

На правах рукописи



Павлинов Александр Михайлович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ
ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Пермь — 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук, ведущий научный
сотрудник ОИВТ РАН,
Разуванов Никита Георгиевич

доктор физико-математических наук, профес-
сор МГУ,
Соколов Дмитрий Дмитриевич

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное об-
разовательное учреждение высшего образова-
ния "Национальный исследовательский уни-
верситет "МЭИ""

Защита состоится " **8** " **декабря 2016 г.** в 14 ч. 00 мин. на заседании Диссер-
тационного совета Д 004.012.01 в Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения
Российской академии наук по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Ко-
ролёва 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМСС УрО РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные гербовой печатью организации, просьба
направлять по указанному адресу в двух экземплярах не позднее, чем за две
недели до защиты.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2016.

Учёный секретарь Диссертационного совета

доктор физико-математических наук



Зуев А. Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы

Актуальность экспериментальных исследований течений жидких металлов обусловлена многочисленными техническими и технологическими приложениями, в первую очередь в металлургии, а также фундаментальными проблемами гидродинамики проводящих сред. Основной тенденцией развития экспериментальной магнитной гидродинамики в наступившем тысячелетии стал переход к задачам, характеризуемым экстремальными значениями определяющих параметров (числа Рейнольдса, магнитного числа Рейнольдса, параметра МГД-взаимодействия), остающимся за гранью возможностей самых современных суперкомпьютеров. Большие значения числа Рейнольдса $Re = UL/\nu$ подразумевают наличие развитой турбулентности, и именно развитые турбулентные течения интересны как с точки зрения технологических приложений, так и с точки зрения фундаментальных гео- и астрофизических задач. Если говорить о процессах, включающих взаимодействие течения проводящей среды с магнитным полем, можно выделить случай больших значений параметра МГД-взаимодействия $N = \sigma B_0^2 L / \rho \nu$, характерный для МГД-машин, возбуждающих течение металла за счёт магнитных полей, и случай больших магнитных чисел Рейнольдса $Rm = \mu \mu_0 \sigma LU$, когда интенсивное течение проводящей среды вызывает возмущение приложенного магнитного поля. Полного понимания особенностей таких взаимодействий на данный момент нет и интерес представляют исследования глубоко нелинейных режимов течений. Многочисленные проблемы измерений в жидких металлах становятся в этих режимах еще серьезней и требуют систематической работы по совершенствованию методик измерений и обработки получаемых сигналов.

Для улучшения качества продукции металлургической промышленности требуется проработка конструкций различных установок, для чего, в свою очередь, необходимы знания как о формируемом среднем течении выплавляемого металла, так и о свойствах возбуждаемых в потоке турбулентных пульсаций. Такие пульсации, в частности, могут оказывать положительное влияние на процесс перемешивания компонент расплава магнитогидродинамическими (МГД-) перемешивателями. При моделировании таких процессов измерительные системы находятся в зоне действия интенсивных электромагнитных помех, создаваемых самой установкой. Для исключения их влияния на результат требуются как детальная проработка измерительной схемы, так и тщательная фильтрация экспериментальных данных.

Интенсивные конвективные течения жидких металлов, имеющих малое значение числа Прандтля Pr , возбуждаются при наличии мощных источников и стоков тепла. Такие условия возникают, например, в контурах охлаждения ядерных реакторов с жидкометаллическим охладителем. При этом в жидком металле возникают значительные термотоки, препятствующие электромагнитным измерениям характеристик течения.

Важным аспектом применения жидких металлов является изучение взаимодействия течения с магнитным полем. Для верификации математических моделей, описывающих явления магнитной гидродинамики, требуются данные экспериментов, проводимых при умеренных и высоких магнитных числах Рейнольдса $Rm > 1$. Такие условия достижимы при наличии интенсивных турбулентных течений хорошо проводящей среды. Оптимальной средой для таких экспериментов является жидкий натрий, сочетающий высокую проводимость с относительно низкой температурой плавления. Проведение экспериментов и работу систем измерений усложняет высокая химическая активность натрия.

Целью работы является создание систем измерения скорости, магнитного поля и температуры в турбулентных потоках жидких металлов, генерируемых электромагнитным, механическим и конвективным способами, работающих в условиях высокой температуры, химической активности среды и высокого уровня электромагнитных помех, отладка методик измерения, и получение новых экспериментальных данных в конкретных турбулентных течениях металла.

Научная новизна определяется разработанными методиками измерений в турбулентных потоках жидких металлов, с помощью которых получены следующие новые результаты:

1. Экспериментально изучена структура турбулентных течений при наложении бегущих и вращающихся магнитных полей и их влияние на процесс кристаллизации жидкого металла;
2. Экспериментально исследованы особенности турбулентных конвективных течений жидкого натрия в длинных цилиндрах с различной ориентацией по отношению к силе тяжести;
3. В лабораторных экспериментах с потоком жидкого натрия в замкнутом тороидальном канале впервые зарегистрировано явление турбулентного диамагнетизма, состоящее в вытеснении магнитного поля из области потока с интенсивной турбулентностью;

4. Впервые метод Лоренцевой расходомерии применен для измерений в потоке жидкого металла с $Rm > 1$.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Отработаны методики измерения скоростей и расходов жидких металлов, которые могут найти широкое применение в системах измерений, применяемых в физических лабораториях и технологических устройствах. Предложена конструкция датчика скорости жидкого металла на основе измерения силы Лоренца, позволяющего работать при $Rm > 1$;
2. Результаты исследований течений модельного сплава в полости МГД-перемешивателя могут быть использованы при создании новых индукционных МГД устройств. Полученные результаты предполагается использовать в ИМСС при проектировании МГД-перемешивателей для жидких металлов;
3. Экспериментальные данные, полученные при исследованиях конвективных течений жидкого натрия в длинных цилиндрах и смешения разнотемпературных потоков жидкого натрия были использованы для верификации кодов, применяемых для проектирования контуров охлаждения реакторов на быстрых нейтронах.
4. Результаты экспериментального исследования эффекта турбулентного диамагнетизма имеют значение для теории динамо.

Работа выполнялась в рамках госбюджетной темы “Численные модели турбулентных потоков проводящей и непроводящей жидкости и их экспериментальная верификация” (№ гос.рег. 01201281037), проектов РФФИ 13-01-96042 р_урал_а, 14-01-96010 р_урал_а, 14-08-96014 р_урал_а и проекта МИГ № С26/251 Министерства образования и науки Пермского края.

Методология и методы исследования

Количественные измерения скоростей жидких металлов осуществлялись при помощи датчиков (кондукционных, индукционных, термодиффузионных) и усилителей собственного изготовления. Для определения границы раздела фаз при кристаллизации под действием перемешивающих течений были использованы ультразвуковые датчики TR0408RS и доплеровский анемометр DOP2000 фирмы Signal Processing SA. Для усиления

сигналов катушек при исследовании явления турбулентного диамагнетизма были использованы усилители SR560 фирмы Stanford Research Systems, Inc. Измерения температур в экспериментах по изучению конвекции и смешения разнотемпературных потоков жидкого натрия проводилось с помощью хромель-алюмелевых термопар. Аналого-цифровое преобразование усиленных сигналов, а также сигналов термопар и датчиков уровня выполнялось средствами плат сбора данных National Instruments (АЦП NI9239, NI9213, NI9205, NI9227, NI9225, цифровая плата NI9403, шасси сDAQ - 9184 и сDAQ-9188). Управление системами сбора данных осуществлялось программами собственной разработки в среде National Instruments LabView и средствами National Instruments SignalExpress. Обработка экспериментальных данных проводилась в системе GNU Octave.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. методики измерения скоростей и расходов жидких металлов;
2. результаты исследования электромагнитных характеристик, течений и процесса кристаллизации в полости МГД-перемешивателя;
3. экспериментальное подтверждение эффекта турбулентного диамагнетизма;
4. результаты экспериментального исследования тепломассопереноса жидкого натрия в длинном наклонённом цилиндре.

Обоснованность и достоверность исследований достигаются тщательной разработкой методик проведения экспериментов, а также сравнением полученных результатов с данными известных теоретических и экспериментальных работ.

Апробация работы. Основные результаты, приводимые в диссертации, докладывались и обсуждались на: Всероссийской конференции молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах», Пермь, 2010, XVII, XVIII, XIX Зимней школе по механике сплошных сред, Пермь, 2011, 2013, 2015, Российской конференции по магнитной гидродинамике, Пермь, 2012, 2015, 14й Европейской Турбулентной конференции (ETC14), Лион, Франция, 2013, Международной научной конференции Фридримановские чтения, Пермь, 2013, Международной конференции Пермские Гидродинамические Научные Чтения, 2013, 2014, 9й международной конференции по фундаментальной и прикладной магнитной гидродинамике RAMIR, Рига, Латвия, 2014, 3м международном семинаре по Измерительным методам в потоках жидких металлов (MTLM2015), Дрезден, Германия, 2015.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 49 работ, включая 8 статей из списка ВАК, Web of Science, Scopus [1–8], 16 статей в трудах конференций различного уровня и сборниках научных статей [9–24], 25 тезисов конференций.

Личный вклад автора. Автор диссертации отвечал за измерительную часть всех экспериментальных исследований. Системы измерения скорости, магнитных полей и температуры разработаны, созданы, настроены, смонтированы автором. В силу сложности и небезопасности работы с жидким натрием при высоких температурах, эксперименты по изучению конвекции натрия проводились командой, состоящей не менее чем из 4 человек. Автор принимал личное участие во всех экспериментах, в создании алгоритмов обработки и проведении обработки экспериментальных данных, участвовал в подготовке всех статей и отчетов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, пяти Глав, Заключения и Списка литературы (121 наименование). Полный объем диссертации составляет 113 страниц, включая 45 рисунков и 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты, их практическая ценность, а также описана структура диссертации.

Первая глава содержит обзор литературы по теме диссертации, объединенной в параграфы: *Турбулентные потоки жидких металлов, Измерения скорости в жидких металлах, Магнитное поле в турбулентной среде.*

Вторая глава посвящена исследованию МГД-турбулентности, вызываемой бегущими и вращающимися магнитными полями. В разделе **2.1** дано описание конструкции МГД-перемешивателя (Рис. 1а). В разделе **2.2** описана методика проведения эксперимента по изучению распределения создаваемого индуктором перемешивателя магнитного поля и полученные результаты, позволившие точно настроить математическую модель индукторов (Рис. 1б). Высокое пространственное разрешение обеспечивалось малыми расстояниями между точками, в которых проводились измерения. Для этого холловский датчик магнитного поля перемещался внутри объема перемешивателя с помощью электронной подвижки. Разработанная программа синхронизировала перемещение датчика с опросом магнитометра, таким образом участие человека в измерениях было минимизировано. В

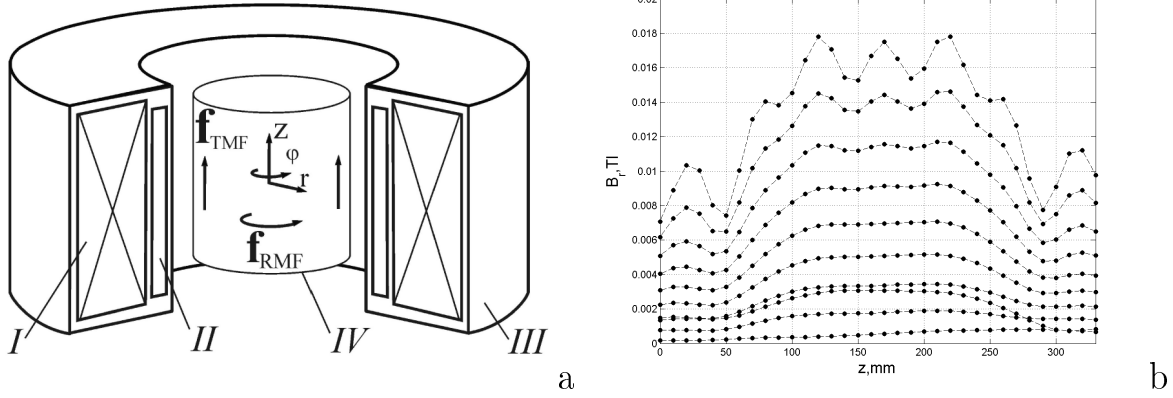


Рис. 1: (а) Устройство МГД-перемешивателя : I - индукторы бегущего и вращающегося магнитных полей, II - трубки охлаждения, III - корпус; (б) распределение радиальной компоненты магнитного поля в полости МГД-перемешивателя вдоль вертикальной оси.

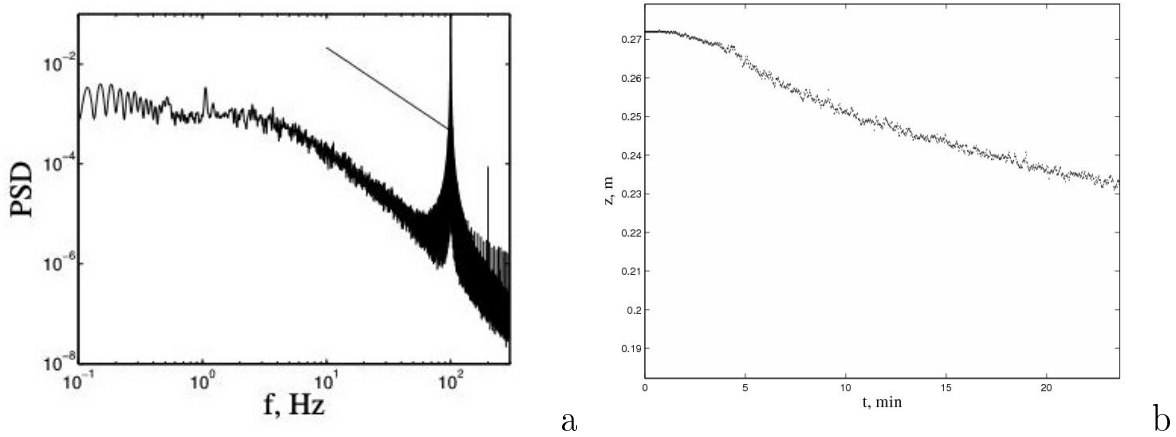


Рис. 2: (а) Спектральная плотность мощности сигнала кондукционного датчика скорости при частоте тока индуктора $F_{rot} = 100$ Гц; (б) эволюция положения фронта кристаллизации.

разделе **2.3** приведены результаты измерения интегральной электромагнитной силы, генерируемой вращающимся и бегущим магнитными полями в проводящем твёрдом цилиндре. Полученные результаты были использованы для верификации математической модели. В разделе **2.4** дано описание экспериментальной установки по измерению характеристик мелко-масштабной турбулентности возбуждаемой МГД-перемешивателем в изотермическом объеме жидкого металла. В силу высокой интенсивности магнитных полей в области перемешивания была разработана чувствительная система измерения локальных значений скорости, включающая в себя массив двухкомпонентных кондукционных датчиков скорости, прецизионные усилители с высоким динамическим диапазоном (на основе инструментальных усилителей Texas Instruments INA128), фильтры и 24-битные высокоскоростные аналого-цифровые преобразователи (National Instruments NI

9239). Также в разделе приведена методика фильтрации экспериментальных данных, основанная на вейвлет-кросскорреляционном анализе, и полученные результаты (Рис. 2а). Раздел **2.5** содержит описание экспериментальной установки по изучению влияния турбулизованных перемешивающих течений на процесс направленной кристаллизации модельного сплава. Эволюция положения фронта кристаллизации и его форма определялись с помощью ультразвуковых датчиков. Вейвлет-анализ позволил локализовать положения фронта в зашумленных сигналах (Рис. 2b). Показано, что интенсификация перемешивающего течения приводит к замедлению намораживания твёрдой фазы.

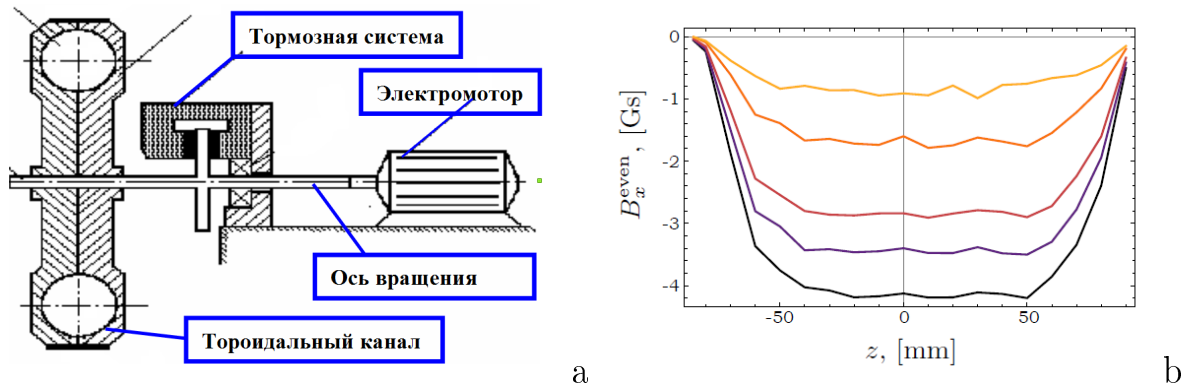


Рис. 3: (а) Схема возбуждения импульсного турбулентного течения жидкого натрия; (б) распределение тороидальной компоненты магнитного поля.

Третья глава посвящена исследованию возмущения аксиального магнитного поля тороидальным турбулентным течением жидкого натрия. В приближении теории среднего поля в уравнении индукции среднего магнитного поля $\partial_t \bar{\mathbf{B}} = \nabla \times (\bar{\mathbf{U}} \times \bar{\mathbf{B}} + \boldsymbol{\varepsilon}) - \eta \nabla^2 \bar{\mathbf{B}}$ появляется слагаемое $\boldsymbol{\varepsilon} = \overline{\mathbf{u} \times \mathbf{b}}$, которое описывает эффективное электрическое поле, вызванное пульсациями магнитного поля и поля скорости:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon} \bar{\mathbf{B}} = & -\alpha^{(0)} \bar{\mathbf{B}} - \beta^{(0)} \nabla \times \bar{\mathbf{B}} - \\ & \dots - (\gamma^{(0)} \mathbf{g} + \dots) \times \bar{\mathbf{B}}. \end{aligned}$$

В общем виде разложение $\boldsymbol{\varepsilon} \bar{\mathbf{B}}$ содержит 19 слагаемых. Слагаемые $\alpha^{(0)}$ и $\beta^{(0)}$ отвечают за генерационный и диссипационный эффекты в однородной изотропной зеркально-несимметричной турбулентности и были изучены экспериментально. Третье слагаемое с $\gamma^{(0)}$ связано с переносом магнитного поля турбулентностью, или турбулентным диамагнетизмом, отвечающим в некоторых случаях за снижение порога динамо-генерации. Его изучение является целью данной работы. Эффект известен давно, но в силу сложности постановки прямым методом экспериментально изучен был впервые.

Эффект является слабым и для измерений требуются потоки среды, характеризующиеся высокими значениями Rm , что накладывает ограничения на свойства среды и делает натрий единственным приемлимым материалом. Несмотря на низкую температуру плавления $T = 97.7^\circ C$, работа с натрием осложнена его высокой химической активностью, что требует тщательной проработки методов измерений. Исследования проводились на экспериментальной установке, подробно описанной в разделе 3.2. Раскручивание тороидальной титановой оболочки, заполненной жидким натрием, до частоты оборотов $F_{max} = 45$ Гц приводит к запасанию энергии в жидкой среде (Рис. 3а). Импульсное турбулентное течение генерируется в момент остановки оболочки за время $\tau \approx 0.3$ с. Получаемый таким образом турбулентный поток с Rm достигающим 30, позволяет исследовать интересующий тонкий эффект. В разделе 3.3 изложены результаты измерения возмущенного магнитного поля (Рис. 3б). Эффект вытеснения магнитного поля турбулентным течением чётко наблюдается по тороидальной компоненте локального магнитного поля. Индуцированное поле B_x достигает величины около 4 Гаусс в момент остановки, когда интенсивность турбулентного течения максимальна, то есть около 30 процентов от величины наложенного магнитного поля.

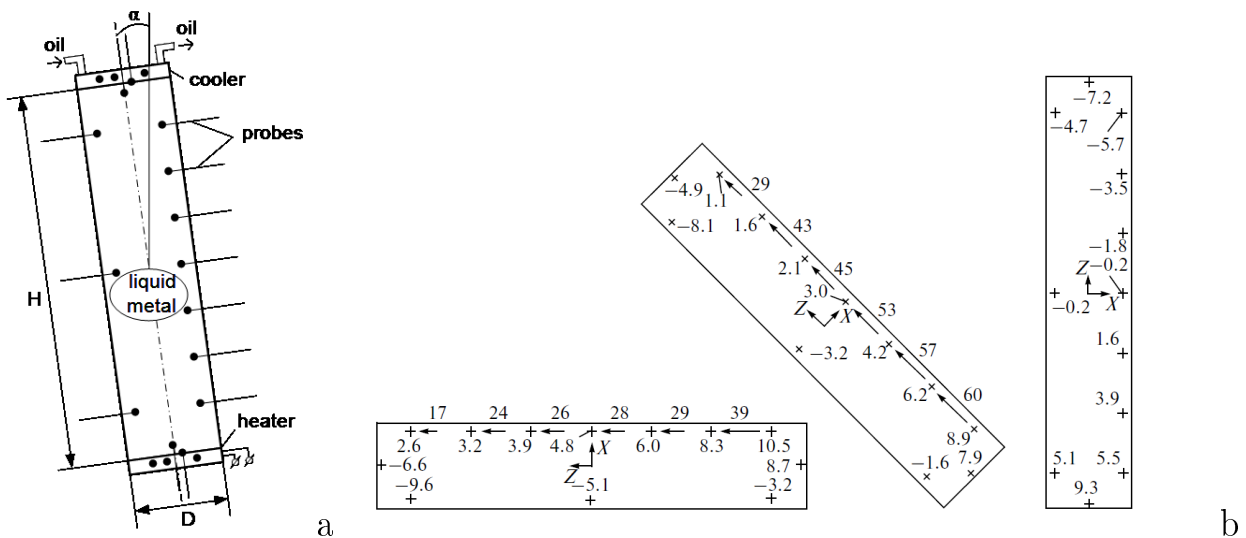


Рис. 4: (а) Схема конвективной установки; (б) средняя относительная температура и средняя скорость натрия, стрелками указано направление средней скорости; значения скорости, в мм/с, приведены над стрелками.

Четвертая глава посвящена исследованию термогравитационной конвекции жидкого натрия в длинном цилиндре, расположенном под различными углами к вертикали. Экспериментальное исследование усложнено не только высокой химической активностью натрия, но и необходимостью

поддержания высокой температуры до 300°C . Это дополнительно приводит к проблемам с герметизацией экспериментальной модели в местах установки датчиков, проходящих через стенку модели. Для исследования конвективного течения были изготовлены высокотемпературные двухкомпонентные кондукционные датчики скорости с переносом магнитного поля от соленоидов в жидкий металл с помощью магнитомягкого сердечника. Однако в ходе экспериментов выяснилось, что мелкомасштабные пульсации температуры между электродами приводят к возникновению термоЭДС, величина которой превышает полезный сигнал скорости. Для получения достоверной информации пришлось ограничиться термопарными измерениями. В разделах **4.1**, **4.2** дано описание экспериментальной модели и методов измерений (Рис. 4а). Массив термопар, помещённых внутрь модели, позволяет определять распределение температур и значение скорости потока в направлении вдоль их расположения. Кросс-корреляционный анализ сигналов даёт информацию о скорости переноса мелкомасштабных пульсаций температуры, что позволяет восстановить скорость течения. В разделе **4.2** содержится описание полученных режимов конвекции и локальные характеристики течения (Рис. 4b). Результаты измерений показали, что в случае вертикального расположения цилиндра в объёме металла генерируются максимальные по интенсивности турбулентные пульсации, при этом крупномасштабная циркуляция отсутствует. При горизонтальном расположении конвективный теплообмен возрастает за счет генерации крупномасштабной циркуляции, при этом интенсивность пульсаций минимальна. В наклоненном под углом 45° канале циркуляция возрастает и существенно усиливает теплообмен.

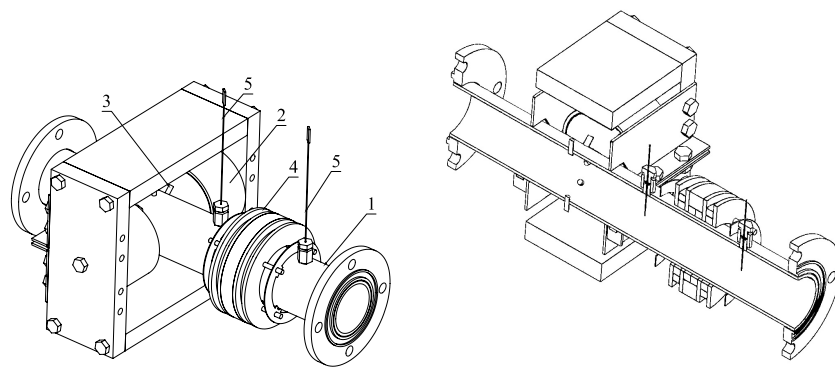


Рис. 5: Конструкция расходомера: 1,2 — термопары термокорреляционного датчика скорости, 3 — труба канала, 4 — массив электродов, 5 — постоянные магниты кондукционного датчика скорости, 6 — магнитопровод, 7 — возбуждающая катушка, 8 — измерительные катушки индукционного расходомера.

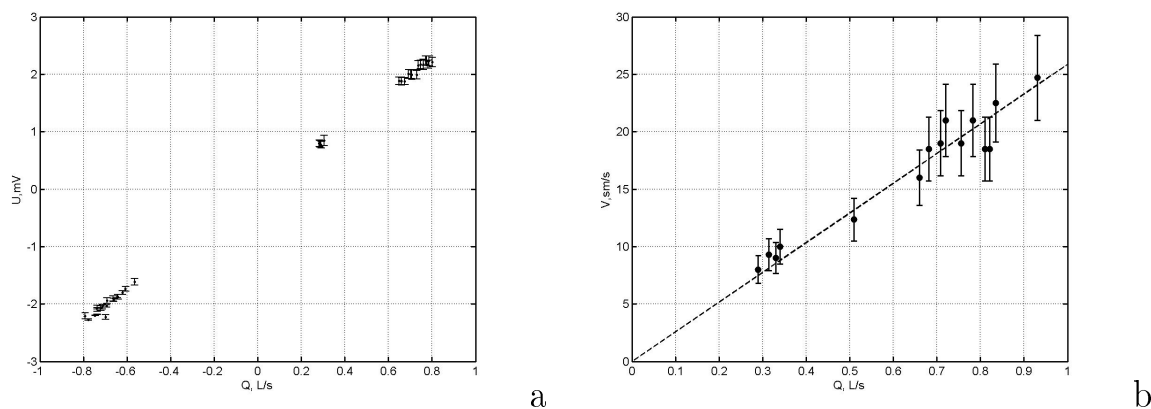


Рис. 6: Зависимости сигналов кондукционного (а) и термокорреляционного (b) датчиков от расхода натрия.

Пятая глава посвящена вопросам измерения усредненной по объему скорости (расхода) жидкого металла, создаваемого в контурах натриевого контура ИМСС УрО РАН (первая часть) и применению метода Лоренцевой расходомерии к высокоскоростным потокам проводящей среды с $Rm > 1$ (вторая часть). В разделе **5.1** дается описание Комбинированной системы измерения расхода жидкого натрия (Рис. 5), предложена схема тарировки и показаны её результаты (Рис. 6). Для обеспечения высокой надёжности и точности измерения расхода был сделан выбор в пользу комбинированной системы измерения расхода, работающей по трем независимым методам: кондукционные датчики скорости, индукционные расходомеры и термокорреляционные датчики скорости. Тарировка осуществлялась путём перекачки известного объёма жидкого натрия последовательно через все датчики, смонтированные на одном участке канала.

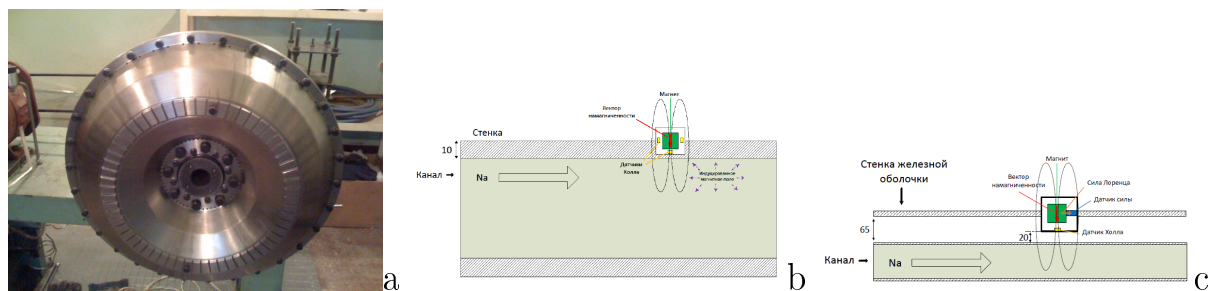


Рис. 7: (а) Торoidalный канал; схемы установки подвижного датчика индуцированного магнитного поля (b) и неподвижного датчика силы Лоренца (с).

В разделе **5.2** описано устройство датчиков для измерения силы Лоренца и индуцированных магнитных полей (Рис. 7) и показаны результаты применения датчиков на турбулентном торoidalном течении жидкого натрия (Рис. 8). Для получения высокоскоростных течений была исполь-

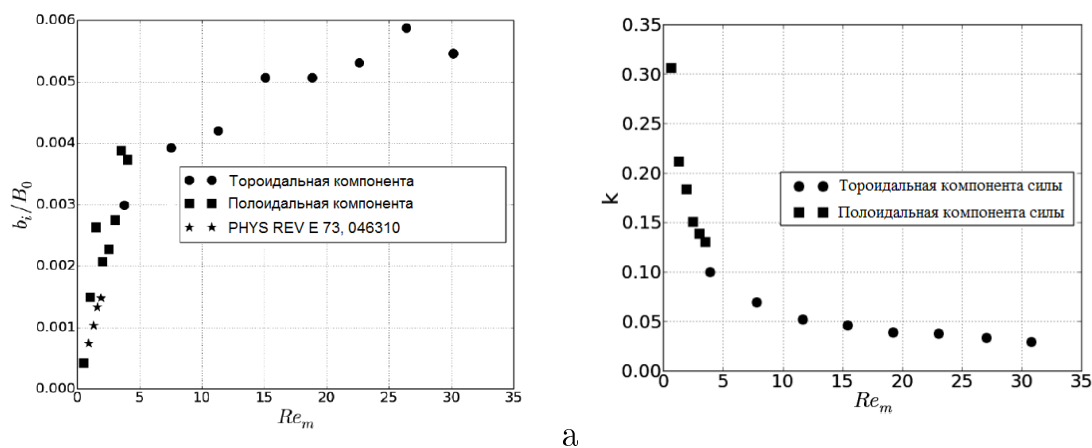


Рис. 8: Зависимости индуцированного магнитного поля, измеренного подвижным датчиком (а) и коэффициента пропорциональности силы Лоренца (b) магнитному числу Рейнольдса.

зована экспериментальная установка, подробно описанная в третьей главе диссертации (Рис. 3а). При достижении экстремальных значений магнитного числа Рейнольдса было зарегистрировано отклонение прежде линейной характеристики расходомера при $Rm > 4$.

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны и созданы системы измерения характеристик турбулентных течений жидких металлов, предназначенные для работы в условиях высокого уровня электромагнитных помех и механических нагрузок, высокой температуры, интенсивных течений с умеренными магнитными числами Рейнольдса. С помощью этих систем проведены исследования конкретных турбулентных потоков жидких металлов.
2. Показано, что на фоне сильных электромагнитных помех, создаваемых индукторами МГД-перемешивателя, возможно восстановление спектров турбулентных пульсаций скорости при адекватном выборе частоты тока индуктора. Показано, что при кристаллизации интенсификация перемешивающего течения приводит к замедлению намораживания твёрдой фазы.
3. В лабораторном эксперименте впервые напрямую зафиксирован эффект турбулентного диамагнетизма, состоящий в вытеснении крупномасштабного магнитного поля из области наиболее интенсивной мелкомасштабной турбулентности. Эффект обнаружен в случае интенсивного турбулентного течения жидкого натрия в тороидальном

канале. В пристеночной области, характеризуемой высоким градиентом энергии турбулентных пульсаций, генерируются круговые токи, создающие поле, противоположное затравочному магнитному полю. При этом наблюдается вытеснение среднего магнитного поля из области турбулентного ядра течения к периферии канала.

4. Для случая турбулентной конвекции жидкого натрия в относительно длинном цилиндре, расположенном вертикально, горизонтально и под углом 45 градусов к вертикали, получены распределения температур и средние скорости основной моды течения для различных режимов нагрева. Показано, что в случае умеренных чисел Рэлея конвективный теплоперенос в основном определяется крупномасштабной циркуляцией, которая наиболее интенсивна в наклонном цилиндре. При этом в случае вертикального расположения цилиндра крупномасштабная циркуляция отсутствует, несмотря на максимальную интенсивность турбулентных пульсаций.
5. Впервые изготовлена и испытана система измерения расхода жидкого металла в канале, работающая на измерении силы Лоренца, для течений, характеризующихся умеренными значениями магнитного числа Рейнольдса. Проведены измерения скорости потока в канале и проведено сравнение с результатами измерений скорости кондукционными датчиками. Показано, что зависимости измеряемой силы и индуцированных вторичными вихревыми токами магнитных полей от скорости потока отклоняются от линейных при $Rm > 4$.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

- [1] Халилов, Р. И., Павлинов, А. М. Генерация электромагнитных сил в цилиндрическом объеме с помощью бегущего и вращающегося магнитных полей // **Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского**. 2011. № 4-3. С. 1225–1226.
- [2] 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.
- [3] 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. 1/2. P. 191–197.

- [4] Frick, P., Denisov, S., Noskov, V. et al. Magnetic field in a decaying spin-down flow of liquid sodium // **Magnetohydrodynamics**. 2015. Vol. 51, no. 2. P. 267–274.
- [5] Frick, P., Khalilov, R., Kolesnichenko, I. et al. Turbulent convective heat transfer in a long cylinder with liquid sodium // **Europhysics Letters**. 2015. Vol. 109, no. 14002.
- [6] Kolesnichenko, Илья, Pavlinov, Alexander, Golbraikh, Ephim et al. The study of turbulence in MHD flow generated by rotating and traveling magnetic fields // **Experiments in Fluids**. 2015. Vol. 56, no. 88.
- [7] Колесниченко, И. В., Мамыкин, А. Д., Павлинов, А. М. и др. Экспериментальное исследование свободной конвекции натрия в длинном цилиндре // **Теплоэнергетика**. 2015. № 6. С. 31–39.
- [8] Khalilov, R., Kolesnichenko, I., Mamykin, A., Pavlinov, A. A combined liquid sodium flow measurement system // **Magnetohydrodynamics**. 2016. Vol. 52, no. 1/2. P. 53–60.
- [9] Колесниченко, И.В., Павлинов, А.М., Халилов, Р.И. Электромагнитные силы в магнитогидродинамическом перемешивателе с добавочным постоянным магнитным полем // Всероссийская конференция молодых ученых “Неравновесные процессы в сплошных средах”. 2010. С. 123–126.
- [10] Колесниченко, И.В., Павлинов, А.М., Халилов, Р.И. Магнитное поле в магнитогидродинамическом перемешивателе // Всероссийская конференция молодых ученых “Неравновесные процессы в сплошных средах”. 2010. С. 119–122.
- [11] Kolesnichenko, I., Khalilov, R., Pavlinov, A. et al. MHD-stirrer for cylindrical moulds of continuous casting machines fabricated aluminum alloy ingots // 8-th International Conference on Fundamental and Applied MHD. Proceedings. Borgo, Corsica, France. 2011.
- [12] Колесниченко, И.В., Павлинов, А.М., Халилов, Р.И. Исследование электромагнитных процессов в цилиндрическом МГД-перемешивателе расплавленного металла // Труды XVII Зимней школы по механике сплошных сред (механика сплошных сред как основа современных технологий (Электронный ресурс) – Пермь: ИМСС УрО РАН. 2011. С. 299–302.

- [13] Павлинов, А.М. Разработка и создание системы измерения скорости жидкого металла // Материалы IV студенческого регионального конкурса инновационных проектов по программе УМНИК г. Пермь. 2011. С. 74–75.
- [14] Павлинов, А. М., Колесниченко, И. В., Халилов, Р. И. Изучение электромагнитных характеристик магнитогидродинамического перемешивателя // Физика для Пермского края: материалы краевой научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. № 4. 2011. С. 125–128.
- [15] Kolesnichenko, I., Khalilov, R., Oborin, P., Pavlinov, A. Application of UDV for studying the flow and crystallization of liquid metal in the process of electromagnetic stirring // 8th International symposium on ultrasonic Doppler methods for fluid mechanics and fluid engineering. Proceedings. Dresden. Germany. 2012. P. 63–66.
- [16] Frick, P., Denisov, S., Noskov, V. et al. Experimental study of turbulent diamagnetism in liquid sodium flow // Proceedings of 9-th International PAMIR conference on Fundamental and Applied MHD, Thermo Acoustic and Space Technologies, Riga, Latvia. Vol. 1. 2014. P. 132–136.
- [17] Mamykin, A., Frick, P., Khalilov, R. et al. Turbulent convective heat transfer in a long cylinder with liquid sodium // Proceedings of 9-th International PAMIR conference on Fundamental and Applied MHD, Thermo Acoustic and Space Technologies, Riga, Latvia. 2014. P. 90–94.
- [18] Pavlinov, A., Kolesnichenko, I., Frick, P., Golbraich, E. Study of turbulence in presence of strong electromagnetic noise in the MHD-stirrer with travelling and rotating magnetic field // Proceedings of 9-th International PAMIR conference on Fundamental and Applied MHD, Thermo Acoustic and Space Technologies, Riga, Latvia. 2014. P. 136–139.
- [19] Pavlinov, A., Kolesnichenko, I., Khalilov, R. The flow and crystallization of liquid metal in the process of MHD-stirring // Proceedings of 9-th International PAMIR conference on Fundamental and Applied MHD, Thermo Acoustic and Space Technologies, Riga, Latvia. Vol. 1. 2014. P. 299–302.
- [20] Mikhailovich, B., Kapusta, A., Khripchenko, S. et al. On the RMF Impact on the Structure of Solidifying Ingots // 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials. 2015. P. 33–36.

- [21] Колесниченко, И. В., Павлинов, А. М., Фрик, П. Г. Особенности исследования турбулентного течения жидкого металла, находящегося под действием переменного магнитного поля // Вестник Пермского Университета. Физика. 2013. № 3-25. С. 54–59.
- [22] Колесниченко, И. В., Павлинов, А. М., Халилов, Р. И. и др. Экспериментальное исследование характеристик турбулентного течения электропроводной жидкости в цилиндрическом канале под действием магнитного поля // Вестник Пермского Университета. Математика. Механика. Информатика. 2011. № 5-9. С. 102–105.
- [23] Denisov, S.A., Dolgikh, V.M., Oborin, P.A. et al. Laboratory model of an aluminum melting furnace with MHD-stirring // Proceedings of 10-th International PAMIR conference on Fundamental and Applied MHD, Cagliari-Sardinia, Italy, June 20-24, 2016. 2016. P. 310–315.
- [24] Khalilov, R., Kolesnichenko, I., Mamykin, A. et al. The flow of liquid sodium in a cylindrical channel of flowmeter // Proceedings of 10-th International PAMIR conference on Fundamental and Applied MHD, Cagliari-Sardinia, Italy, June 20-24, 2016. 2016. P. 247–251.