

На правах рукописи



Мандрыкин Сергей Дмитриевич

**Течения жидких металлов в замкнутых полостях  
под действием электромагнитных сил  
и сил плавучести**

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2021

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 Петр Готлобович**, доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Соколов Дмитрий Дмитриевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры математики физического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова» (г. Москва);

**Перминов Анатолий Викторович**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры общей физики ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (г. Пермь).

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится **11 ноября 2021 г.** в 10:30 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.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» октября 2021 г.

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

А. Л. Зуев

## Общая характеристика работы

### **Актуальность и степень разработанности темы исследования.**

Интенсивные течения жидких металлов (ЖМ) в замкнутых объемах, вызываемые большими градиентами температуры и/или интенсивными электромагнитными полями, возникают во многих современных технологических процессах (металлургия, жидкометаллические системы охлаждения), а также в перспективных технологиях, таких как термоядерные реакторы и жидкометаллические накопители энергии (батареи). Именно проблемы охлаждения токамаков в последнее десятилетие стимулировали активное исследование переноса в присутствии сильных магнитных полей, а разработка интересных в прикладном плане крупномасштабных жидкометаллических батарей вызвала новый интерес к широкому спектру течений, обусловленных электровихревыми силами и силами плавучести в многослойных жидкометаллических системах.

Сложности экспериментальных исследований магнитоконвективных течений ЖМ связаны с физическими и химическими свойствами ЖМ (оптическая непрозрачность, химическая активность, высокая температура расплава и т. п.). Численное моделирование осложнено необходимостью решения электро- и гидродинамических задач, а также характерными для жидких металлов низкими числами Прандтля (высокая теплопроводность), то есть существенно более тонким динамическим пограничным слоем, по отношению к температурному. Как следствие, для корректного разрешения пограничных слоев необходимы сетки с большим числом узлов, что неизбежно ведет к существенным затратам ресурсов при численном моделировании.

В последние годы был достигнут существенный прогресс как в экспериментальных исследованиях конвективного переноса, электровихревых течений и течений, порождаемых сильными электромагнитными полями, так и в развитии технологий численного моделирования. Последнее означает главным образом возможность изучать течения большей интенсивности. Это позволило проводить более подробные лабораторные исследования, дополняемые численными экспериментами. Наиболее активно в экспериментальные исследования течений ЖМ вовлечены такие научные институты, как Institute of Fluid Dynamic (HZDR, Германия), University of Göttingen (Германия, г. Геттинген), ИМСС УрО РАН (Россия, г. Пермь), а также ОИВТ РАН (Россия, г. Москва). В численном моделировании таких процессов принимают участие ученые из LIMSI (Франция),

институтов HZDR (Германия), Technische Universität Ilmenau (Германия), ИМСС УрО РАН (Россия, г. Пермь), ОИВТ РАН (Россия, г. Москва) и др.

Несмотря на большой прогресс в изучении конвекции и электровихревых течений жидких металлов, остаются нерешенные проблемы, связанные с различными осложняющими факторами, способными существенным образом менять структуру течения и играть ключевую роль в реальных устройствах. К таким факторам могут относиться различные геометрические особенности (аспектное отношение емкости, расположение электродов), либо дополнительные силы, обусловленные, например, отклонением ориентации полости от канонической постановки, наличием внешних силовых полей. Получение зависимости характеристик течения даже от одного из описанных факторов требует рассмотрения целого спектра конфигураций задачи. В то же время, даже с применением современных методов лабораторных и численных экспериментов данная задача часто оказывается затратной как по времени, так и экономически.

Совокупность данных лабораторных экспериментов и прямого численного моделирования актуализирует использование моделей турбулентности в задачах о течениях жидких металлов под действием электромагнитных сил и сил плавучести, так как обеспечивает все лучшую базу для верификации. Благодаря моделям турбулентности, становится возможным разрешение сложных течений жидких металлов на более грубых сетках, чем тех, что требуются при прямом численном моделировании. Все описанные выше факторы делают доступным нахождение в приемлемые сроки подробных зависимостей режимов течения от параметров задачи в ранее неизученных конфигурациях.

**Целью диссертационной работы** является численное и экспериментальное изучение влияния осложняющих факторов на течения жидких металлов в замкнутых полостях под действием электромагнитных сил или сил плавучести. В рамках поставленной цели решены следующие задачи:

1. о влиянии наклона емкости на конвекцию жидкого натрия в наклонном цилиндре единичного аспектного отношения;
2. об электровихревом течении (ЭВТ) жидкого металла в длинном цилиндре с боковым оппозитным токоподводом;
3. о зависимости характеристик ЭВТ жидкого металла от аспектного отношения цилиндра;
4. о влиянии слабого вертикального однородного магнитного поля на ЭВТ

жидкого металла в цилиндре.

**Научная новизна** работы состоит в том, что в ней впервые

1. численно в трехмерной постановке исследована турбулентная конвекция жидкого натрия в цилиндре единичного аспектного отношения при ранее не рассмотренных значениях управляющих параметров (чисел Релея и Прандтля), при различных углах наклона емкости к направлению силы тяжести. Изучено влияние угла наклона цилиндра на теплоперенос и структуру течения. Использование метода крупных вихрей позволило в приемлемые сроки получить весь спектр результатов для полного диапазона наклонов (от 0 до 90 градусов с шагом 10 градусов);
2. экспериментально исследовано электровихревое течение галлиевой эвтектики ранее не рассматривавшейся конфигурации при несогласованных топологии течения и геометрии емкости. Экспериментально течение рассмотрено в отсутствие и присутствии внешнего магнитного поля, направление которого параллельно линии, соединяющей электроды. Также численно изучено ЭВТ в отсутствие внешнего магнитного поля, поскольку в эксперименте полностью избавиться от внешних полей невозможно;
3. численно исследованы электровихревые течения жидкого металла в замкнутых цилиндрических полостях различного аспектного отношения, в том числе во внешнем однородном магнитном поле, коллинеарном оси симметрии цилиндра, либо направленным к ней под заданным углом. Показано, что электровихревое течение наиболее выражено при малых аспектных отношениях. Обнаружено, что внешнее аксиальное магнитное поле, генерирующее азимутальное течение жидкого металла, приводит к сильному подавлению полоидального электровихревого течения. В слабых магнитных полях подавление происходит не сразу, и имеет место переходный режим, характеризующийся энергиями, на два порядка превосходящими энергии в установившемся течении. Подобные режимы могут играть критическую роль в работе жидкометаллических батарей.

**Теоретическая и практическая значимость.** Результаты, полученные в первой главе, представляют фундаментальный интерес с точки зрения более глубокого понимания особенностей турбулентной конвекции жидких металлов при различных углах наклона между градиентом температуры и направлением силы тяжести. Материалы второй, третьей и четвертой глав дают представление

о возможных механизмах управления пространственно-временной структурой электровихревых течений при использовании нестандартных конфигураций подвода тока, различных аспектных отношениях емкости, а также внешних магнитных полей.

С практической точки зрения результаты первой главы могут быть использованы при разработке технологических устройств, в которых используются жидкометаллические теплоносители. Результаты второй главы могут оказаться полезными при учете влияния вторичных течений, возникающих при боковом оппозитном токоподводе, на основное транзитное течение проводящей среды. Материалы третьей и четвертой глав могут быть востребованы в металлургии и энергетике, в частности, при проектировании жидкометаллических батарей. Это обусловлено тем, что полученные результаты свидетельствуют о существовании режимов течения, способных критическим образом влиять на работу таких устройств. В том числе показано, что слабое внешнее магнитное поле способно привести к развитию сильного азимутального течения и подавлению изначально полоидального течения проводящей среды.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Численное решение поставленных задач осуществлялось с использованием современных пакетов OpenFOAM и ANSYS. Экспериментальная часть работы выполнена на оборудовании лаборатории физической гидродинамики ИМСС УрО РАН.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты численного исследования турбулентной конвекции жидкого натрия в замкнутой наклонной цилиндрической полости с длиной равной диаметру, в том числе зависимости чисел Нуссельта и Рейнольдса от угла наклона цилиндра.
2. Результаты численного и экспериментального исследований электровихревых течений в замкнутой цилиндрической полости, при боковом токоподводе двумя оппозитно локализованными электродами.
3. Результаты численного исследования электровихревых течений в цилиндрах различной высоты при локализованном токоподводе на нижнем торце и снятии тока на всем верхнем торце.
4. Результаты численного исследования электровихревых течений жидкого металла в цилиндрической емкости с высотой равной радиусу, в присутствии внешнего однородного вертикального магнитного поля.

**Достоверность результатов** обеспечивается тщательным тестированием методов измерений, использованием качественного измерительного оборудования, верификацией математических моделей на имеющихся экспериментальных данных и, где это возможно, сравнением с известными результатами других авторов.

**Аппробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: Третья Российская конференция конференция по магнитной гидродинамике, 18–21 июня, 2018, Пермь; XXVII Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках», 3–6 октября, 2018, Пермь; Седьмая российская национальная конференция по теплообмену, 22–26 октября, 2018, Москва; V-я Всероссийская конференция с международным участием «Пермские гидродинамические научные чтения», 26–29 сентября, 2018, Пермь; XXI Зимняя школа по механике сплошных сред, 18–22 февраля, 2019, Пермь; Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 19–24 августа, 2019, Уфа; V международная конференция «Актуальные вопросы электротехнологии», 1–2 октября, 2020; VII всероссийская конференция с международным участием «Пермские гидродинамические научные чтения», 22–24 октября, 2020.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 22 печатных работах: 6 статей в журналах, являющихся рецензируемыми научными изданиями, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук [1–6]; 1 статья в журнале, индексируемом системой РИНЦ [7]; 3 статьи в сборниках трудов конференций [8–10] и 12 тезисов докладов [11–22].

**Личный вклад автора.** Постановка задач, результаты исследования и их интерпретация обсуждались с научным руководителем П. Г. Фриком и И. В. Колесниченко. Автор лично участвовал в подготовке, сборке и наладке экспериментальной установки. Автор лично участвовал в анализе и интерпретации полученных данных. Подготовка и выполнение расчетов в задачах конвекции жидких металлов осуществлялись совместно с А. С. Теймуразовым. Расчеты электродинамических задач выполнены И. В. Колесниченко. Расчеты гидродинамики в задачах электровихревых течений выполнены автором совместно с И. В. Колесниченко. Автор лично участвовал в обсуждении результатов и

подготовке всех статей.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 4 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 118 страниц, из них 61 страница текста, включая 49 рисунков. Библиография включает 139 наименований на 14 страницах.

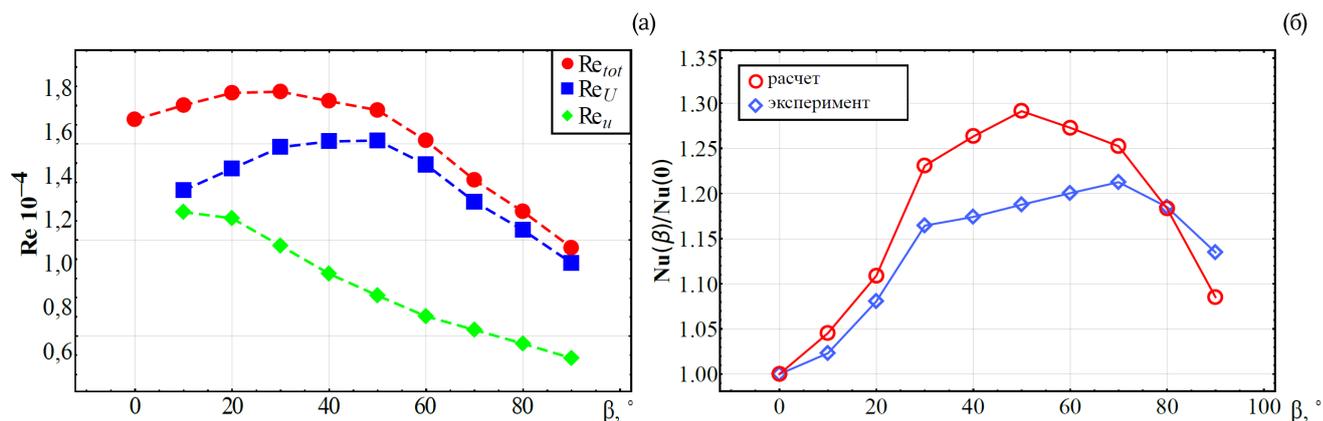
## Содержание работы

**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 первой главе** представлены результаты численного исследования турбулентной конвекции жидкого натрия в наклонном цилиндре с единичным аспектным отношением  $\Gamma \equiv L/D = 1$  и аксиальным подогревом. Между осью цилиндра и направлением силы тяжести задается угол  $\beta$  в интервале  $0 \div 90^\circ$ , с шагом в  $10^\circ$ . Боковые стенки емкости считаются теплоизолирующими. Материальные параметры выбирались в соответствии с имеющимися данными лабораторных экспериментов [23], так что число Релея составило  $Ra \equiv g\alpha L^3 \Delta T / (\nu\chi) = 1.5 \cdot 10^7$ . Задача решается численно в приближении Буссинеска в нестационарной постановке, с использованием OpenFOAM 4.1. Для моделирования мелкомасштабной турбулентности задействовался LES подход с применением модели Смагоринского.

Установлено, что при всех рассмотренных  $\beta$  в цилиндре на фоне турбулентного течения присутствует крупномасштабная циркуляция (КМЦ). Наибольшая скорость среднего течения соответствует наклону в  $50^\circ$ , а наименьшая — наклону в  $90^\circ$ . При вертикальном положении цилиндра наблюдается сложная трехмерная динамика КМЦ, а именно: изменение плоскости выделенного направления вращения, инверсии, низкочастотные колебания угла ориентации. Эти особенности течения подтверждают экспериментальные результаты, полученные в [23] при помощи подробного анализа долговременного поведения КМЦ. При отклонении цилиндра от вертикального положения появляется выделенное направление КМЦ. По мере приближения к горизонтальному положению цилиндра стратификация среды по температуре усиливается, и турбулентные

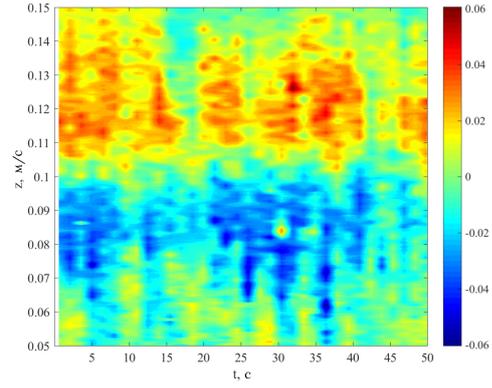
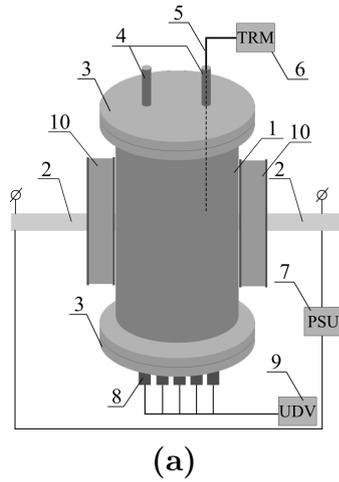
пульсации затухают.



**Рис. 1.** Зависимости числа Рейнольдса (а) и нормированного числа Нуссельта  $Nu(\beta)/Nu(0)$  (б) от угла наклона цилиндра  $\beta$ ; представлены экспериментальные данные из [23]

Важными интегральными характеристиками конвективных процессов, описывающими интенсивность течения и эффективный теплоперенос, являются числа Рейнольдса  $Re = UL/\nu$  и Нуссельта  $Nu = QL/(\chi\Delta t)$ . Результаты численного моделирования показали (см. Рис. 1), что число Рейнольдса, характеризующее полную энергию течения, достигает максимума при наклоне  $\beta = 20^\circ$ , а затем, с последующим увеличением  $\beta$ , монотонно уменьшается. Среднее течение имеет максимальную интенсивность при  $\beta = 50^\circ$ . Интенсивность пульсаций скорости монотонно убывает с увеличением угла наклона цилиндра. Наибольший теплоперенос, характеризуемый числом Нуссельта, наблюдается в наклонном положении емкости при  $\beta = 50^\circ$  и составляет  $Nu = 11.97$ , что на 29% выше, чем в вертикальном положении. В коротком цилиндре при наклоне поток тепла увеличивается не так существенно, как в длинных цилиндрах ( $\Gamma = 5$ ,  $\Gamma = 20$ ) [24–26].

**Во второй главе** численно и экспериментально рассмотрено электровихревое течение (ЭВТ) в цилиндрическом объеме жидкого металла при локализованном токоподводе к боковой стенке двумя оппозитными электродами. Для случая цилиндра «естественным» был бы аксиальный подвод тока, при котором тороидальные вихри образуются вблизи торцов цилиндра. В рассматриваемом случае возникающие вихри не соответствуют геометрии, то есть ось симметрии гидродинамического течения не совпадает с осью симметрии канала (осью симметрии цилиндра). В итоге, ожидаемо возникновение неустойчивости генерируемого ЭВТ, в силу внесения возмущений в поток стенками цилиндрической емкости.



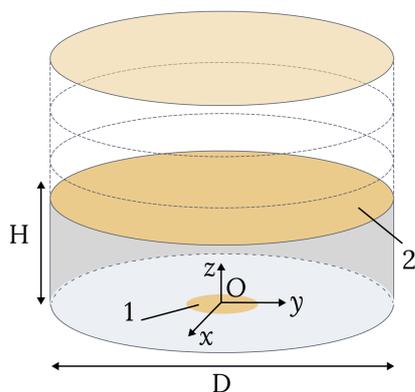
**Рис. 2.** (а) — схема эксперимента; (б) — пространственно-временная карта  $z$ -компоненты скорости течения вдоль оси цилиндра, сила тока  $I = 465$  А

Экспериментальная установка (Рис. 2(а)) состоит из цилиндрического канала 1 длиной  $L = 204$  мм и внутренним диаметром  $D = 68$  мм, выполненного из нержавеющей стали. К боковым стенкам канала оппозитно подведены цилиндрические медные электроды 2 диаметром 20 мм, подключенные к источнику постоянного тока 7. Торцевые стенки 3 выполнены из плексигласа для обеспечения возможности измерения скорости течения галлиевого сплава при помощи ультразвукового доплеровского анемометра. Также установка включает в себя катушки Гельмгольца 10 для создания внешнего магнитного поля, работающие в сонаправленном или противоположном режимах. Канал заполняется жидкой галлиевой эвтектикой 87% Ga + 10.5% Sn + 2% Zn со следующими материальными параметрами: плотность  $\rho = 6265$  кг/м<sup>3</sup>, электропроводность  $\sigma = 3.56 \cdot 10^6$  См/м, кинематическая вязкость  $\nu = 3.1 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, скорость звука в среде  $c = 2828$  м/с. Численное моделирование задачи осуществляется в пакете программ ANSYS.

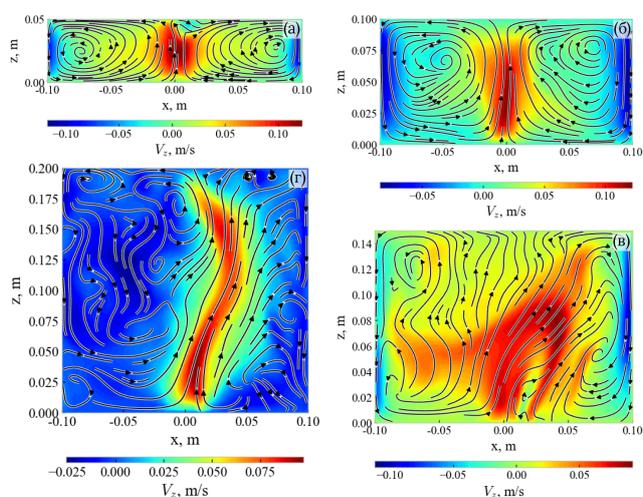
Результаты лабораторных экспериментов и численного моделирования показали, что возникающее в цилиндрической полости с боковым оппозитным токоподводом электровихревое течение (ЭВТ) жидкого металла нестационарно (см. Рис. 2(б)) во всем рассмотренном диапазоне силы тока (от 200 до 500 А в лабораторном эксперименте и от 50 до 1000 А — в численном). В отсутствие внешнего магнитного поля течение представлено двумя тороидальными вихрями, смещенными в верхнюю часть цилиндра. Наложение магнитного поля, направление которого параллельно линии, соединяющей электроды, приводит к закрутке металла вблизи электродов и увеличивает как общую интенсивность

течения, так и пульсации скорости.

**В третьей главе** численно решена задача об электровихревом течении галлиевого сплава, помещенного в цилиндрические емкости аспектного отношения  $\Gamma \equiv H/D = 0.25, 0.50, 0.75$  и  $1$ . Схема расчетной области изображена на Рис. 3. Один из электродов имеет радиус  $D_c = 40$  мм и расположен на нижнем торце цилиндра, а в качестве второго электрода выступает вся поверхность верхнего торца. Сила тока варьировалась в пределах от 10 до 1000 А. Расчеты проводились в пакете программ ANSYS, а материальные параметры жидкого металла были выбраны аналогичными описанным во второй главе.



**Рис. 3.** Схема расчетной области. 1 и 2 — электроды,  $H$  — высота цилиндра,  $D = 200$  мм — диаметр цилиндра. Диаметр электрода на нижнем торце  $D_c = 40$  мм



**Рис. 4.** Мгновенные поля  $z$ -компоненты скорости течения в сечении  $zOx$ . Аспектное отношение  $\Gamma$ : (а) — 0.25, (б) — 0.50, (в) — 0.75, (г) — 1

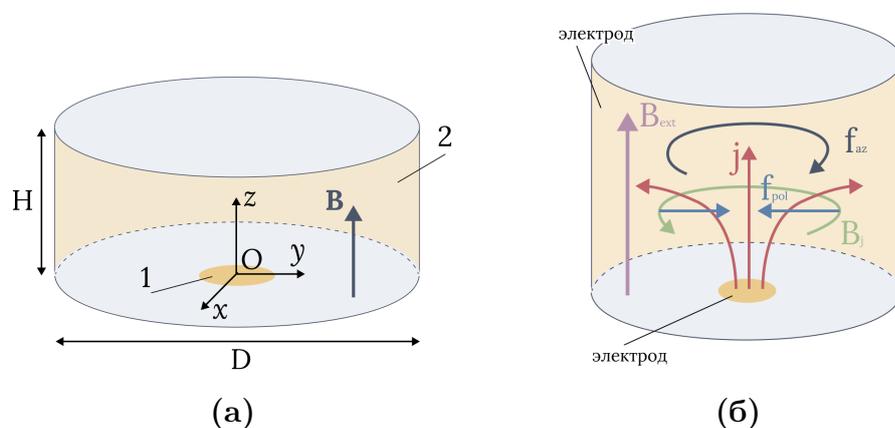
Показано, что ЭВТ возникает во всем рассмотренном диапазоне параметров задачи. Течение имеет полоидальный вид, что обусловлено формированием в жидком металле одного крупномасштабного вихря. При этом существует квазистационарный режим течения, реализующийся при токах ниже некоторого критического значения, зависящего от аспектного отношения емкости и проявляющегося в сохранении в среднем формы крупномасштабного вихря на временных масштабах, много больших характерного времени процесса (периода оборота вихря). Обнаружено, что изменение аспектного отношения цилиндра оказывает влияние на все параметры течения — его структуру, интенсивность, а также пульсационные характеристики. Увеличение аспектного отношения  $\Gamma$  способствует развитию мелкомасштабной структуры течения.

**В четвертой главе** рассмотрена задача о влиянии слабого внешнего однородного постоянного магнитного поля на электровихревое течение жидкого

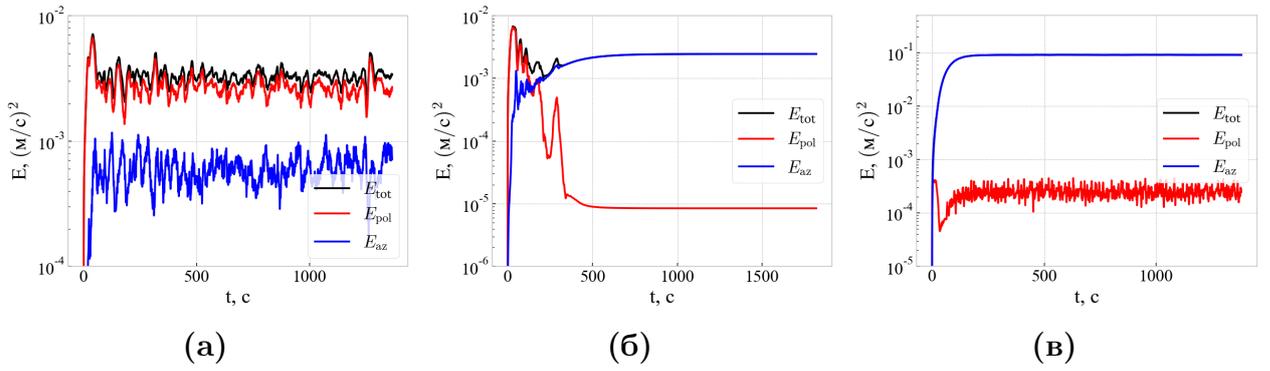
металла в цилиндре с аспектным отношением  $\Gamma \equiv H/D = 0.5$ . ЭВТ создается в осесимметричной конфигурации (см. Рис. 5): один электрод с диаметром  $D_c = 30$  мм расположен в центре нижнего торца цилиндра, а в качестве второго электрода выступает вся боковая стенка цилиндра. Задача решалась численно в пакете программ ANSYS. Материальные параметры жидкого металла были выбраны соответствующими галлиевому сплаву, описанному во второй главе.

Численно получены зависимости интегральных характеристик течения — энергии полоидального  $E_{\text{pol}} = \int_V (v_r^2 + v_z^2) dV$  и азимутального  $E_{\text{az}} = \int_V v_\varphi^2 dV$  течений — от внешнего магнитного поля, а также поля скорости течения жидкого металла в цилиндре. Результаты свидетельствуют о том, что в отсутствие внешнего магнитного поля энергия полоидального течения почти на порядок выше энергии азимутального (Рис. 6(а)). Если к системе приложено слабое внешнее магнитное поле, по своей конфигурации идентичное магнитному полю Земли (Рис. 6(б)), то существует переходный интервал, в котором сначала развивается основное полоидальное течение, однако затем его энергия резко уменьшается, становясь на два порядка меньше энергии  $E_{\text{az}}$ . То есть поле Земли является достаточным для развития азимутального течения, способного существенным образом подавить полоидальное ЭВТ (Рис. 7(а)). В сильном вертикальном магнитном поле 1 мТл интенсивное вращение развивается настолько быстро (Рис. 6(в)), что полоидальное течение не формируется вовсе.

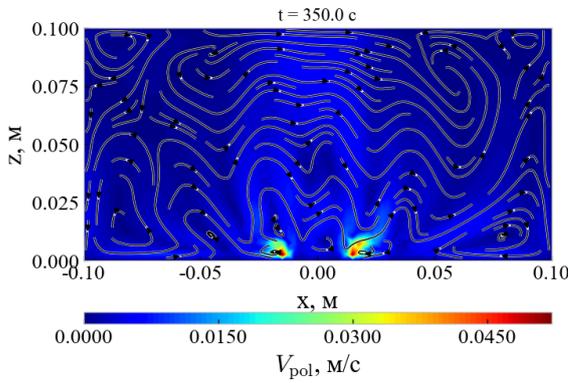
Показано, что полоидальное подавление имеет место при превышении некоторого критического внешнего вертикального магнитного поля ( $\approx 0.02$  мТл, см. Рис. 7(б)). Ниже данного порога полоидальное течение устойчиво к азимутальным возмущениям. При превышении критического значения  $E_{\text{pol}}$  и  $E_{\text{az}}$



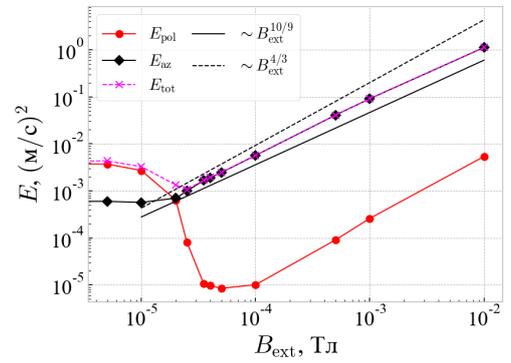
**Рис. 5.** Схемы расчетной области (а) и генерации течения (б)



**Рис. 6.** Эволюция полной, полоидальной и азимутальной энергий течения. (а) — нет внешнего магнитного поля, (б) — магнитное поле Земли, (в) — сильное вертикальное магнитное поле 1 мТл



(а)



(б)

**Рис. 7.** (а) — мгновенное поле полоидальной компоненты скорости в сечении  $zOx$ , в случае магнитного поля Земли; (б) — зависимости полоидальной, азимутальной и полной энергии течения от внешнего магнитного поля

монотонно возрастают с магнитным полем.

**В Заключение** приводятся основные результаты, полученные в диссертационной работе.

## Основные результаты и выводы

1. По результатам численного моделирования термогравитационной конвекции жидкого натрия в цилиндре с аспектным отношением  $\Gamma \equiv L/D = 1$  проведен анализ зависимости пространственно-временной структуры течения от угла  $\beta$  между осью цилиндра и направлением силы тяжести. Показано, что в цилиндре возникает крупномасштабная циркуляция (КМЦ), угол ориентации которой при малых углах наклона непостоянен, а его вариации носят колебательный характер с доминирующей частотой. По

мере увеличения угла наклона КМЦ стабилизируется, а при углах  $\beta > 30^\circ$  доминирующая частота пропадает. Обнаружена нелинейная немонотонная зависимость интенсивности циркуляции натрия (числа Рейнольдса) и эффективного теплопереноса (числа Нуссельта) от наклона цилиндра. Энергия течения максимальна при  $\beta = 20^\circ$ , причем среднее течение имеет максимальную интенсивность при  $\beta = 50^\circ$ , а интенсивность пульсаций скорости монотонно убывает с увеличением угла наклона цилиндра. Максимальный теплоперенос наблюдается при угле  $\beta \approx 50^\circ$ . Отмечено, что в случае  $\Gamma = 1$  с увеличением наклона число Нуссельта растет не так существенно, как в длинных цилиндрах.

2. На основании данных экспериментальных и численных исследований показано, что возникающее в цилиндрической полости с боковым оппозитным токоподводом электровихревое течение (ЭВТ) жидкого металла нестационарно во всем рассмотренном диапазоне силы тока (от 200 до 500 А в лабораторном эксперименте и от 50 до 1000 А — в численном). В отсутствие внешнего магнитного поля течение представлено двумя тороидальными вихрями, смещенными в верхнюю часть цилиндра. Наложение магнитного поля, направление которого параллельно линии, соединяющей электроды, приводит к закрутке металла вблизи электродов и увеличивает как общую интенсивность течения, так и пульсации скорости.
3. Показано, что в вертикальном цилиндре с локализованным осевым токоподводом на торцевой поверхности возникающее в жидком металле ЭВТ в виде одного крупномасштабного вихря тороидальной формы доминирует во всем диапазоне рассмотренных токов (от 10 до 1000 А) и аспектных отношений ( $\Gamma = H/D = 0.25; 0.50; 0.75; 1$ ). При малых токах вихрь стационарен, а критическое значение силы тока, определяющее границу перехода к нестационарному режиму течения, зависит от аспектного отношения цилиндра. При больших токах, увеличение  $\Gamma$  способствует развитию мелкомасштабной (турбулентной) структуры течения.
4. Обнаружено, что внешнее аксиальное магнитное поле, генерирующее азимутальное течение металла, приводит к сильному подавлению полоидального электровихревого течения. Показано, что механизм подавления основан на балансе сил, создающих ЭВТ, и центробежных сил вращающегося потока и в целом соответствует теории, предложенной в работе [27]. Показано, что

в слабых магнитных полях менее  $2 \cdot 10^{-5}$  Тл время развития общего вращения металла существенно превосходит время развития ЭВТ, что приводит к формированию переходного режима, характеризуемого энергиями, на два порядка превосходящими энергии в установившемся течении. Такие переходные режимы могут быть критичны для работы жидкометаллических батарей.

## Список публикаций

1. Мандрыкин С. Д., Теймуразов А. С. Турбулентная конвекция жидкого натрия в наклонном цилиндре с единичным аспектным отношением // [Вычислительная механика сплошных сред](#). 2018. Т. 11, № 4. С. 417–428.
2. Mandrykin S., Kolesnichenko I., Frick P. Electrovortex flows generated by electrodes localized on the cylinder side wall // [Magnetohydrodynamics](#). 2019. Vol. 55, no. 1-2. P. 115–124.
3. Mandrykin S., Ozernykh V., Kolesnichenko I. Numerical study of electro-vortex flow in long cylinder with localized current supply // [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering](#). 2019. Vol. 581. P. 012009.
4. Zwirner L., Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Mandrykin S., Pavlinov A., Shestakov A., Teimurazov A., Frick P., Shishkina O. The influence of the cell inclination on the heat transport and large-scale circulation in liquid metal convection // [Journal of Fluid Mechanics](#). 2019. Vol. 884. P. A18.
5. Kolesnichenko I., Frick P., Eltishchev V., Mandrykin S., Stefani F. Evolution of a strong electrovortex flow in a cylindrical cell // [Phys. Rev. Fluids](#). 2020. Vol. 5. P. 123703.
6. 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. 56, no. 2–3. P. 81–90.
7. Мандрыкин С. Д., Колесниченко И. В., Лосев Г. Л., Фрик П. Г. Электровихревое течение жидкого металла в цилиндрическом канале // [Вестник Пермского университета. Физика](#). 2018. № 2. С. 20–27.
8. Мандрыкин С. Д., Теймуразов А. С. Метод крупных вихрей для расчета конвекции жидкого металла в коротком наклонном цилиндре // [Материалы XXVII Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студен-](#)

- тов «Математическое моделирование в естественных науках». Пермь: 2018. С. 166–169.
9. Мандрыкин С. Д., Теймуразов А. С., Колесниченко И. В. Численное исследование турбулентной конвекции жидкого натрия в наклонном цилиндре единичного аспектного отношения с использованием метода крупных вихрей // Труды Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену: в 3 томах. Т. 1. Москва: Издательский дом МЭИ, 2018. С. 69–71.
  10. Мандрыкин С. Д., Озерных В. С., Колесниченко И. В. Электровихревые течения в цилиндрах с различным аспектным отношением при локальном токоподводе // Материалы XXVIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках». Пермь: 2019. С. 98–102.
  11. Мамыкин А. Д., Мандрыкин С. Д., Теймуразов А. С., Фрик П. Г. Турбулентная конвекция жидкого натрия в коротком наклонном цилиндре // Тезисы V-ой всероссийской конференции «Пермские гидродинамические научные чтения». Пермь: 2018. С. 192–194.
  12. Mandrykin S., Kolesnichenko I., Losev G., Frick P. Experimental study of the electrovortex flow generated by opposing point electrodes in a vertical cylindrical cell // Book of abstracts III Russian Conference on Magnetohydrodynamics. Perm: 2018. P. 83.
  13. Mandrykin S., Teimurazov A. Numerical study of turbulent liquid metal convection in inclined cylinder of unit aspect ratio using large-eddy-simulation approach // Book of abstracts III Russian Conference on Magnetohydrodynamics. Perm: 2018. P. 84.
  14. Мандрыкин С. Д., Теймуразов А. С. Естественная конвекция жидкого металла в цилиндре единичного аспектного отношения при различных наклонах к направлению силы тяжести // XXI Зимняя Школа по механике сплошных сред. Тезисы докладов. Пермь: 2019. С. 190.
  15. Колесниченко И. В., Халилов Р. И., Мандрыкин С. Д. Вихревое течение жидкого металла, вызванное действием электромагнитной силы // XXI Зимняя Школа по механике сплошных сред. Тезисы докладов. Пермь: 2019. С. 147.
  16. Колесниченко И. В., Мандрыкин С. Д., Озерных В. С., Ельтищев В. А., Халилов Р. И., Павлинов А. М., Лосев Г. Л., Фрик П. Г. Структура и поведе-

- ние нестационарного электровихревого течения в цилиндрической ячейке // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Аннотации докладов. Уфа: 2019. С. 117.
17. Фрик П. Г., Ельтищев В. А., Лосев Г. Л., Мандрыкин С. Д., Колесниченко И. В., Халилов Р. И., Стефани Ф., Вебер Н. Электровихревые течения в контексте проблемы создания жидкометаллических батарей // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Аннотации докладов. Уфа: 2019. С. 128.
  18. Мандрыкин С. Д., Теймуразов А. С. Естественная конвекция жидкого натрия в наклонном цилиндре квадратного сечения // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Аннотации докладов. Уфа: 2019. С. 120.
  19. Колесниченко И. В., Халилов Р. И., Мандрыкин С. Д. Вихревое течение жидкого металла, вызванное действием электромагнитной силы // XXI Зимняя Школа по механике сплошных сред. Тезисы докладов. Пермь: 2019. С. 147.
  20. Колесниченко И. В., Ельтищев В. А., Мандрыкин С. Д., Лосев Г. Л., Озерных В. С., Фрик П. Г. Гидродинамические процессы в ячейке с локализованным подводом тока в контексте проблемы создания жидкометаллических батарей // II International conference «Problems of Thermonuclear Power and Plasma Technology». Book of abstracts. Moscow: 2019. С. 110.
  21. Мандрыкин С. Д., Ельтищев В. А., Колесниченко И. В. Подавление полоидальных электровихревых течений жидкого металла внешним магнитным полем // Тезисы XXIX Всероссийской конференции «Математическое моделирование в естественных науках». Пермь: 2020. С. 71.
  22. Мандрыкин С. Д., Колесниченко И. В., Фрик П. Г. Динамика полоидальных электровихревых течений жидкого металла в слабом внешнем магнитном поле // Тезисы VII-ой всероссийской конференции с международным участием «Пермские гидродинамические научные чтения». Пермь: 2020. С. 281–284.

## Цитированная литература

23. Khalilov R., Kolesnichenko I., Pavlinov A., Mamykin A., Shestakov A., Frick P. Thermal convection of liquid sodium in inclined cylinders // [Physical Review](#)

- [Fluids](#). 2018. Vol. 3, no. 4. P. 043503.
24. Teimurazov A., Frick P. Thermal convection of liquid metal in a long inclined cylinder // [Physical Review Fluids](#). 2017. Vol. 2, no. 11.
  25. Vasil'ev A. Y., Kolesnichenko I. V., Mamykin A. D., Frick P. G., Khalilov R. I., Rogozhkin S. A., Pakholkov V. V. Turbulent convective heat transfer in an inclined tube filled with sodium // [Technical Physics](#). 2015. Vol. 60, no. 9. P. 1305–1309.
  26. Kolesnichenko I. V., Mamykin A. D., Pavlinov A. M., Pakholkov V. V., Rogozhkin S. A., Frick P. G., Khalilov R. I., Shepelev S. F. Experimental study on free convection of sodium in a long cylinder // [Thermal Engineering](#). 2015. Vol. 62, no. 6. P. 414–422.
  27. Davidson P. A., Kinnear D., Lingwood R. J., Short D. J., He X. The role of Ekman pumping and the dominance of swirl in confined flows driven by Lorentz forces // [European Journal of Mechanics -B/Fluids](#). 1999. Vol. 18, no. 4. P. 693–711.

*Научное издание*

Мандрыкин Сергей Дмитриевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук на тему:

Течения жидких металлов в замкнутых полостях под действием

электромагнитных сил

и сил плавучести

Подписано в печать 15.07.2021. Формат 60 × 90 1/16. Тираж 100 экз. Заказ .