значений параметров,  
характерных для технологических приложений

Подписано в печать 05.08.2024. Формат 60 × 84/16.  
Тираж 100 экз. Усл. печ. л. 2. Заказ № 51.  
Отпечатано с готового оригинал-макета в ООО «А+».  
614068, г. Пермь, ул. Дзержинского, 12, офис 26.  
Тел.: (342) 219-66-35, 233-56-20, 273-77-92.