

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Павлинов Александр Михайлович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук
Фрик Пётр Готлобович

Пермь 2016

Оглавление

Введение	4
1 Измерения в потоках жидких металлов	10
1.1 Турбулентные потоки жидких металлов	10
1.2 Измерения скорости в жидких металлах	14
1.3 Магнитное поле в турбулентной среде	19
1.4 Выводы по главе	23
2 МГД-турбулентность, вызываемая бегущими и врачающимися магнитными полями	24
2.1 Конструкция МГД-перемешивателя	26
2.2 Распределение создаваемого МГД-перемешивателем магнитного поля	27
2.3 Электромагнитные силы, генерируемые МГД-перемешивателем	31
2.4 Характеристики мелкомасштабной турбулентности течений, генерируемых МГД-перемешивателем	37
2.5 Процесс кристаллизации под воздействием перемешивающего течения	44
2.6 Выводы по главе	50
3 Магнитное поле в турбулентном тороидальном течении жидкого натрия	51
3.1 Особенности тороидального МГД-течения	54
3.2 Описание экспериментальной модели	56
3.2.1 Возбуждение течения в тороидальной модели	56
3.2.2 Вспомогательные узлы	57
3.2.3 Система измерений	57
3.3 Структура возмущенного магнитного поля	62

3.3.1	Профили локального магнитного поля	62
3.3.2	Распределение магнитного потока в сечении торoidalного канала	64
3.4	Выводы по главе	65
4	Турбулентный конвективный теплообмен в длинном цилиндре с жидким натрием	67
4.1	Экспериментальная модель	68
4.2	Локальные измерения температуры	70
4.3	Результаты экспериментов	74
4.4	Выводы по главе	76
5	Измерения средних скоростей и расходов жидких металлов	77
5.1	Расходометрия	78
5.1.1	Тарировочный эксперимент	80
5.1.2	Кондукционные расходомеры	81
5.1.3	Индукционные расходомеры	83
5.1.4	Термокорреляционные расходомеры	84
5.1.5	Результаты	85
5.2	Расходометрия на основе измерения силы Лоренца	87
5.2.1	Измерение индуцированного магнитного поля	87
5.2.2	Измерение силы Лоренца	90
5.3	Выводы по главе	93
6	Заключение	95
Список литературы		98

Введение

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 $N = \sigma B_0^2 L / \rho v$, характерный для МГД-машин, возбуждающих течение металла за счёт магнитных полей, и случай больших магнитных чисел Рейнольдса $Rm = \mu \mu_0 \sigma L U$, 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 жидкостях становятся в этих режимах еще серьезней и требуют систематической работы по совершенствованию методик измерений и обработки получаемых сигналов.

Для улучшения качества продукции metallurgicheskoy promyshlennosti 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 жидкостным 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, требуется 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 изме-

рений в турбулентных потоках жидких металлов, с помощью которых получены следующие новые результаты:

1. Экспериментально изучена структура турбулентных течений при наложении бегущих и врачающихся 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 расходометрии 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.регистрация 01201281037), проектов РФФИ 13-01-96042 р_урал_a, 14-01-96010 р_урал_a, 14-08-96014 р_урал_a 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, термокорреляционных) 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. Аналогово-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 cDAQ - 9184 и cDAQ-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 Фридмановские чтения, Пермь, 2013, Международной конференции Пермские Гидродинамические Научные Чтения, 2013, 2014, 9й международной конференции по фундаментальной и прикладной магнитной гидродинамике PAMIR, 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 чело-

век. 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.

1. Измерения в потоках жидких металлов

1.1. Турбулентные потоки жидких металлов

Магнитная гидродинамика (МГД) – раздел механики жидкости, посвященный изучению гидродинамики электропроводящих сред во взаимодействии с магнитным полем. При относительном движении среды и магнитного поля в среде возбуждаются электрические токи, которые при взаимодействии с магнитными полями большой величины возбуждают электромагнитную силу, модифицирующую течение, а в случае интенсивного течения, возбуждаемые магнитные поля вносят возмущения в структуру исходного магнитного поля. В некоторых случаях, течения проводящей среды могут быть источником генерации магнитного поля (явление динамо).

Для описания характера исследуемых МГД-течений помимо обычных гидродинамических критериев подобия, таких, как число Рейнольдса $Re = UL/\nu$ (характеризующее отношение нелинейного и диссипативного членов в уравнении Навье-Стокса) и число Струхала $Sr = fL/U$ (порядок отношения локальной $\partial_t \mathbf{v}$ и конвективной $(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}$ производных, составляющих полную производную скорости по времени в уравнении движения), появляются критерии, описывающие взаимодействие течения с магнитными полями. Так, параметр МГД-взаимодействия $N = \frac{\sigma B^2 L}{\rho \nu}$ характеризует степень влияния магнитного поля на структуру и интенсивность течения, а магнитное число Рейнольдса $Rm = \sigma \mu_0 U L$ является отношением генерационного слагаемого к диффузионному в уравнении индукции и характеризует степень обратного влияние течения на магнитное поле. Здесь U является характерной скоростью течения, L – масштабом длины, ν – кинематическая вязкость, f – характерная частота, σ – электропроводность, μ_0 – магнитная постоянная, B – величина среднего магнитного поля, ρ – плотность. Отношение двух чисел Рейнольдса определяется магнитным

числом Прандтля $Pm = \nu\mu_0\sigma = \nu/\nu_m = Rm/Re$, характеризующим отношение кинематической вязкости к магнитной $\nu_m = (\mu_0\sigma)^{-1}$ и являющимся важнейшей для магнитной гидродинамики характеристикой жидкости.

При наличии перепадов температуры ΔT , которые характерны и для космических объектов, и для промышленности, в частности, для металлургии, необходимы и критерии подобия тепловых процессов: числа Рэлея $Ra = g\beta\Delta TL^3/(\nu\chi)$, Грасгофа $Gr = g\beta\Delta TL^3/\nu^2$, Нуссельта $Nu = q_c/q_v$ (где g – ускорение свободного падения, β – коэффициент теплового расширения среды, χ – коэффициент температуропроводности, q_c – тепловой поток за счёт конвекции, q_v – тепловой поток за счёт теплопроводности). Важной характеристикой жидкости в этих процессах является число Прандтля $Pr = \nu/\chi$: при $Pr \ll 1$ теплопроводность является более эффективной, чем массоперенос, и наоборот. Спецификой жидких металлов являются низкие значения числа Прандтля $Pr \approx 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-2}$. Что касается магнитного числа Прандтля, то оно мало не только для металлов $Pm \approx 10^{-6} \div 10^{-5}$, но и для потоков плазмы в звёздах $Pm \approx 10^{-4} \div 10^{-7}$.

Важно отметить, что большинство технологических МГД-процессов, не говоря о природных, характеризуются большими размерами, сильными неоднородностями температуры, большими скоростями и токами, а следовательно и высокими значениями управляющих параметров, что позволяет говорить о магнитной гидродинамике экстремальных параметров, в которой доминируют существенно нелинейные явления, требующие детального исследования как в теории, так и в лабораторных экспериментах. Среди технологических МГД-машин [25–27] можно выделить следующие: МГД-насосы [28], МГД-дроссели [29, 30] (служат для точного регулирования расхода металла), МГД-перемешиватели [31] (служат для гомогенизации расплава при кристаллизации), алюминиевые электролизеры [32] (не являются чисто МГД-машинами, но генерируемые большими токами $I \approx 2 \div 3 \cdot 10^5$ А магнитные поля приводят к неустойчивостям, которые необходимо учитывать при работе).

Отдельно стоит выделить проблему МГД-динамо [33]: течения проводящих сред ответственны за генерацию магнитных полей планет, звёзд и других объектов [34]. При этом они характеризуются большими масштаба-

ми и скоростями, что делает их существенно турбулентными [35]. Сильный перепад температуры между центром и поверхностью космических объектов возбуждает интенсивную естественную конвекцию. Порождаемые крупномасштабные турбулентные течения плазмы (в случае звёзд) или расплавов металлов (в случае планет) обладают сложной топологией и способны приводить к усилению магнитного поля [36]. При этом пространственный масштаб магнитных полей становится сопоставимым с масштабами космических объектов, а энергия – достаточной для того, чтобы оказывать влияние на некоторые физические процессы. Широко известен 11-летний цикл активности Солнца, сопровождаемый изменением количества солнечных пятен и изменением направления полоидальной компоненты магнитного поля [37]. Согласно востановленным палеомагнитным данным, в истории Земли обращения магнитного поля также многократно имели место, но их последовательность далека от периодичности [38, 39]. Теоретическому изучению и математическому моделированию МГД-динамо посвящено большое число работ [40], опирающихся на результаты космических наблюдений и лабораторных экспериментов [41].

Магнитная гидродинамика экстремальных параметров становится все чаще объектом лабораторных исследований, приводя к созданию огромных лабораторных стендов для работы с жидкими металлами [42, 43] (эксперименты von Karman Sodium в Кадараше [44], департамента магнитной гидродинамики в Центре им. Гельмгольца Дрезден-Россendorf [45], Института физики Латвийского Университета [46] и пр.). Вызовом для экспериментаторов является как проблема достижения в лаборатории рекордных значений управляющих параметров, так и последующие проблемы адекватных измерений в создаваемых потоках.

Большинство течений жидких металлов, изучаемых в лабораторных исследованиях, можно разделить на два класса: течения в трубах, для которых характерно наличие транзитного расхода металла, и течения в замкнутых полостях.

Экспериментальные контуры используются для испытания и наладки насосов, расходомеров, сепараторов и других устройств [47], а также для проведения фундаментальных исследований в области МГД и теп-

лофизики [48]. В промышленности можно выделить две основные отрасли, использующие жидкокометаллические контуры: это непосредственно металлургические производства и ядерная энергетика [49]. Для перекачки жидких металлов активно применяются бесконтактные магнитогидродинамические насосы, обладающие рядом преимуществ перед механическими: полная герметичность, отсутствие вращающихся частей и уплотнений, простота регулирования расхода по амплитуде питающего напряжения [50]. В металлургическом производстве вопрос правильной дозировки при перекачке металла между печами и линиями разливки актуален в контексте приготовления сплавов с высокой точностью соотношения компонентов. В ядерной энергетике жидкие металлы необходимы для удовлетворения требований в отношении теплоотвода и стабильности атомов, предъявляемым к энергетическим реакторам на промежуточных и быстрых нейтронах, а также к реакторам-размножителям. В обоих случаях необходимо применение высокоточных систем измерения, работающих в условиях повышенной температуры, химической активности среды, высокого уровня электромагнитных помех.

Течения металлов в замкнутых полостях могут возбуждаться за счёт естественной конвекции, путём электромагнитного воздействия или механически. Для повышения однородности структуры металла, застывающего в кристаллизаторах, их оснащают перемешивающими системами. Как правило, это электромагнитные индукторы переменных бегущих или вращающихся магнитных полей [51, 52]. Эффективность их применения существенно зависит от структуры возбуждаемых ими течений и турбулентных характеристик [53]. Разработанный и созданный в ИМСС УрО РАН МГД-перемешиватель позволяет одновременно генерировать бегущие и вращающиеся магнитные поля [54], возбуждающие течения электропроводной среды. Конструкция перемешивателя, включающая систему охлаждения, позволяет использовать его в условиях промышленного производства алюминия, магния и их сплавов. Экспериментальные данные исследований течений и процесса кристаллизации в такой комбинированной системе отсутствуют.

Во многих случаях целесообразно проведение экспериментального ис-

следования процесса в лабораторных условиях для повышения его эффективности и безопасности [55]. Это позволяет увеличить точность измерений, так как ликвидируются некоторые источники помех, существующие в условиях реального производства, а также устраниТЬ экономические риски, связанные с простоями в работе вследствие наладки процесса измерения. В лабораторных условиях не всегда требуется создание полноразмерных копий узлов промышленных установок. Современный уровень вычислительной гидродинамики позволяет во многих случаях осуществлять верификацию рассчётов на уменьшенных моделях и применять результаты рассчётов для описания процессов, происходящих в реальных устройствах. Проблемы математического моделирования возникают при наличии турбулентного течения. Применение подхода среднего поля к уравнению Навье-Стокса приводит к тому, что в уравнении для средней скорости остаётся слагаемое, включающее в себя пульсационную составляющую: тензор напряжений Рейнольдса $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j}$. Попытка выражения его через средние значения приводит к появлению других неизвестных тензоров (момента третьего порядка и новых моментов второго порядка). Для замыкания уравнений требуется либо выразить момент определённого порядка через моменты меньших порядков и средние величины, либо записать для него уравнение переноса. В любом случае, конечная система будет содержать некоторые константы. В настоящее время существует большое количество приближенных моделей турбулентности [56]. Для подбора параметров таких полуэмпирических моделей требуются результаты экспериментов на турбулентных течениях.

1.2. Измерения скорости в жидких металлах

Среди методов измерения скоростей жидких металлов можно выделить теплофизические методы, методы на основе доплеровских смещений и широкий класс электромагнитных методов.

Вопросы теплообмена в жидких металлах имеют большую значимость для развития энергетических установок высокой мощности, где они могут выполнять функцию теплоносителя. Экспериментальному изучению

теплообмена в различных металлах посвящено множество работ, и наибольшее распространение получило использование ртути в качестве исследуемой среды [57–59]. Она обладает невысокой теплопроводностью, что позволяет создавать большие градиенты температуры при небольших затратах энергии. При этом, в отличие от висмута, можно существенно понизить рабочую температуру. Объединённой группой исследователей из институтов НИУ МЭИ и ОИВТ РАН активно проводятся исследования неизотермических течений ртути [60]. Рассматриваются транзитные течения в вертикальных, горизонтальных и наклонённых [61] цилиндрических и прямоугольных [62] каналах, в которых помимо транзитного течения образуются конвективные течения за счёт разницы температуры на стенках канала, на которые можно оказать влияние наложением магнитного поля [63]. Такие постановки задачи характерны, в частности, для экспериментальных термоядерных установок.

При отсутствии вынужденного транзитного течения скорости чисто конвективных течений уменьшаются, что усложняет применение тепловых методов измерения. Экспериментов на жидком натрии в схожих постановках не проводилось. Исследования естественной конвекции натрия ограничиваются только случаем коротких цилиндров с $0.03 \leq H/D \leq 0.22$ [64].

Применение тепловых анемометров (англ. hot-film или hot-wire anemometer) для исследований течений жидких металлов усложнено необходимостью создания стойкой электроизоляции нагреваемой проволоки [65]. В работе [66] описан датчик, позволяющий измерять скорость изотермического течения жидкой ртути в интервале $1 \div 12$ см/с. В неизотермическом случае локальные пульсации температуры в течении жидкого металла подавляют те изменения температуры проволоки, которые используются для регистрации скорости, что существенно ограничивает применимость метода для изучения конвекции и ряда технологических процессов.

При наличии температурных пульсаций в течениях жидких металлов применим другой, термокорреляционный метод измерения скорости. Расположенные вдоль течения датчики температуры регистрируют пульсации температуры с временными задержками, определяемыми скоростью крупномасштабного течения, переносящего мелкомасштабные пульсации. Сте-

пень корреляции сигналов пары датчиков можно определить путём нахождения нормированной кросс-корреляционной функции. Положение максимума этой функции соответствует времени перемещения пульсаций между датчиками, откуда восстанавливается средняя скорость течения. Нормировка корреляционной функции требуется для устранения влияния изменений средней температуры и позволяет оценить корректность измерения скорости [67].

Оптические методы для жидких металлов применимы только при измерениях на свободной поверхности. Простейший случай – это поплавковый метод: поле скорости на поверхности металла восстанавливается путём фотосъёмки поверхности, когда в качестве трассеров выступают пузырьки газа, выделяющиеся в результате взаимодействия слоя металла с кислотой [68]. Развитием этого метода является DLP (double-layer projection): поверхность облучается лазерным лучом, проходящим через толстую стеклянную пластину, а положение и ориентация локализованной площадки поверхности определяется путём анализа изображения на пластине после отражения [69]. Также в случае свободной поверхности применимы Лазерные доплеровские измерители скорости (ЛДИС) [70]. Сканирующая схема и применение двух измерителей, лучи которых направлены под углом, позволяет получать двумерное распределение двух компонент скорости [71].

Для измерения внутренней структуры течений в последние годы стал широко использоваться ультразвуковой метод (англ. ultrasonic doppler velocimetry, UDV). Применение этого метода к экспериментам на жидких металлах началось с работ [72, 73]. Источником ультразвуковых волн обычно является пьезоэлектрический преобразователь, который иногда используют и как приёмник отражённых от движущихся неоднородностей волн. В качестве отражающих частиц (трассеров) в металлах могут выступать как искусственные твёрдые частицы, так и оксиды самого металла. Анализ отражённых сигналов позволяет как определить профиль распределения неоднородностей вдоль пучка (“профиль эха”), так и профиль скорости. Большой популярностью у учёных-экспериментаторов пользуются ультразвуковые доплеровские анемометры (УДА) фирмы Signal Processing. Эти приборы совмещают в себе генератор и усилитель ультразвукового сигна-

ла с мультиплексором и высокоскоростной блок обработки и анализа. Настройка узлов УДА, вывод на экран в реальном времени профилей эха и скорости и сохранение результатов измерений осуществляется с помощью встроенного компьютера.

Развитие метода позволило охватить большой круг задач: для двухфазных потоков с пузырьками воздуха [74], для течений в капиллярах [75], в присутствии неоднородных магнитных полей [76], при наличии движения фронта кристаллизации [77]. Основным недостатком этого метода является невозможность разрешения высокочастотных пульсаций скорости. Также возникает ряд трудностей с обеспечением определённой концентрации оксидов: как недостаток, так и избыток трассеров делает измерения невозможными.

В случае жидких металлов с их высокой проводимостью рационально использование электромагнитных методов измерения скорости [78]. Эти методы основываются на измерении величин, характеризующих взаимодействие течения металла с магнитным полем. В этом классе можно выделить несколько методов, работающих по различным принципам. В основе кондукционных датчиков скорости [79] (англ.: potential difference probe, PDP) лежит закон Ома для движущейся среды $\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B})$, где \mathbf{E} – напряженность электрического поля в области измерения, \mathbf{u} – локальная скорость течения, \mathbf{B} – индукция магнитного поля. В качестве источника магнитного поля могут выступать как внешние постоянные магниты / электромагниты, создающее глобальное магнитное поле, так и миниатюрные постоянные магниты, помещённые в объём металла [80]. Область измерения ограничивается электродами, разность потенциалов которых связана с локальной скоростью течения. Ряд допущений даёт линейное соотношение между разностью потенциалов электродов $\Delta\phi$, индукцией магнитного поля и компонентой скорости u_\perp , перпендикулярной силовым линиям магнитного поля и линии \mathbf{l} , соединяющей электроды $\Delta\phi \sim lBu_\perp$. Кондукционные датчики применимы как для измерения средних скоростей, так и для получения статистических характеристик однородной изотропной турбулентности [81].

Возмущение приложенного магнитного поля течением лежит в осно-

ве индукционных датчиков скорости и расходомеров. Для измерения одной компоненты скорости или расхода жидкого металла по сечению трубы достаточно использовать два датчика магнитного поля, регистрирующих возмущения поля течением проводящей среды. В случае однородного стационарного течения в уравнении индукции $\partial_t \mathbf{b} = (\mathbf{B}_0 \cdot \nabla) \mathbf{u} - (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{B}_0 + \nu_m \nabla^2 \mathbf{b}$ преобладает слагаемое $(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{B}_0$, что даёт линейную характеристику [82]. При наложении переменных магнитных полей и измерения их возмущений с помощью катушек можно проводить анализ сдвига фаз основной гармоники магнитного поля [83], либо соотношения между амплитудами электродвижущей силы, возбуждаемой в симметрично расположенных катушках [84].

Для анализа трёхмерной структуры течения жидкого металла активно развивается метод индукционной томографии (англ. contactless inductive flow tomography, CIFT). При этом, возмущения магнитного поля регистрируются при помощи массива миниатюрных датчиков [85]. Поле скорости восстанавливается путём подстановки плотности тока, выраженной через закон Ома для движущейся среды, в уравнение Био-Савара-Лапласа [86].

Лоренцевы датчики скорости и расхода работают на измерении силы, возбуждаемой взаимодействием внешнего магнитного поля с вихревыми токами, наводимыми им в движущейся среде. Эта сила $f \sim \sigma v B^2$ оказывает тормозящее действие на поток, а противодействующая ей сила – увлекает источник магнитного поля по направлению течения. Измеряя силу рекции опоры постоянного магнита можно получить информацию о скорости [87]. В случае слабых течений зависимость силы от скорости является линейной, что позволяет осуществлять калибровку в некотором диапазоне скоростей и экстраполировать характеристику на больший интервал [88]. Совершенствование технологий производства сильных высокотемпературных постоянных магнитов и прецизионных датчиков силы привело к активному развитию данного метода, в том числе, в применении к промышленным условиям [89].

Граница линейности характеристики для случая движения твёрдого проводника была обнаружена в работе [90]. Увеличение скоростей течения высокопроводящих сред приводит к тому, что индуцированные вихревые

токи генерируют магнитные поля, сопоставимые с величиной внешнего поля. При этом, суммарное поле уменьшается, а чувствительность измерительной системы падает. В случае с жидкой средой существенный вклад даёт турбулентность: уменьшение эффективной электропроводности влечёт за собой уменьшение вихревых токов, что влияет на измеряемую силу Лоренца. Экспериментальные данные с применением Лоренцевых датчиков на жидких металлах при умеренных значениях магнитного числа Рейнольдса отсутствуют.

1.3. Магнитное поле в турбулентной среде

Течения жидкого металла широко используются для исследования эффекта динамо-генерации и связанных с ним задач. Этот эффект заключается в преобразовании кинетической энергии движущейся проводящей среды в энергию магнитного поля и отвечает за существование магнитных полей различных космических объектов [36]. Эффект является пороговым и его моделирование в лабораторных условиях чрезвычайно затруднено в силу необходимости достижения экстремальных значений безразмерного параметра – магнитного числа Рейнольдса $Rm > Rm_c$, что требует создания крупномасштабных турбулентных течений высокопроводящей среды. Необходимым условием генерации также является наличие сложной топологии течения. Поддержание незатухающего осесимметричного или трансляционно-симметричного магнитного поля невозможно. Самым низким из известных значением $Rm_c = 17$ [91] обладает модель так называемого “винтового динамо”, предложенная Пономаренко [92]. Применимые в лабораторных условиях жидкие металлы обладают малыми значениями магнитного числа Прандтля. Наиболее подходящей жидкостью для лабораторных экспериментов является натрий, сочетающий низкую температуру плавления и высокую электрическую проводимость $\sigma \approx 10^7$ См/м [93]. Но даже в случае натрия $Rm \approx 10^{-5}$, поэтому для достижения порога генерации в лабораторных условиях требуется создание течений, характеризуемых гидродинамическим числом Рейнольдса $Re > 10^6$, при этом они будут являться существенно турбулентными. Для установки с характерным мас-

штабом $L = 1$ м скорости течения натрия должны составлять десятки метров в секунду.

Впервые явление генерации магнитного поля течениями жидкого натрия было зарегистрировано независимо и почти одновременно в двух лабораториях: в Риге [94] и в Карлсруэ [95]. В первом случае задача решалась в постановке динамо Пономаренко: винтовое динамо приводит к возбуждению магнитного поля в виде спиральной волны, бегущей вверх по винтовому потоку. Тurbулентность в этой модели является источником дополнительных турбулентной и магнитной диффузий, приводя к повышению критического магнитного числа Рейнольдса Rm_c . Экспериментальная установка в Карлсруэ была создана для реализации так называемого двухмасштабного динамо. В цилиндре диаметром около 2 метров было установлено 52 “спиногенератора” - винтовых каналов, через которые прокачивался жидкий натрий. Для прокачки натрия через каналы с расходом $Q_v \approx 115 \text{ м}^3/\text{ч}$ использовалось три насоса мощностью 210 кВт [96]. Течения меньшего масштаба в регулярных каналах выступали в роли мелкомасштабной турбулентности с заданными топологическими свойствами. В результате генерировалось крупномасштабное дипольное магнитное поле, ориентированное поперек цилиндра. Обе экспериментальные установки при выходе на режим генерации потребляли сотни киловатт мощности, затрачиваемой на прокачку тонн натрия по каналам установок.

Иной механизм возбуждения интенсивного течения (правда импульсного) был предложен в Институте механики сплошных сред УрО РАН [97]. Жидкий металл, заключённый в тороидальный канал, приводится во вращение вокруг оси тора с частотой до $\Omega_{max} = 50$ Гц. Течение создаётся за счёт сил инерции при резкой остановке канала и может приобретать винтовую структуру за счёт закреплённых в канале винтовых лопаток (диверторов). Такая схема позволяет на порядок снизить мощность двигателя а также объём металла. При течении по криволинейному каналу азимутальный момент импульса препятствует повороту винтового течения, при этом завихренность может быстро затухать. Для проверки устойчивости винтового течения в тороидальном канале был проведён эксперимент с водой на плексигласовом канале с аспектным соотношением $\Gamma = R/r = 3.81$, где R

– радиус тора, r – радиус поперечного сечения канала [97].

Все природные динамо являются существенно турбулентными, и в них турбулентность играет гораздо более сложную роль. Топология этих течений не навязывается искусственными граничными условиями, и во взаимодействии течения с магнитным полем участвует большое число механизмов. Попытки уйти от течений в каналах и предоставить мелкомасштабной турбулентности развиваться самостоятельно предпринимались командами исследователей из Университета Висконсина (Мэдисон) и объединенной командой ряда французских лабораторий, реализовавшей эксперимент в Исследовательском центре ядерной энергетики в Кадараше. В Мэдисоне турбулентное течение жидкого натрия в сфере диаметром 1 м возбуждалось соосными пропеллерами [98]. Явление генерации получено не было [99]. В Кадараше течение натрия в цилиндре возбуждалось вращающимися дисками [100]. Несмотря на то, что в численных расчетах такое течение приводило к генерации поля, динамо эффект в экспериментальной установке получен не был [101]. Модификация экспериментальной установки, заключающаяся в установке ферромагнитных крыльчаток [102], позволила зарегистрировать явление динамо, однако общепринятого объяснения влияния ферромагнитных элементов до сих пор нет.

Таким образом, имеющийся опыт лабораторных исследований эфекта динамо подтверждает очень важную и совсем неоднозначную роль турбулентности в задачах динамо. Анализ уравнений динамо средних полей выявил целый спектр механизмов её взаимодействия с магнитным полем (более полное обсуждение будет дано в главе 3), экспериментальная верификация которых остается важной нерешенной задачей.

На экспериментальных установках в ИМСС УрО РАН винтовые течения были получены в каналах с аспектным отношением $2.75 \leq \Gamma \leq 3.89$ [103, 104]. На канале с максимальным аспектным отношением впервые был зарегистрирован альфа-эффект [105], ответственный за генерацию турбулентным течением электрического тока, сонаправленного приложенному магнитному полю. На титановом канале с аспектным отношением $\Gamma = 2.25$ винтовое течение получить не удается [106]. На этом канале в отсутствие диверторов впервые были выполнены одновременные прямые измерения

турбулентной диффузии магнитного поля (бета-эффект) и турбулентной вязкости [107]. Помимо альфа- и бета-эффектов воздействие течения проводящей среды на магнитное поле описывается, по современным представлениям теории среднего поля, ещё 17-ю слагаемыми в разложении эффективного электрического поля [108]. Так, гамма-эффект описывает вытеснение магнитного поля из области интенсивной мелкомасштабной турбулентности, называемое турбулентным диамагнетизмом.

Теоретически эффект турбулентного диамагнетизма известен давно [109], однако в силу сложности постановки первая попытка его экспериментального исследования была осуществлена только в 2007 году в работе [110]. Авторами исследовалось течение жидкого натрия в неподвижной сферической ёмкости диаметром 1 м, возбуждаемое двумя врачающимися пропеллерами [111]. На внешней поверхности сферы были размещены датчики магнитного поля. Внешнее магнитное поле создавалось системой катушек в дипольной или квадрупольной конфигурации. Возникающие внутри сферы сложные течения вызывают генерацию электрических токов за счёт средней скорости и пульсаций. Для определения среднего поля скорости была собрана идентичная установка для экспериментов с водой, так как гидродинамически вода близка к натрию. По полученному полю скорости с помощью численного моделирования были определены токи, генерируемые в натрии средними течениями [112]. После вычитания этих оценок из экспериментальных данных, полученных на натриевой модели, были получены вклады турбулентных пульсаций в генерацию электрических токов. Однако такой подход вызывает сомнения. Во-первых, неидеальное совпадение вязкостей и плотностей воды и натрия вносит ошибки в определение структуры течения жидкого натрия. Во-вторых, используемая математическая модель позволяет вычислить вклад взаимодействия среднего течения с магнитным полем, но при этом турбулентные пульсации, наложенные на сложную топологию крупномасштабного течения, могут быть ответственны за иные вклады в эффективное электрическое поле. Таким образом, достоверно отделить вклад турбулентного диамагнетизма в наведенные потоком магнитные поля на удалось.

1.4. Выводы по главе

Магнитная гидродинамика экстремальных параметров является востребованным направлением исследований, имеющим как фундаментальную, так и прикладную мотивацию. Проведение измерений в условиях экстремальных параметров существенно усложняется. Поэтому отработка и развитие методов получения экспериментальных данных является очень актуальной задачей.

Жидкий натрий активно используется в системах охлаждения энергетических установок, в которых имеются большие перепады температуры. Роль вклада свободно-конвективного теплопереноса в таких системах исследована недостаточно, что обуславливает актуальность исследования свободной конвекции жидкого натрия, особенно в протяженных цилиндрах.

Механизмы динамо генерации активно изучаются в последние десятилетия. Экспериментально удалось выделить некоторые физические механизмы воздействия турбулентной электропроводящей среды на магнитное поле. Остаётся много механизмов, предсказанных теоретически, регистрация и изучение которых в лабораторных условиях является актуальной задачей.

Предложен ряд способов измерения скоростей и расходов жидких проводящих сред с помощью измерения силы, возбуждаемой взаимодействием внешнего магнитного поля с вихревыми токами, наводимыми им в движущейся среде. Имеющиеся оценки линейности характеристик датчиков, основанных на этом методе, не точны, так как не основываются на взаимодействии магнитного поля с сильно турбулентным течением.

2. МГД-турбулентность, вызываемая бегущими и вращающимися магнитными полями

Мелкомасштабные турбулентные течения, генерируемые бегущими и вращающимися магнитными полями, имеют место в различных промышленных процессах. В частности, метод электромагнитного воздействия на жидкий металл широко используется в металлургии. К технологическим устройствам, использующим этот метод воздействия, можно отнести насосы, дроссели, перемешиватели, сепараторы. Турбулентный характер генерируемых в них течений существенно влияет на ход производственных процессов и знание характеристик мелкомасштабной турбулентности необходимо для проектирования этих устройств. Так, МГД-перемешиватели, используемые при полунепрерывном литье, возбуждают интенсивные течения сложной конфигурации (раздел 2.1), оказывающие влияние на кристаллизацию, тем самым, улучшая качество выплавляемых металлов.

Экспериментальное изучение свойств мелкомасштабной турбулентности требует применения прецизионных локальных датчиков скорости, обладающих высоким частотным разрешением. Проведение экспериментальных исследований динамики течений и процесса кристаллизации промышленных металлов невозможно из-за их агрессивности и высокой температуры плавления, при которой датчики работать не могут. При этом, даже с использованием низкотемпературных сплавов в лабораторных условиях, систематических измерений турбулентных свойств генерируемых переменными магнитными полями течений не проводилось. Основная трудность таких измерений заключается в интенсивном влиянии магнитных полей сложной конфигурации непосредственно на измерительную систему (раздел 2.4). Временное усреднение сигнала датчика, в частном случае, может дать корректную информацию о средней скорости течения, тогда как пульсационные составляющие скорости оказываются на несколько порядков меньше наведённых от внешних электромагнитных полей паразитных

сигналов.

Актуальной задачей является построение математической модели процессов в перемешивателе. При этом для настройки и верификации модели необходимо знать некоторые особенности работы реального устройства. В данной главе будет представлена структура создаваемого магнитного поля, интегральные электромагнитные характеристики, характеристики мелкомасштабной турбулентности течений и динамика кристаллизации при наличии интенсивных турбулентных течений.

2.1. Конструкция МГД-перемешивателя

Исследуется турбулентное течение, генерируемое в МГД-перемешивателе жидкого металла, изготовленном в ИМСС УрО РАН. МГД-перемешиватель представляет собой законченное промышленное устройство, позволяющее бесконтактно независимо генерировать азимутальные и меридиональные течения проводящей среды [2].

Индуктор кольцевой формы имеет высоту 330 мм (Рис. 2.1) и внешний диаметр 500 мм. Магнитные поля генерируются с помощью системы электрических катушек I с ферромагнитными сердечниками. Для предотвращения перегрева в индукторе имеется водяная система охлаждения обмоток II. Аппарат помещен в корпус III. Таким образом, в жидким металле IV, помещенном в рабочую зону перемешивателя диаметром 200 мм, происходит генерация азимутальной электромагнитной силы с помощью вращающегося магнитного поля (ВМП) и (или) аксиальной силы с помощью бегущего магнитного поля (БМП). При этом существует возможность раздельного управления параметрами ВМП и БМП. Перемешиватель может быть использован для литья алюминиевых и магниевых сплавов. Катушки обоих систем соединены в зигзаг и рассчитаны на непрерывную работу от питающей сети 380 В при включенном охлаждении. Предельные значения фазных токов: 15 А для катушек ВМП и 12 А для катушек БМП. При этом, суммарные тепловые потери в обмотках составляют около 300 Вт.

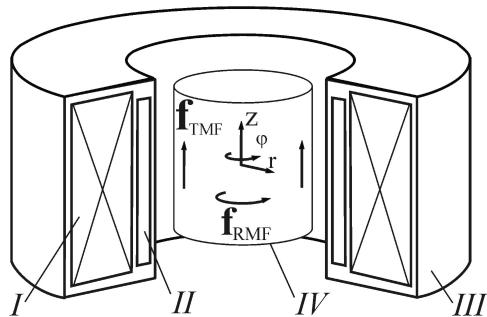


Рис. 2.1. Устройство МГД-перемешивателя

2.2. Распределение создаваемого МГД-перемешивателем магнитного поля

Магнитное поле, создаваемое МГД-перемешивателем, не является однородным, потому что изготовление и установка магнитных систем выполнены с некоторой погрешностью, а в индукторе БМП имеет место концевой эффект. Неоднородности поля могут влиять на характер течения и процесс кристаллизации. При задании в параметрах численной модели симметричного источника магнитных полей, в ней могут не проявиться некоторые неустойчивости, существенно влияющие на динамику течения, которые присущи реальному устройству. Таким образом, первоочередной задачей является измерение распределения магнитного поля в рабочей зоне МГД-перемешивателя. Необходимость автоматизации измерений следует из сложной топологии этих полей.

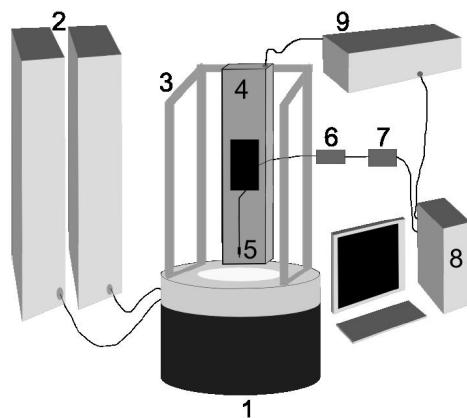


Рис. 2.2. Схема установки по измерению распределения магнитного поля в рабочей зоне МГД-перемешивателя

Экспериментальная установка для исследования структуры создаваемых магнитных полей внутри МГД-перемешивателя схематически изображена на рис. 2.2. Обмотки ВМП, БМП перемешивателя 1 независимо подключены к питающей сети с помощью двух лабораторных трехфазных автотрансформаторов 2. Измерения магнитного поля производились локальными датчиками Холла 5 магнитометра 6 (Lakeshore Model 421). Взаимозаменяемые датчики позволяли измерить радиальную, азимутальную и вертикальную компоненты магнитного поля в фиксированной точке. Дат-

чик закреплён в держателе моторизованной подвижки 4 (Isel Automation), которая позволяла осуществлять его перемещение вдоль вертикальной оси, при этом положение датчика в горизонтальной плоскости задавалось вручную. Измерительная система закреплена на каркасе 3 (ThorLabs). Для автоматизации эксперимента была разработана программа в среде LabView, которая с помощью подключенного к компьютеру 8 аналогово-цифрового преобразователя 7 (АЦП модели NI9239, National Instruments) сохраняла данные, поступающие с выхода магнитометра, а также отправляла команды блоку управления подвижкой 9. Магнитометр и АЦП позволяют работать с частотой, на порядки превышающей частоту магнитного поля индукторов. Перемещение локального датчика магнитного поля с помощью подвижки производилось с высокой скоростью и синхронно со сбором данных. Такая автоматизация позволила провести детальное изучение профилей компонент магнитного поля в объёме рабочей зоне МГД-перемешивателя.

На рис. 2.3(а) показаны зависимости амплитуды радиальной компоненты магнитного поля от действующего значения напряжения индуктора БМП в различных по высоте точках, частота тока в обмотках $F_{RMF} = 50$ Гц. Все зависимости этого типа близки к линейным, следовательно сердечники индуктора не входят в насыщение на интервале напряжений до 400В . На рис. 2.3(б) показаны зависимости амплитуды радиальной компоненты магнитного поля от частоты тока индуктора БМП в различных по высоте точках при фиксированном токе индуктора $I_{RMF} = 1$ А. Полученные кривые различаются постоянным смещением, которое появляется по причине неоднородности магнитного поля по объёму рабочей зоны. Наклон характеристик совпадает во всём объёме, так как разброс в значениях индуктивностей катушек индуктора составляет не более 1.5%.

На рис. 2.4 показаны профили амплитуд радиальной компоненты магнитного поля при включенном индукторе БМП (а) и азимутальной компоненты магнитного поля при включенном индукторе ВМП (б). В обоих случаях частота и величина тока были зафиксированы: $F_{RMF,TMF} = 50$ Гц, $I_{RMF,TMF} = 1$ А.

На расстоянии более 100 мм от верхней плоскости перемешивателя и

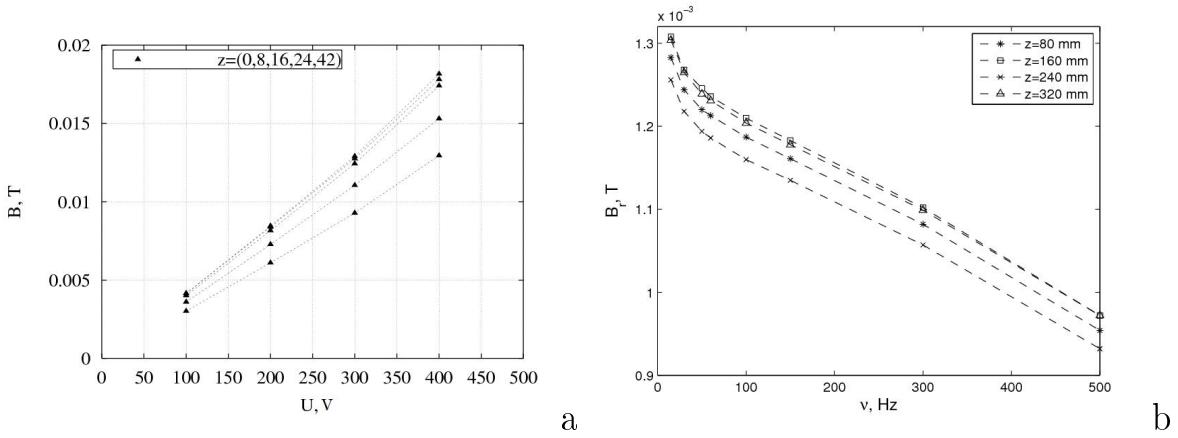


Рис. 2.3. Зависимости радиальной компоненты магнитного поля от напряжения питания обмоток бегущего магнитного поля (а) и частоты тока(б) в различных по высоте точках

на расстоянии более 40 мм от внутренней стенки наблюдается равномерное распределение магнитного поля (вариация магнитного поля менее 3%). В окрестности стенок, где интенсивности магнитного поля максимальны, профили полей соотносятся с расположением сердечников индуктора. В случае с ВМП неоднородности затухают ещё ближе к стенкам (рис. 2.4(б)) – на расстоянии более 30 мм. Таким образом, объёмы цилиндрических областей с однородным распределением магнитного поля оцениваются как $V_{RMF} = 13.5$ л, $V_{AMF} = 12.0$ л.

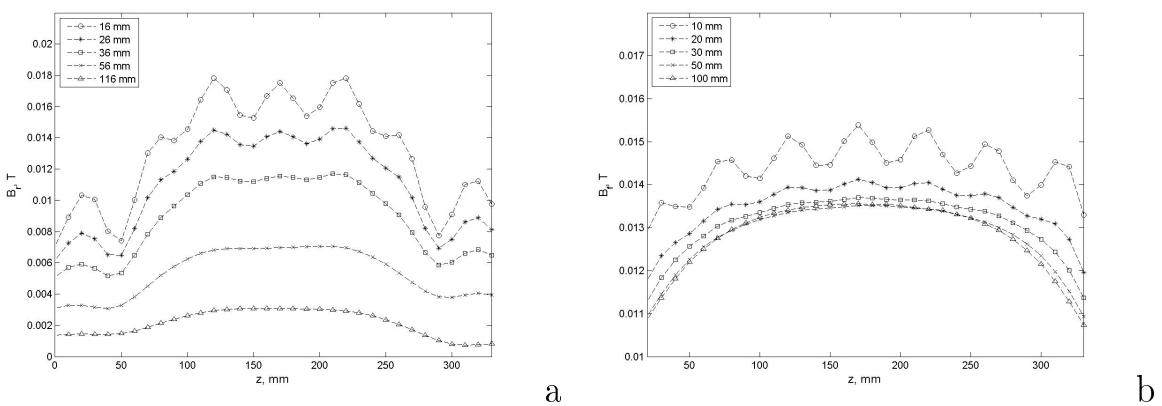


Рис. 2.4. Профили радиальной (а) и азимутальной (б) компонент магнитного поля

Обнаруженные неоднородности приводят к локальным неоднородностям электромагнитной силы, что может улучшать перемешивание при

близком расположении жидкого металла к стенке.

2.3. Электромагнитные силы, генерируемые МГД-перемешивателем

Вариации магнитного поля в объёме МГД-перемешивателя приводят к неоднородному распределению генерируемых в проводящей среде электромагнитных сил. Прямое измерение локальной электромагнитной силы, возбуждаемой в жидкой проводящей среде невозможно. Поэтому был поставлен эксперимент, позволивший изучить особенности интегральных электромагнитных сил, возбуждаемых БМП и ВМП в проводящем твёрдом теле. При этом измерялись силы и моменты сил, действующие на цилиндрические дюралюминиевые слитки (сплав Д16, $\sigma_{dur} = 37.2 \cdot 10^6$ См/м, $\rho_{dur} = 2.79$ г/см³) различной длины $L = (101, 173, 201, 302, 397)$ мм. Поскольку турбулентные свойства возбуждаемых в перемешивателе течений и процесс кристаллизации изучались не на дюралюминии, а на галлиевом сплаве, были проведены численные эксперименты по возбуждению электромагнитных сил в обоих сплавах. Результаты численных и натурных экспериментов с дюралюминием сопоставлены между собой.

Вращающееся магнитное поле

ВМП, создающее азимутальное течение в жидком металле, приводит к возникновению вращающего момента, действующего и на твёрдое тело. Схематическое изображение и фото экспериментальной установки для изучения зависимостей интенсивности электромагнитных сил ВМП от частоты и величины питающих токов представлены на рис. 2.5.

Дюралюминиевый цилиндр 4 диаметром 173 мм, имеющий одну вращательную степень свободы, помещён в рабочую зону перемешивателя 1. Обмотки ВМП подключены к трехфазному источнику переменного тока регулируемой частоты 2 (Pacific Power Source). Для измерения частоты и ускорения вращения цилиндра был использован диск с чередующимися прозрачными и непрозрачными секторами, закреплённый на оси цилиндра. Большое число секторов, пересекающих зазор оптопары 6, позволило измерять частоту вращения и угловое ускорение цилиндра с большой точностью и при малых интенсивностях воздействия. Оптопара подключена к источ-

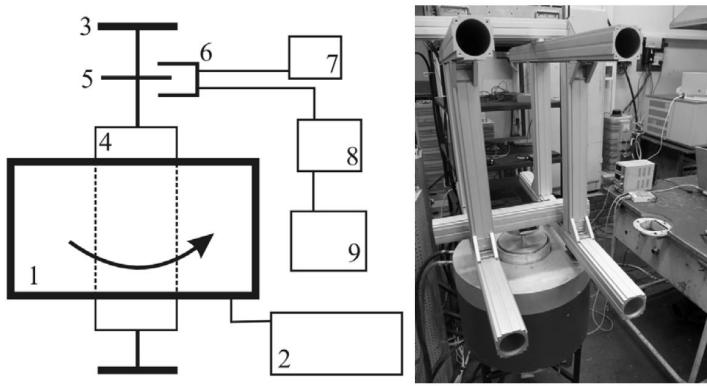


Рис. 2.5. Схема и фото установки по изучению характеристик электромагнитных сил, создаваемых ВМП.

нику тока 7 и высокочастотному АЦП 8 (NI9239). Программа, работающая в среде LabView, принимала периодический сигнал, соответствующий чередованию прозрачных секторов диска в оптопаре. В ходе каждого измерения были получены эволюции скорости и ускорения, а также интегрального момента сил, действовавших на цилиндр. При этом осуществлялся разгон цилиндра за счёт ВМП, после чего поле выключалось, и цилиндр медленно останавливался за счет трения в подшипниках. Замеры динамики угловой скорости производились в обоих случаях. Интегральный момент электромагнитных сил определялся, как разница между моментом сил при разгоне и моментом сил трения [1].

Были проведены эксперименты при совпадающих центрах цилиндра и рабочей зоны перемешивателя и смещении цилиндра на 50 мм выше и ниже вдоль оси перемешивателя (рис. 2.6). Обнаружено, что при одинаковых питающих токах моменты электромагнитных сил для всех трёх положений цилиндров остаются идентичными. Это означает, что суммарная сила для такого диапазона высот остаётся неизменной. Полученный результат важен для процесса кристаллизации, когда граница фаз находится на различной высоте.

На рис. 2.7(а) показана зависимость момента электромагнитной силы от среднего тока в катушках, а на рис. 2.7(б) – от частоты тока для цилиндров различной высоты. Численный счёт выполнен для случая цилиндра высотой 201 мм, результаты показаны на рисунках сплошной линией.

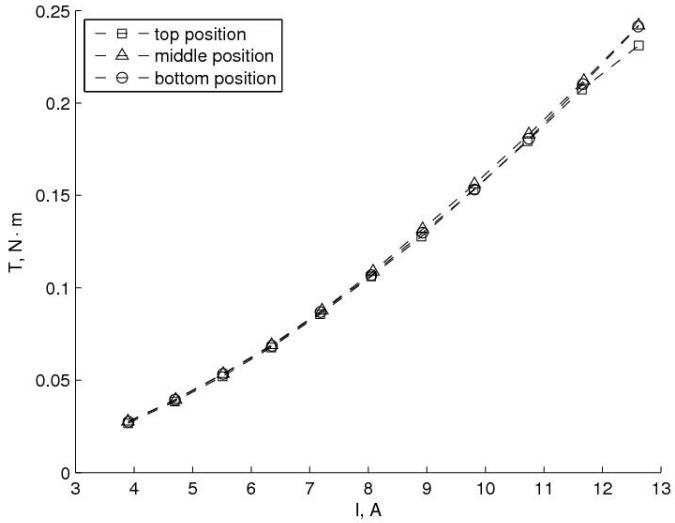


Рис. 2.6. Зависимость момента электромагнитной силы, действующей на цилиндр, от величины тока в обмотках БМП при различных положениях цилиндра.

Увеличение электрического тока приводит к квадратичному по величине увеличению момента электромагнитных сил. Увеличение высоты цилиндра также приводит к увеличению момента, так как возрастает объём проводящей среды, в котором возбуждаются вихревые токи, что и ведёт к увеличению электромагнитной силы. Уменьшение частоты питающего тока ведёт к увеличению момента за счёт более глубокого проникновения магнитного поля в проводник (скин-эффект). В случае дюралюминия, оптимальная частота находится за пределами минимально достижимой на используемом источнике частоты 15 Гц.

Бегущее магнитное поле

Экспериментальная установка для исследования электромагнитных сил, создаваемых БМП, (рис. 2.8) состоит из перемешивателя 1, источника трехфазного переменного тока регулируемой частоты 2 (Pacific Power Source), каркаса 3 (ThorLabs), дюралюминиевого цилиндра 4 и весов 5. БМП перемешивателя приводит к генерации в проводящей среде электромагнитной силы, направленной в среднем вертикально. Эта сила меняет вес цилиндра, который регистрируется весами.

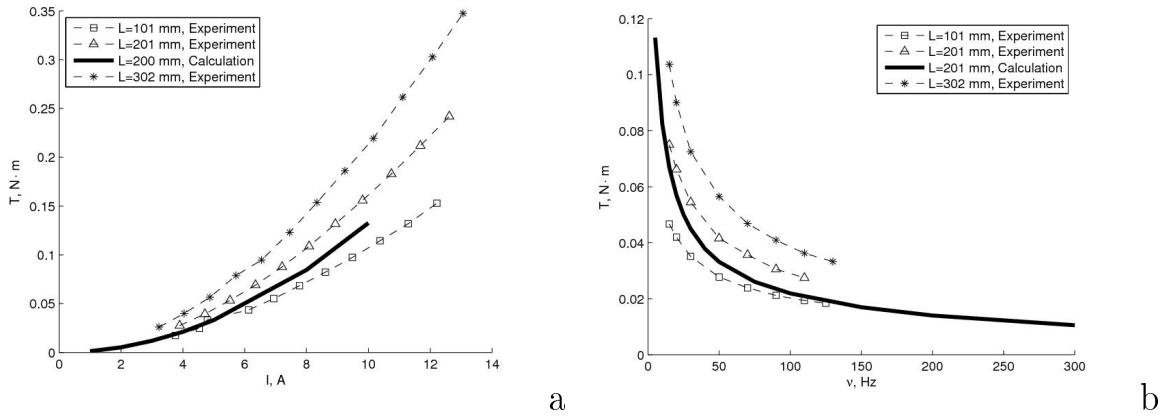


Рис. 2.7. Зависимость момента электромагнитной силы ВМП от тока в катушках (а) и от частоты тока (б). Пунктирными линиями показаны результаты экспериментов, проведённых с цилиндрами различной высоты, сплошной линией – результаты численного счета.

На рис. 2.9 показана зависимость интегральной электромагнитной силы от питающего тока (а) и частоты (б) для цилиндров различной высоты. Численный счёт выполнен для случая цилиндра высотой 201 мм, результаты показаны на рисунках сплошной линией. Зависимости силы от тока для разных высот цилиндра практически совпадают, при этом сохраняя схожее соотношение, как для случая с ВМП. Наблюдается рост электромагнитной силы с уменьшением частоты магнитного поля. Численная модель показывает приемлемое соответствие эксперименту.

Численные эксперименты также проведены для цилиндров из галлиевого сплава GaZnSn, обладающего на порядок меньшей проводимостью ($\sigma = 3.56 \cdot 10^6$ См/м). На рис. 2.10 приведены зависимости нормализованных электромагнитных сил от частот магнитного поля при токе 5 А, полученные численно. Увеличение толщины скрин-слоя с ростом удельного сопротивления приводит к сдвигу экстремума интенсивности электромагнитных сил в область высоких частот. Для материалов с проводимостью, меньшей, чем у дюралюминия, частота электрического тока, обеспечивающая максимальное значение электромагнитной силы, должна быть выше.

Полученные экспериментальные данные использованы для верификации математической модели возбуждаемых в проводящей среде электромагнитных сил.

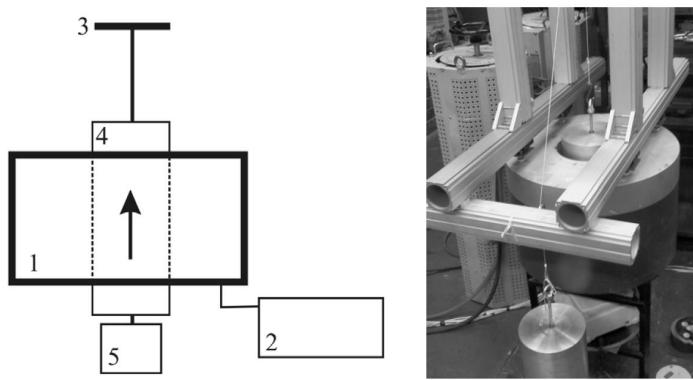


Рис. 2.8. Схема и фото установки по изучению характеристик электромагнитных сил, создаваемых БМП.

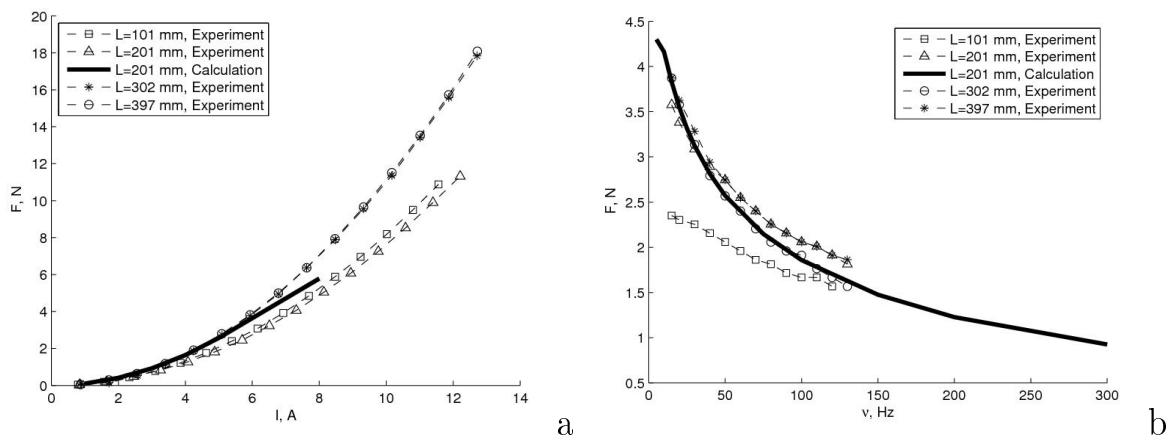


Рис. 2.9. Зависимость электромагнитной силы БМП от тока в катушках (а) и от частоты тока (б). Пунктирными линиями показаны результаты экспериментов, проведённых с цилиндрами различной высоты, сплошной линией – результаты численного счета.

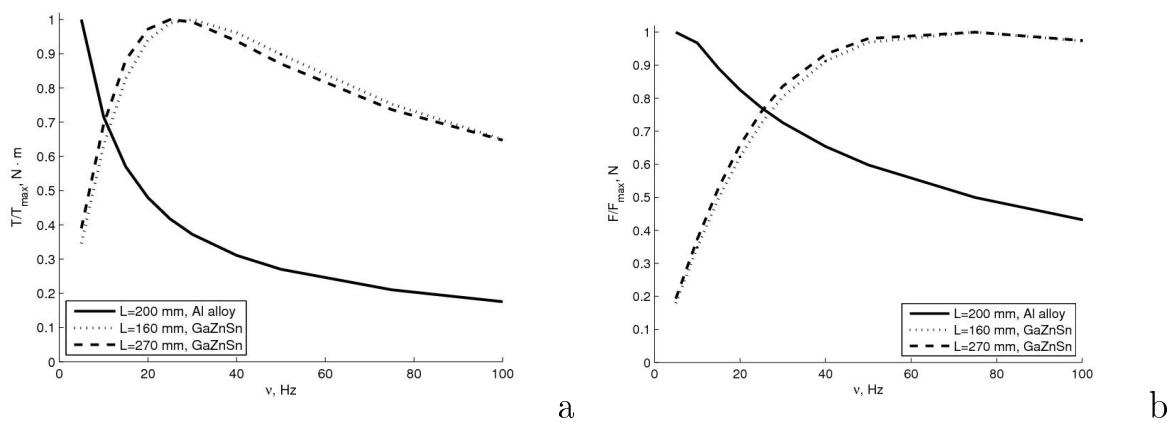


Рис. 2.10. Зависимость нормализованного момента электромагнитной силы, генерируемой ВМП (а) и нормализованной электромагнитной силы, генерируемой БМП (б) от частоты тока (численный счет). Сплошной линией показаны результаты расчетов для дюралюминиевого цилиндра, пунктирными линиями – для цилиндров из галлиевого сплава разной высоты.

2.4. Характеристики мелкомасштабной турбулентности течений, генерируемых МГД-перемешивателем

Непосредственное измерение турбулентных пульсаций скорости в проводящей среде можно осуществить различными способами (см. главу 1.2). В случае, если сами течения генерируются переменными магнитными полями, многие методы измерений перестают давать качественные результаты. В случае с перемешивателем были применены кондукционные датчики скорости, так как они просты в конструкции и не содержат нелинейных элементов. Поскольку постоянное локальное магнитное поле такого датчика скорости превышает генерируемые перемешивателем переменные магнитные поля, основным источником помех является Э.Д.С., наведенная на электрических проводах, соединяющих датчик с системой сбора данных [21].

Работа проведена с использованием низкотемпературного эвтектического сплава GaSnZn (Ga 87.5% + Sn 10.5% + Zn 2%), имеющим следующие свойства: $\sigma = 3.56 \cdot 10^6$ См/м – удельная электрическая проводимость, $\rho = 6256$ кг/м³ – плотность, $\nu = 3.1 \cdot 10^{-7}$ м²/с – кинематическая вязкость, 17°C – температура плавления, $Pm = \nu \sigma \mu_0 = 1.3 \cdot 10^{-6}$ – магнитное число Прандтля.

Цилиндрическая ёмкость из нержавеющей стали со внутренним диаметром 96 мм и высотой 240 мм, заполненная сплавом, размещается в рабочей зоне МГД-перемешивателя. Температура сплава поддерживалась на уровне $T_0 = 30^\circ\text{C}$ с помощью термостата и медного теплообменника, закрывающего нижний торец ёмкости. Обмотки ВПМ и БМП подключены к питающей сети через ЛАТРы или 3х-фазный источник Pacific Power Source 360-ASX, позволяющий регулировать как величину, так и частоту тока в интервале $F = (15 \div 300)$ Гц.

Измерения скорости проводились с помощью двух миниатюрных кондукционных датчиков Р1 и Р2, закреплённых на стенке ёмкости на расстоянии 10мм от неё (рис. 2.11(б)). Каждый датчик является двухкомпонентным и обладает хорошим динамическим разрешением по скорости ([21]). Устройство датчика изображено на рис. 2.11(а). Миниатюрный постоянный

магнит создаёт сильное локальное магнитное поле, а расположенные рядом электроды используются для измерения электродвижущей силы, связанной с локальной скоростью жидкости. Каждый датчик содержит две пары (Ch1 и Ch2) электродов 1, расположенных вокруг магнита 2 (размеры магнита: 10 мм × 2 мм × 2 мм), создающего на расстоянии 3 мм от торца магнитное поле с индукцией 20 мТл. Диаметр корпуса датчика 3 составляет 6 мм.

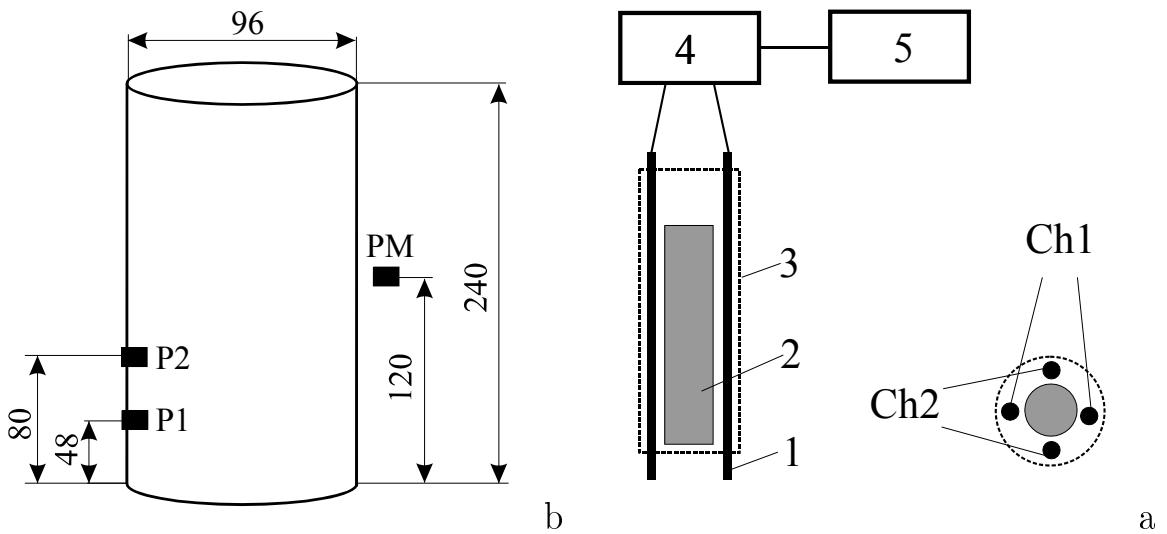


Рис. 2.11. Расположение датчиков относительно ёмкости со сплавом (а); схема кондукционного датчика скорости (б) (размеры приведены в миллиметрах).

В силу малости величины сигнала датчиков по сравнению с чувствительностью системы сбора данных был изготовлен многоканальный промежуточный усилитель 4 с $K_y = 30$ дБ. Основным элементом является инструментальный усилитель INA128 (производитель: Texas Instruments, полоса пропускания при $K_y = 30$ дБ: 20 кГц, коэффициент ослабления синфазного сигнала $CMMR = 120$ дБ). Система сбора данных 5 представляет собой 24-битные аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) NI 9239, работающие с частотой дискретизации 5 кГц. Также на них поступает сигнал с датчика тока одной из фаз питания перемешивателя и с холловского датчика магнитного поля, закреплённого на наружной стенке ёмкости внутри перемешивателя (РМ на рис. 2.11(б)). Калибровка кондукции-

онных датчиков скорости проводилась в ходе отдельного эксперимента на цилиндрической вращающейся кювете (рис. 2.12(а)). Кювета, заполненная галлиевым сплавом, приводилась во вращение с известной фиксированной скоростью, при этом наступало твердотельное вращение сплава. Каждая пара контактов обоих датчиков была по очереди сориентирована для измерения азимутальной скорости, которая точно известна на фиксированном расстоянии от оси вращения. Полученные калибровочные характеристики оказались линейными в интервале требуемых скоростей движения сплава в перемешивателе.

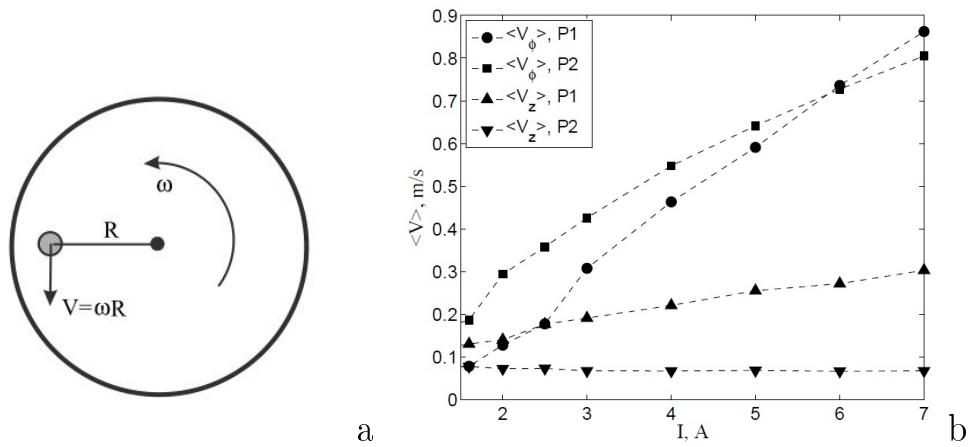


Рис. 2.12. Схематическое изображение метода калибровки кондукционных датчиков скорости (а); зависимости компонент средней скорости от тока в катушках вращающегося поля (б).

В ходе экспериментов изучались течения металла, вызванные ВМП и БМП. На рис. 2.12(б) показан пример характерных зависимостей средней скорости. На графике изображены зависимости средних компонент скорости (азимутальной V_ϕ и вертикальной V_z) от амплитуды переменного тока в индукторе МГД-перемешивателя.

Течение в ёмкости имеет сложную структуру, которую можно наблюдать, в частности, в поведении вертикальной компоненты скорости. Появление вертикальной составляющей скорости при наличии только ВМП хорошо известно, как гёртлеровская неустойчивость пограничного слоя ([113], [52], [53]) и связано в данном случае с расположением в окрестности первого датчика дна ёмкости. При удалении от дна, данный эффект

спадает, что согласуется с результатами измерений, проведённых на схожих режимах [54].

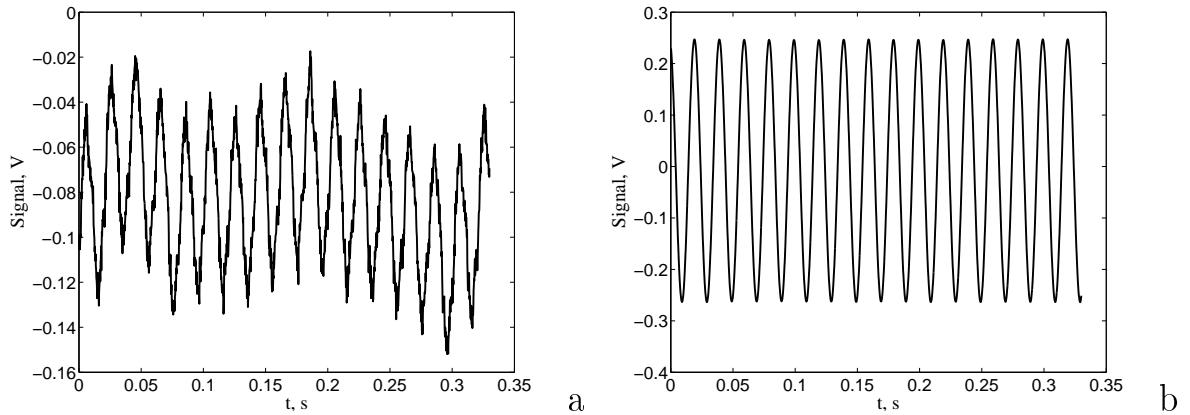


Рис. 2.13. Пример исходных сигналов: (а) – вертикальная компонента кондукционного датчика Р1; (б) – датчик магнитного поля (частота питания индуктора $f = 50\text{Hz}$).

Типичный сигнал датчика скорости жидкого металла при наличии ВМП показан на рис. 2.13 вместе с сигналом холловского датчика магнитного поля. Наблюдается преобладание интенсивных наводок, вызванных внешними магнитными полями над полезным турбулентным сигналом. Это преобладание поставило вопрос о возможности восстановления свойств мелкомасштабных (турбулентных) пульсаций скорости. Тот же вопрос возникает при анализе Фурье-спектров скорости, примеры которых показаны на рис. 2.14(а,с). И хотя есть некоторое сходство с колмогоровским наклоном, нельзя сказать, что является причиной такой структуры спектра – пульсации магнитного поля или, всё же, пульсации скорости.

Для отделения полезного сигнала от внешних шумов был применен метод фильтрации, основанный на анализе помасштабных вейвлет кросс-корреляций. Этот метод позволил корректно выделить интервалы частот, в которых флюктуации сигнала датчиков скорости вызваны турбулентными пульсациями скорости, а не электромагнитным шумом ([6]). Для сигналов датчиков скорости и магнитного поля были получены вейвлет-образы

$$W_f(\nu, t) = \sqrt{\nu} \int f(t') \psi(\nu(t' - t)) dt', \quad (2.1)$$

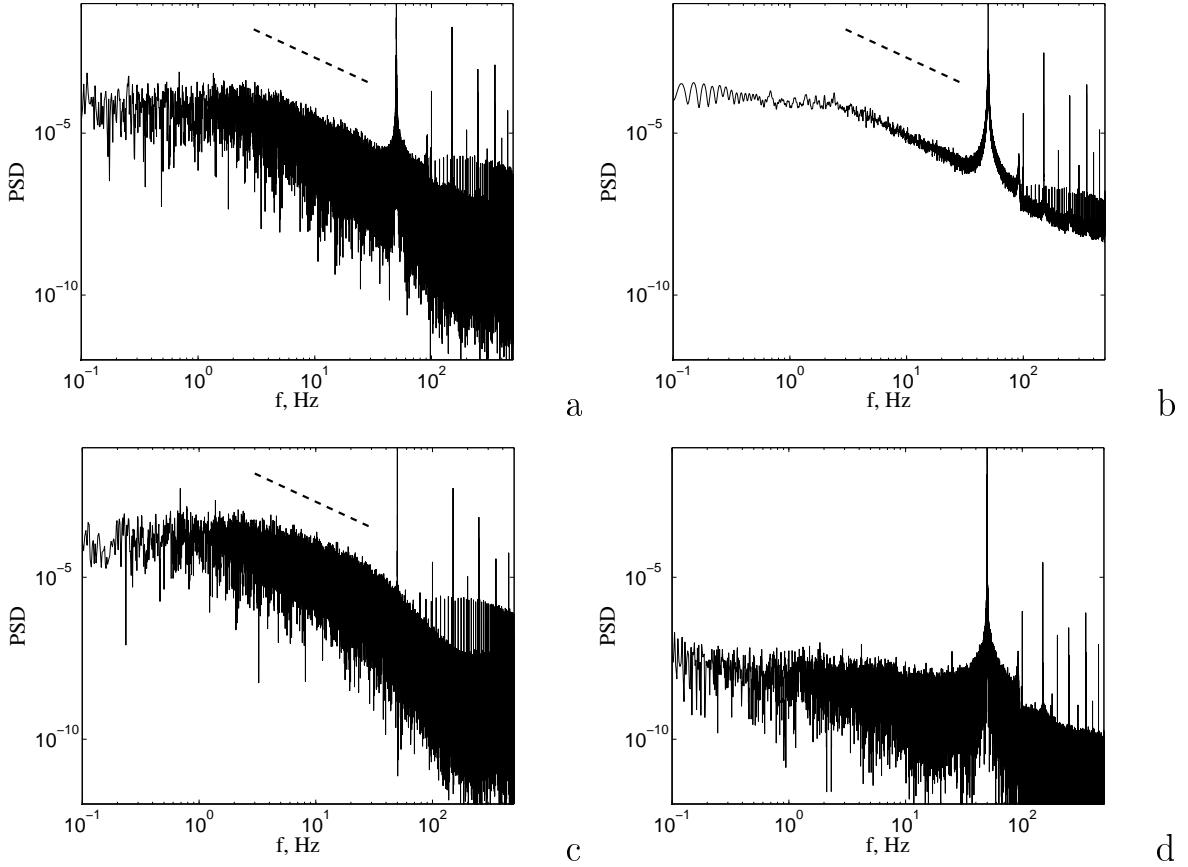


Рис. 2.14. Спектры сигналов датчиков скорости и магнитного поля: (а) – Фурье-спектр азимутальной скорости, (б) – вейвлет-спектр азимутальной скорости (с использованием анализирующего вейвлета-Морле с $\kappa = 7$), (с) – Фурье-спектр вертикальной скорости, (д) – Фурье-спектр магнитного поля. Пунктирной линией показан колмогоровский наклон “ $-5/3$ ”.

с использованием комплексного анализирующего вейвлета Морле $\psi(t) = e^{-t^2/2\kappa^2}e^{i2\pi t}$, где κ - параметр, позволяющий выбрать оптимальное разрешение по времени или частоте (далее указаны результаты для $\kappa = 7$). Вейвлет кросс-корреляция сигналов $f(t)$ и $g(t)$ определяется, как

$$r_w(\nu) = \frac{\int W_f(\nu, t)W_g^*(\nu, t)dt}{(M_f(\nu)M_g(\nu))^{1/2}}, \quad (2.2)$$

где $M_f(\nu)$ и $M_g(\nu)$ – интегральные спектры:

$$M(\nu) = \int |W(\nu, t)|^2 dt. \quad (2.3)$$

На рис. 2.15(а) показаны вейвлет-кросс-корреляционные функции, полученные по сигналам вертикальной компоненты скорости и датчика

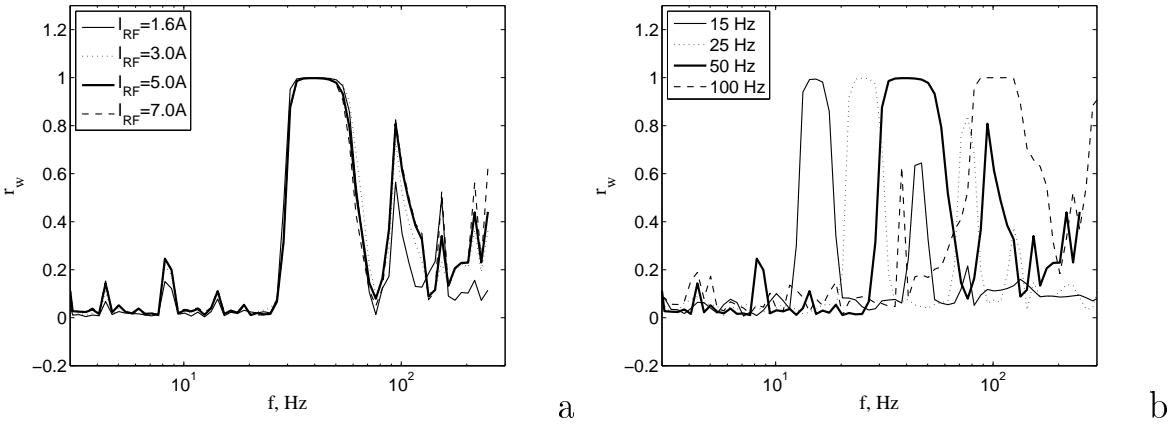


Рис. 2.15. Кросс-корреляции сигналов датчика скорости и магнитного поля: (а) – при различной величине тока индуктора; (б) – при различной частоте тока индуктора.

магнитного поля для частоты питающего тока 50 Гц и различных величин тока в индукторе ВМП. Видно, что в окрестности этой частоты значение корреляционной функции близко к единице, то есть магнитное поле доминирует в сигнале датчиков скорости. На больших частотах, за исключением кратных частот, уровень корреляции спадает, составляя около 20% при $f \simeq 1000$ Гц. Также уровень корреляции спадает на меньших частотах, начиная с $f \approx (0.7 \div 0.9) \cdot f_0$, что позволяет изучать характеристики пульсаций скорости в этом масштабе. Кросс-корреляционные функции для различных частот тока индуктора ВМП ($15 \text{ Гц} \leq f_0 \leq 200 \text{ Гц}$) показаны на рис. 2.15(б), видно, что интервал с сильной корреляцией перемещается в соответствии с изменением частоты тока.

Примеры спектров сигналов кондукционных датчиков, полученных при частотах ВМП $f_0 = (15, 25, 50, 100)$ Гц, показаны на рис. 2.16. Инерционный интервал, применимый для анализа турбулентных свойств течения, существенно расширяется при увеличении частоты тока, питающего обмотки индуктора магнитного поля. Полученные спектры соответствуют турбулентным спектрам в диапазоне частот до $0.7f_0$ (максимальный пик). Это позволяет проводить достоверный анализ турбулентных пульсаций при наличии интенсивных электромагнитных помех на ограниченных интервалах частот.

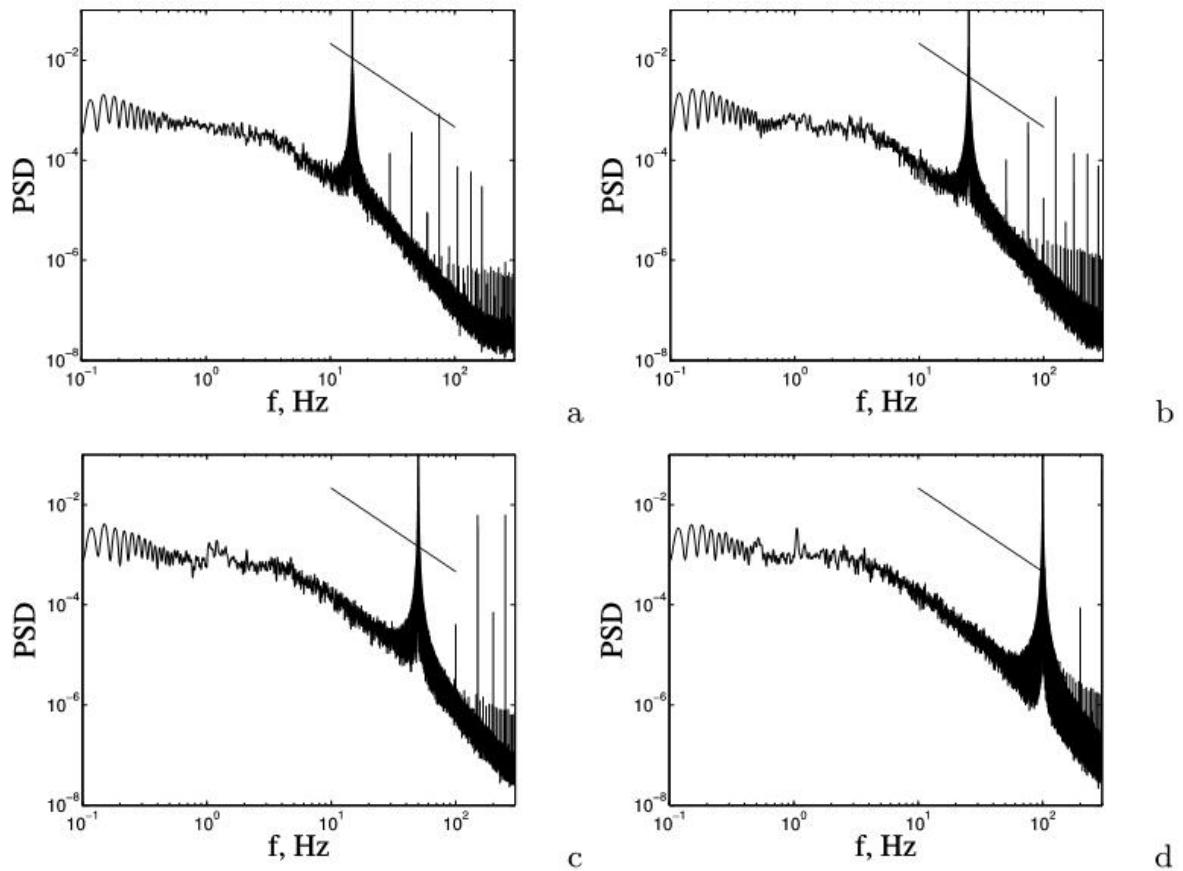


Рис. 2.16. Фурье спектры сигналов датчика скорости Р2, полученные при различных частотах бегущего магнитного поля: а – 15 Гц, б – 25 Гц, в – 50 Гц, г – 100 Гц. Сплошной линией показан колмогоровский наклон спектра “-5/3”.

2.5. Процесс кристаллизации под воздействием перемешивающего течения

Влияние турбулентных течений на процесс кристаллизации можно изучать в динамике, измеряя форму и скорость движения твёрдой границы или структуру течений, которые будут перестраиваться в ходе процесса, а также анализируя срезы уже затвердевших слитков ([20]). Последний метод является довольно длительным и трудоемким и не даёт информации о динамике процесса. Попытки измерения локальных скоростей кондукционными датчиками не увенчались успехом. Неоднородности инвазивных датчиков собирают на себе центры кристаллизации и перестают корректно функционировать. Характеристики ультразвукового анемометра позволяют использовать его для локализации положения ограниченной области границы раздела фаз ([77]) при работе с низкотемпературными сплавами (свойства сплава – см. главу 2.4). Хотя параметры такого эксперимента отличаются от условий реального производства, полученные результаты могут быть использованы для верификации численной модели, которая описывает в том числе и промышленные процессы.

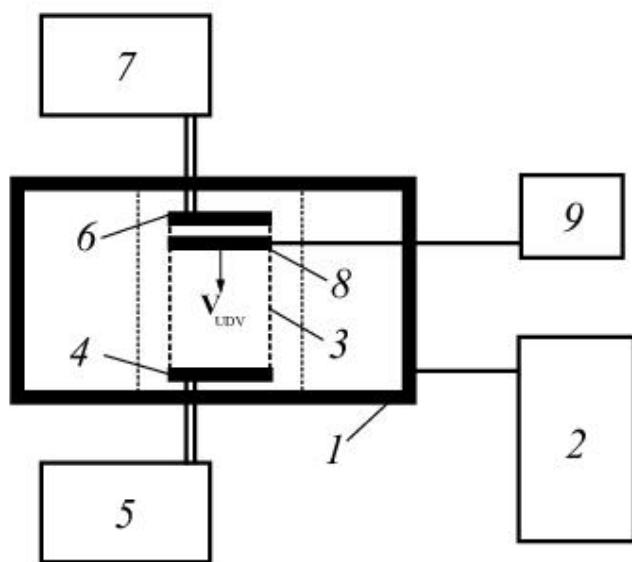


Рис. 2.17. Схема экспериментальной установки.

Кристаллизация изучалась в вертикальном цилиндрическом объёме

галлиевого сплава при интенсивном однородном охлаждении снизу и наличии вынужденных течений (рис. 2.17) [3]. Перемешивающие течения различной конфигурации создавались в рабочей зоне МГД-перемешивателя 1 (см. главу 2.1). Обмотки ВМП и БМП независимо подключены к питающей сети через ЛАТРы 2.

Емкость 3 представляет собой размещенный вертикально отрезок трубы из нержавеющей стали со стенкой толщиной 6 мм. Нижний торец трубы закрыт медным теплообменником 4, соединённым трубками с термостатом 5. Через нижний теплообменник перекачивается незамерзающая охлаждающая жидкость ТОСОЛ-40, температура которой поддерживается ниже температуры кристаллизации сплава $T_1 < T_C$. Другой теплообменник 6 погружен в объём сверху и будучи подключенным к термостату 7 поддерживает в верхней части цилиндра $T_2 > T_C$. Каждый теплообменник имеет развитую внутреннюю структуру канала, по которому протекает теплоноситель, что обеспечивает равномерное распределение температуры на поверхности. Снаружи ёмкость покрыта теплоизолятором из минеральной ваты.

Измерения эволюции и формы границы раздела фаз проводились с помощью ультразвукового доплеровского анемометра (УДА) 9 (DOP 2000, Model 2125, Signal Processing, Lausanne, Switzerland). Скорость звука в используемом галлиевом сплаве $V_s = 2740$ м/с. Данный сплав имеет малую толщину двухфазной зоны (*mushy zone*), что позволяет определять положение фронта кристаллизации с хорошей точностью. Система из девяти датчиков УДА 8 была погружена в сплав в верхней части ёмкости и ориентирована так, чтобы пучки ультразвуковых волн были направлены параллельно вертикально вниз навстречу растущей границе и, отражаясь от неё, возвращались в соответствующий датчик. Поскольку опрос проводился в мультиплексированном режиме, сигналы датчиков были разнесены во времени и не оказывали друг на друга влияния при рассеянии от неровного фронта кристаллизации. При этом такой набор датчиков позволил исследовать динамику намерзания твёрдой фазы в нескольких точках, что позволило оценить форму границы раздела. Были использованы короткие датчики диаметром 8 мм, предназначенных для работы на частоте

4 МГц. Они были закреплены заподлицо в отверстиях в медной пластине толщиной 2 мм, таким образом, и верхняя граница исследуемого объёма являлась плоской. Это существенно упрощает сопоставление экспериментальных данных с математической моделью с позиции граничных условий для поля скорости. Хотя граничные условия для теплопереноса при наличии пластины с датчиками становятся неидеальными, был сделан выбор именно в пользу такой конфигурации измерительной системы. Высота получившегося цилиндрического объёма жидкого металла составляла 240 мм, а диаметр – 96 мм.

В ходе предварительных экспериментов был выявлен оптимальный режим для измерений. Перед началом измерений объём жидкого металла поддерживался при температуре $T_2 = +21^\circ C$ с помощью верхнего теплообменника, при этом термостат нижнего теплообменника был отключен от установки и охлаждал теплоноситель до $T_1 = -25^\circ C$. Затем с помощью вентилей нижний термостат подключался к нижнему теплообменнику и запускался процесс измерений УДА.

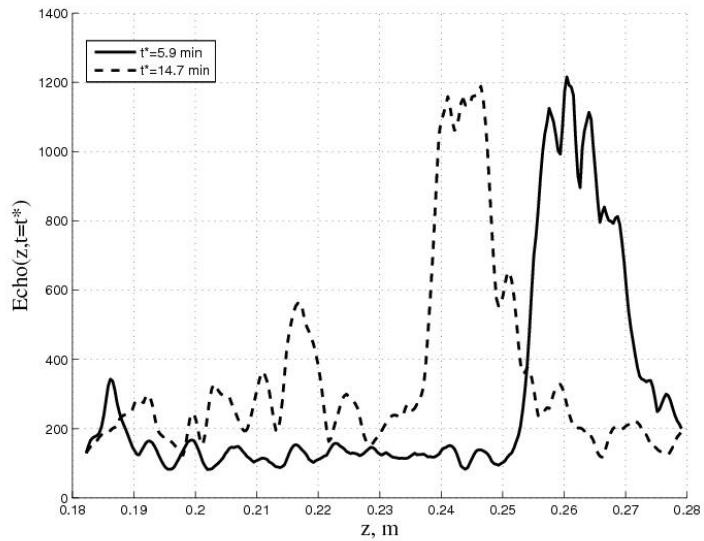


Рис. 2.18. Сигналы эха, полученные в разные моменты времени t^* в ходе кристаллизации.

При измерениях производился сбор данных о профилях скорости и уровнях эха. На рис. 2.18 показана эволюция сигнала профиля эха, полученная в процессе кристаллизации. Частота дискретизации ультразву-

ковых датчиков была выбрана таким образом, чтобы временное разрешение было достаточным для отслеживания довольно медленного движения фронта кристаллизации. В начале эксперимента все датчики отображают четкую границу между жидким металлом и твёрдой поверхностью нижнего теплообменника. Использование эвтектического сплава предполагает возможность отчетливого определения положения границы раздела твёрдой и жидкой фаз в ходе замерзания. Однако эксперименты показали, что сигнал профиля эха имеет неоднородности в окрестности границы раздела фаз, и этому есть несколько объяснений. Во-первых, сплав может быть не химически чистым. Во-вторых, граница раздела, в идеальном случае, должна быть строго параллельна плоскости датчиков, иначе это приводит к рассеянному отражению, кроме того на поверхности твёрдой фазы могут быть локальные неоднородности, что также приводит к рассеянию ультразвука. Таким образом, тривиальный поиск максимума не позволил корректно определить положение фронта кристаллизации.

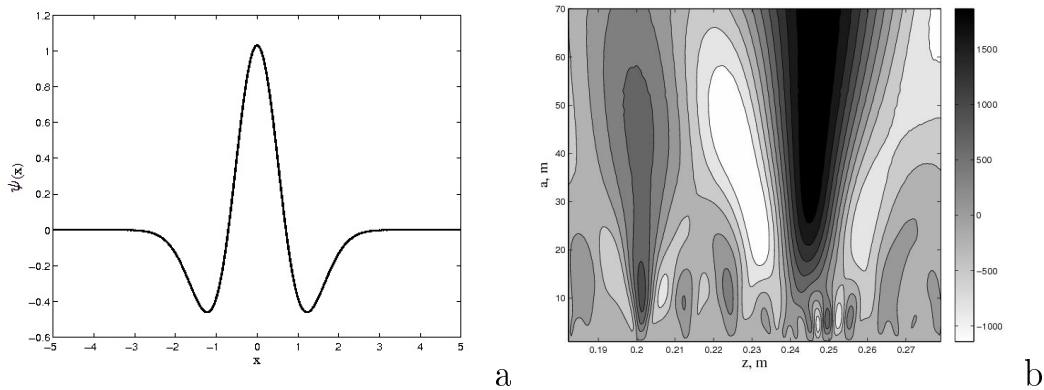


Рис. 2.19. (а) Вейвлет 'Мексиканская шляпа', использованный для определения положения границы раздела фаз; (б) Пример плоскости вейвлет-коэффициентов, полученной в ходе анализа профиля эха.

Локализация фронта кристаллизации была проведена с использованием вейвлет-анализа. В качестве анализирующего вейвлета был использован действительный вейвлет "Мексиканская шляпа" $\psi(x) = (1 - x^2)e^{-x^2/2}$ (рис. 2.19(а)). Результатом анализа каждого снимка сигнала эха была плоскость вейвлет-коэффициентов (рис. 2.19(б)), на которой наблюдается максимум. Его координата по горизонтальной оси говорит о положении фронта

криSTALLизации, а положение максимума по оси масштабов даёт информацию о точности локализации.

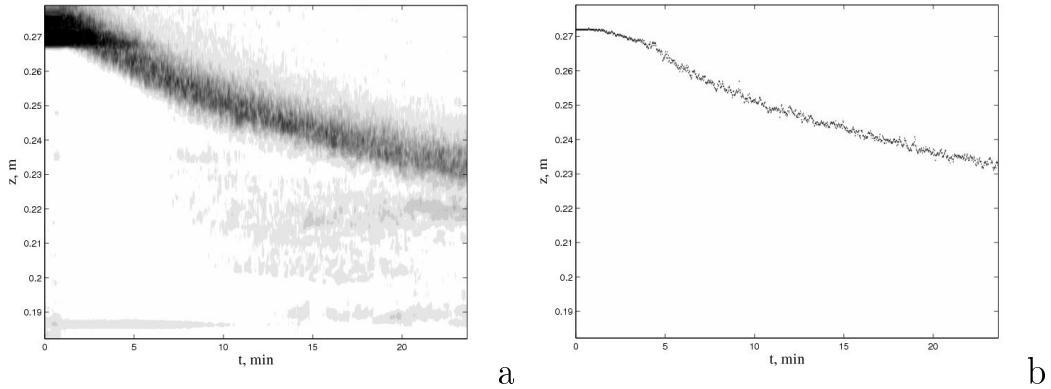


Рис. 2.20. (а) Пространственно-временная диаграмма профиля эха в ходе кристаллизации; (б) Эволюция границы фаз, полученная из (а) с помощью вейвлет-анализа

На рис. 2.20(а) показана эволюция профиля эха до применения вейвлет-анализа. По горизонтальной оси отложено время, по вертикальной – координата вдоль луча. Уровень сигнала показан градациями серого. Применение вейвлет-анализа дало информацию о положении границы раздела. Пример эволюции положения границы раздела, полученной с помощью вейвлет-анализа, показан на рис. 2.20(б). Видно, что такой анализ может быть использован для локализации положения фронта кристаллизации. Данная методика была применена для обработки экспериментальных данных, полученных в ходе кристаллизации при различных режимах перемешивания (рис. 2.21). Результаты исследований показали замедление намораживания твёрдой фазы при интенсификации перемешивающего течения.

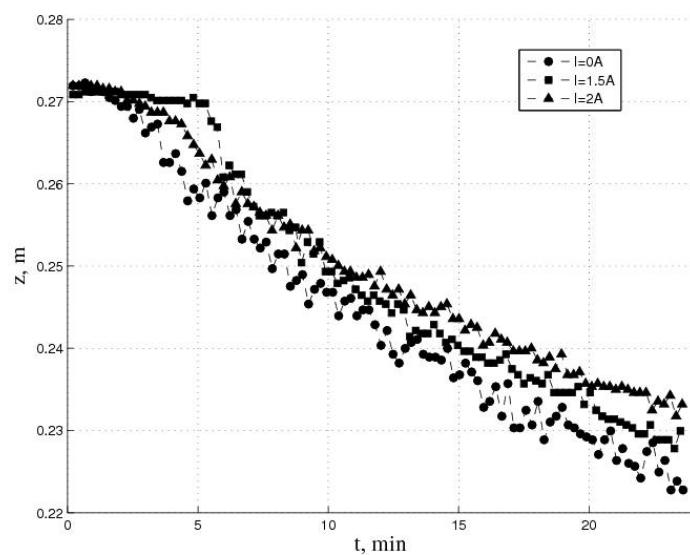


Рис. 2.21. Эволюции границы раздела фаз в ходе кристаллизации при различных величинах тока индуктора вращающегося магнитного поля.

2.6. Выводы по главе

1. Подготовлены и проведены эксперименты по изучению характеристик индуктора МГД-перемешивателя. Исследована структура генерируемых МГД-перемешивателем магнитных полей, а также характеристики создаваемых этими полями электромагнитных сил в твёрдотельных цилиндрических дюралюминиевых слитках.
2. Подготовлена и проведена серия экспериментов по исследованию турбулентного течения, генерируемого бегущими и вращающимися магнитными полями. Разработана методика анализа экспериментальных данных, позволившая при спектральном анализе выделить диапазоны частот, достоверно характеризующие турбулентные пульсации скорости течений.
3. Подготовлены и проведены эксперименты по изучению динамики процесса кристаллизации под воздействием бегущих и врачающихся магнитных полей различной интенсивности. Разработан метод определения положения границы раздела фаз по неоднородным сигналам ультразвукового доплеровского анемометра. Показано, что интенсификация перемешивающего течения приводит к замедлению намораживания твёрдой фазы.
4. Полученные экспериментальные данные использованы для настройки и верификации численной модели генерируемых в рабочей зоне МГД-перемешивателе течений и процесса кристаллизации.

3. Магнитное поле в турбулентном тороидальном течении жидкого натрия

Уравнение индукции магнитного поля в движущейся электропроводящей среде записывается следующим образом

$$\partial_t \mathbf{B} = \nabla \times (\mathbf{U} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}, \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.1)$$

Разложение полных значений магнитного поля и скорости на средние по реализациям значения $\bar{\mathbf{B}}$, $\bar{\mathbf{U}}$ и флюктуации $\mathbf{b} = \mathbf{B} - \bar{\mathbf{B}}$, $\mathbf{u} = \mathbf{U} - \bar{\mathbf{U}}$ позволяет записать уравнение индукции для усредненных переменных

$$\partial_t \bar{\mathbf{B}} = \nabla \times (\bar{\mathbf{U}} \times \bar{\mathbf{B}} + \boldsymbol{\varepsilon}) - \eta \nabla^2 \bar{\mathbf{B}}, \nabla \cdot \bar{\mathbf{B}} \quad (3.2)$$

При этом слагаемое $\boldsymbol{\varepsilon} = \overline{\mathbf{u} \times \mathbf{b}}$ описывает эффективное электрическое поле, вызванное пульсациями магнитного поля и поля скорости. Для решения уравнения индукции среднего поля (3.2) дважды в кинематической постановке (расчет распределения магнитного поля при заданной конфигурации поля скорости) требуется задать не только крупномасштабное поле скорости, но и зависимость $\boldsymbol{\varepsilon}$ от средних полей и статистических свойств флюктуаций. При этом следует учитывать, что значение $\boldsymbol{\varepsilon}$ в конкретной точке зависит от величин $\bar{\mathbf{U}}$, $\bar{\mathbf{B}}$, \mathbf{u} и \mathbf{b} не только в данной точке, но и в некоторой её окрестности. Предположение о том, что $\bar{\mathbf{U}}$ медленно меняется в окрестности рассматриваемой точки даёт линейную зависимость $\boldsymbol{\varepsilon}$ от компонент вектора $\bar{\mathbf{U}}$ и его пространственных производных. Для наиболее общего случая зеркально-несимметричной неоднородной турбулентности удобно ввести общее вращение $\boldsymbol{\Omega}$ и разложить градиент среднего поля скорости на симметричную и антисимметричную части. Тензор скорости деформаций $\mathbf{D} = (\nabla \bar{\mathbf{U}} + \nabla \bar{\mathbf{U}}^T)/2$ описывает сдвиговую составляющую движения, а $\mathbf{W} = \nabla \times \bar{\mathbf{U}}$ – твердотельное вращение. Мелкомасштабные неоднородности характеризуются градиентом энергии турбулентных пуль-

саций $\mathbf{g} = \nabla(\overline{|\mathbf{u}|^2})/\overline{|\mathbf{u}|^2}$. В общем виде выражение для $\boldsymbol{\varepsilon}$, полученное в работе [108] содержит 19 слагаемых

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{\varepsilon}^{\overline{\mathbf{B}}} = & -\alpha^{(0)}\overline{\mathbf{B}} - \beta^{(0)}\nabla \times \overline{\mathbf{B}} - \\
& - (\delta^{(\Omega)}\boldsymbol{\Omega} + \delta^{(\mathbf{W})}\mathbf{W}) \times (\nabla \times \overline{\mathbf{B}}) - \\
& - (\kappa^{(\Omega)}\boldsymbol{\Omega} + \kappa^{(\mathbf{W})}\mathbf{W}) \cdot (\nabla \overline{\mathbf{B}})^{(s)} - \\
& - \beta^{(D)}\mathbf{D} \cdot (\nabla \times \overline{\mathbf{B}}) - \kappa^D \hat{\boldsymbol{\kappa}}(\mathbf{D}) \cdot (\nabla \overline{\mathbf{B}})^{(s)} - \\
& - \alpha_1^{(\Omega)}(\mathbf{g} \cdot \boldsymbol{\Omega})\overline{\mathbf{B}} - \alpha_2^{(\Omega)}((\boldsymbol{\Omega} \cdot \overline{\mathbf{B}})\mathbf{g} + (\mathbf{g} \cdot \overline{\mathbf{B}})\boldsymbol{\Omega}) - \\
& - \alpha_1^{(W)}(\mathbf{g} \cdot \mathbf{W})\overline{\mathbf{B}} - \alpha_2^{(W)}((\mathbf{W} \cdot \overline{\mathbf{B}})\mathbf{g} + (\mathbf{g} \cdot \overline{\mathbf{B}})\mathbf{W}) - \\
& - \alpha^{(D)}\hat{\boldsymbol{\alpha}}(\mathbf{g}, \mathbf{D}) \cdot \overline{\mathbf{B}} - \\
& - (\gamma^{(0)}\mathbf{g} + \gamma^{(\Omega)}\mathbf{g} \times \boldsymbol{\Omega} + \gamma^{(\mathbf{W})}\mathbf{g} \times \mathbf{W} + \gamma^{(\mathbf{D})}\mathbf{g} \cdot \mathbf{D}) \times \overline{\mathbf{B}}.
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Поясним физический смысл наиболее изученных слагаемых. Слагаемые с $\alpha^{(0)}$ и $\beta^{(0)}$ отвечают за генерационный и диссипационный эффекты в однородной изотропной зеркально-несимметричной турбулентности и именно ими долгое время ограничивались при описании турбулентных эффектов в теории динамо. Теория динамо оперировала альфа и бета эффектами в течение полувека, но только недавно оба эффекта были зарегистрированы в лабораторных экспериментах. Альфа-эффект был получен в работе [105], а бета-эффект (падение электрической проводимости в турбулентном потоке) – в работе [114].

$\delta^{(\Omega)}$ ($\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{J}$ -эффект) и $\delta^{(W)}$ возникают во вращающейся турбулентности под влиянием общего вращения и локальной завихренности. Сдвиг среднего поля скорости \mathbf{D} , свойственный большинству течений в астрофизических объектах, определяет эффекты с $\beta^{(D)}$ и κ^D . Остальные слагаемые дают вклад в случае неоднородности энергии турбулентных пульсаций \mathbf{g} . Слагаемое с $\gamma^{(0)}$ описывает вытеснение магнитного поля из области интенсивной мелкомасштабной турбулентности, называемое турбулентным диамагнетизмом, отвечающим в некоторых случаях за снижение порога динамо-генерации.

Целью данной работы является изучение эффекта турбулентного диамагнетизма в постановке, позволяющей исключить иные механизмы генерации эффективного электрического поля, то есть выделить вклад слага-

емого $\boldsymbol{\varepsilon} = -\gamma^{(0)}(\mathbf{g} \times \mathbf{B})$. Для решения этой задачи исследуются искажения наложенного тороидального магнитного поля на тороидальный же (в среднем) поток турбулентного жидкого натрия. Коллинеарность основного потока наложенному магнитному полю дает надежду на исключение эффектов, связанных со средним полем скорости.

3.1. Особенности тороидального МГД-течения

Характерным параметром взаимодействия движущихся проводящих сред с магнитным полем является магнитное число Рейнольдса $Rm = \sigma\mu_0 VL$, где σ – проводимость среды, V – характерная скорость течения, L – масштаб течения. Генерация, диссипация и иные возмущения магнитного поля имеют место при $Rm \sim 1$. Для обнаружения этих эффектов в лабораторных условиях необходимо создать интенсивные течения среды с высокой проводимостью. В качестве такой среды наиболее целесообразно использовать жидкий натрий. Он обладает высокой проводимостью $\sigma \approx 10^7$ См/м и низкой температурой плавления $T_p = 97.8 \pm 0.1^\circ C$. При этом его плотность $\rho \approx 920$ кг/м³ и вязкость $\nu \approx 7.2 \cdot 10^{-7}$ м²/с близки к плотности и вязкости воды. Это позволяет изучать чисто гидродинамические процессы в натрии путем проведения экспериментов на воде, для которой применимы оптические методы измерения.

Основная сложность проведения экспериментов с натрием – это его высокая химическая активность. По технике безопасности запрещается работа с натрием без перчаток, специальной одежды, защиты для глаз. При взаимодействии с кислородом воздуха даже при низких температурах образуется оксид Na_2O , вызывающий ожоги рук и глаз. При температуре выше $120^\circ C$ натрий самовоспламеняется в присутствии кислорода, образуя пероксид Na_2O_2 , вдыхание хлопьев которого приводит к сильнейшим поражениям лёгких. Взаимодействие чистого натрия с водой приводит к образованию щелочи и водорода, что может привести к взрыву. При проведении всех исследований с натрием, описываемых в данной диссертационной работе, из помещений экспериментальных установок были исключены системы водоснабжения и водяного отопления. Все этапы работ (заполнение натрием установок, проведение эксперимента, слив натрия в ёмкости хранения) проводятся без доступа воздуха, а перекачка натрия между ёмкостями осуществляется путём вакуумирования и создания избыточного давления инертного газа аргона. Управление ходом экспериментов осуществляется дистанционно из соседних комнат.

Как правило, высокоскоростные потоки жидкого натрия в магнито-

гидродинамических экспериментах получаются путём возбуждения течения в замкнутом объёме пропеллерами, либо непрерывной перекачкой металла через канал с помощью насоса. Идея получения интенсивных потоков натрия в малом объеме за счет возбуждения импульсного потока в замкнутом тороидальном канале была предложена и реализована в лаборатории физической гидродинамики ИМСС УрО РАН [97]. При раскручивании канала, заполненного жидким натрием, наступает твердотельное вращение натрия за счет сил трения о стенки канала, в нём запасается кинетическая энергия. После быстрой остановки канала возникает основное тороидальное течение U_t относительно его стенок, скорость которого пропорциональна начальной скорости вращения канала и достигает 70% от линейной скорости канала перед торможением. Кривизна канала приводит к возбуждению вторичного полоидального течения U_p (течения Дина), подробная структура которого исследована для случая больших значений Rm в работе [115].

Вызываемое таким образом течение в канале сугубо нестационарно и затухает достаточно быстро, но в течение некоторого времени после остановки канала (характерное время измерения $\tau = 10$ с) скорости могут быть достаточно велики, чтобы провести исследования различных механизмов взаимодействия течения с магнитным полем. Такая постановка эксперимента позволяет получать значения чисел Рейнольдса до Re до $3 * 10^6$ и магнитных чисел Рейнольдса Rm до 30, что соответствует частоте вращения канала $\Omega \approx 50$ Гц.

3.2. Описание экспериментальной модели

3.2.1. Возбуждение течения в тороидальной модели

Экспериментальная установка представляет собой тороидальную титановую оболочку объёмом $V = 22.5$ л, заполненную жидким натрием (рис. 3.1 а,б). Оболочка имеет радиус кривизны $R = 0.18$ м и радиус попечечного сечения $r_0 = 0.08$ м. Вал оболочки ремённой передачей соединен с электродвигателем мощностью $P = 14$ кВт. На валу также закреплена гидравлическая дисковая тормозная система и диск с прорезями, пересекающий зазор оптопары. Перед проведением эксперимента набор грузов массой 37 кг, закреплённый на рычаге главного тормозного цилиндра, фиксируется электромагнитом в верхней точке. Регулятор тока ротора двигателя позволяет осуществлять плавное раскручивание модели. Импульсы с оптопары поступают на тахометр, позволяющий в реальном времени контролировать частоту вращения модели. По достижении требуемой скорости вращения, с пульта управления установкой подается команда торможения. При этом одновременно начинается сбор экспериментальных данных, отключение питания электродвигателя и электромагнита, удерживающего грузы тормозной системы. При падении грузы толкают поршень главного тормозного цилиндра, который передаёт усилие на тормозной механизм, останавливающий оболочку за время $\tau_{br} < 0.3$ с.

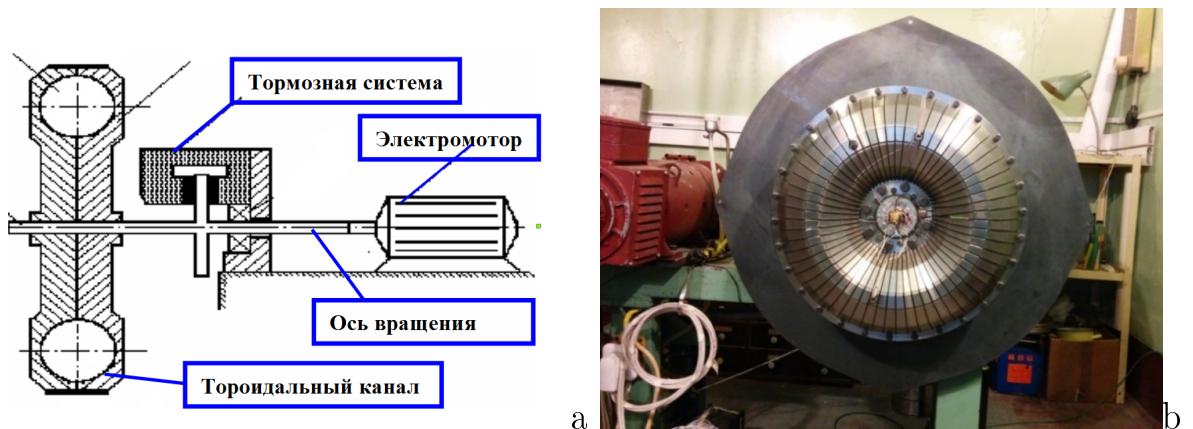


Рис. 3.1. Схема (а) и фото (б) экспериментальной установки.

3.2.2. Вспомогательные узлы

Для поддержания натрия в жидким состоянии и обеспечения постоянства температуры ($T = 105^{\circ}\text{C} > T_p$), тороидальный канал заключен в терmostатирующий кожух. Внутри канала в натрии находится миниатюрный терморезистор, ещё 2 терморезистора размещены под кожухом в непосредственной близости от тороидального канала для измерения температуры воздуха. Сигналы датчиков поступают в приборы Термодат 12к4 и 11м1, позволяющие поддерживать температуру натрия с точностью до 0.1°C и защищать компоненты измерительной системы, контролируя температуру воздуха путём отключения цепи питания нагревателя кожуха. Для того, чтобы исключить воздействие генерируемых спиралью нагревателя магнитных полей на измерения, перед торможением модели происходит автоматическое отключение его питания на время проведения измерения.

3.2.3. Система измерений

Для измерения скорости течения на стенке канала установлен миниатюрный двухкомпонентный кондукционный датчик, позволяющий одновременно измерять тороидальную и полоидальную компоненты локальной скорости (см. [107]). Датчик закреплен на расстоянии 1.5 мм от стенки канала, таким образом, измерения проводятся вне гидродинамического погранслоя на всех стадиях эволюции течения.

Схема датчика приведена на рис. 3.2 а. Миниатюрный постоянный магнит размером $2 \times 2 \times 10$ мм используется для создания сильного локального магнитного поля (2 кГс на поверхности) $\mathbf{B} = B_0\mathbf{e}_z$, ориентированного перпендикулярно стенке. Две пары медных электродов, закреплённых вокруг магнита, используются для измерения электродвижущей силы, связанной с локальной скоростью жидкости по закону Ома $\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$, откуда разница потенциалов выражается через среднюю скорость: $\phi_{x1} - \phi_{x2} = \int v_y B_z dx$.

Погрешность измерений составляет менее 3% при скоростях течения до 20 м/с и увеличивается до 15% при $v = 45$ м/с ([107]). Поскольку характерный уровень сигнала датчика скорости составляет доли милливольт, он

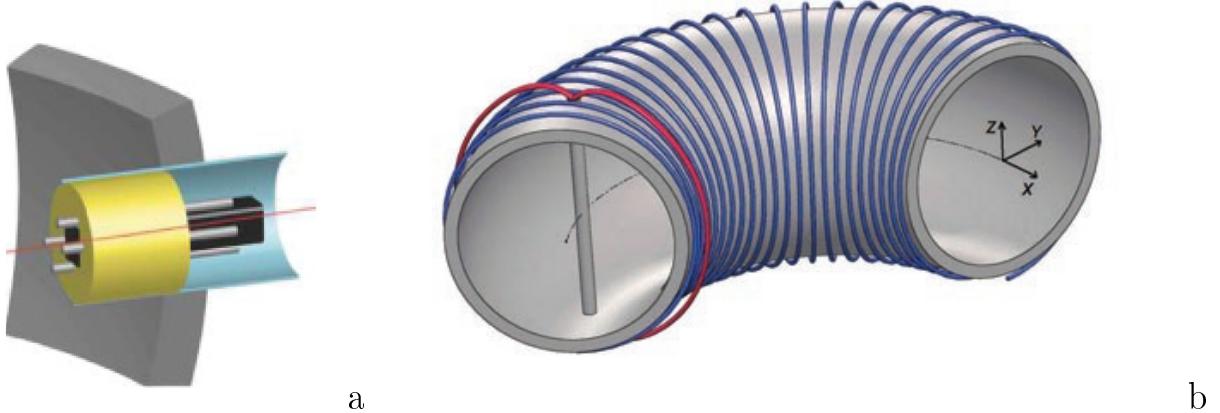


Рис. 3.2. (а) Эскиз кондукционного датчика скорости;(б) расположение возбуждающей (показана синим) и измерительных (показаны красным) катушек.

подключен экранированными кабелями к усилителю на основе инструментального усилителя AD8221, размещённому в полости внутри вала модели за теплоизолирующей прокладкой. Осьное размещение усилителя позволяет как уменьшить механические перегрузки, так и обеспечить постоянную пониженную температуру микросхем. Двуполярное питание усилителя осуществляется от батарей гальванических элементов, также размещённых в полости вала.

Шасси с высокоскоростными 16-битными платами сбора данных (DAQ) NI9215 (National Instruments) установлены вблизи экспериментальной установки, а сигналы датчиков из вращающейся системы координат поступают на входы плат через массив скользящих контактов Airflyte Electronics 1000150-024. Скользящие контакты обеспечивают надёжный электрический контакт неподвижных щёток и вращающихся колец типа золото-золото, обладающий низким переходным сопротивлением. Помимо сигналов датчиков к платам сбора данных подведен сигнал остановки, выполняющий функцию триггера для начала записи экспериментальных данных в среде National Instruments Signal Express, и сигнал частотомера, позволяющий точно определять начальную скорость вращения канала. Частота дискретизации АЦП DAQ составляет 100 кГц для каждого канала. Опрос DAQ осуществляется по гальванически-развязанному каналу

Ethetnet. Также оптическая развязка обеспечена по входам сигнала остановки и частотомера, что уменьшает влияние помех на входы DAQ, подключенные к датчикам.

Эволюция тороидальной и полоидальной компонент скорости, усредненных по 20 реализациям, показана на рис. 3.3, где $t = 0$ соответствует моменту полной остановки оболочки. На графиках показаны чётные $U^{even} = \frac{U^+ + U^-}{2}$ и нечётные $U^{odd} = \frac{U^+ - U^-}{2}$ компоненты скорости (полусуммы и полуразности эволюций скорости при вращениях по часовой стрелке U^+ и против U^-), по которым видно, что знак тороидальной компоненты скорости U_t зависит от направления вращения, а знак полоидальной компоненты U_p нет. Перед началом торможения устанавливается твердотельное вращение жидкого натрия, чему соответствует нулевая относительная скорость. На этапе торможения величина скорости жидкости относительно замедляющейся стенки канала (на которой и закреплён датчик скорости) увеличивается. Максимум скорости течения достигается в момент полной остановки канала. Основной интерес представляет динамика течения после момента остановки.

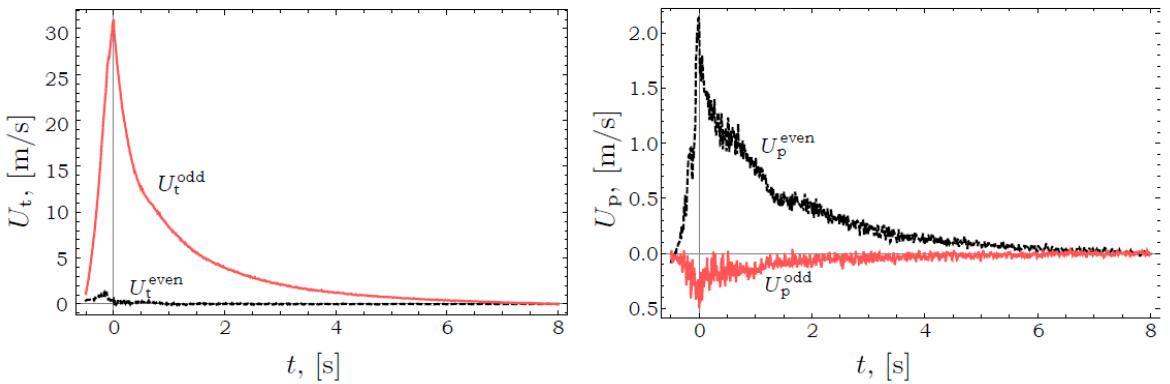


Рис. 3.3. Эволюции средней тороидальной (слева) и полоидальной (справа) компонент скорости, полученные при начальной частоте вращения канала $\Omega = 40$ Гц. Чёрным цветом показана чётная компонента, красным – нечётная.

Измерения индуцированного турбулентным течением локального магнитного поля производятся с помощью миниатюрного трехкомпонентного датчика магнитного поля на основе микросхем холловских датчиков

Sentron CSA-1VG с чувствительностью 28 мВ/Гс. Для его установки трубка из нержавеющей стали внутренним диаметром 8 мм была пропущена через центр канала. При измерениях датчик помещается внутри трубы на нужную глубину, которая определяет координату датчика по оси z : $z = 0$ соответствует центральному положению в сечении канала, $z = \pm 80$ мм – крайним левому и правому положениям датчика вблизи стенок канала.

Эта трубка также используется для измерений суммарного магнитного потока с помощью специальных катушек, намотанных вокруг половины сечения канала (см. рис. 3.2 b). Усиление сигналов катушек производится с помощью малошумящих предустановок Stanford Research Systems SR560. Данные усилители обладают высокой чувствительностью, при этом следует не допускать попадания повышенных уровней напряжения на их входы. Основным источником импульсов высокой амплитуды является включение и отключение катушки затравочного магнитного поля. Эти переключения необходимы, так как длительное протекание большого тока через катушку приводит к перегреву и расплавлению изоляции. Таким образом, потребовалась возможность дистанционного отключения входов усилителей от измерительных катушек на время проведения переключений питания катушки затравочного поля.

Используемые усилители содержат цифровой блок на основе микропроцессора (Zilog Z80A) и постоянного запоминающего устройства, содержащего код программы микропроцессора. Данный блок управляет отключением входа, задаёт коэффициенты усиления, настройки фильтров и других узлов устройства. Цифровой блок получает команды либо с лицевой панели устройства, либо по последовательному интерфейсу RS-232. При этом, задающий генератор микропроцессора включается только во время поступления команд, а в остальное время цифровой шум, способный повлиять на слабые сигналы в аналоговой части устройства, отсутствует. Была разработана программа, полностью эмулирующая лицевую панель устройства, и позволяющая дистанционно изменять различные настройки усилителей. Другая разработанная программа выполняет функцию отключения входов усилителей в момент переключения тока генерирующей катушки.

Затравочное постоянное магнитное поле $B_0(y)$ создается тороидаль-

ной катушкой, намотанной поверх канала (60 витков). Создаваемое ей магнитное поле при отсутствии течения однородно вдоль трубы и составляет величину $\simeq 13$ Гс.

Для измерения суммарного магнитного потока вокруг тороидального канала параллельно генерирующей была намотана дополнительная измерительная катушка. До скользящих контактов сигнал этой катушки проходит через схему на основе операционного усилителя к 140УД17а.

3.3. Структура возмущенного магнитного поля

Изучение распределения индукции магнитного поля и магнитного потока осуществляется путём получения одиннадцати реализаций процесса возбуждения турбулентного течения, исключения наиболее отличающейся реализации и дальнейшего усреднения результатов по реализациям, а также оконным усреднением с шагом 0.01 с. В случае результатов измерения локального магнитного поля проводится выделение индуцированной составляющей путём вычитания затравочного магнитного поля. Также предварительная обработка сигналов включает в себя проверку сохранения в серии экспериментов начальной скорости вращения оболочки и времени торможения по данным тахометра.

3.3.1. Профили локального магнитного поля

На рис. 3.4 а показана эволюция двух компонент магнитного поля B_x и B_z , осредненных по 10 реализациям. Верхние графики рисунка показывают чётную составляющую магнитного поля $B^{even} = \frac{B^+ + B^-}{2}$, нижние – нечётную $B^{odd} = \frac{B^+ - B^-}{2}$. Эффект подавления магнитного поля четко виден по тороидальной компоненте. Величина индуцированного магнитного поля B_x достигает около 4 Гс в момент остановки оболочки, когда интенсивность турбулентного течения максимальна. Эффект строго чётен по направлению вращения и может быть объяснен вытеснением магнитного поля из турбулентного ядра течения ко внешней части канала.

Индукционное поле B_z значительно слабее (менее 0.5 Гс) и представлено одновременно чётной и нечётной модами (рис. 3.4 б). Компонента B_z в основном сконцентрирована вблизи стенки и, по-видимому, генерируется за счёт дрейфа неоднородностей приложенного магнитного поля (имеющих место в силу большого расстояния между витками катушки ≈ 13 мм). На рис. 3.5 показано распределение индуцированного магнитного поля вдоль оси z в разные моменты времени после остановки оболочки. Профиль компоненты B_x подтверждает предположение о вытеснении магнитного поля интенсивным турбулентным течением – профиль является плоским в области турбулентного ядра и уменьшается в окрестности сте-

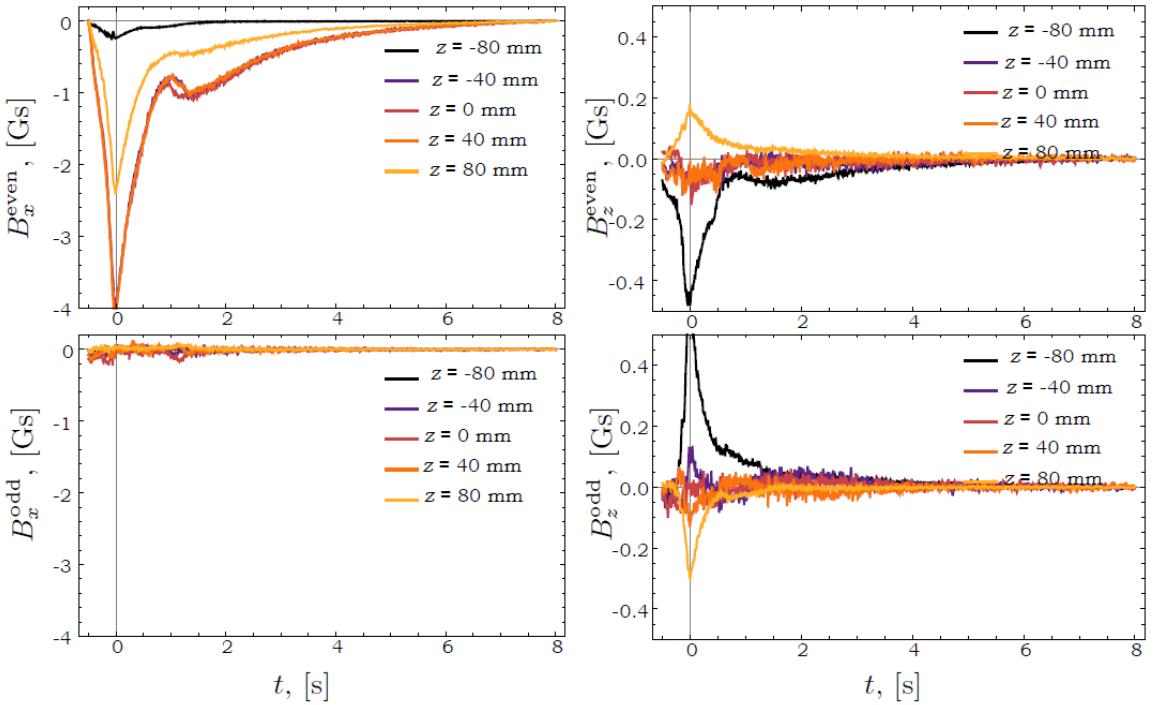


Рис. 3.4. Эволюция среднего индуцированного магнитного поля в нескольких точках вдоль оси z . На верхних графиках представлены чётные компоненты, на нижних – нечётные компоненты сигналов датчика магнитного поля.

nock. Индуцированная компонента B_z , наоборот, сконцентрирована у стеконок. На рис. 3.6 показано как среднеквадратичные пульсации скорости и магнитного поля развиваются и затухают.

В течение первой секунды при затухании течения турбулентность является сильно анизотропной – график показывает преобладание пульсаций полоидальной компоненты скорости. Правый график на рис. 3.6 показывает, что эволюция среднеквадратичных пульсаций магнитного поля схожа с эволюцией полоидальной скорости. Стоит отметить, что на графике приведены измерения датчиком магнитного поля, закреплённым в центральной части канала, а датчик скорости находится у стенки в диаметрально-противоположном сечении канала, следовательно не ожидается прямой корреляции сигналов. Тем не менее, поведение измеренных средних и пульсационных компонент магнитного поля качественно коррелирует с поведением тороидальной компоненты скорости.

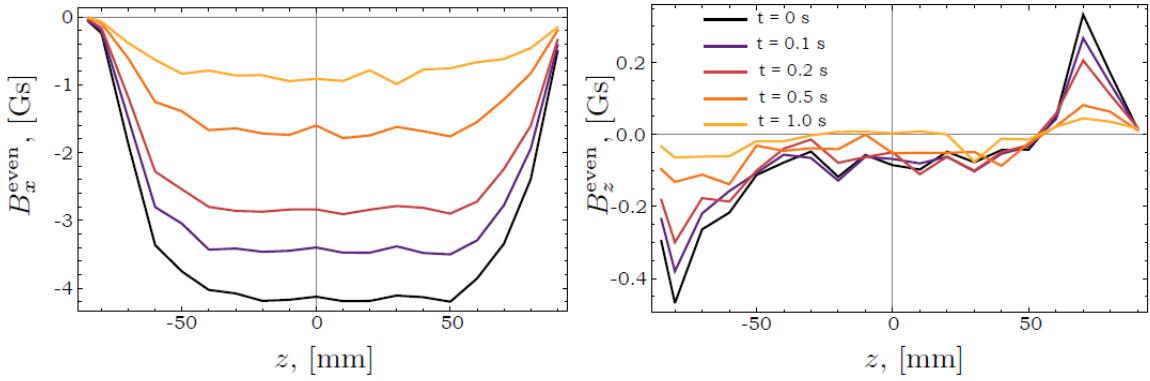


Рис. 3.5. Профили индуцированного магнитного поля в разные моменты времени после торможения.

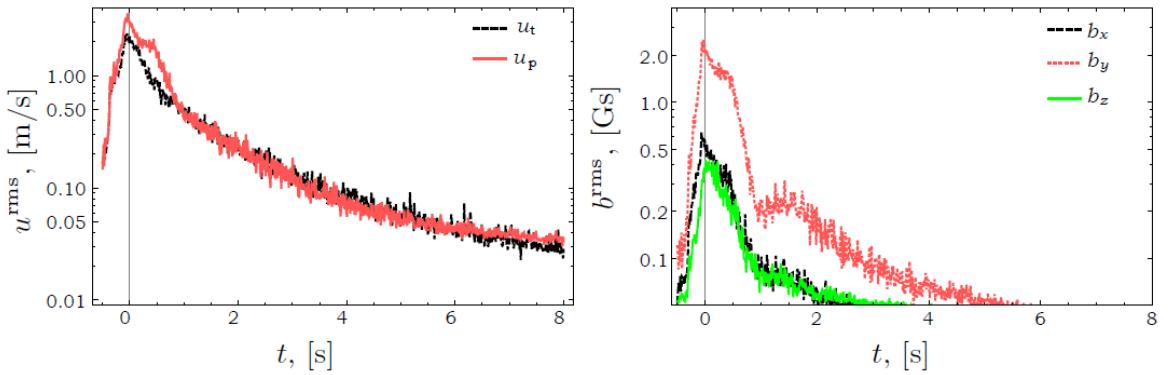


Рис. 3.6. Среднеквадратичные пульсации компонент скорости (справа) и компонент индуцированного магнитного поля (слева).

3.3.2. Распределение магнитного потока в сечении тороидального канала

Измерения изменения магнитного потока в двух катушках, охватывающих половину сечения канала, показали сохранение полного магнитного потока тороидального магнитного поля (с точностью в пределах нескольких процентов). Замеры электродвижущей силы в катушке, охватывающей полное сечение канала, подтвердили сохранение полного потока с погрешностью менее 0.1%. Однако, измерения локального магнитного поля в трубке показывают его ослабление. Это означает, что магнитное поле частично вытесняется к периферии канала в направлении y , где поле B_z должно увеличиться.

Помимо турбулентного диамагнетизма, адвекция частично вморо-

женного в поток магнитного поля может быть вызвана обтеканием потоком трубы. Численное моделирование показало ослабление магнитного поля в трубке всего на 25% от наблюданного эффекта. Магнитное число Рейнольдса, определённое через радиус трубы и тороидальную скорость составляет всего лишь 0.7, что объясняет слабое влияние адвекции.

Эффективную адвекцию \mathbf{B} можно рассматривать как воздействие соответствующей эффективной скорости $\mathbf{v}_d = -\gamma \mathbf{g}$. Течение в тороидальном канале не может быть чисто тороидальным, но результаты эксперимента, показывают, что основной эффект вызван средним тороидальным потоком. Исходя из того, что максимальный градиент энергии турбулентных пульсаций ориентирован в радиальном направлении, наблюдаемые в ходе экспериментов свойства симметрии по отношению к направлению вращения подтверждают объяснение эффекта в рамках теории среднего поля. Количественные оценки требуют дополнительных допущений.

Согласно [108] турбулентный коэффициент переноса может быть выражен как $\gamma \approx 0.1 Rm_t^2 \eta$, где η – магнитная диффузия, а $Rm_t = \frac{u_c \lambda_c}{\eta}$ – турбулентное магнитное число Рейнольдса ($u_c = \sqrt{u^2}$ - характерная амплитуда турбулентных пульсаций скорости, λ_c - длина корреляции). При использовании одного датчика скорости, расположенного у стенки канала, точное определение Rm_t затруднено: примерное его значение оценивается, как $Rm_t \approx 0.25 \div 2.5$, откуда следует оценка коэффициента переноса $\gamma = (5 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-2}) \text{ м}^2/\text{с}$. Абсолютное значение вектора \mathbf{g} лежит в интервале $10 \div 100 \text{ м}^{-1}$, в зависимости от профиля турбулентной энергии. Верхняя оценка соответствует значениям, характеризующим свойства течения в пограничном слое. Таким образом, максимальные значения магнитного числа Рейнольдса $Rm_d = v_d r_0 / \eta = \gamma g r_0 / \eta \approx 1$, что сходится с измеренным эффектом.

3.4. Выводы по главе

- Подготовлено и выполнено экспериментальное исследование эффекта вытеснения магнитного поля, коллинеарного основному потоку металла, из турбулентного ядра течения.

2. Экспериметы подтвердили наличие эффекта турбулентного магнитизма. Измерения показали, что в момент максимальной интенсивности течения среднее магнитное поле в центре канала ослабляется на 30%.

4. Ту́рбулентный конвективный теплообмен в длинном цилиндре с жидким натрием

Основная сложность исследования конвекции жидких металлов заключается в необходимости подведения и отведения больших тепловых мощностей к объёму металла для получения значимых перепадов температуры в силу его высокой теплопроводности. Кроме того, существенной проблемой является высокая химическая активность некоторых легкоплавких металлов и высокие температуры, необходимые для поддержания их в жидком состоянии. Явление турбулентной конвекции жидких металлов имеет место, в частности, в трубопроводах жидкometаллических контуров охлаждения ядерных энергетических установок. При этом эффект может создавать нежелательный теплоперенос в случае отсутствия принудительной циркуляции [116]. Это может привести к перегреву вышестоящих узлов и, как следствие, к аварии при нештатном отключении насосов контура. Наиболее актуальной эта проблема стала при конструировании системы охлаждения реакторов на быстрых нейтронах. Для оценки тепловых и динамических режимов необходимы данные о конвективных потоках жидких металлов в длинных цилиндрах, расположенных под различным углом к вертикали. Проведение детальных экспериментов в условиях работающей ядерной энергетической установки невозможно, поэтому разработчиками реактора создаётся математическая модель течений в контурах охлаждения. Экспериментальные данные по конвекции жидких металлов в полостях с отношением высоты к диаметру $\Gamma \gg 1$ отсутствуют. Известно небольшое число работ по изучению конвекции жидких металлов в вертикальных цилиндрах с $\Gamma \leq 1$. Например, конвекция ртути исследовалась в полости с $\Gamma = 1$ [59], а конвекция натрия в нескольких полостях с $0.03 \leq \Gamma \leq 0.22$ [64]. Поскольку экспериментальных исследований конвекции натрия в длинных цилиндрах до настоящего времени не проводилось, а верификация столь критичных для безопасности кодов необходима, в

ИМСС УрО РАН был проведён цикл экспериментальных работ. Ключевым вопросом является определение зависимости безразмерного теплового потока через жидкий металл (числа Нуссельта $Nu = \lambda_e/\lambda = qL/(\lambda\Delta T)$, где λ_e – эффективная теплопроводность с учётом вклада свободной конвекции, λ – теплопроводность неподвижной среды, q – средний удельный тепловой поток) от параметров, определяющих характер конвективного течения (числа Рэлея $Ra = g\beta\Delta TD^3/(\nu\chi)$, где β – коэффициент теплового расширения, ν – кинематическая вязкость, χ – температуропроводность среды, и числа Прандтля $Pr = \nu/\chi$).

4.1. Экспериментальная модель

Экспериментальная установка (рис. 4.1) представляет собой цилиндрический канал 5 диаметром $D = 168$ мм из нержавеющей стали с толщиной стенки $s = 6$ мм. Нижний и верхний концы трубы имеют приваренные фланцы с уплотнительной поверхностью типа шип-паз для соединения с медными торцевыми теплообменниками. Герметичность соединения обеспечивается графитовыми прокладками. Расстояние между теплообменниками составляет $L = 850$ мм. Нижний горячий теплообменник 6 состоит из четырёх медных пластин толщиной по 15 мм, в проточках которых расположено 3 электронагревателя суммарной мощностью $P_{max} = 6$ кВт. Ближайшая к натрию пластина служит для выравнивания температуры вдоль плоскости теплообменника. Верхний холодный теплообменник 3 является масляным: в медной пластине по проточке сложной геометрии прокачивается минеральное масло. Разогретое масло поступает в воздушный радиатор, который принудительно обдувается вентиляторами. Для защиты от температурного расширения натрия к каналу подсоединена расширительная ёмкость (на рисунке не показана), заполненная аргоном. Для уменьшения тепловых потерь боковая поверхность канала была теплоизолирована минеральной ватой толщиной 30 мм, после чего они не превышали 13% мощности нагревателя. Для фиксации экспериментальной установки под различными углами к вертикали была изготовлена специальная рама с подшипниками.

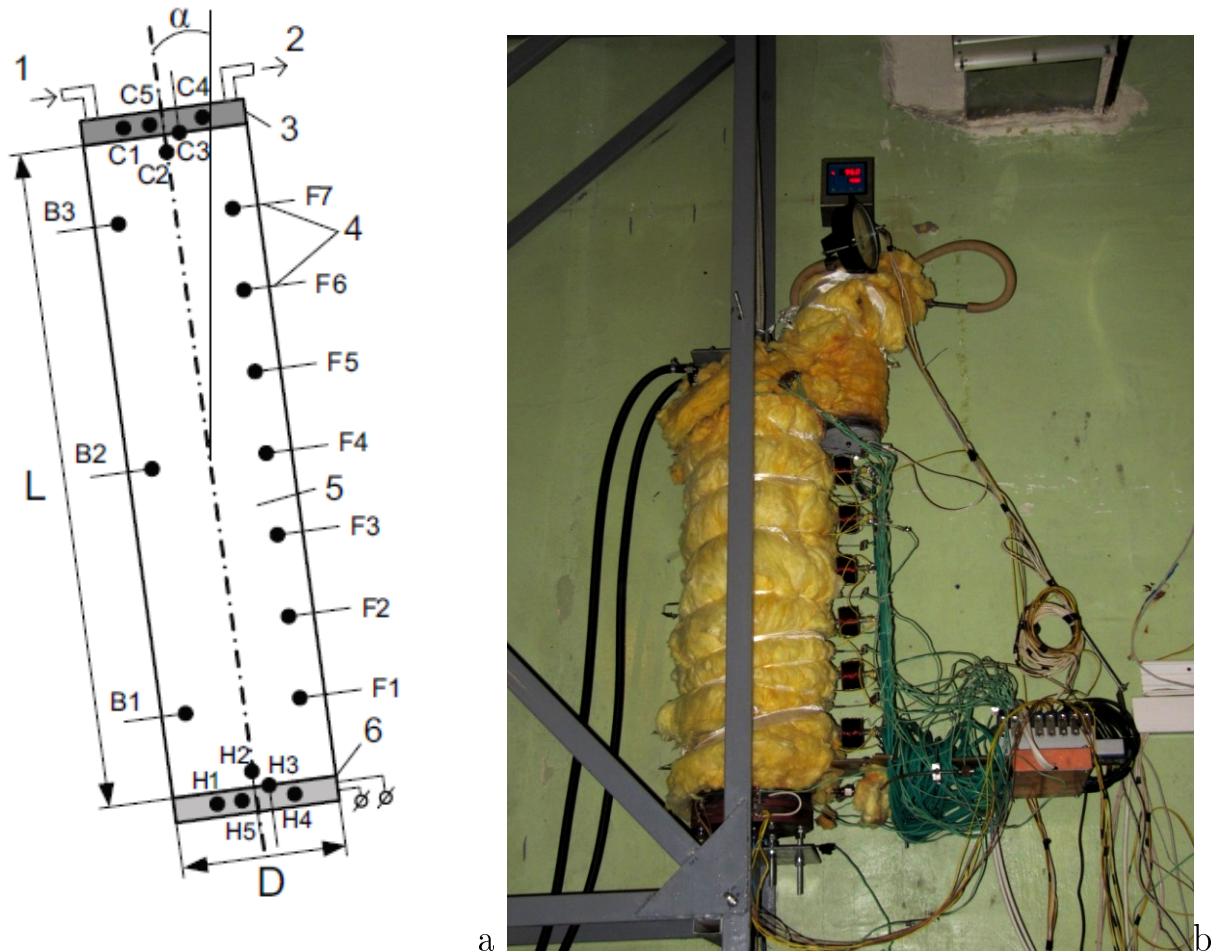


Рис. 4.1. Схема (а) и фото (б) экспериментальной установки.

Электрические нагреватели горячего теплообменника поключены к питающей сети через силовые блоки, позволяющие сигналом низкого напряжения высокой частоты менять электрическую мощность путём изменения скважности сигнала. Для поддержания фиксированной температуры или мощности нагрева управление силовыми блоками производится приборами Термодат модели 12к5. Для контроля мгновенного значения температуры в проточку пластины теплообменника помещена термопара, соединённая с прибором. Диапазон температур уставки горячего теплообменника: $T_H = 175 \div 275^{\circ}\text{C}$. Ещё один прибор Термодат модели 11м5 поддерживает температуру расширительного бачка и трубы, соединяющей его с цилиндрическим каналом, выше температуры плавления натрия.

Эффективность теплосъёма регулируется путём изменения расхода масла и интенсивности обдува радиатора, что определяет температуру хо-

лодного теплообменника. Процесс установления стационарного перепада температур занимает 2 часа. При этом некорректно определять перепад температуры в натрии по показаниям термопар медных теплообменников по причине существования неизвестной контактной разности температур на границе с натрием. На расстоянии 4 и 7 мм от горячего и холодного теплообменника были зафиксированы термоспай термопар, проходящих сквозь теплообменники и служащих для определения перепада температур натрия вдоль канала ΔT . Диапазон числа Релея, определяемого по диаметру цилиндра, $Ra = g\beta\Delta TD^3/(\nu\chi)$, составил: $(2 \div 10) \cdot 10^6$.

4.2. Локальные измерения температуры

Для измерения температур используются хромель-алюмелевые термопары с изолированным спаем диаметром 1мм. На участке 1.5 м от спая термопарные провода заключены в тонкую трубку, и лишь затем переходят в гибкий кабель. Расположение термопар 4 в установке показано на рис. 4.1. В медной пластине горячего теплообменника установлены 3 термопары H1, H2 и H5. Термоспай термопары H2 зафиксирован в натрии на расстоянии 4 мм от теплообменника. В медной пластине холодного теплообменника установлены термопары C4 и C5. Термоспай C2 находится в натрии на расстоянии 7 мм от пластины. Установка нескольких термопар в плоскостях теплообменников продиктована необходимостью определения равномерного распределения температуры по из поверхности.

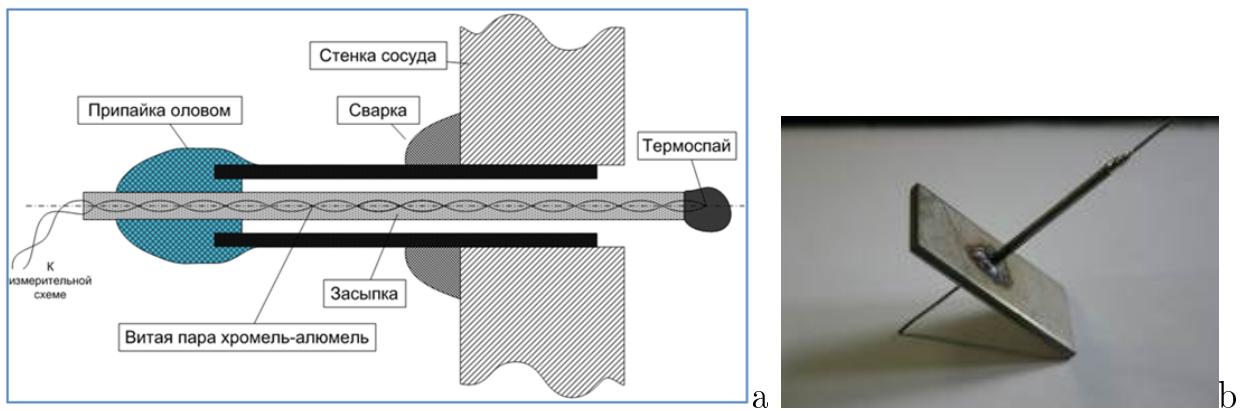


Рис. 4.2. Схема (а) и фото (б) метода герметичной установки термопар через стенку канала.

Для установки термопар через стенку канала (рис. 4.2) на неё были приварены длинные трубы внутренним диаметром 1 мм, через которые термопары проходили снаружи установки в натрий. Герметизация соединения обеспечивалась путём запаивания конца трубы оловянно-свинцовым припоем. В силу того, что концы трубы находятся на воздухе на достаточноном удалении от области высоких температур, а расширительный бачок минимизирует избыточное давление, припой обеспечивает надёжный герметичный вывод термопар из натрия. На стенке канала размещено десять термопар. Семь термопар F1-F7 установлено вдоль образующей цилиндра с равным шагом 119 мм. Глубина погружения термоспая в натрий составляет 17 мм. Диаметрально противоположно термопарам F1, F4 и F7 установлены термопары B1, B2, B3.

Кондукционные датчики скорости

Для исследования конвективного течения были изготовлены высокотемпературные двухкомпонентные кондукционные датчики скорости, закреплённые на модели через стенку канала. Для обеспечения постоянства магнитного поля при высокой температуре ($T \sim 300^{\circ}C$) был сделан выбор в пользу переноса магнитного поля в область измерения извне с помощью магнитомягкого сердечника. Для возбуждения магнитного поля были использованы катушки, вынесенные в область низких температур. Электроды датчика были изготовлены из отрезков медной проволоки диаметром 1 мм и закреплены вдоль сердечника. Концы проволоки приводились в непосредственный контакт с жидким натрием на расстоянии 5 мм от стенки канала. Для фиксации электродов в сердечнике были сделаны продольные пропилы, а для электроизоляции между электродами и сердечником была проложена стеклолента, пропитанная эпоксидной смолой. Герметичная установка кондукционных датчиков производилась по аналогии с принципом установки термопар: сердечник с электродами плотно помещался в длинную трубку, приваренную к стенке канала, а фиксация и герметизация осуществлялась при помощи высокотемпературного эпоксидного клея. Для повышения эффективной разрядности аналого-цифрового преобразования сигналов датчиков был изготовлен многоканальный промежуточный

усилитель с $K_y = 30$ дБ. Основным элементом является инструментальный усилитель INA128 (производитель: Texas Instruments, полоса пропускания при $K_y = 30$ дБ : 20 кГц, коэффициент ослабления синфазного сигнала $CMMR = 120$ дБ). Тарировка датчиков проводилась на вращающейся кювете, заполненной жидким галлиевым сплавом. Полученная характеристическая чувствительность датчиков составила ~ 80 мВ· с/м.

Однако в ходе экспериментов обнаружилось, что мелкомасштабные пульсации температуры между электродами приводят к возникновению термоЭДС, величина которой превышает полезный сигнал скорости. Поэтому для получения достоверной информации пришлось ограничиться термопарными измерениями.

Термокорреляционные датчики скорости

Мелкомасштабные пульсации температуры, переносимые средним течением V , вызывают пульсации сигналов термопар, смешённые на время, обратно пропорциональное средней скорости течения $\tau = L/V$. Для определения этого времени проводится кросс-корреляционный анализ сигналов термопар $T_i(t)$, $T_j(t)$ с целью нахождение положения τ максимума нормированной корреляционной функции (рис. 4.3)

$$C_{T_i, T_j}(\tau) = \frac{\sum_t T_i(t) \cdot T_j(t + \tau)}{\sqrt{\sum_t T_i^2 \cdot \sum_t T_j^2}}. \quad (4.1)$$

Усреднение результатов кросс-корреляционного анализа сигналов на парах соседних термопар для всего ряда F1-F7 позволило определять скорость течения вдоль линейки термопар. При установке экспериментальной модели под углом ожидалось формирование крупномасштабного подъёмного конвективного течения вдоль стенки с термопарами F1-F7 и опускного течения вдоль стенки с термопарами B3-B1.

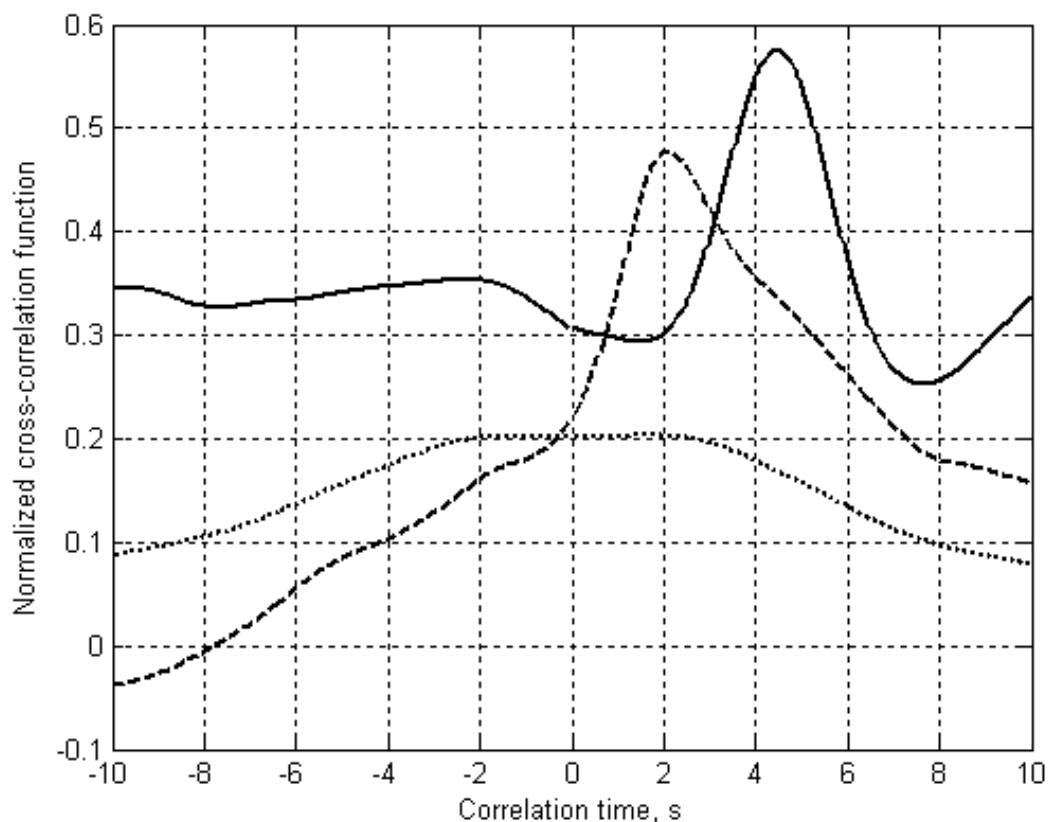


Рис. 4.3. Пример нормированных кросс-корреляционных функций, полученных для различных режимов конвекции.

4.3. Результаты экспериментов

В ходе экспериментов были получены температурные профили и средние скорости крупномасштабного течения для трёх углов ориентации конвективной модели: 0° – вертикальное положение, 90° – горизонтальное положение, 45° – наклонное положение. Основные параметры экспериментов приведены в таблице 4.1.

Параметр	Угол наклона трубы к вертикалі		
	90°	45°	0°
Температура уставки, $^\circ\text{C}$	225	275	175
Характерная разность температур, $^\circ\text{C}$	16.5	12.8	20.1
Максимальные измеренные среднеквадратичные пульсации температуры в натрии, $^\circ\text{C}$	0.5	1.8	2.1
Максимальная оцененная скорость натрия, мм/с	39	60	-
Число Рэлея $\text{Ra} \times 10^{-6}$	5.2	4.9	5.0
Число Прандтля $\text{Pr} \times 10^3$	8.4	7.5	9.4
Число Нуссельта Nu	40	68	25

Таблица 4.1. Параметры экспериментальных режимов.

В случае вертикального расположения модели наблюдается наибольшая интенсивность пульсаций температуры, но проведение кросс-корреляционного анализа показало отсутствие какой-либо корреляции сигналов термопар. Из этого следует отсутствие стационарного крупномасштабного течения. Слабый теплоперенос позволил получить максимальный перепад температур. При наклоне модели возбуждается интенсивное крупномасштабное турбулентное течение, существенно усиливающее теплообмен. В случае горизонтального расположения модели вначале возбуждаются завихренности течения в окрестностях теплообменников, которые в дальнейшем объединяются и также формируют крупномасштабную циркуляцию умеренной скорости.

На рис. 4.4 цифрами внутри схематично-изображённых экспериментальных каналов показаны распределения температуры (за вычетом средней температуры по всей модели $\bar{\Theta}$). Цифрами снаружи каналов и стрелками показаны распределения средней скорости течения натрия, полученные

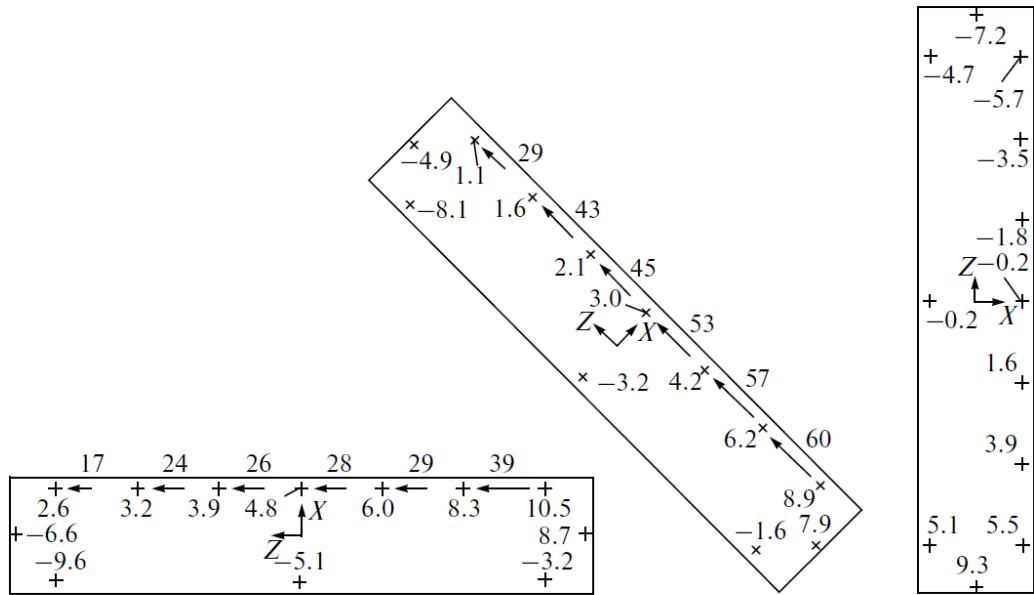


Рис. 4.4. Распределения средних скоростей V , см/с крупномасштабного течения (показаны вне модели) и относительных температур ($T_i - \bar{\Theta}$), $^{\circ}$ C.

по сигналам каждой пары соседних термопар F1-F7. Эволюции температуры и соотношения безразмерных параметров при различных режимах нагрева и положениях экспериментальной установки были использованы для верификации CFD кодов, используемых при разработке и проектировании систем охлаждения реакторов с жидкокометаллическими теплоносителями [117].

4.4. Выводы по главе

1. Подготовлены и проведены эксперименты по изучению конвективного тепломассопереноса в длинном цилиндре, заполненном жидким натрием.
2. Показано, что в случае вертикального расположения цилиндра в объеме металла генерируются максимальные по интенсивности турбулентные пульсации ($2.1^\circ C$), а осредненная крупномасштабная циркуляция отсутствует. Эффективность конвективного теплопереноса при этом минимальна и составляет $Nu = 25$.
3. Показано, что при горизонтальном расположении конвективный теплообмен возрастает за счет генерации крупномасштабной циркуляции ($V = 39$ мм/с): $Nu = 40$. При этом интенсивность пульсаций минимальна ($0.5^\circ C$).
4. Наиболее эффективный теплоперенос вдоль оси цилиндра реализуется в канале, наклоненном под углом 45° к вертикалам: $Nu = 68$. При этом интенсивная крупномасштабная циркуляция ($V = 60$ мм/с) существует с развитой мелкомасштабной турбулентностью ($1.8^\circ C$).
5. Полученные экспериментальные данные использованы для верификации CFD кодов, используемых при разработке и проектировании систем охлаждения реакторов с жидкокометаллическими теплоносителями.

5. Измерения средних скоростей и расходов жидких металлов

Разработка методов измерения средних скоростей жидких металлов, пригодных к применению в промышленных условиях, является актуальной задачей. Измерительная система должна быть устойчивой к воздействию различных факторов, таких как высокие температуры, агрессивность среды, наличие интенсивных электромагнитных помех. Эти факторы часто приводят к необходимости бесконтактных измерений. В то же время, система должна обеспечивать приемлемую точность как при использовании на металлургическом производстве, так и, например, в контурах охлаждения ядерных реакторов.

Важным элементом созданного в ИМСС УрО РАН натриевого контура является система измерения расхода натрия (раздел 5.1). При её разработке пришлось учесть воздействия всех перечисленных выше факторов. Поскольку результаты экспериментов на контуре предназначены для верификации численного счета, используемого для проектирования систем охлаждения ядерных реакторов, к их точности предъявлены особые требования.

5.1. Расходометрия

Натриевый контур ИМСС предназначен для экспериментальных исследований процессов перемешивания разнотемпературных потоков натриевого теплоносителя. Результаты экспериментов необходимы для обеспечения проектных расчетов и верификации CFD кодов для реакторных установок.

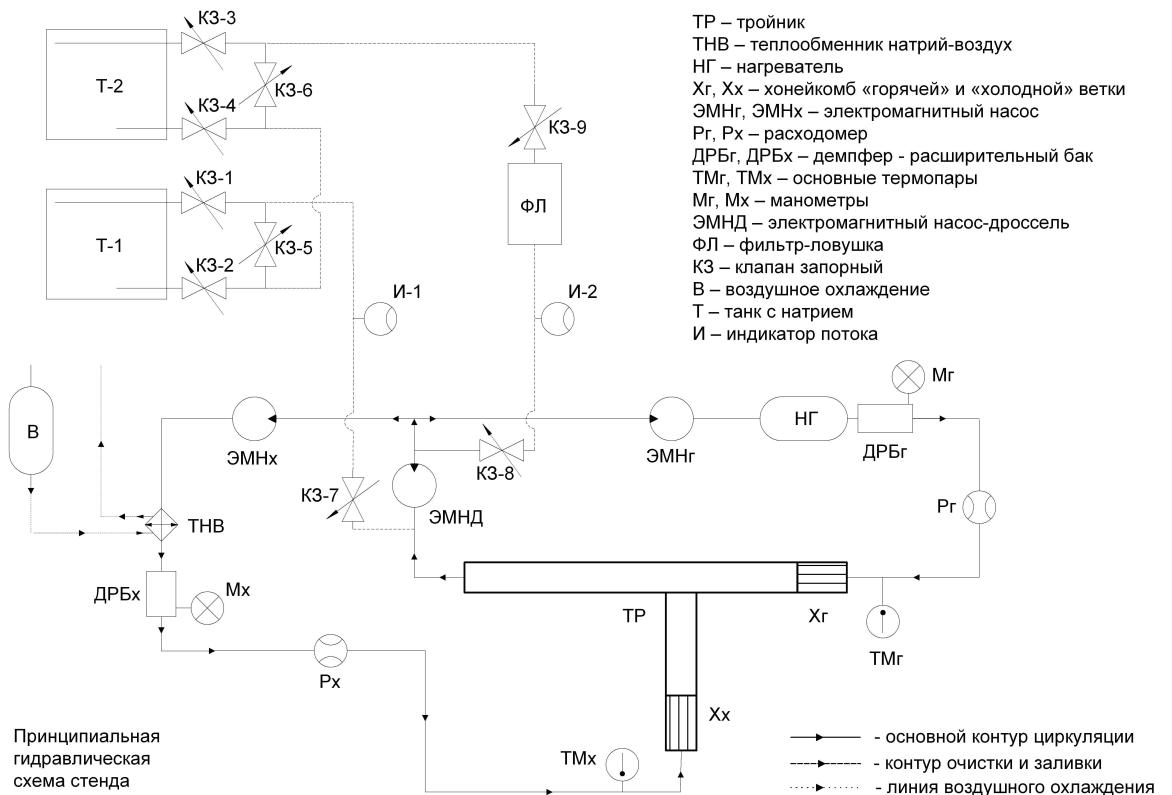


Рис. 5.1. Принципиальная гидравлическая схема натриевого контура ИМСС.

Основная часть контура (рис. 5.1) состоит из двух веток: горячей и холодной, каждая из которых включает МГД-насос (ЭМНг, ЭМНх), расходомерные системы (Pr, Px) и теплообменник (НГ и ТНВ). Ветки основного контура имеют внутренний диаметр DN 68, общий объём натрия в контуре $V_{total} \approx 110$ л. Насосы бегущего поля работают независимо и позволяют создавать сонаправленные течения различной интенсивности ($Q_{max}^{H,C} > 1$ л/с). Теплообменник горячей ветки представляет собой цилиндрический объём, заполненный натрием, в который погружены патронные электрические на-

греватели суммарной мощностью $P_{max}^H > 25$ кВт. Прокачиваемый насосом жидкий натрий может быть разогрет до $T_{max}^H = 250^\circ C$. Теплообменник холодной ветки содержит систему оребрённых трубок, по которым циркулирует натрий, охлаждаемый за счёт обдувания потоком воздуха регулируемой интенсивности. Пройдя через теплообменники, два потока натрия различной температуры ($\Delta T_{max} = 100^\circ C$) и различной интенсивности сливаются в измерительном тройнике (ТР), где и проводятся основные измерения распределения и пульсаций температуры. Установка предназначена для использования с тройниками различной конструкции, позволяющими получать различные конфигурации смешения потоков. На выходе из основного тройника объединившийся поток разделяется во вторичном тройнике и продолжает циркулировать по веткам контура.

Для обеспечения высокой надёжности и точности измерения расхода был сделан выбор в пользу комбинированной системы измерения расхода (см. рис. 5.2), работающей по трем независимым методам: кондукционные датчики скорости (2 – постоянные магниты, 3 – электроды), индукционные расходомеры (4 – возбуждающая и две измерительные катушки) и термо-корреляционные датчики скорости (5 – термопары). Датчики, работающие по обозначенным выше методам установлены на отрезке трубы 1 (также с DN 68) длиной 500 мм. Подключение расходомерных систем в контур осуществляется с помощью фланцевого соединения.

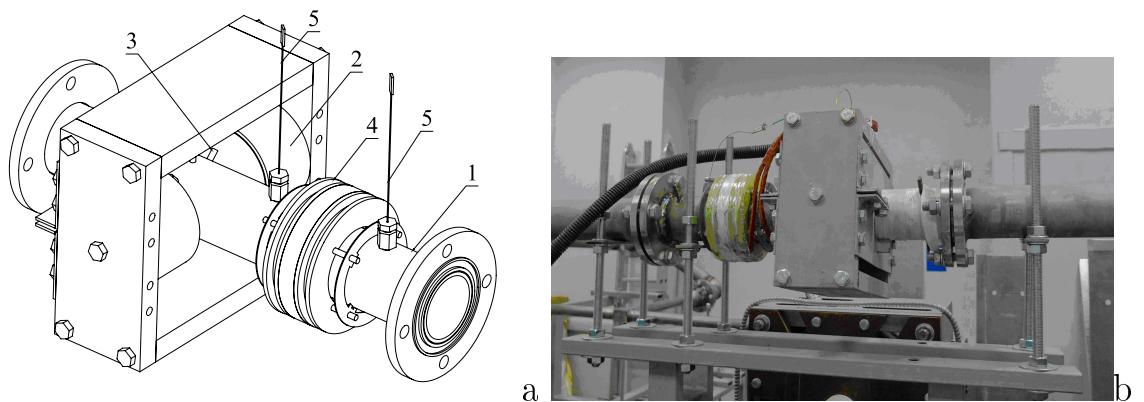


Рис. 5.2. (а) Схематическое изображение и (б) фотография системы измерения расхода в сборе.

5.1.1. Тарировочный эксперимент

Каждый метод обладает сильными и слабыми сторонами, необходима калибровка системы измерения в условиях, приближенных к условиям эксплуатации. Для одновременной тарировки всех датчиков обоих расходомеров была собрана установка, представленная на рисунке 5.3. Оба расходомера были соединены последовательно, свободные концы были подключены к двум ёмкостям для хранения натрия (натриевым танкам). Поток натрия через расходомеры создавался переливанием натрия из одной емкости хранения натрия в другую. В пустом танке создавался вакуум, в полном – избыточное давление аргона, около $0.3 \div 0.8$ атм. Регулирование интенсивности потока проводилось штатным вентилем одного из танков. При тарировке поток натрия проходил последовательно через все расходомеры и одновременно велась запись сигналов. Каждый из танков имеет систему контактных уровнемеров, по показаниям которых можно сравнивать интегральные характеристики расходомеров.

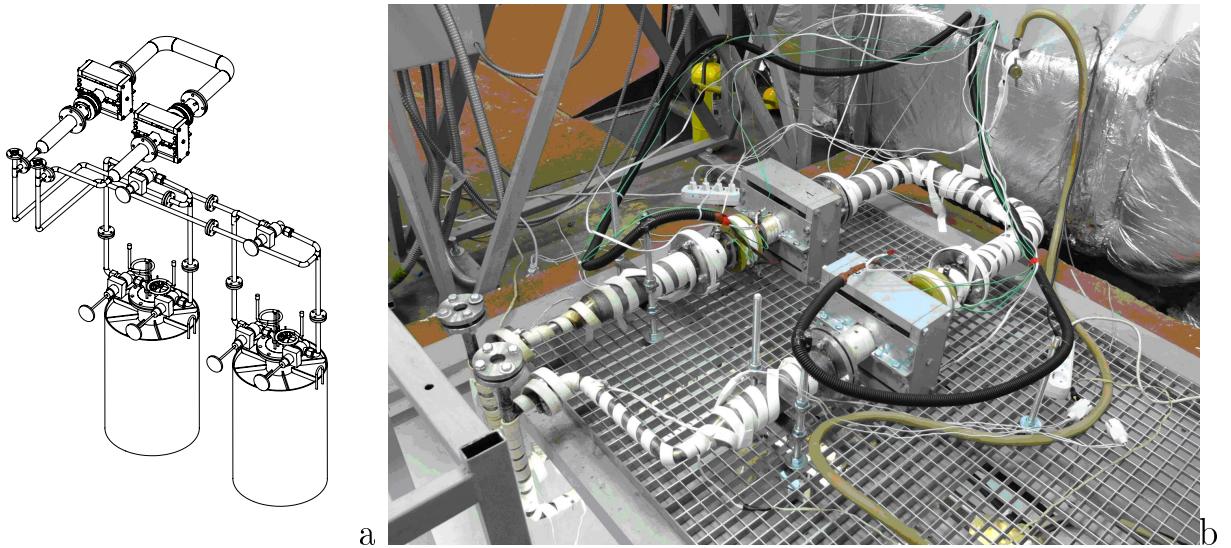


Рис. 5.3. (а) Схематическое изображение и (б) фотография установки для тарировки расходомеров.

Погрешность установки контактных датчиков уровня в каждом танке составляет не более 1 мм. При внутреннем диаметре танка в 530 мм изменение уровня в 1 мм соответствует изменению объема в 220 мл. Контрольными отсечками, по которым ведется сравнение интегральных характеристик

уровнемеров являются соседние положения датчиков уровня в танке. Это значение составляет 180 мм. Таким образом, относительная точность определения уровня в танке составляет 0.55%. Погрешность измерения отсечек по времени ничтожно мала по сравнению с остальной погрешностью, поскольку измеряется в автоматическом режиме с помощью высокочастотной платой сбора данных (при частоте дискретизации 2 кГц и расходе 1 л/с, относительная погрешность составляет порядка 0.001%).

Результаты тарировки, проводившейся для системы измерения в сбое, описаны по-отдельности для каждой методики в соответствующих подразделах.

5.1.2. Кондукционные расходомеры

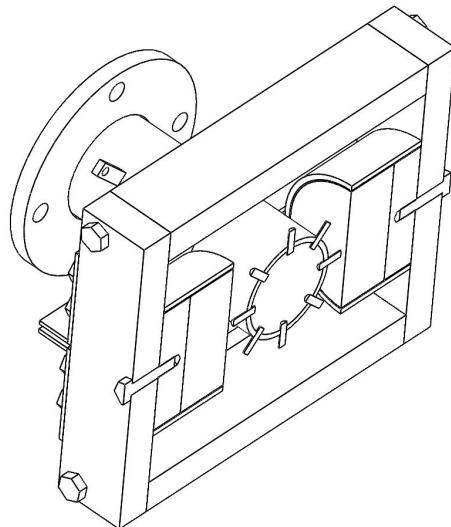


Рис. 5.4. Схематическое изображение кондукционных датчиков скорости.

Датчик состоит из магнитной системы, содержащей два NdFeB магнита цилиндрической формы (диаметр 100 мм, высота 40 мм). Магниты расположены с двух сторон канала таким образом, что их поле направлено перпендикулярно потоку жидкого натрия (см. рис. 5.4). В канал в отверстиях установлены 4 пары контактов из нержавеющей стали: одна пара расположена перпендикулярно направлению магнитного поля, вторая пара контактов соосна с магнитным полем и две последние пары под углом 45°. Четыре пары контактов используются для ослабления влияния асиммет-

рии гидродинамического профиля скорости на характеристики преобразователя ([118]). Результирующий сигнал представляет собой сумму ЭДС на парах контактах, помноженных на соответствующий угол:

$$U_0 = \sum_{i=1}^4 U_i \sin \phi_i$$

Электроды герметично приварены к каналу на такую глубину, что расстояние между их торцами составляет 60 мм. Сигнал с каждой пары электродов поступает в систему сбора данных, расположенную вблизи расходомеров. Напряжения измеряются с помощью 24-битных АЦП NI9239.

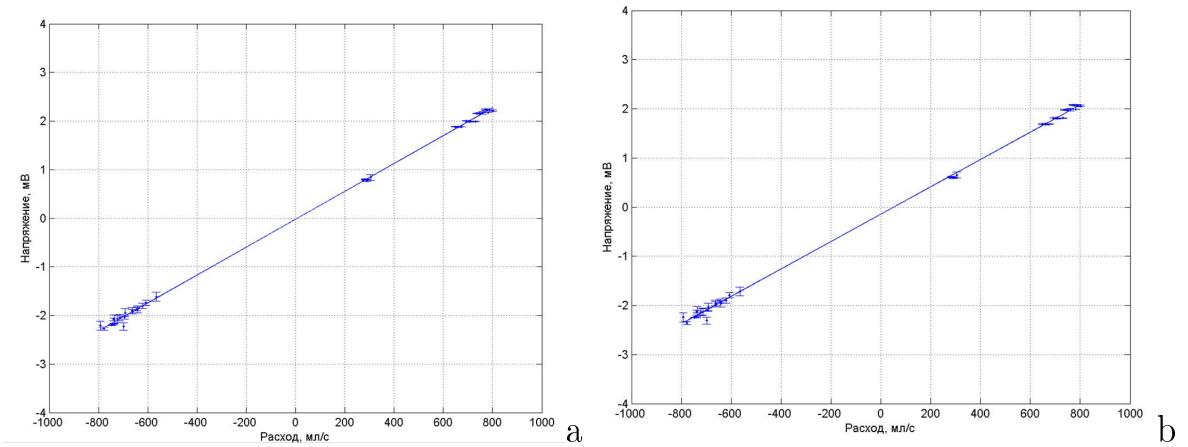


Рис. 5.5. Результат тарировки кондукционных датчиков горячей (а) и холодной (б) веток.

В тарировочных экспериментах для каждого перелива натрия из одного резервуара в другой проводились измерения скорости перелива (расхода) $Q_P^{H,C}$ [л/с] и результирующих сигналов $U_0^{H,C}$ [В] расходомеров горячей и холодной веток соответственно. Полученные для каждого расходомера зависимости напряжения $U_0^{H,C}$ от расхода показаны на рис. 5.5. Измерительная система работает в линейном режиме, экспериментальные точки лежат на прямой с достаточной точностью. Получены следующие калибровочные характеристики $Q_P^H = 348 \cdot U_0^H + 0.007 \pm 0.018$, $Q_P^C = 359 \cdot U_0^C + 0.052 \pm 0.021$.

Различие между возникающими напряжениями составляют порядка 3%, что объясняется точностью установки электродов и магнитопроводов, а

также отличиями в величине магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами.

5.1.3. Индукционные расходомеры

Индукционный датчик расхода состоит из трех катушек, охватывающих измерительный канал (см. рис. 5.6(а)). Центральная катушка является возбуждающей магнитное поле, две крайние – регистрирующими магнитное поле. Катушки намотаны высокотемпературным эмалированным обмоточным проводом ПЭТ-155. Возбуждающая катушка имеет 250 витков, измерительные катушки – по 500 витков. Возбуждающая катушка подключена к электрической сети через понижающий трансформатор. Сигналы с измерительной катушки поступают на высокоомные входы 24-битных АЦП NI9239.

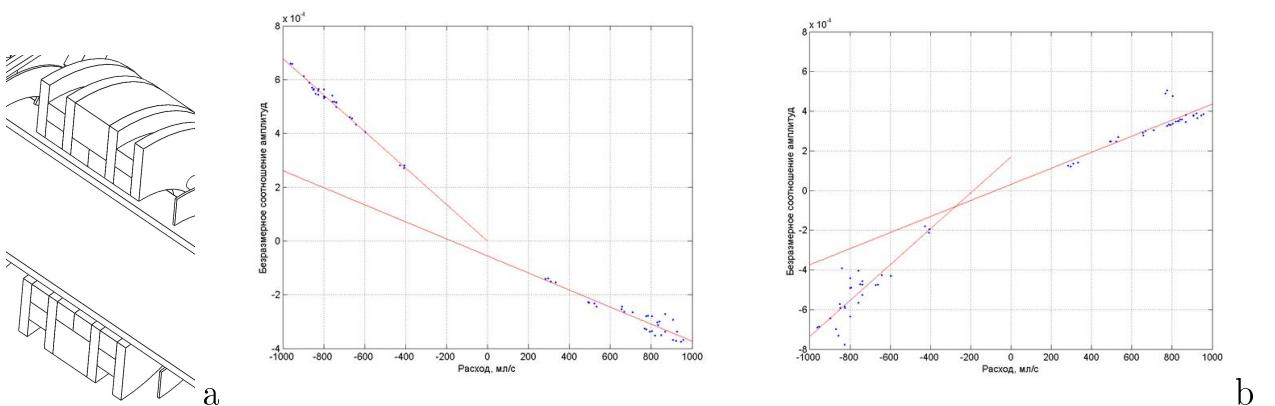


Рис. 5.6. (а) Схематическое изображение индукционных датчиков расхода. (б) Результат тарировки индукционных датчиков горячей (в центре) и холодной (справа) веток.

Принцип измерения основан на увлечении магнитного поля потоком проводящей среды. При этом нарушается симметрия распределения поля. Анализируя разницу в амплитудах ЭДС на измерительных катушках $A_1 - A_2$ можно получить информацию о скорости течения. Для устранения зависимости полезного сигнала от амплитуды исходного поля, можно ввести нормировку: $Q_I^{H,C} = \frac{A_1 - K_I \cdot A_2}{A_1 + K_I \cdot A_2}$. Коэффициент K_I был введён для устранения несимметрии намоток измерительных катушек.

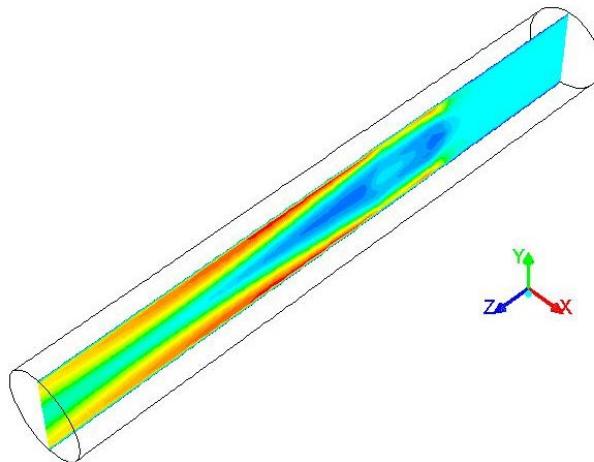


Рис. 5.7. Результат численного моделирования течения натрия в канале в области действия интенсивного магнитного поля кондукционного датчика.

По результатам тарировки была обнаружена сильная несимметричность коэффициента преобразования (см. рис. 5.6(b)). Положительному расходу соответствует течение натрия по направлению от индукционной системы к магнитам кондукционной системы. При отрицательном расходе натрий сперва протекает через область интенсивного постоянного магнитного поля, при этом, профиль течения меняется (см. рис. 5.7). Поскольку, в силу скин-слойного эффекта, чувствительность индукционных датчиков к течению вблизи стенок выше, чем в центре, это приводит к возрастанию сигнала $Q_I^{H,C}$ при отрицательном расходе, по сравнению с $Q > 0$.

5.1.4. Термокорреляционные расходомеры

Метод кроскорреляционной велосиметрии, основанный на статистическом анализе сигналов термопар, подробно рассмотрен в 4. В рассматриваемой задаче данный метод используется для измерения расхода. Две термопары помещены внутрь канала каждого расходомера через шлюзовые отверстия, при этом их термоспай находятся на осевой линии трубы на расстоянии $L = 200$ мм друг от друга (см. рис. 5.8). Сигнал с термопар поступает на 24-битную термопарную плату АЦП NI9213 со встроенной термокомпенсацией холодного спая. Частота опроса: 75 значений в секунду.

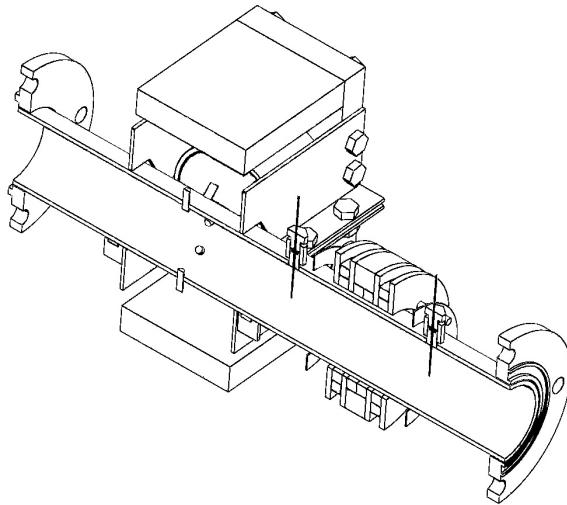


Рис. 5.8. Расположение термопар термокорреляционных датчиков.

В случае с однородным профилем скорости кросскорреляционный метод измерения, при наличии значимых пульсаций температуры является абсолютным методом и тарировки не требует. Однако в данной задаче уровень температурных пульсаций значительно меньше, чем в случае с конвекцией – при отрицательном направлении течения статистический анализ не позволяет восстановить положение максимума кросскорреляционной функции. При положительном же направлении течения его профиль существенно отличается от однородного. Полученные тарировочные характеристики имеют вид: $Q_T^{H,C} = \frac{L}{24 \cdot T_c}$, где T_c [с] – положение максимума корреляционной функции.

5.1.5. Результаты

После проведения тарировки два экземпляра расходомеров были установлены на натриевый контур ИМСС. В ходе реальной эксплуатации контура была подтверждена работоспособность выбранных методов расходометрии. На рис. 5.9 показаны данные, полученные с расходомеров в ходе реальных экспериментов на контуре. Расход горячей ветки всегда превышал расход холодной ветки. Максимально достигнутые расходы горячей ветки: 1750 мл/с, холодной ветки: 950 мл/с.

Полученные в ходе исследования смешения разнотемпературных по-

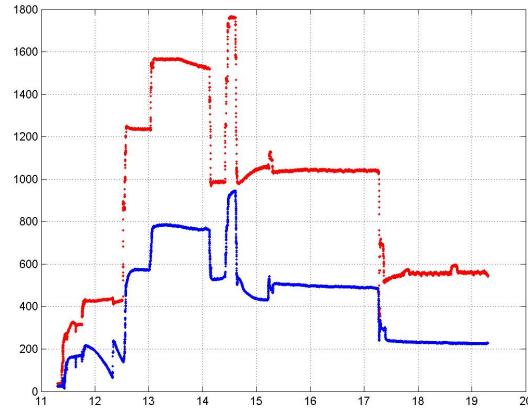


Рис. 5.9. Показания расходомеров в процессе их эксплуатации на натриевом контуре ИМСС: красным – горячая ветка, синим – холодная ветка.

токов жидких металлов экспериментальные данные позволили провести верификацию CFD кодов, используемых при разработке и проектировании систем охлаждения реакторов с жидкотекущими теплоносителями [119].

5.2. Расходометрия на основе измерения силы Лоренца

Прямое измерение силы взаимодействия магнитного поля с движущейся проводящей средой используется в различных расходомерах и датчиках скорости ([78], [120], [88]). В случае однородного течения силу со скоростью связывает соотношение

$$F_L = \int_{\Omega} \vec{J} \times \vec{B} d\Omega = k(Rm, B) \cdot \sigma V B^2. \quad (5.1)$$

В большинстве случаев, когда течения имеют малую и умеренную интенсивность (соответствующие им магнитные числа Рейнольдса $Rm \sim \mu\sigma VD \ll 1$), $k(Rm, B) = const$ и зависимость силы от скорости линейна. При $Rm \gg 1$ или даже $Rm \sim 1$ силовые линии магнитного поля становятся вморооженными в движущуюся проводящую среду, что приводит к сильно-му вытеснению магнитного поля, что равносильно появлению сильных индуцированных (вторичных) магнитных полей b_i . При сильном вытеснении величина $\vec{J} \times \vec{B}$ падает, что приводит к уменьшению измеряемой силы Лоренца. Это явление исследовалось для твердотельных проводников в [90]. Было обнаружено, что зависимость силы Лоренца от скорости течения существенно меняется, когда значение магнитного числа Рейнольдса становится умеренным. Для проверки возможности использования расходометрии силой Лоренца при высоких Rm необходимо использовать интенсивное течение жидкого металла с высокой проводимостью [103]. Для возбуждения такого течения была использована экспериментальная установка, подробно описанная в главе 3. Некоторые модификации экспериментальной установки позволили провести две независимые серии экспериментов.

5.2.1. Измерение индуцированного магнитного поля

Размещение различных датчиков на стенке канала представляет определённые трудности. Центростремительное ускорение для объекта, закреплённого на поверхности тороидальной оболочки на расстоянии $R = 180$ мм от оси вращения оболочки при её вращении с частотой $f = 50$ об/с достигает $|\vec{a}_c| = 4\pi^2 f^2 R \sim 36g$.

Первая серия экспериментов была поставлена с целью изучения индуцированных вихревыми токами магнитных полей вследствие взаимодействия течения с затравочным магнитным полем. Миниатюрный сильный постоянный магнит и датчики магнитного поля были закреплены в специальном держателе на стенке канала в непосредственной близости от жидкого натрия.

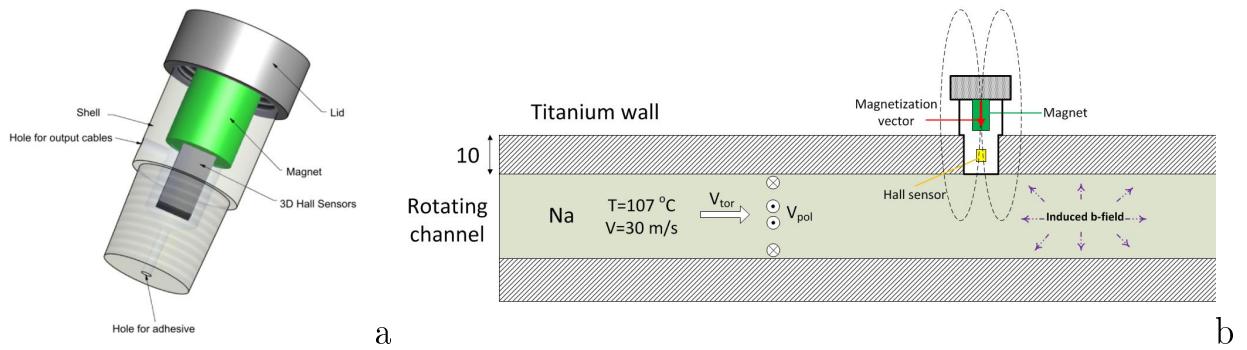


Рис. 5.10. Система измерения индуцированного магнитного поля. (а) 2D-холловский датчик и NdFeB магнит (10×15 мм) размещены в алюминиевом корпусе длиной 34 мм. Система закреплена на вращающейся оболочке экспериментальной установки (б).

Локальный датчик магнитного поля состоит из двух высокотемпературных арсенид-галлиевых холловских датчиков CYTHS124, обладающих чувствительностью 0.5 В/Тл и миниатюрного NdFeB постоянного магнита, имеющего магнитное поле величиной 0.45 Тл на поверхности (рис. 5.10(а)). Холловские датчики ориентированы и закреплены под прямым углом, позволяя одновременно измерять две компоненты магнитного поля. Хотя прилагаемое магнитное поле достаточно велико, измеряемые флюктуации поля должны быть на несколько порядков меньше по величине. Для измерения этих малых изменений на фоне сильного сигнала постоянного магнитного поля был изготовлен специальный усилитель. Он позволяет как изменять коэффициент усиления, так и задавать постоянное смещение. Датчик был закреплён на поверхности канала с помощью резьбового соединения диаметрально противоположно датчику скорости (рис. 5.10(б)). Сигнал с датчика магнитного поля также поступал в неподвижную измерительную систему через скользящие контакты. Таким образом, имеется возможность

всеконтактно измерять b_i^{tor} и b_i^{pol} , создаваемые соответственно V^{tor} и V^{pol} после момента торможения титановой оболочки при различных начальных скоростях вращения.

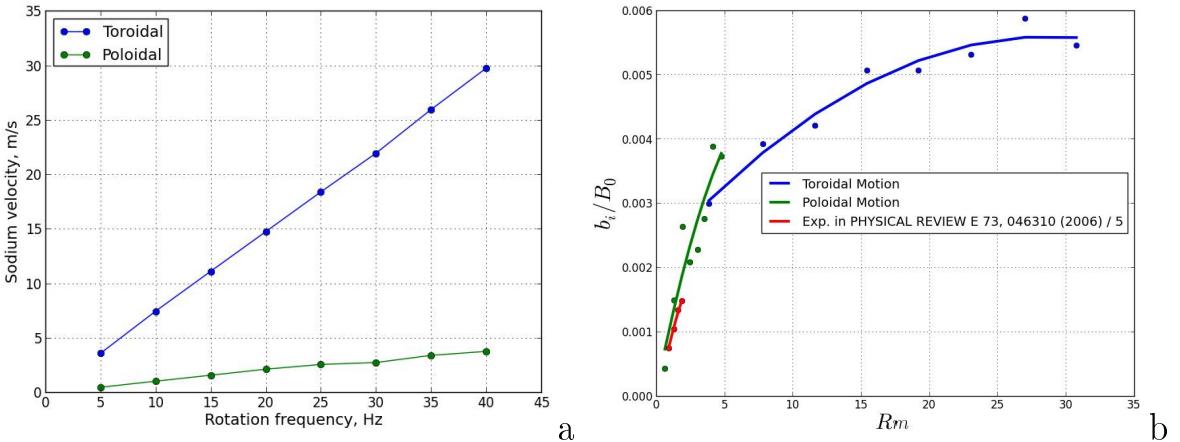


Рис. 5.11. (а) Максимальная величина локальной скорости натрия в момент остановки оболочки в зависимости от начальной частоты вращения модели. (б) Отношение индуцированного магнитного поля к приложенному в зависимости от магнитного числа Рейнольдса. При $Rm > 1$ наблюдается нелинейная зависимость вследствие вытеснения B_0 . Два типа маркеров соответствуют двум измеренным компонентам индуцированного магнитного поля. Красной линией показаны полученные ранее данные при $Rm < 3$.

Величина тороидальной и полоидальной компонент скорости (и, таким образом, величина Rm) зависит от начальной частоты вращения канала. Представим $Rm = \alpha f_{rot}$, где $\alpha \approx 0.78 \text{ Гц}^{-1}$. После достижения требуемой частоты вращения и остановки компоненты скорости V^{tor} и V^{pol} достигают максимума за время, меньшее 0.5 с ([107]), а абсолютные значения максимумов линейно растут с ростом частоты вращения (рис. 5.11(а)). Индуцированные магнитные поля имеют максимальные значения в тот же момент времени, что и компоненты скорости. Максимальные значения b_i^{tor} и b_i^{pol} в зависимости от величины магнитного числа Рейнольдса Rm показаны на рис. 5.11(б). В качестве $B_0 = 0.1$ Тл взято оценочное значение индукции магнитного поля вблизи стенки канала.

Обнаружено, что отношение $b_i/B_0 = f(Rm)$ отклоняется от линейной зависимости при $Rm \sim 4$. Это является следствием нелинейного вытесне-

ния поля, впервые наблюдавшегося в [121]. Вытеснение в тороидальном течении жидкого металла также наблюдалось в [105], но не столь выраженно. Индуцированное магнитное поле перестаёт линейно расти, так как при $Rm > 1$ с вытеснением затравочного поля ослабляются вихревые токи.

5.2.2. Измерение силы Лоренца

Прецизионные датчики силы обладают большей массой, чем датчики магнитного поля, поэтому невозможно по аналогии с описанным выше датчиком разместить измерительную систему на врачающемся канале. Измерительная система была неподвижно закреплена на фиксированном расстоянии от врачающегося канала с помощью жёсткого алюминиевого каркаса. Пьезоэлектрический датчик силы (см. рис. 5.12(a)) PCB 208C01 измерял силу противодействия постоянного NdFeB кубического магнита (длина грани: 30 мм). Также между магнитом и каналом были размещены два Холловских датчика магнитного поля CYTHS124 и датчик температуры Pt100. Все датчики и магнит закреплены внутри держателя, продуваемого воздухом для охлаждения. Для устранения электромагнитных помех от цепей питания были использованы независимые аккумуляторные батареи (24В, 9А·ч). Измерительная система (см. рис. 5.12(b)) была установлена на расстоянии 20 мм от внутренней стенки канала (фактическое расстояние до жидкого натрия). Применение пьезоэлектрического датчика позволило избавиться от нежелательных постоянных подложек и дрейфов за счёт температурных вариаций и разрешить более высокие частоты, по сравнению с тензометрическими датчиками. Чувствительность использованного датчика составляет 0.1 В/Н, сигнал с выхода поступает на преобразователь ICP 682A02.

Контроль температуры имеет особую важность при проведении экспериментов. Во-первых, нельзя допускать перегрева или переохлаждения жидкого натрия. С одной стороны, при пониженной температуре в течении натрия образуются вакуумные пузырьки, которые, попадая в область кондукционного датчика скорости, зашумляют его сигнал. С другой стороны, при расширении вследствие перегрева может произойти утечка натрия из установки. Эта температура поддерживалась на уровне $102 \div 107^{\circ}\text{C}$ штат-

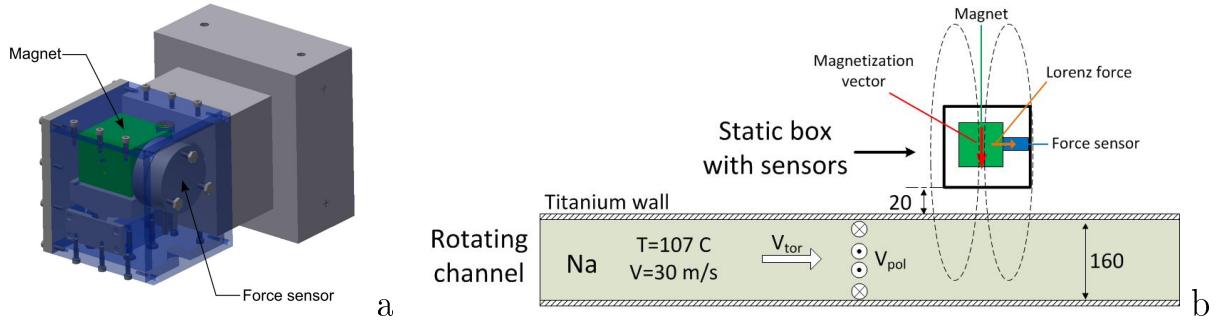


Рис. 5.12. Неподвижная измерительная система (а) состоит из датчика силы, двух ортогональных датчиков магнитного поля, датчика температуры. Магнитное поле создаётся с помощью кубического NdFeB магнита с индукцией 0.45 Тл на поверхности. (б) Схема расположения измерительной системы относительно тороидального канала. Поворачивая измерительную систему на 90° можно измерять две компоненты силы Лоренца F_{pol} и F_{tor} .

ной системой термостабилизации установки, основываясь на показаниях терморезистора, помещённого в канал. Во-вторых, требуется поддерживать постоянной температуру внутри измерительной системы. Хотя датчик силы имеет очень слабую температурную зависимость, она влияет на величину приложенного магнитного поля. Для контроля этой температуры был использован дополнительный терморезистор. Он имеет чувствительность $0.07\text{В}/^\circ\text{C}$ и функционирует в интервале $0 \div 150^\circ\text{C}$. В случае со вращающимся датчиком индуцированного поля длинновременные измерения эволюций магнитных полей были невозможны из-за температурного дрейфа сигнала. В данном случае термостабилизация позволила корректно измерить эволюции как силы Лоренца, так и индуцированных магнитных полей. Выходы датчиков подключены к системе сбора данных National Instruments на основе 16-битных АЦП NI 9215 с частотой дискретизации 100 000 значений в секунду.

Установка датчиков магнитного поля в охлаждаемом корпусе измерительной системы позволила пронаблюдать эволюции индуцированных магнитных полей, что было невозможно в случае с миниатюрным вращающимся датчиком. На рис. 5.13 показаны эволюции двух компонент индуцированного магнитного поля: $b_{pol}(t)$ и $b_z(t)$, где ось z направлена вдоль

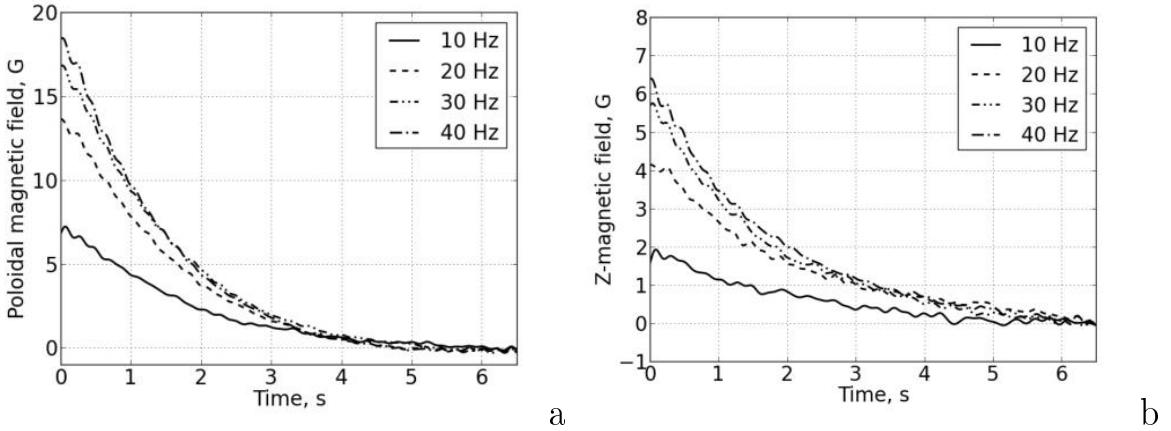


Рис. 5.13. Эволюции x- и z-компонент индуцированного магнитного поля при нескольких начальных частотах вращения модели. Z-компоненты направлены противоположно вектору намагниченности постоянного магнита. Время $t = 0$ соответствует моменту остановки тороидальной оболочки канала.

оси вращения тора и противоположно направлено вектору намагниченности постоянного магнита. При $t = 0$ наступает полная остановка оболочки, при этом течение натрия имеет максимальную интенсивность, индуцированные магнитные поля также имеют максимальное значение. Затем $b_i(t)$ падают с затуханием течения. Как и ожидалось, максимальные значения $b_i(t)$ при $t = 0$ не зависят линейно от частоты вращения тора из-за эффекта вытеснения, рассмотренного в 5.2.1. Вытеснение также влияет на измеряемую силу Лоренца при высоких интенсивностях течения (рис. 5.14(а)). При этом приложенное магнитное поле становится частично вмороженным в проводящую среду и уносится течением. Нормировочный коэффициент k в уравнении 5.1 становится функцией Rm (рис. 5.14(б)), что усложняет калибровку датчика. Экспериментальная установка не позволяет получать течения с интенсивностями $Rm \ll 5$, так как при частотах вращения тора $f_{rot} < f_{min} = 5$ Гц течение становится нестабильным, теряется повторяемость результатов. В работах [120], [87], [89] показано, что при $Rm \rightarrow 0$ коэффициент k стремится к некоторому постоянному значению, не зависящему от скорости, а зависящему только от распределения магнитного поля.

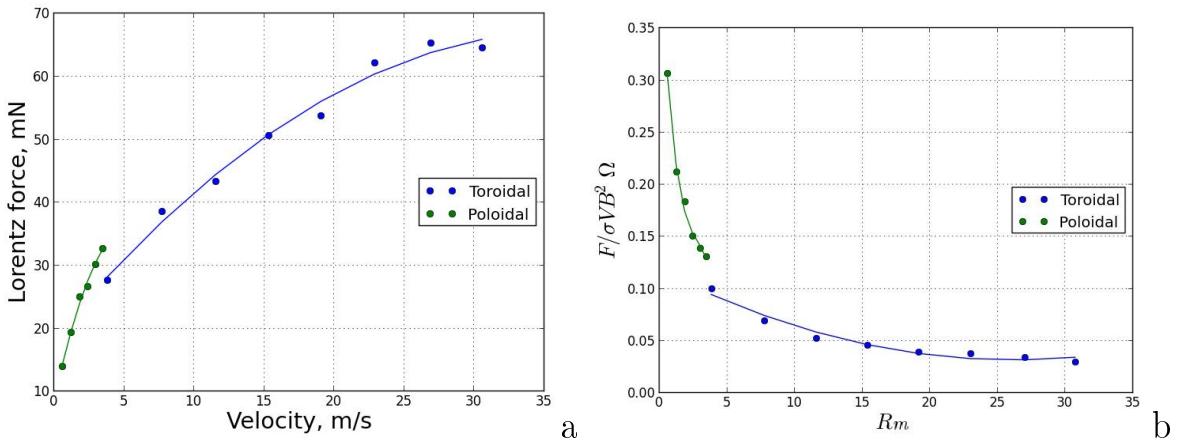


Рис. 5.14. (а) Результаты измерения силы Лоренца при различных скоростях жидкого натрия. При малых скоростях вращения зависимость силы от скорости подчиняется уравнению 5.1, при больших – наблюдается отклонение от линейного закона. (б) В этом случае константа k становится функцией R_m .

5.3. Выводы по главе

1. Разработаны, изготовлены и протарированы комбинированные системы измерения расхода жидкого натрия. Работающие в составе натриевого контура ИМСС системы успешно используются для контроля режимов работы контура в течение трех лет.
2. Изготовлена установка для изучения возможности использования датчиков расхода на основе измерения силы Лоренца в каналах при умеренных значениях магнитного числа Рейнольдса $R_m \gtrsim 1$.
3. Исследовано возмущение магнитного поля течением жидкого металла в рабочей области расходомера на основе измерения силы Лоренца при высоких интенсивностях турбулентного течения.
4. Измерена сила Лоренца, действующая со стороны турбулентного потока жидкого натрия на источник постоянного магнитного поля. Показано, что зависимость силы Лоренца от скорости натрия перестает быть линейной при $R_m \approx 4$. Использование метода расходометрии на основе измерения силы Лоренца при таких режимах возможно, но требует тщательной тарировки, либо программной корректировки

результатов измерений.

6. Заключение

Итоги выполненного исследования

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, расположенным 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, характеризуемых 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 $Rm > 4$.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Полученные в ходе испытаний и тарировочных экспериментов характеристики индукционных и термокорреляционных расходомеров жидкого натрия показали, что они уступают по точности кондукционным датчикам. Дальнейший интерес представляет проработка конструкции и увеличение точности устройств. В случае индукционных датчиков возможно сокращение числа витков с целью уменьшения влияния тепловых деформаций. Чувствительность метода при этом можно поднять применением синхронных усилителей. Для случая термокорреляционных датчиков возможно повышение чувствительности путём искусственного внесения в поток температурных неоднородностей.

Проведённое исследование показало отклонение характеристик расходомера на основе измерения силы Лоренца от линейных при умеренных значениях Rm . Использование метода расходометрии на основе измерения силы Лоренца при таких режимах возможно, но требует тщательной тарировки, либо программной корректировки результатов измерений. Для более подробного исследования поведения магнитного поля, возбуждаемого вихревыми токами, возможно изменение материала корпуса датчика на

титан.

В рамках исследования явления турбулентного диамагнетизма, дальнейший интерес представляет изучение детального распределения вытесненного магнитного поля в турбулентном потоке. Усовершенствование методик измерения позволит провести измерения профиля магнитного поля в центральной плоскости тора.

Исследование конвекции показало, что течения и теплообмен в длинных цилиндрах имеют существенно иные черты, чем в случае классической геометрии Рэлея-Бенара. Кроме того, жидкий металл существенно отличается от обычно используемых в конвективных экспериментах жидкостей с умеренными и большими значениями числа Прандтля. Поэтому безусловный интерес представляет дальнейшее исследование конвекции жидкого натрия, как в классической постановке Рэлея-Бенара, так и для случая более длинных труб и труб иного сечения.

Список литературы

1. Халилов, Р. И., Павлинов, А. М. Генерация электромагнитных сил в цилиндрическом объеме с помощью бегущего и врачающегося магнитных полей // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4-3. С. 1225–1226. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21121378>.
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. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2012/1/MG.48.1.25.R.html>.
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. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2013/1/MG.49.1.23.R.html>.
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. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2015/2/MG.51.2.10.R.html>.
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. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1209/0295-5075/109/14002/meta>.
6. Kolesnichenko, Ilya, 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. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00348-015-1957-z>.

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. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?doi=10.1134/S0040363615060028>.
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. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2016/1/MG.52.1.7.R.html>.
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. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20886408>.
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. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20778163>.
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.
25. Повх, И.Л., Капуста, Д.Б., Чекин, Б.В. Магнитная гидродинамика в металлургии. М.: Металлургия, 1974.
26. Лиелаусис, О. А. Гидродинамика жидкокометаллических МГД-устройств. Рига: Зинатне, 1967.
27. Кирко, И.М. Жидкий металл в электромагнитном поле. М.: Энергия, 1964.
28. Вольдек, Д.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкокометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия, 1970.
29. Гельфгат, Ю.М., Горбунов, Л.А., Витковский, И.В. Магнитогидродинамическое дросселирование и управление жидкокометаллическими потоками. Рига: изд. Зинатне, 1989.

30. Валдмане, Р.А., Я.Я., Валдманис, Улманис, Л.Я., Шишко, А.Я. Влияние МГД-процессов на характеристики многополюсного дросселя с кольцевым каналом // Магнитная гидродинамика. 1982. Т. 18, № 2. С. 109–112.
31. Barglik, J., Dolega, D., Smagor, A. Coupled temperature electromagnetic flow fields in the electromagnetic stirrer with a rotating magnetic field // Magnetohydrodynamics. 2010. Vol. 46, no. 4. P. 387–392. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2010/4/MG.46.4.9.R.html>.
32. Davidson, P.A., Lindsay, R.L. Stability of interfacial waves in aluminium reduction cells // Journal of Fluid Mechanics. 1998. Vol. 362. P. 273–295. URL: <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112098001025>.
33. Lielausis, O. Dynamo theory and liquid metal MHD experiments // Astronomische Nachrichten. 1994. Vol. 315, no. 4. P. 303–317. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/asna.2103150407/abstract>.
34. Моффат, Г. Возбуждение магнитного поля в проводящей среде. М.: Мир, 1980.
35. Кичатинов, Л.Л. Дифференциальное вращение звезд // Успехи физических наук. 2005. Т. 175, № 5. С. 475–494. URL: <http://elibRARY.ru/item.asp?id=9025285>.
36. Зельдович, Я.Б., Рузмайкин, А.А., Соколов, Д.Д. Магнитные поля в астрофизике. М. - Ижевск: Инст. компют. исслед., РХД, 2006.
37. Ossendrijver, M. The solar dynamo // The Astronomy and Astrophysics Review. 2003. Vol. 11. P. 287–367. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00159-003-0019-3>.
38. Kern, J. W., Vestine, E. H. Magnetic field of the earth and planets // Space Science Reviews. 1963. Vol. 2, no. 1. P. 136–171. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF00174030>.

39. Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Smith, A.G. A Geologic Time Scale. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005.
40. Brandenburg, A., Sokoloff, D., Subramanian, K. Current Status of Turbulent Dynamo Theory From Large-Scale to Small-Scale Dynamos // Space Science Reviews. 2012. Vol. 169, no. 1. P. 123–157. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11214-012-9909-x>.
41. Соколов, Д.Д., Степанов, Р.А., Фрик, П.Г. Динамо: на пути от астрофизических моделей к лабораторному эксперименту // Успехи физических наук. 2014. Т. 184, № 3. С. 313–335. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21361968>.
42. Gailitis, A., Lielausis, O., Platacis, E. et al. *Colloquium* : Laboratory experiments on hydromagnetic dynamos // Reviews of Modern Physics. 2002. Vol. 74, no. 4. P. 973–990. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.74.973>.
43. Stefani, F., Gailitis, A., Gerbeth, G. Magnetohydrodynamic experiments on cosmic magnetic fields // Zeitschrift Angewandte Mathematik und Mechanik. 2008. Vol. 88. P. 930–954. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/zamm.200800102/abstract>.
44. Bourgoin, M., Marie, L., Pétrélis, F. et al. Magnetohydrodynamics measurements in the von Karman sodium experiment // Physics of Fluids. 2002. Vol. 14, no. 9. P. 3046–3058. URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pof2/14/9/10.1063/1.1497376>.
45. Franke, S., Eckert, S., Gundrum, T., Gerbeth, G. Channel flow profile measurements at hot liquid metal loops by the Ultrasound Doppler method // 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering. 2014.
46. Gailitis, A., Gerbeth, G., Gundrum, T. et al. History and results of the Riga dynamo experiments // Comptes Rendus Physique. 2008. Vol. 9, no. 7. P. 721–728. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070508000972>.

47. Dementev, S., Glasbrenner, H., Kirchner, T. et al. Liquid metal loop of the LiSoR experimental facility // Magnetohydrodynamics. 2001. Vol. 37, no. 4. P. 417–426. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2001/4/MG.37.4.12.R.html>.
48. Bucenieks, I., Krishbergs, R., Platacis, E. et al. Investigation of corrosion phenomena in eurofer steel in Pb-17Li stationary flow exposed to a magnetic field // Magnetohydrodynamics. 2006. Vol. 42, no. 2/3. P. 237–251. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2006/2/MG.42.2.15.R.html>.
49. Ivanov, S., Platacis, E., Flerov, A. et al. Experience of calculation, design, fabrication and testing of the electromagnetic pump system for the MEGAPIE target // Magnetohydrodynamics. 2006. Vol. 42, no. 2-3. P. 275–280. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2006/2/MG.42.2.18.R.html>.
50. Khalilov, R., Kolesnichenko, R. Annular linear induction pump for liquid sodium // Magnetohydrodynamics. 2015. Vol. 51, no. 1. P. 95–104. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2015/1/MG.51.1.10.R.html>.
51. Moffatt, H. K. Electromagnetic stirring // Physics of Fluids A. 1991. Vol. 3, no. 5. P. 1336–1343. URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pofa/3/5/10.1063/1.858062>.
52. Nikrityuk, P. A., Eckert, K., Grundmann, R. Contactless Mixing of Liquid Metals // Metallurgical and Materials Transactions B. 2010. Vol. 41, no. 1. P. 94–111. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11663-009-9320-5>.
53. Räßiger, D., Eckert, S., Gerbeth, G. Measurements of an unsteady liquid metal flow during spin-up driven by a rotating magnetic field // Experiments in Fluids. 2010. Vol. 48, no. 2. P. 233–244. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00348-009-0735-1>.
54. Denisov, S., Dolgikh, V., Kolesnichenko, I. et al. Flow of liquid metal in a cylindrical crystallizer generating two-directional MHD stirring //

- Magnetohydrodynamics. 2010. Vol. 46, no. 1. P. 69–78. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2010/1/MG.46.1.6.R.html>.
55. Крылов, А.Н., Рогожкин, С.А., Колесниченко, И.В. и др. Рассчетно-экспериментальные исследования процесса перемешивания потоков теплоносителя в Т-образном соединении труб // Сборник тезисов научно-технического семинара “Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике”, Н.Новгород, 2016, 13-14 сентября. 2016. С. 76–77.
 56. Фрост, У, Моулден, Т. Тurbulentность. Принципы и применение. М.: Энергия, 1964.
 57. Rossby, H. T. A study of Benard convection with and without rotation // Journal of Fluid Mechanics. 1969. Vol. 36, no. 2. P. 309–335. URL: <https://www.cambridge.org/core/article/a-study-of-benard-convection-with-and-without-rotation/BE9739E1BD7910371F70A4D460BA056F>.
 58. Cioni, S., Ciliberto, S., Sommeria, J. Temperature Structure Functions in Turbulent Convection at Low Prandtl Number // Europhysics Letters. 1995. Vol. 32, no. 5. P. 413. URL: <http://stacks.iop.org/0295-5075/32/i=5/a=006>.
 59. Cioni, S., Ciliberto, S., Sommeria, J. Strongly turbulent Rayleigh-Benard convection in mercury: Comparison with results at moderate Prandtl number // Journal of Fluid Mechanics. 1997. Vol. 335. P. 111–140. URL: <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112096004491>.
 60. Belyaev, I. A., Genin, L. G., Listratov, Ya. I. и др. Specific features of liquid metal heat transfer in a TOKAMAK reactor // Magnetohydrodynamics. 2013. Т. 49, № 1/2. С. 177–190. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2013/1/MG.49.1.22.R.html>.
 61. Belyaev, I. A., Razuvanov, N. G., Sviridov, V. G., Zagorsky, V. S. Liquid metal downflow in an inclined heated tube affected by a longitudinal

- magnetic field // Magnetohydrodynamics. 2015. Т. 51, № 4. С. 673–684. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2015/4/MG.51.4.3.R.html>.
62. Razuvanov, N. G., Sviridov, V. G., Sviridov, E. V. et al. Experimental study of liquid metal heat transfer in a vertical heated channel affected by a coplanar magnetic field // Magnetohydrodynamics. 2016. Vol. 52, no. 1/2. P. 171–180. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2016/1/MG.52.1.20.R.html>.
63. Zikanov, Oleg, Listratov, Yaroslav I., Sviridov, Valentin G. Natural convection in horizontal pipe flow with a strong transverse magnetic field // Journal of Fluid Mechanics. 2013. Vol. 720. P. 486–516. URL: <https://www.cambridge.org/core/article/natural-convection-in-horizontal-pipe-flow-with-a-strong-transverse-magnetic-field/3E30C759D73A4B91CBE8D7B781AA0A435>.
64. Horanyi, S., Krebs, L., Muller, U. Turbulent Rayleigh-Benard convection in low Prandtl-number fluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1999. Vol. 42, no. 21. P. 3983–4003. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931099000599>.
65. Платниекс, И. Использование метода нагретой нити в исследованиях характеристик жидкокометаллических потоков // Магнитная гидродинамика. 1994. Т. 30, № 2. С. 237–246. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/1994/2/MG.30.2.16.R.html>.
66. Sajben, M. Hot Wire Anemometer in Liquid Mercury // Review of Scientific Instruments. 1965. Vol. 36, no. 7. P. 945–949. URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/rsi/36/7/10.1063/1.1719791>.
67. Motevalli, V., Marks, C. H., McCaffrey, B. J. Cross-correlation velocimetry for measurement of velocity and temperature profiles in low-speed, turbulent, nonisothermal flows // Journal of Heat Transfer. 1992. Vol. 114, no. 2. P. 331–337. URL: <http://heattransfer.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1441002>.

68. Колесниченко, В.И., Хрипченко, С.Ю. Вихревое движение жидкости в плоском слое со свободной поверхностью // Магнитная гидродинамика. 1993. Т. 29, № 2. С. 76–80.
69. Hillenbrand, M. P., Stieglitz, R., Neitzel, G. P. Detection of liquid–metal, free-surface flow using the DLP measurement technique // Experiments in Fluids. 2012. Vol. 52, no. 1. P. 179–192. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00348-011-1214-z>.
70. Nornberg, M. D., Peterson H. Ji, J. L., Rhoads, J. R. A liquid metal flume for free surface magnetohydrodynamic experiments // Review of Scientific Instruments. 2008. Vol. 79, no. 9. P. 094501. URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/rsi/79/9/10.1063/1.2976109>.
71. Albrecht, H.-E., Damaschke, N., Borys, M., Tropea, C. Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.
72. Takeda, Y. Velocity profile measurement by ultrasound Doppler shift method // International Journal of Heat and Fluid Flow. 1986. Vol. 7, no. 4. P. 313–318. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0142727X86900111>.
73. Takeda, Y. Measurement of velocity profile of mercury flow by ultrasound Doppler shift method // Nuclear Technology. 1987. Vol. 79. P. 120–124.
74. Zhang, C., Eckert, S., Gerbeth, G. Gas and Liquid velocity measurements in bubble chain driven two-phase flow by means of UDV and LDA // Flow Measurement and Instrumentation. 2004. Vol. 15. P. 145–153.
75. Messer, M. Pulsed Ultrasonic Doppler Velocimetry for Measurement of Velocity Profiles in Small Channels and Cappilaries: Ph. D. thesis. 2005.
76. Andreev, O., Kolesnikov, Y., Thess, A. Application of the ultrasonic velocity profile method to the mapping of liquid metal flows under the influence of a non-uniform magnetic field // Experiments in Fluids. 2009. Vol. 46, no. 1. P. 77–83. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00348-008-0540-2>.

77. 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. 1/2. P. 231–236. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2013/1/MG.49.1.29.R.html>.
78. Shercliff, J. A. The Theory Of Electromagnetic Flow-Measurement. Cambridge University Press, Cambridge, 1962.
79. Ricou, R., Vives, C. Local velocity and mass transfer measurements in molten metals using an incorporated magnet probe // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1982. Vol. 25, no. 10. P. 1579–1588. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0017931082900369>.
80. Cramer, A., Varshney, K., Gundrum, Th., 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. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095559860500083X>.
81. Tsinober, A., Kit, E., Teitel, M. On the relevance of the potential-difference method for turbulence measurements // Journal of Fluid Mechanics. 1987. Vol. 175. P. 447–461. URL: <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112087000478>.
82. Miralles, S., Verhille, G., Plihon, N., Pinton, JF. The magnetic-distortion probe: velocimetry in conducting fluids // Review of Scientific Instruments. 2011. Vol. 82, no. 9. P. 095112. URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/rsi/82/9/10.1063/1.3630949>.
83. Priede, J., Buchenau, D., Gerbeth, G. Contactless electromagnetic phase-shift flowmeter for liquid metals // Measurement Science and Technology. 2011. Vol. 22, no. 5. P. 055402. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/22/5/055402/meta>.

84. Poornapushpkala, S., Gomathy, C., Sylvia, J.I., Babu, B. Design, development and performance testing of fast response electronics for eddy current flowmeter in monitoring sodium flow // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2014. Vol. 38. P. 98– 107. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095559861400048X>.
85. Wondrak, T., Galindo, V., Gerbeth, G. et al. Contactless inductive flow tomography for a model of continuous steel casting // *Measurement Science and Technology*. 2010. Vol. 21, no. 4. P. 045402. URL: <http://stacks.iop.org/0957-0233/21/i=4/a=045402>.
86. Stefani, F., Gundrum, T., Gerbeth, G. Contactless inductive flow tomography // *Physical Review E*. 2004. Vol. 70. P. 056306. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.70.056306>.
87. Thess, A., Votyakov, E., Knaepen, B., Zikanov, O. Theory of the Lorentz force flowmeter // *New Journal of Physics*. 2007. Vol. 9, no. 8. P. 299. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/9/8/299>.
88. Wang, X., Kolesnikov, Y., Thess, A. Numerical calibration of a Lorentz force flowmeter // *Measurement Science and Technology*. 2012. Vol. 23, no. 4. P. 045005. URL: <10.1088/0957-0233/23/4/045005>.
89. Kolesnikov, Y., Karcher, C., Thess, A. Lorentz Force Flowmeter for Liquid Aluminum: Laboratory Experiments and Plant Tests // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2011. Vol. 42, no. 3. P. 441–450. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11663-011-9477-6>.
90. Sokolov, I., Kolesnikov, Y., Thess, A. Experimental investigation of the transient phase of the Lorentz force response to the time-dependent velocity at finite magnetic Reynolds number // *Measurement Science and Technology*. 2014. Vol. 25, no. 12. P. 125304. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11663-011-9477-6>.
91. Гайлитис, А., Фрейберг, Я. К теории винтового МГД-динамо // *Магнитная гидродинамика*. 1976. Т. 12, № 2. С. 3–6.

92. Пономаренко, Ю.Б. К теории гидромагнитного динамо // Прикладная механика и техническая физика. 1973. № 6. С. 47–51.
93. Sobolev, V. Database of thermophysical properties of liquid metal coolants for GEN-IV. 2010. Vol. 7.
94. Gailitis, A., Lielausis, O., Platacis, E. et al. Magnetic Field Saturation in the Riga Dynamo Experiment // Physical Review Letters. 2001. Vol. 86, no. 14. P. 3024–3027. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.86.3024>.
95. Stieglitz, R, Muller, U. Experimental demonstration of a homogeneous two-scale dynamo // Physics of fluids. 2001. Vol. 13, no. 3. P. 561. URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pof2/13/3/10.1063/1.1331315>.
96. Muller, U., Stieglitz, R., Horanyi, S. Experiments at a two-scale dynamo test facility // Journal of Fluid Mechanics. 2006. Vol. 552. P. 419–440. URL: <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112006008779>.
97. Денисов, С.А., Носков, В.И., Соколов, Д.Д. и др. О возможности лабораторной реализации нестационарного МГД – динамо // Доклады Академии Наук. Механика. 1999. Т. 365, № 4. С. 478–489.
98. Spence, E. J., Nornberg, M. D., Jacobson, C. M. et al. Observation of a Turbulence-Induced Large Scale Magnetic Field // Physical Review Letters. 2006. Vol. 96, no. 5. P. 055002. URL: <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.96.055002>.
99. Nornberg, M. D., Spence, E. J., Kendrick, R. D. et al. Intermittent Magnetic Field Excitation by a Turbulent Flow of Liquid Sodium // Physical Review Letters. 2006. Vol. 97. P. 044503. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.97.044503>.
100. Marie, L., Petrelis, F., Bourgoin, M. et al. Open questions about homogeneous fluid dynamos: the VKS experiment // Magnetohydrodynamics. 2002. Vol. 38, no. 1/2. P. 163–176. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2002/1/MG.38.1.13.R.html>.

101. Volk, R., Ravelet, F., Monchaux, R. et al. Transport of Magnetic Field by a Turbulent Flow of Liquid Sodium // Physical Review Letters. 2006. Vol. 97. P. 074501. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.97.074501>.
102. Monchaux, R., Berhanu, M., Bourgoin, M. et al. Generation of a Magnetic Field by Dynamo Action in a Turbulent Flow of Liquid Sodium // Physical Review Letters. 2007. Vol. 98. P. 044502. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.98.044502>.
103. Frick, P., Noskov, V., Denisov, S. et al. Non-stationary screw flow in a toroidal channel: way to a laboratory dynamo experiment // Magnetohydrodynamics. 2002. Vol. 38, no. 1/2. P. 143–162. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2002/1/MG.38.1.12.R.html>.
104. Noskov, V., Denisov, S., Frick, P. et al. Magnetic field rotation in the screw gallium flow // The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems. 2004. Vol. 41, no. 4. P. 561–568. URL: <http://link.springer.com/article/10.1140/epjb/e2004-00349-8>.
105. Stepanov, R., Volk, R., Denisov, S. et al. Induction, helicity, and alpha effect in a toroidal screw flow of liquid gallium // Physical Review E. 2006. Vol. 73, no. 4. P. 046310. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.73.046310>.
106. Frick, P., Noskov, V., Denisov, S., Stepanov, R. Turbulent spin-down flow of liquid sodium in a thick torus // Magnetohydrodynamics. 2012. Vol. 48, no. 1. P. 31–42. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2012/1/MG.48.1.5.R.html>.
107. Noskov, V., Denisov, S., Stepanov, R., Frick, P. Turbulent viscosity and turbulent magnetic diffusivity in a decaying spin-down flow of liquid sodium // Physical Review E. 2012. Vol. 85. P. 016303. URL: <http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.85.016303>.
108. Radler, Karl-Heinz, Stepanov, Rodion. Mean electromotive force due to turbulence of a conducting fluid in the presence of mean flow // Physical

- Review E. 2006. Vol. 73, no. 5. P. 056311. URL: <http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.73.056311>.
109. Зельдович, Я.Б. Магнитное поле при двумерном движении проводящей турбулентной жидкости // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 1956. Т. 31, № 1. С. 154–156.
110. Spence, E.J., Nornberg, M.D., Jacobson, C.M. et al. Turbulent Diamagnetism in Flowing Liquid Sodium // Physical Review Letters. 2007. Vol. 98, no. 16. P. 164503. URL: <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.98.164503>.
111. Forest, C.B., O'Connell, R., Kendrick, R. et al. Hydrodynamic and numerical modeling of a spherical homogeneous dynamo experiment // Magnetohydrodynamics. 2002. Vol. 38, no. 1/2. P. 107–120. URL: <http://mhd.sal.lv/contents/2002/1/MG.38.1.9.R.html>.
112. Bayliss, R. A., Forest, C. B., Nornberg, M. D. et al. Numerical simulations of current generation and dynamo excitation in a mechanically forced turbulent flow // Physical Review E. 2007. Vol. 75, no. 2. P. 026303. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.75.026303>.
113. Nikrityuk, P. A., Ungarish, M., Eckert, K., Grundmann, R. Spin-up of a liquid metal flow driven by a rotating magnetic field in a finite cylinder: A numerical and an analytical study // Physics of Fluids. 2005. Vol. 17, no. 6. P. 067101. URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pof2/17/6/10.1063/1.1897323>.
114. Frick, P., Noskov, V., Denisov, S., Stepanov, R. Direct Measurement of Effective Magnetic Diffusivity in Turbulent Flow of Liquid Sodium // Physical Review Letters. 2010. Vol. 105, no. 18. P. 184502. URL: <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.105.184502>.
115. Chupin, A., Stepanov, R. Full perturbation solution for the flow in a rotating torus // Physical Review E. 2008. Vol. 77, no. 5.

- P. 057301. URL: <http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.77.057301>.
116. Ashurko, Y., Pugachev, G. Phenomenon of coolant local natural circulation occurring in heat removal loops of nuclear power plant // Journal of Nuclear Science and Technology. 2011. Vol. 48, no. 4. P. 602–611. URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/18811248.2011.9711740>.
117. Рогожкин, С.А., Фадеев, И.Д., Шепелев, С.Ф. и др. Состояние с верификацией CFD кодов применительно к реакторам БН // Сборник тезисов научно-технического семинара “Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике”, Н.Новгород, 2016, 13-14 сентября. 2016. С. 21–22.
118. Корнилов, В., Овсянников, В., Снежко, Л. Измерение расхода электропроводной жидкости при несимметричном профиле скорости электромагнитным преобразователем расхода // Магнитная гидродинамика. 1989. Vol. 25, no. 3. P. 95–100.
119. Крылов, А.Н., Рогожкин, С.А., Колесниченко, И.В. и др. Рассчетно-экспериментальные исследования процесса перемешивания потоков теплоносителя в Т-образном соединении труб // Сборник тезисов научно-технического семинара “Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике”, Н.Новгород, 2016, 13-14 сентября. 2016. С. 76–77.
120. Thess, A., Votyakov, E. V., Kolesnikov, Y. Lorentz Force Velocimetry // Physical Review Letters. 2006. Vol. 96, no. 16. P. 164501. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.96.164501>.
121. Gailitis, A., Lielausis, O., Platacis, E. et al. The Riga Dynamo Experiment // Surveys in Geophysics. 2003. Vol. 24, no. 3. P. 247–267. URL: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1024851818821>.