

БАЛАБАЕВ НИКИТА ЕВГЕНЬЕВИЧ

**Влияние электрической проводимости стенки на образование  
магнитно-конвективных пульсаций при опускном течении в  
вертикальных трубах**

Специальность 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель:

**Беляев Иван Александрович**  
Кандидат технических наук, ФГБУН  
Объединенный Институт Высоких  
Температур Российской академии  
наук  
Старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:  
Ведущая организация

Защита состоится в - на заседании диссертационного совета – при  
ФГБУН Объединенный Институт Высоких Температур Российской академии  
наук по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2.

С диссертацией можно ознакомиться на в библиотеке и на сайте ОИВТ РАН  
<https://jiht.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,  
просьба направлять по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, уче-  
ному секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан 2026 года  
Ученый секретарь диссертационного совета

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Развитие термоядерной энергетики и создание установок нового поколения неразрывно связано с решением сложных теплофизических и гидродинамических задач. К числу таких установок относится международный проект ITER, находящийся на стадии сборки во Франции [1], проект демонстрационной электростанции DEMO, который находится на стадии проектирования [2], а также российский проект ТИН (термоядерный источник нейтронов) на базе токамака Т-15МД, разрабатываемый в НИЦ «Курчатовский институт», находящийся в активной стадии экспериментальных исследований и технических разработок [3].

В современных проектах бланкетов термоядерных реакторов в качестве теплоносителей и тритийвоспроизводящих материалов рассматриваются жидкие металлы и эвтектики (PbLi, Na, Li), обладающие высокой теплопроводностью, низкой температурой плавления и способностью работать при высоких тепловых нагрузках [4, 5]. Однако циркуляция электропроводящей жидкости в сильных магнитных полях (до 12 Тл) приводит к проявлению таких магнитогидродинамических (МГД) эффектов как: резкий рост гидравлического сопротивления, подавление изотропной турбулентности, формирование тонких пограничных слоёв Гартмана и Робертса, а также развитие крупномасштабных магнитоконвективных пульсаций (МКП) [6, 7].

МКП представляют собой низкочастотные колебания температуры и скорости, возникающие при совместном действии вынужденного течения, термогравитационной конвекции и поперечного магнитного поля. Их амплитуда может достигать десятков градусов, что вызывает циклические термические напряжения в стенках каналов, ускоряет коррозию и приводит к локальным перегревам, критичным для надёжности конструкций реакторов [8, 9]. Традиционные расчётные модели МГД-течений оперируют предельными граничными условиями: идеально проводящая или полностью изолированная стенка. В реальных экспериментах и промышленных контурах контакт жидкого металла с конструкционными материалами (нержавеющая сталь, ферритные сплавы) характеризуется высоким переходным электрическим сопротивлением, обусловленным ограниченной смачиваемостью, образованием оксидных плёнок, адсорбцией примесей и химическим взаимодействием на границе «жидкий металл/конструкционный материал», приводящим к формированию поверхностных слоёв (оксидов, нитридов, интерметаллических фаз), обладающих высоким электрическим сопротивлением [10]. В результате эффективная электрическая проводимость стенки  $C_w$  может отличаться от расчётной на порядки, что кардинально меняет схему замыкания индуцированных токов, профиль скорости и условия возникновения конвективных неустойчивостей. Экспериментальное исследование влияния реальной проводимости стенки на гидродинамику, теплообмен и формирование МКП

при опускном течении жидкого металла в вертикальном канале остаётся нерешённой задачей, имеющей фундаментальное и прикладное значение для теплофизики и ядерной энергетики.

Экспериментальные исследования МГД-теплообмена в течение многих лет проводились коллективом ОИВТ РАН – НИУ МЭИ. В частности, в работах [11 – 13] показано, что при высоких числах Грасгофа и Гартмана течение теряет устойчивость, возникают низкочастотные температурные колебания аномально высокой амплитуды, а локальные коэффициенты теплоотдачи становятся крайне неоднородными. Однако в большинстве экспериментов эффективная проводимость стенки не контролировалась напрямую и принималась постоянной или пренебрежимо малой, что затрудняло количественное сопоставление с теорией. Механизм деградации контакта «ртуть–нержавеющая сталь» и способы его целенаправленного регулирования ранее не изучались. Таким образом, несмотря на значительный прогресс в численном моделировании и экспериментальной гидродинамике, комплексное экспериментальное выявление роли электрической проводимости стенки в формировании МКП и изменении гидравлического сопротивления в широком диапазоне режимных параметров остаётся актуальной научной проблемой.

**Целью** диссертационной работы является экспериментальное исследование закономерностей гидродинамики и теплообмена при опускном течении жидкого металла (ртути) в вертикальных каналах круглого сечения в условиях воздействия сильного поперечного магнитного поля (до 1,7 Тл) и высоких тепловых нагрузок.

Для достижения этой цели решаются следующие **задачи**:

1. Разработка методики контроля и восстановления эффективной электрической проводимости на границе «ртуть – нержавеющая сталь» путём нанесения гальванического медного покрытия на внутреннюю поверхность стальной трубы.
2. Установление количественной связи между относительной электропроводностью стенки и гидравлическим сопротивлением, а также пространственно-временной структурой течения.
3. Проведение комплексных измерений температурных пульсаций в характерных точках поперечного сечения трубы (в ядре потока, вблизи стенок Гартмана и Робертса) в диапазоне режимных параметров:  $Re = (0,6-7) \cdot 10^4$ ,  $Ha = 0 - 1800$ ,  $Gr = (2 - 47) \cdot 10^8$ ,  $Ri = 0,04-24$ .

### **Научная новизна**

1. Впервые экспериментально установлен и количественно оценен механизм деградации электрического контакта на границе «ртуть–нержавеющая сталь», обусловленный плохой смачиваемостью и образованием ди-

электрических отложений. Предложен и успешно реализован метод восстановления контактной проводимости путём нанесения медного покрытия на внутреннюю поверхность канала.

2. Впервые в эксперименте показано, что относительная электропроводность стенки  $C_w$  является управляющим параметром, который определяет не только гидравлическое сопротивление, но и возможность возникновения МКП. Показано, что увеличение  $C_w$  в  $\sim 100$  раз (с  $\sim 0,0005$  до  $\sim 0,05 - 0,055$ ) приводит к изменению структуры температурных пульсаций.
3. Впервые построены карты режимов существования МКП в координатах  $Ri-N$  и  $Ri-Rh^{-1}$  для каналов с различной относительной электропроводностью стенки. Установлено, что повышение проводимости стенки существенно сужает область развития МКП: нижняя граница по числу Ричардсона смещается с  $Ri \approx 0,25$  до  $Ri \approx 1,4$ , а правая граница подавления пульсаций описывается зависимостью  $Ri = 0,2N$  вместо  $Ri = 0,02N$  для изолированной стенки.

**Теоретическая и практическая значимость.** Полученные результаты имеют непосредственное отношение к проектированию жидкометаллических бланкетов термоядерных реакторов. Установленные закономерности позволяют более точно прогнозировать гидравлические потери и распределение температур в магнитогидродинамических (МГД) каналах с учётом реального состояния контактной проводимости стенки, что особенно важно в условиях длительной эксплуатации, когда качество электрического контакта может деградировать. На основе построенных карт режимов течения в координатах чисел Ричардсона и Стюарта становится возможным выявлять и избегать опасные режимы, сопровождающиеся развитием МКП, которые способны вызывать циклические термомеханические нагрузки и угрожать усталостной прочностью конструкционных материалов. Также сформирован массив экспериментальных данных в широком диапазоне чисел подобия, который может служить базой для верификации численных моделей МГД-течений (DNS, LES).

**Методология и методы исследования.** Методология исследования опирается на комплексный подход к изучению магнитогидродинамических (МГД) течений жидких металлов в условиях сильного поперечного магнитного поля и термогравитационной конвекции. Ключевым методическим решением работы является разработка технологии целенаправленного управления эффективной электрической проводимостью на границе раздела «жидкий металл – стенка». Для восстановления и контроля контактной проводимости применялся метод нанесения гальванического медного покрытия на внутреннюю поверхность стального канала, что позволило контролировать деградацию электрического контакта. Физическое моделирование процессов выполнялось на замкнутом ртутном стенде

РК-3 с использованием электромагнитной системы, обеспечивающей индукцию поперечного магнитного поля до 1,7 Тл.

В рамках работы был реализован комплекс высокоточных диагностических методик, направленных на исследование пространственно-временной структуры потока. Для измерения полей температуры и интенсивности пульсаций применялся прецизионный координатный механизм с погружным микротермопарным зондом (размер спая 250 мкм), обеспечивающий высокое пространственное разрешение. Важной методической особенностью являлось использование внешнего термостата (УРНТ-01) для компенсации холодного спая, что позволило полностью исключить систематическую погрешность встроенных систем АЦП. Измерение гидравлического сопротивления выполнялось с применением системы дистанционного отбора давления, вынесенной за пределы зоны действия магнитного поля для исключения магниторезистивных эффектов и электромагнитных помех. Контроль расхода теплоносителя осуществлялся электромагнитным расходомером с верификацией показаний по тепловому балансу установки. Сбор и первичная обработка данных проводились с помощью автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) и системы диспетчеризации на базе LabVIEW.

Обработка экспериментальных данных базируется на методах спектрального и статистического анализа, а также теории подобия. Для выявления и классификации МКП применялся расчет спектральной плотности мощности (PSD) температурных флуктуаций, что позволило отделить низкочастотные мономатематические конвективные выбросы от фоновой трехмерной турбулентности. Разработан и применен адаптивный алгоритм накопления сигнала, обеспечивающий статистическую достоверность результатов за счет автоматического контроля сходимости среднеквадратичных отклонений в скользящем временном окне. Для верификации гипотезы о природе контактного сопротивления использовался метод локального элементного анализа (энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, EDS), позволивший идентифицировать фазовый состав продуктов взаимодействия ртути со стенкой и подтвердить формирование диэлектрических оксидных слоев на поверхности нержавеющей стали и проводящей медно-ртутной амальгамы на меди. Оценка неопределенностей всех измеряемых и рассчитываемых безразмерных комплексов ( $Re$ ,  $Ha$ ,  $Gr$ ,  $Ri$ ,  $N$ ,  $Nu$ ,  $C_w$ ) проводилась в соответствии с ГОСТ Р 54500.3-2011 (GUM) [14].

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Количественная взаимосвязь гидравлического сопротивления от относительной электропроводности стенки трубы в поперечном магнитном поле, установленная экспериментально.

2. Описание механизма деградации и метод восстановления электрического контакта на границе раздела «жидкий металл–стенка» для пары ртуть – нержавеющая сталь в температурном диапазоне от 10 до 80 °С, включая количественные характеристики об изменении относительной проводимости стенки.

3. Карты существования магнитно-конвективных пульсаций (МКП) в пространстве чисел Ричардсона и Стюарта ( $Ri - N$ ) на основе экспериментальных данных об интенсивности температурных пульсаций при опускном течении жидкого металла в вертикальной трубе в поперечном магнитном поле (до 1,7 Тл) в широком диапазоне чисел подобия ( $Re = (0,6 - 7) \cdot 10^4$ ,  $Na = 0 - 1800$ ,  $Ri = 0,04 - 24$ ) для стенок с различной относительной электропроводностью ( $C_w = 0,0005 - 0,055$ ).

4. Экспериментальное наблюдение интенсификации теплообмена за счет развития МКП вблизи слоев Робертса, при слабом влиянии МКП на теплообмен в области слоев Гартмана в рассматриваемой конфигурации и исследованном диапазоне чисел подобия

#### **Достоверность полученных результатов подтверждается:**

- использованием апробированной методики зондовых измерений с применением микротермопарных датчиков;
- использованием поверенных либо калиброванных средств измерений;
- полной автоматизацией эксперимента на базе современного оборудования и специализированного программного обеспечения, что минимизирует влияние человеческого фактора и обеспечивает высокую воспроизводимость данных;
- многократным воспроизведением ключевых режимов в серии повторных экспериментов, подтвердившим устойчивость наблюдаемых явлений;
- качественным и количественным согласованием полученных данных с результатами независимых экспериментов, современных численных исследований других авторов и известными эмпирическими зависимостями.

#### **Практическая значимость**

Полученные результаты имеют непосредственное отношение к проектированию жидкометаллических бланкетов термоядерных реакторов. Установленные закономерности позволяют более точно прогнозировать гидравлические потери и распределение температур в МГД каналах с учётом реального состояния контактной проводимости стенки, что особенно важно в условиях длительной эксплуатации, когда качество электрического контакта может деградировать. На основе построенных карт режимов течения в координатах чисел Ричардсона и Стюарта становится возможным выявлять и избегать опасные режимы, сопровождающиеся развитием МКП, которые способны вызывать циклические термомеханические нагрузки и угрожать усталостной прочностью конструкционных материалов.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях:

1. IV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОФИЗИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ», Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва, 21 – 25 октября 2024 года.
2. The Fifth Russian Conference on Magnetohydrodynamics, Пермь, Россия, 24 – 27 июня 2024 года.
3. XXIV Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь, Россия, 24 – 28 февраля 2025 года.
4. Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, Россия, 13 – 15 марта 2025 года.
5. XXV Школа-семинар молодых ученых и специалистов академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», Рыбинск, Россия, 9 – 13 июня 2025 года.
6. «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Москва, Россия, 30 июня – 4 июля 2025 года.

**Личный вклад.** Представленные в диссертации результаты получены лично соискателем. Выводы и положения, выносимые на защиту, сформулированы лично автором при участии научного руководителя

Соискателем самостоятельно разработана и реализована методика управления эффективной электрической проводимостью границы раздела «жидкий металл – стенка». Технология нанесения покрытия была предварительно отработана на опытном образце, после чего перенесена на полноразмерные рабочие участки.

Подготовка экспериментальной установки к измерениям выполнена соискателем лично. В рамках подготовки проведены калибровка термометров сопротивления типа РТ100 и электронного дифференциального датчика давления по эталонному жидкостному манометру, центровка микротермопарного зонда в поперечном сечении рабочего участка, а также модернизация системы отбора давления.

Измерения гидравлического сопротивления и все серии экспериментов по теплообмену проведены соискателем лично. Для обеспечения статистической достоверности результатов разработан адаптивный алгоритм накопления сигнала, основанный на автоматическом контроле сходимости среднеквадратичных отклонений температуры в скользящем временном окне.

Обработка экспериментальных данных, включающая расчёт спектральных плотностей мощности температурных пульсаций, а также оценку неопределённостей измеряемых величин, выполнена соискателем самостоятельно.

Образцы отложений, собранных с внутренних поверхностей трубы без покрытия и с медным покрытием, подготовлены соискателем лично, включая процедуру термического выпаривания ртути перед проведением локального элементного анализа методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS).

Модифицированная интерполяционная формула для расчёта коэффициента гидравлического сопротивления, корректно описывающая переход между асимптотиками идеально изолированной и идеально проводящей стенки при произвольном значении  $C_w$ , предложена соискателем.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, в том числе 2 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, и 2 статьи в журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus.

1. Гидравлическое сопротивление круглой трубы при течении жидкого металла в поперечном магнитном поле / Н. А. Лучинкин, Н. Е. Балабаев, Л. А. Федосеев, Е. М. Шенягин, И. А. Беляев // Письма в Журнал технической физики. — 2024. — Т. 50, вып. 21. — С. 47–50. — URL: <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.21.58960.20012>
2. О пространственной локализации проявления магнитоконвективных пульсаций потока в вертикальных трубах с опускным течением жидкого металла / Н. Е. Балабаев, Н. А. Лучинкин, И. А. Беляев // Вестник ОИВТ РАН. — 2025. — Т. 18, № 2. — С. 27–31.
3. Mixed Convection of a Molten Salt Simulant in a Horizontal Pipe under a Transverse Magnetic Field/ R.F. Rakhimov, N.E. Balabaev, N.Yu. Pyatnitskaya, E.A. Belavina, I.A. Belyaev// Journal of Engineering Thermophysics. — 2026. — Т. 35, № 4.
4. Экспериментальное исследование магнитоконвективных пульсаций и импульсных возмущений в жидкометаллических потоках для систем охлаждения термоядерных реакторов / Н. Е. Балабаев, Р. Ф. Рахимов, Я. И. Листратов, И. А. Беляев // Тепловые процессы в технике. — 2025. — Т. 17, № 12. — С. 557–568. — URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187095>.
5. Wall conductivity effect on magneto-convective fluctuations in a mercury flow / N. E. Balabaev, I. A. Belyaev // International Journal of Heat and Fluid Flow. — 2026. — Т. 121. — С. 110533. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2026.110533>.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, связанная с развитием термоядерной энергетики и необходимостью решения сложных теплофизических задач при циркуляции жидкометаллических теплоносителей в сильных магнитных полях. Сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В главе 1** проведен комплексный обзор литературных источников, посвященных исследованию гидродинамики и теплообмена жидких металлов в условиях смешанной конвекции и воздействия поперечного магнитного поля.

**В разделе 1.1** проанализированы критерии подобия ( $Re$ ,  $Ha$ ,  $Gr$ ,  $Ri$ ,  $N$ ,  $Pe$ ,  $Ra$ ) и режимы течения в вертикальных каналах. Обосновано использование числа Ричардсона  $Ri = Gr/Re^2$  для определения доминирующего механизма переноса. Показано, что для жидких металлов с экстремально малыми значениями числа Прандтля ( $Pr \approx 0,001-0,03$ ) температурный пограничный слой оказывается значительно толще гидродинамического, что требует применения специализированных моделей теплопереноса.

**В разделе 1.2** рассмотрены особенности течения проводящей жидкости в поперечном магнитном поле. Проанализированы механизмы формирования тонких пограничных слоёв Гартмана [15] и Робертса [16], а также пути замыкания индуцированных электрических токов (рис. 1). Показано, что высокие градиенты скорости в слоях Гартмана формируются в результате баланса сил: в ядре потока сила Лоренца тормозит течение, а в пристеночных слоях Гартмана она направлена вдоль потока и вместе с градиентом давления уравнивает вязкие силы. В слоях Робертса электромагнитная сила практически отсутствует. В результате поток в этих слоях не испытывает электромагнитного торможения, характерного

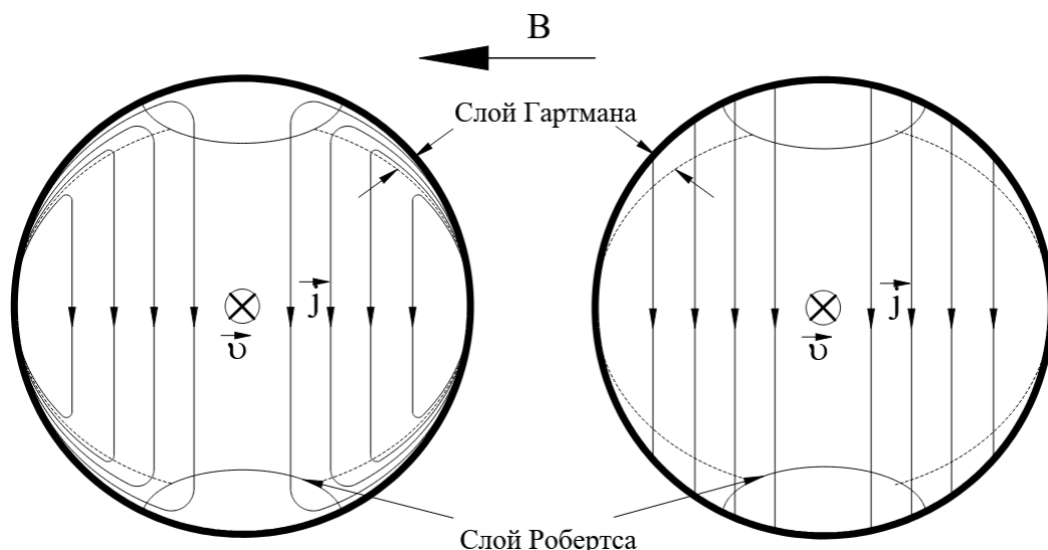


Рисунок 1 – Схема замыкания электрических токов в круглой трубе согласно [8]: (а) — изолирующая стенка, (б) — проводящая стенка.

для ядра, и под действием градиента давления достигает скоростей, превышающих скорость в ядре. Именно это различие в действии силы Лоренца при наличии проводящих стенок Гартмана приводит к формированию М-образного профиля скорости с высокоскоростными МГД-струями у боковых стенок.

**В разделе 1.3** подробно рассмотрены магнитоконвективные пульсации – низкочастотные колебания температуры и скорости аномально высокой амплитуды, возникающие при совместном действии вынужденного течения, термогравитационной конвекции и поперечного магнитного поля. Проанализированы экспериментальные и численные работы коллектива ОИВТ РАН – НИУ МЭИ [17 – 22]. Показано, что МКП представляют серьезную опасность для конструкций термоядерных реакторов, вызывая циклические термические напряжения и ускоряя коррозию материалов. Обоснована важность учета реальной электрической проводимости стенки и контактного сопротивления на границе «жидкий металл – конструкционный материал» для описания МГД-течений и прогнозирования возникновения МКП.

**В разделах 1.4–1.5** рассмотрены существующие подходы к описанию гидравлического сопротивления и теплообмена в канальном течении. Приведены классические зависимости для ламинарного и турбулентного режимов [23–25], а также корреляции для теплообмена жидких металлов, включая классическую зависимость Лайона [26] и Себана–Шимадзаки [27].

**Глава 2** посвящена описанию экспериментальной установки РК-3, методик измерений и обработки данных. Особое внимание уделено методу контроля и изменения электропроводности стенки с помощью медного покрытия, а также методике определения эффективного значения  $C_w^{exp}$  по данным о гидравлическом сопротивлении [28].

**В разделах 2.1–2.3** приведено описание замкнутого ртутного стенда РК-3, и электромагнитной системы, обеспечивающей индукцию поперечного магнитного поля до 1,7 Тл (рис. 2). Представлена конструкция экспериментального рабочего участка (рис. 3), состоящего из однородно обогреваемой трубы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т длиной 750 мм, с внутренним диаметром 40 мм и толщиной стенки 2,5 мм.

**В разделе 2.4** описана примененная в работе техника целенаправленного управления эффективной электрической проводимостью стенки. На основе анализа фазовых диаграмм и растворимости металлов во ртути [29, 30], обоснован выбор меди в качестве материала покрытия. Приведена процедура нанесения гальванического медного покрытия толщиной ~50 мкм. Рассчитаны значения относительной проводимости  $C_w$  для трубы без покрытия ( $C_w^{расч} \approx 0,03$ ) и с медным покрытием ( $C_w^{расч} \approx 0,05$ ) с учетом температурной зависимости свойств материалов.

В разделах 2.5–2.6 описана автоматизированная система научных исследований (АСНИ) на базе LabVIEW и методика локальных измерений температурных полей с помощью микротермопарного зонда.

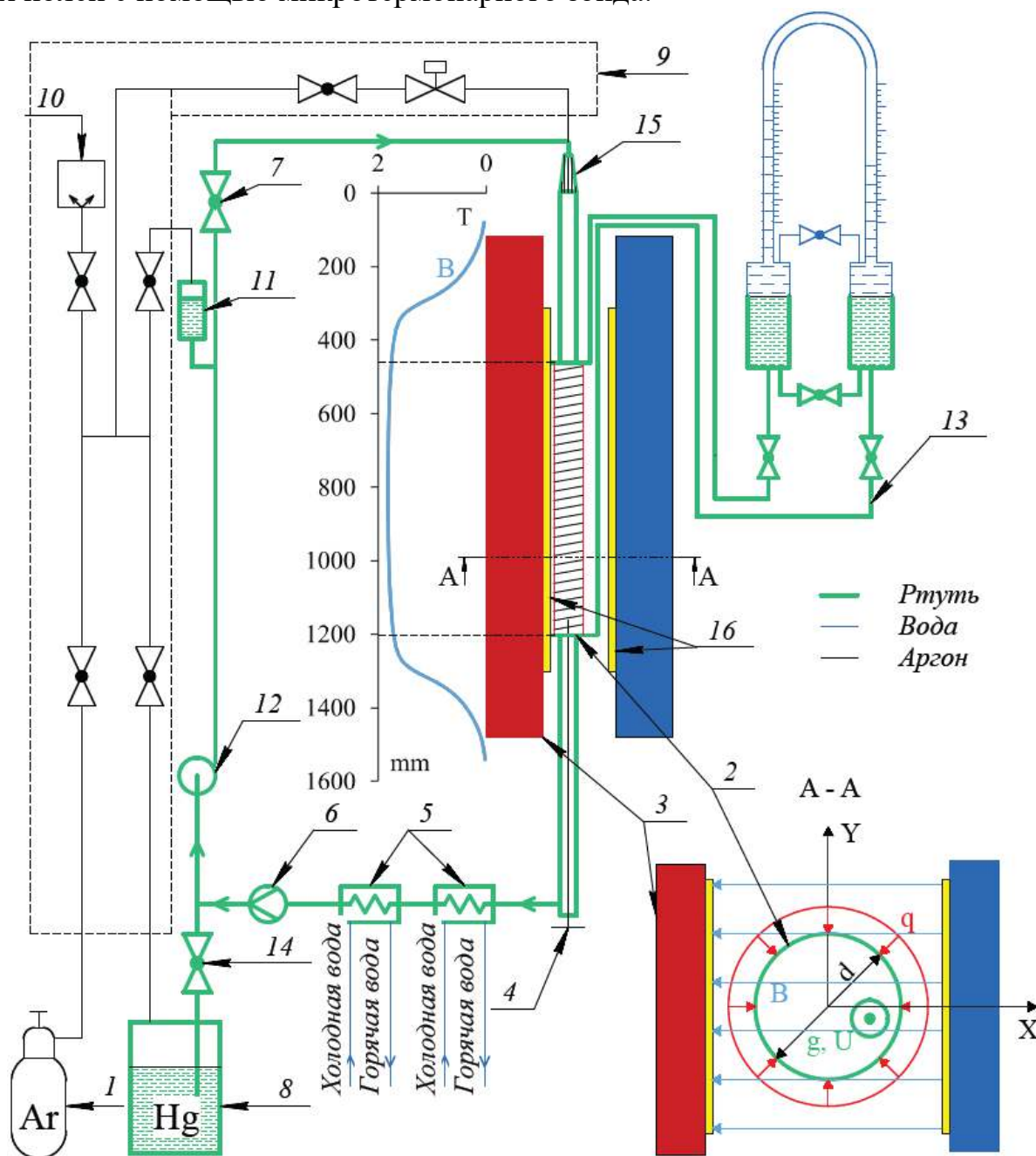


Рисунок 2 – Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – баллон с аргоном, 2 – экспериментальный участок, 3 – электромагнит, 4 – микротермопара, 5 – теплообменники с водой («труба в трубе»), 6 – электромагнитный расходомер, 7 – регулирующие клапаны, 8 – накопительный резервуар, 9 – система продувки газом, 10 – вакуумный насос, 11 – гидравлический успокоитель, 12 – центробежный насос, 13 – система измерения гидравлического сопротивления, 14 – запорный клапан, 15 – сотовый успокоитель потока (Хоникомб), 16 – полюсные наконечники для концентрации магнитного поля.

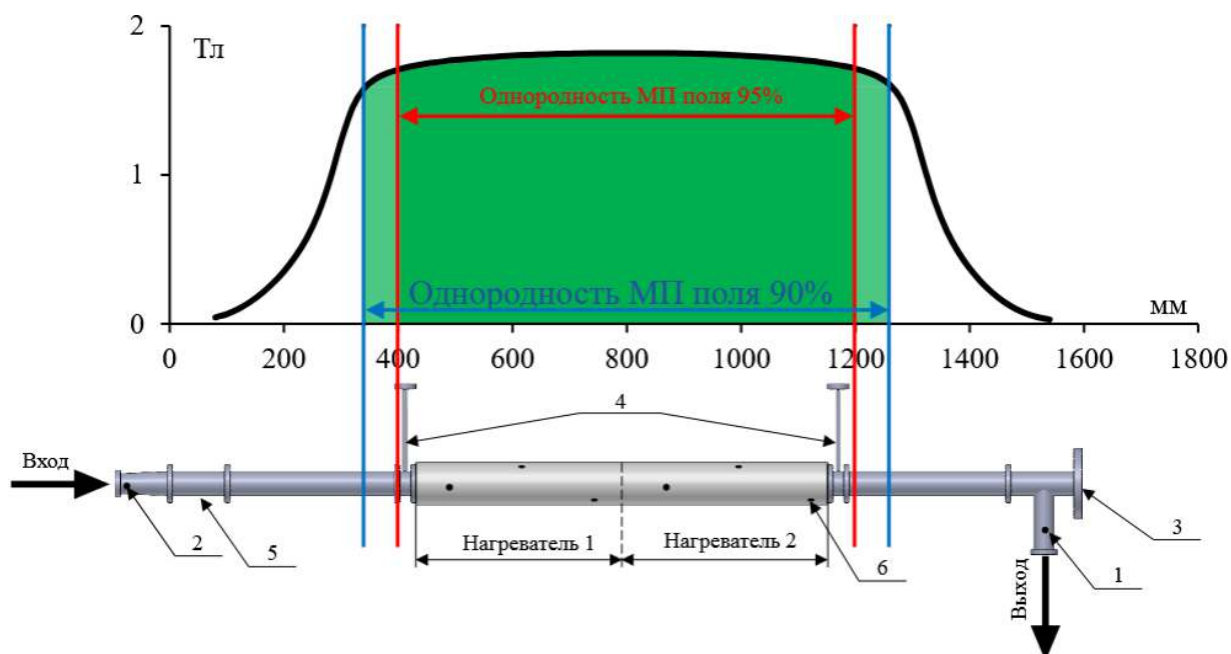


Рисунок 3 – Схема экспериментального рабочего участка: 1 – место закладки термометров сопротивления на выходе из потока, 2 – место закладки термометров сопротивления на входе в поток, 3 – место установки микротермопарного зонда, 4 – отборы давления, 5 – сотовый успокоитель потока (хоникомб), 6 – место установки термопар, контролирующих температуру нагревателей.

В разделе 2.7 описана методика измерения гидравлического сопротивления. В разделе 2.7.1 приведена методика измерений перепада давления с применением двух способов: прямое абсолютное измерение перепада жидкости и при помощи дифференциального датчика давления. В разделе 2.7.2 выполнена оценка гидродинамической стабилизации потока. Предложен критерий для оценки гидродинамической стабилизации потока, основываясь на формулу Шерклифа [15]:

$$\frac{Re}{Na} < 123. \quad (1)$$

В разделе 2.7.3 описана методика проведения измерений гидросопротивления.

В разделе 2.8 приведена оценка тепловой стабилизации потока для исследуемого сечения  $L_{eff}/d = 21,6$  [31], на основе которой получен критерий

$$\frac{Re}{Na} < 90, \quad (2)$$

используемый в дальнейшем для критического анализа экспериментальных данных.

В разделе 2.9 изложена методика расчета локального числа Нуссельта с учетом поправки на точку касания королька термопары.

В разделе 2.10 описан адаптивный алгоритм накопления сигнала, обеспечивающий статистическую достоверность результатов за счет автоматического контроля сходимости среднеквадратичных отклонений в скользящем временном окне.

В разделе 2.11 выполнена оценка неопределенностей всех измеряемых и рассчитываемых безразмерных комплексов в соответствии с руководством ГОСТ Р 54500.3-2011 (GUM) [14]. Показано, что суммарная относительная неопределенность числа Нуссельта составляет  $\sim 9,1\%$ , коэффициента гидравлического сопротивления  $\sim 3,0\%$ , а параметра проводимости стенки  $\sim 6,7\text{--}7,8\%$ .

**Глава 3** посвящена представлению результатов комплексного экспериментального исследования влияния проводимости стенки на гидравлическое сопротивление, структуру температурных полей и условия возникновения МКП в диапазоне чисел подобия:  $Re = (0,6 - 7) \cdot 10^4$ ,  $Ha = 0 - 1800$ ,  $Ri = 0,04 - 24$  [32, 33].

В разделе 3.1 установлены количественные закономерности изменения гидравлического сопротивления в зависимости от числа Стюарта ( $N$ ) и состояния стенки. Показано, что длительная эксплуатация трубы из нержавеющей стали без покрытия (до 30 циклов нагрева) приводит к деградации контакта «ртуть – нержавеющая сталь», в результате, эффективная проводимость  $C_w$  снижается с расчетных 0,03 до 0,0005 (рис. 4).

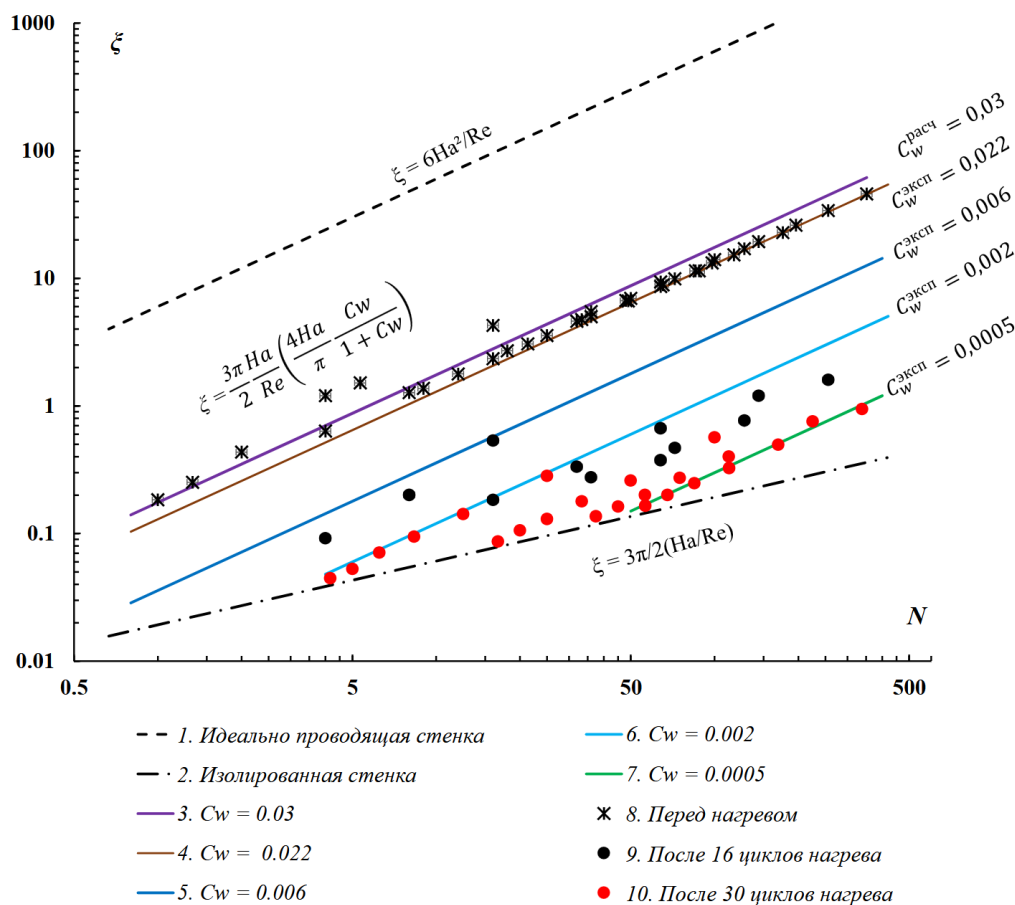


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$  от числа Стюарта ( $N$ ) для трубы без покрытия: линии – расчетные и экспериментальные кривые для различных значений относительной электропроводности стенки ( $C_w$ ), маркеры – экспериментальные данные, полученные до начала нагрева, а также после 16 и 30 циклов нагрева

Для трубы с гальваническим медным покрытием (первая серия экспериментов) достигнуто значение  $C_w \approx 0,05$  (рис. 5) длительно сохранявшееся на протяжении двух серий экспериментов. По завершению второй серии экспериментов с трубой покрытой медью были изучены режимы с высокими тепловыми нагрузками ( $q = 99 \text{ кВт/м}^2$ ) и температурами на стенке до  $120^\circ\text{C}$ , что привело к частичной деградации покрытия и снижению эффективной проводимости с  $C_w \approx 0,055$  до  $C_w \approx 0,017$ .

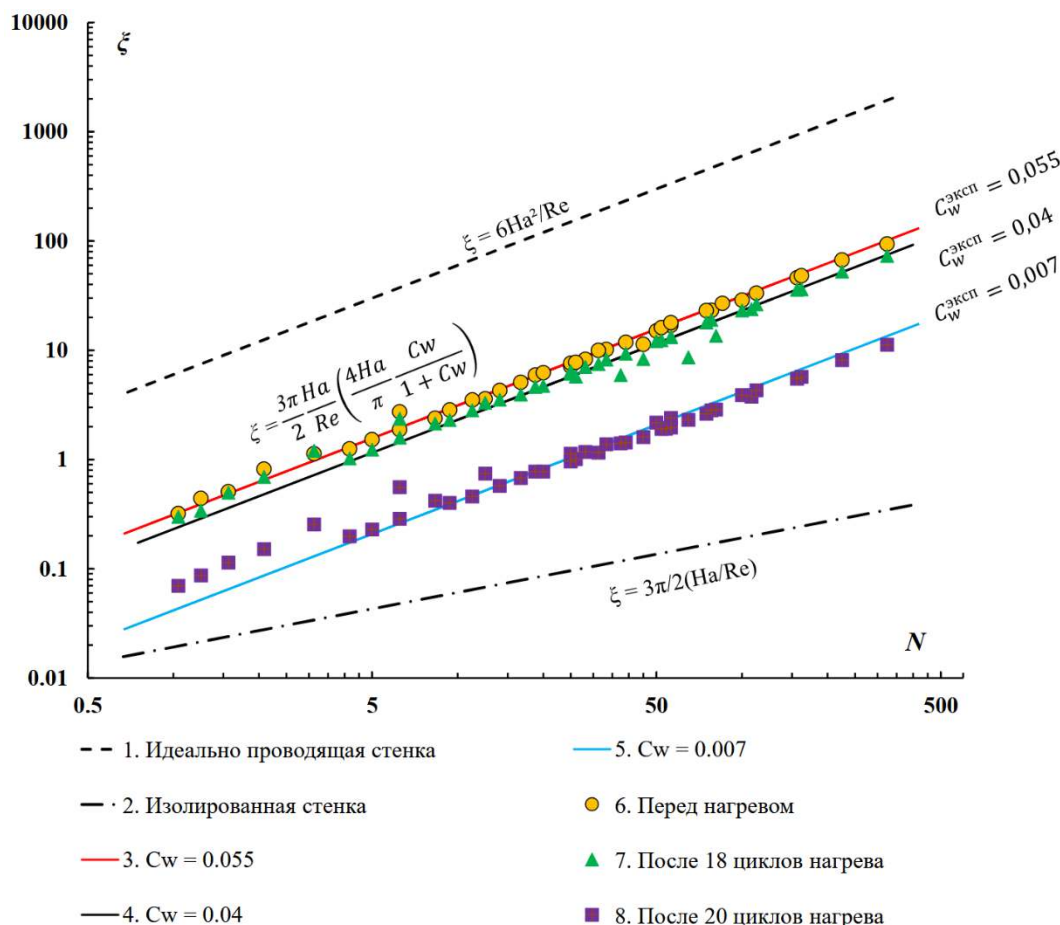


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$  от числа Стюарта ( $N$ ) для трубы с медным покрытием: линии – расчетные и экспериментальные кривые для различных значений относительной электропроводности стенки ( $C_w$ ), маркеры – экспериментальные данные, полученные до начала нагрева, а также после 18 и 20 циклов нагрева

В разделе 3.2 обоснован выбор управляющего параметра для представления данных о гидравлическом сопротивлении труб с конечной проводимостью. Предложена модификация поправочного коэффициента  $\Phi^*$ , предложенного в [34], для вычисления коэффициента гидравлического сопротивления в трубе с

конечной проводимостью, которая позволяет определить эффективную проводимость стенки вблизи предельных случаев для изолированной и идеально проводящей стенки.

$$\Phi^* = \frac{1 + \frac{4Ha}{\pi} C_w}{1 + C_w} \quad (3)$$

В разделе 3.3 исследована пространственно-временная структура температурных флуктуаций. Методом спектрального анализа показано, что сильное магнитное поле подавляет мелкомасштабную турбулентность, переводя ее в режим квазидвумерной МГД-турбулентности [35], но при высоких числах Ричардсона ( $Ri \gtrsim 7$ ) генерирует МКП.

Впервые экспериментально доказано, что электропроводность стенки качественно меняет механизм потери устойчивости. Для нержавеющей стали без покрытия ( $C_w \approx 0,0005$ ) зона максимальной интенсивности пульсаций смещается в ядро потока распределяясь параллельно магнитному полю, тогда как для проводящей омедненной стенки ( $C_w \approx 0,05$ ) МКП локализуется непосредственно в пристенных слоях Робертса из-за формирования высокоскоростных электромагнитных струй (рис. 6).

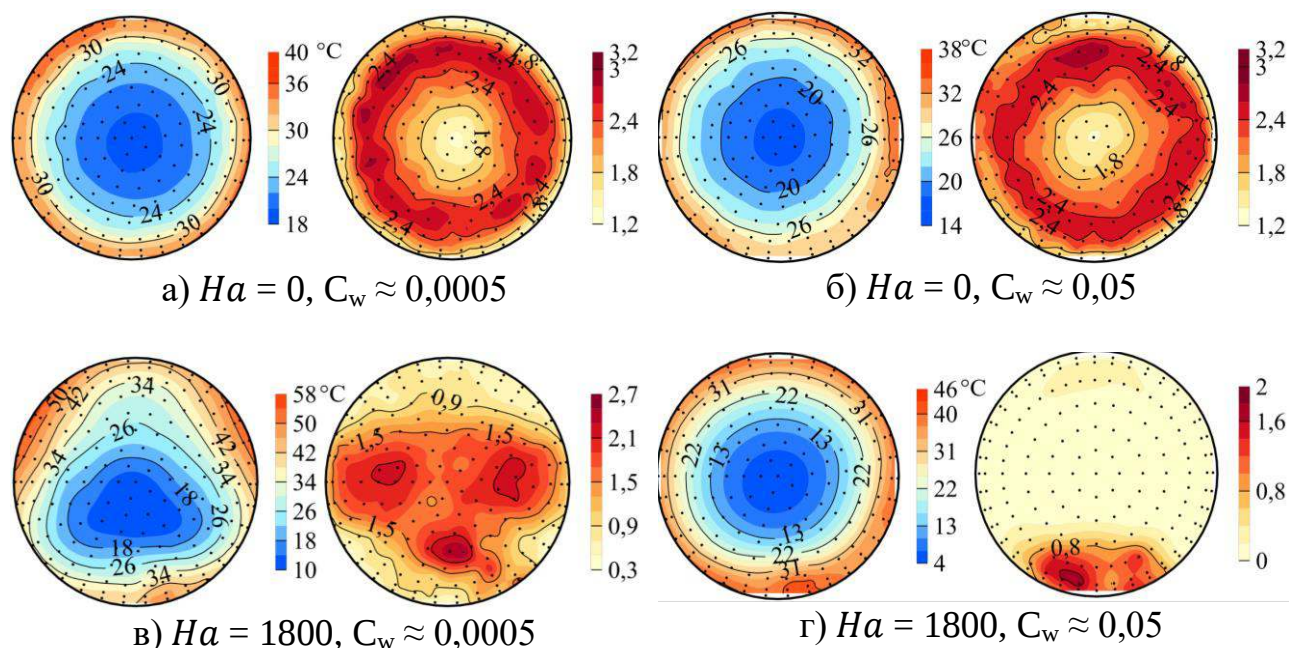


Рисунок 6 – Поля избыточных температур и интенсивностей пульсаций в измеряемом сечении для трубы без покрытия:  $Re = 20000$ ,  $Ri = 3,8$  ( $q = 35$  кВт/м<sup>2</sup>),  $Gr = 1,52 \cdot 10^9$

Построены результирующие диаграммы существования МКП в координатах  $Ri(N)$  (рис. 7) и  $Ri(Rh^{-1})$  [28, 29] для стенок с различной электрической проводимостью. Группа точек 1 соответствует режимам с МКП ( $\sigma^* > 1$ ), выделенным

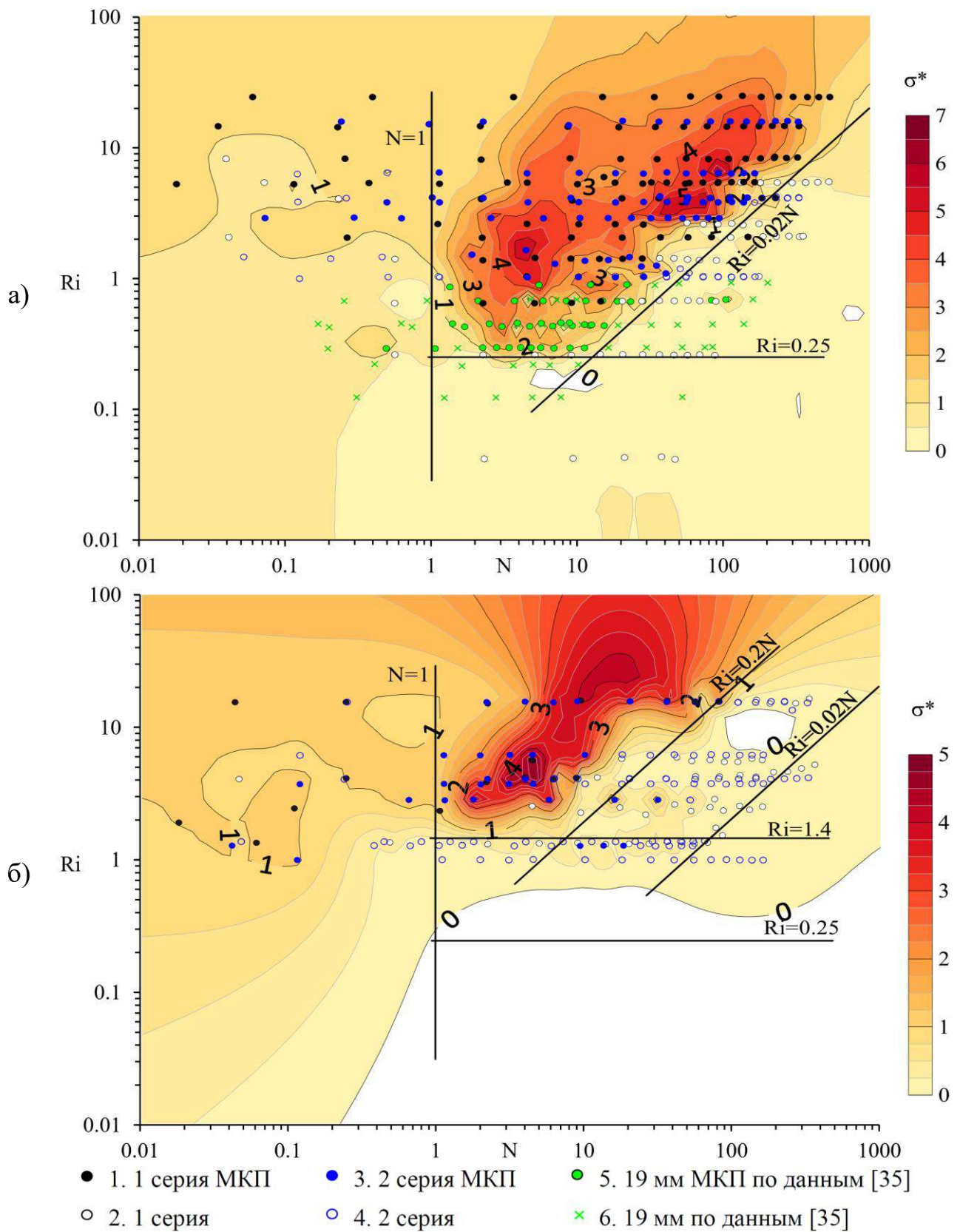


Рисунок 7 – Диаграммы режимов течения в координатах  $N - Ri$  для трубы из нержавеющей стали без покрытия ( $C_w \sim 0.0005$ ) (а) и с медным покрытием ( $C_w \sim 0.05$ ) (б)

по данным первой серии экспериментов, а точки 2 – режимам без МКП ( $\sigma^* < 1$ ) из той же серии. Точки 3 обозначают режимы с МКП по результатам второй серии экспериментов, а точки 4 – режимы без МКП из этой же серии. Отдельно представлены данные, полученные на трубе диаметром 19 мм, построенные по данным из работы [35]: точки 5 соответствуют режимам с МКП, а точки 6 – режимам без МКП. Видно, что режимы с развитыми пульсациями в этих экспериментах наблюдаются преимущественно при  $Ri > 0,25$  и демонстрируют хорошее согласование с данными, полученными на других рабочих участках.

Установлено, что повышение проводимости стенки существенно сужает область существования МКП (рис. 7(б)), так как нижняя граница по числу Ричардсона смещается с  $Ri \approx 0,25$  до  $Ri \approx 1,4$ , а правая граница подавления пульсаций описывается зависимостью  $Ri = 0,2N$  (или  $Ri = 400 \cdot Rh^{-1,5}$ ) вместо  $Ri = 0,02N$  для изолированной стенки.

По полученным экспериментальным данным на диаграммы нанесены границы области существования МКП, определенные для труб с различной проводимостью. Левая граница ( $N \approx 1$ ) определяет минимальное значение числа Стюарта, при котором магнитное поле начинает существенным образом влиять на развитую турбулентность. Нижняя граница ( $Ri \approx 0,25$ ) соответствует критическому значению числа Ричардсона, ниже которого силы плавучести слишком слабы для генерации крупномасштабных конвективных структур. Правая граница, определяющая предел подавления пульсаций сильным магнитным полем, имеет наклонный характер и в первом приближении описывается линейной зависимостью  $Ri = 0,02 N$ .

Сравнение с результатами для трубы с медным покрытием (рис. 7(б)) показывает, что наличие высокопроводящего слоя приводит к существенной трансформации области существования МКП. Нижняя граница по числу Ричардсона сместилась в область больших значений от  $Ri \approx 0,25$  до  $Ri \approx 1,4$ , что свидетельствует о необходимости более интенсивного нагрева для развития конвективных структур в присутствии проводящей стенки. Левая граница ( $N \approx 1$ ) осталась неизменной, что указывает на универсальность порога влияния магнитного поля на турбулентность. Правая наклонная граница сместилась и теперь соответствует зависимости  $Ri = 0,2 N$ , что указывает на расширение области подавления пульсаций из-за дополнительного диссипативного эффекта токов, индуцированных в проводящей стенке.

Проанализировано влияние МКП на локальный теплообмен. Показано, что в слое Робертса развитие МКП вызывает разброс нормированного числа Нуссельта  $Nu/Nu_0$  формируя широкое плато в интервале от 0,2 до 1,4 (рис. 8 (а), рис. 9(а)), тогда как в слое Гартмана наблюдается его снижение и стабилизация на уровне 0,4–0,8 независимо от состояния стенки (рис. 8 (б), рис. 9 (б)). Также в

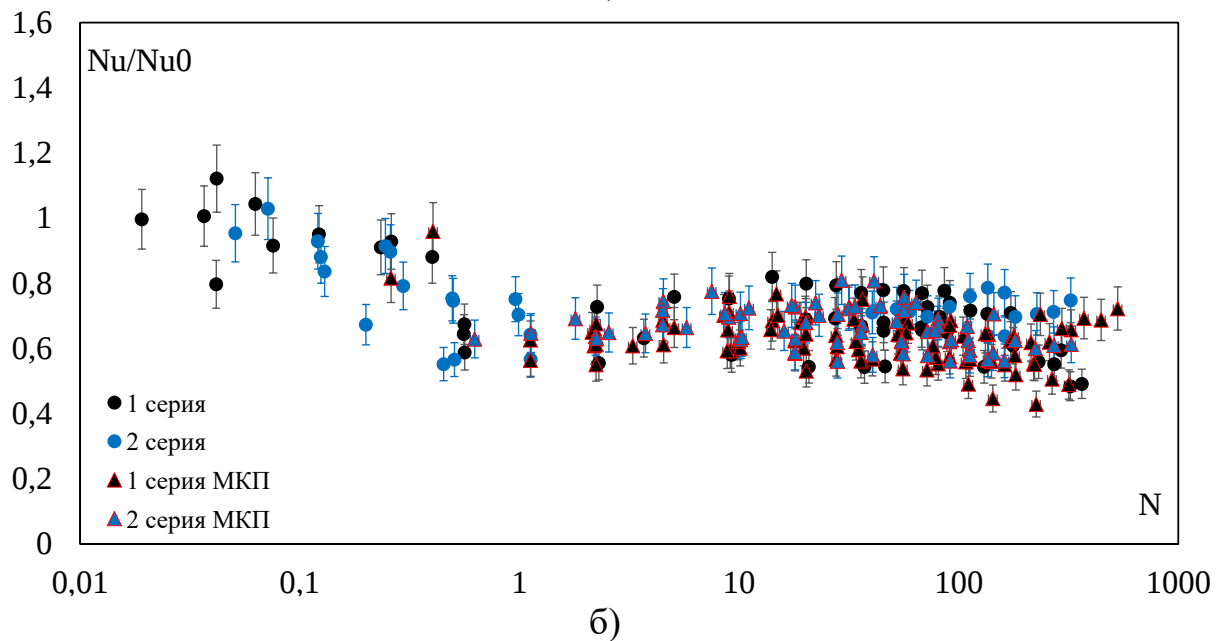
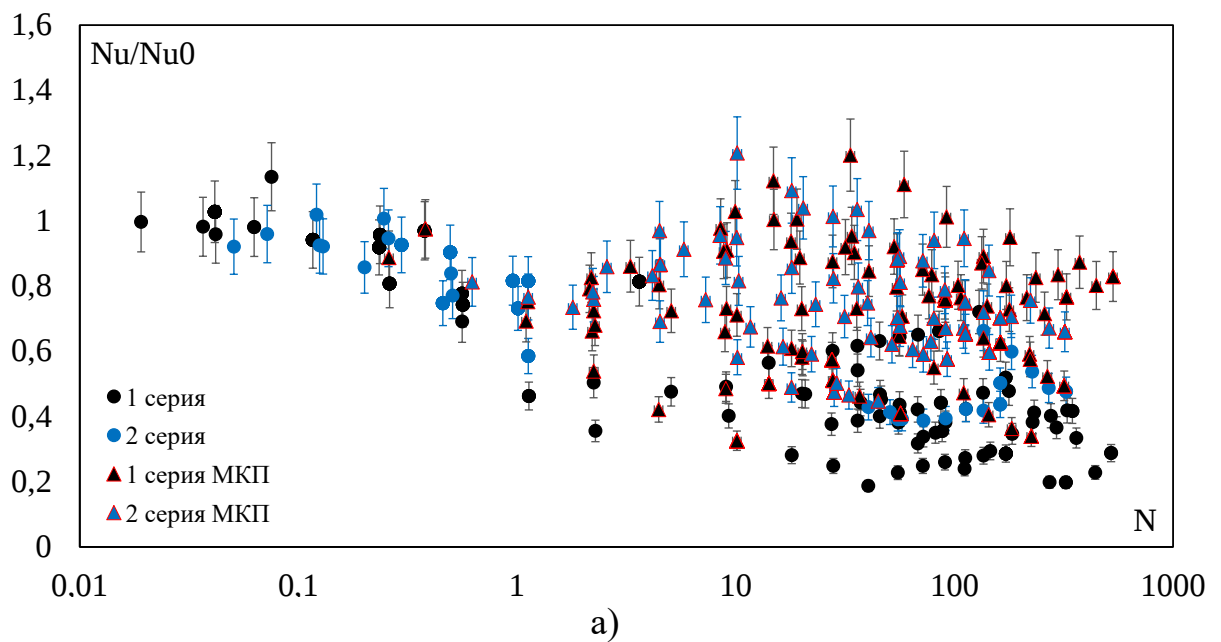
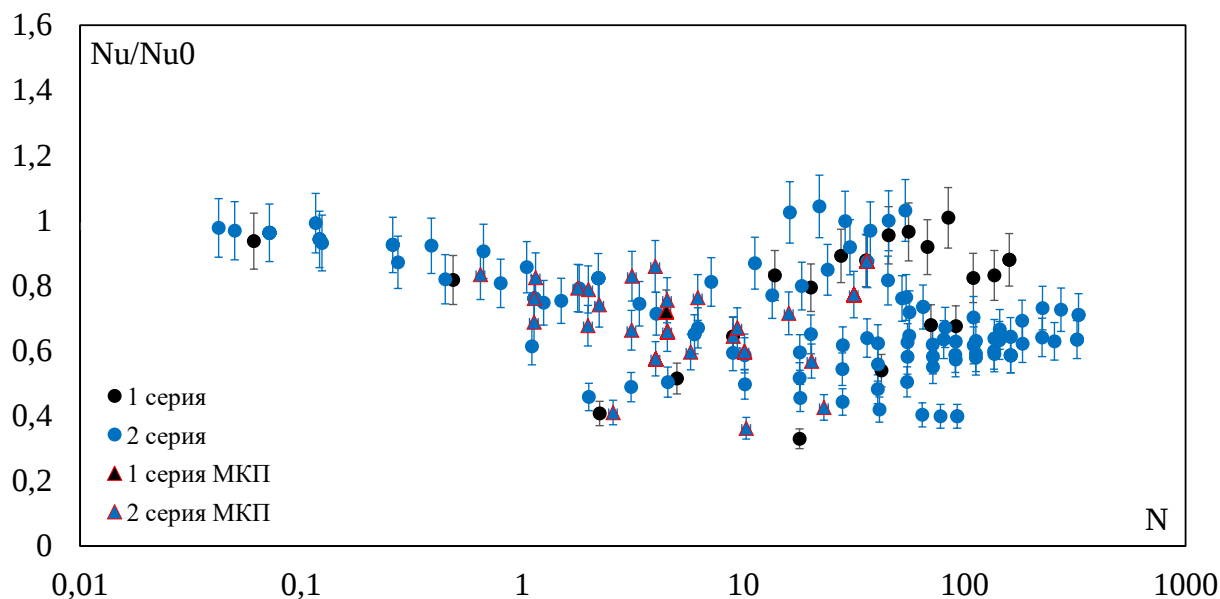


Рисунок 8 – Зависимость нормированного локального числа Нуссельта  $Nu/Nu_0$  от числа Стюарта  $N$  в слое Робертса (а) и в слое Гартмана (б) для без покрытия ( $C_w \sim 0.0005$ )

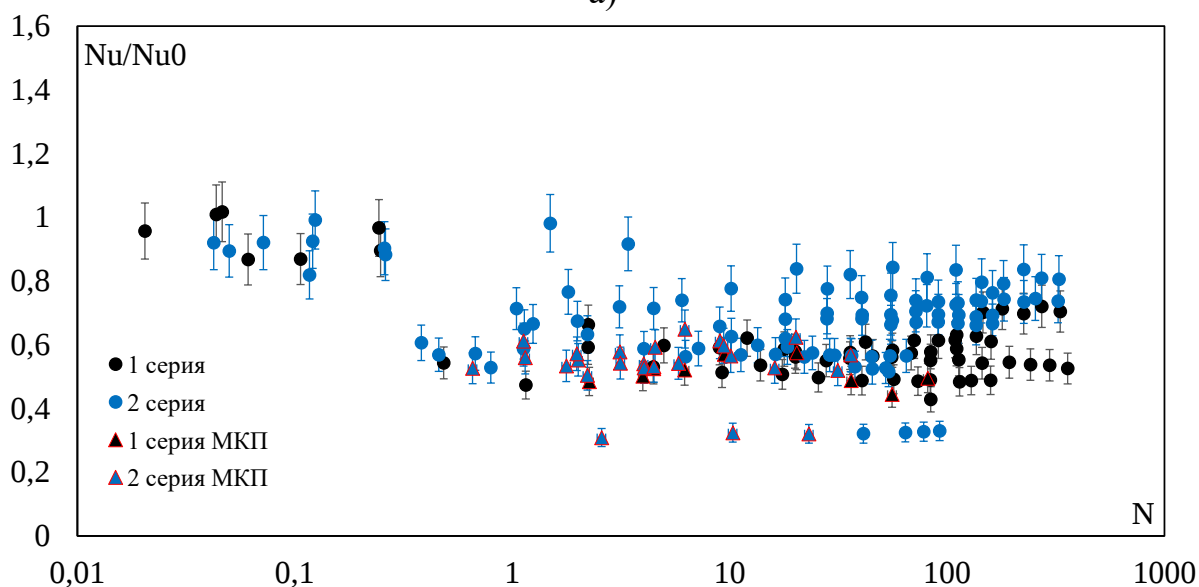
отсутствии магнитного поля ( $N \rightarrow 0$ ) отношение  $Nu/Nu_0$  стремится к единице, что соответствует теплоотдаче при развитом турбулентном течении.

Проведено сопоставление данных с классической корреляцией Лайона ( $Nu_{Ti} = 5 + 0,025 \cdot Re^{0,8}$ ) [26], показавшее, что в режиме без магнитного поля, экспериментальные значения стабильно превышают единицу, находясь в диапазоне 1,0–1,4. При этом точки, соответствующие измерениям в зонах, условно сопоста-

вимых со стенками Гартмана и Робертса, практически не разделяются. При наложении сильного магнитного поля ( $Ha=1800$ ) интенсивность теплообмена снижается и экспериментальные значения стабилизируются на уровне  $Nu/Nu_{T1} \approx 0,7$ .



а)



б)

Рисунок 9 – Зависимость нормированного локального числа Нуссельта  $Nu/Nu_0$  от числа Стюарта  $N$  в слое Робертса (а) и в слое Гартмана (б) для трубы с медным покрытием ( $C_w \sim 0,05$ )

**В разделе 3.4** методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS) определен состав отложений, образующихся на поверхности стальной стенки, контактирующей со ртутью и впервые физико-химически подтверждена природа деградации контактного сопротивления, гипотеза о котором высказывалась в ранних работах [11, 22]. Установлено, что на поверхности нержавеющей

стали без покрытия формируется диэлектрический барьер, состоящий преимущественно из оксидов железа (до 65 мас.% Fe) со связанными остатками ртути, а на поверхности с медным покрытием образуется электропроводящая медно-ртутная амальгама (до 77 мас.% Cu), обеспечивающая хороший электрический контакт ртути и стали.

**В Заключение** сформулированы основные выводы по работе, заключающиеся в следующем:

В ходе диссертационного исследования была разработана и экспериментально реализована методика управления эффективной электрической проводимостью границы раздела «жидкий металл – стенка» путем нанесения гальванического медного покрытия (~50 мкм) на внутреннюю поверхность трубы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Показано, что данный метод позволяет восстановить электрический контакт и повысить относительную электропроводность стенки  $C_w$  примерно в 100 раз (с ~0,0005 до ~0,055).

Впервые экспериментально установлен и количественно оценен механизм деградации электрического контакта на границе «ртуть – нержавеющая сталь». Установлено, что в результате длительной эксплуатации (до 30 циклов нагрева) и воздействия тепловых нагрузок (до 99 кВт/м<sup>2</sup>) эффективная проводимость  $C_w$  снижается с расчетных ~0,03 до ~0,0005 из-за образования диэлектрических оксидных прослоек.

Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS) определен состав отложений, образующихся на поверхности стальной стенки, контактирующей со ртутью и определена физико-химическая природа деградации контактного сопротивления.

Получена количественная зависимость коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$  от числа Стюарта  $N$  и относительной электропроводности стенки  $C_w$  в диапазоне режимных параметров  $Re = (0,6-7) \cdot 10^4$ ,  $Ha = 0-1800$ . Предложена модифицированная интерполяционная формула для расчета  $\xi$ , корректно описывающая переход между асимптотиками идеально изолированной и идеально проводящей стенки при произвольном значении  $C_w$ .

Установлено, что электропроводность стенки качественно меняет механизм формирования и пространственную структуру МКП.

Построены карты режимов существования МКП в координатах  $N - Ri$ ,  $Rh^{-1} - Ri$ . Показано, что повышение электропроводности стенки существенно сужает область развития МКП.

Исследовано влияние магнитного поля и МКП на локальный теплообмен в слоях Гартмана и Робертса. Показано, что в слое Гартмана нормированное число Нуссельта  $Nu/Nu_0$  снижается и стабилизируется на уровне 0,4–0,8 независимо от состояния стенки. В слое Робертса развитие МКП вызывает разброс значений  $Nu/Nu_0$  (от 0,2 до 1,4), который для трубы с медным покрытием заметно меньше. Проведено сопоставление с классической корреляцией Лайона.

## Список литературы

1. Barabaschi P. et al. ITER progresses into new baseline // *Fusion Engineering and Design*. — 2025. — Vol. 215. — P. 114990.
2. Mazzone G. et al. Revised Divertor Design for the new European DEMO LAR reactor // *IAEA 5th Technical Meeting on Divertor Concepts*. — 2025.
3. Длугач Е. Д., Шленский М. Н., Кутеев Б. В. Генерация нейтронов в плазме термоядерного источника нейтронов пучком быстрых атомов // *Физика плазмы*. — 2023. — Vol. 49, no. 10. — Pp. 937–946
4. Нигматулин Б. И. Атомная энергетика в мире. Состояние и прогноз до 2050 года // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. — 2019. — Vol. 25, no. 4. — Pp. 6–22.
5. Abdou M. et al. Blanket/first wall challenges and required R&D on the pathway to DEMO // *Fusion Engineering and Design*. — 2015. — Vol. 100.— Pp. 2–43.
6. Zikanov O. et al. Mixed convection in pipe and duct flows with strong magnetic fields // *Applied Mechanics Reviews*. — 2021. — Vol. 73, no. 1. — P. 010801.
7. Belyaev I. A. et al. Temperature fluctuations in a liquid metal MHD-flow in a horizontal inhomogeneously heated tube // *High Temperature*. — 2015.— Vol. 53, no. 5. — Pp. 734–741
8. Kolmakov A. G. et al. Fatigue strength of low-activation ferritic–martensitic high-chromium EK-181 steel // *Russian Metallurgy (Metally)*. — 2016. — Vol. 2016, no. 4. — Pp. 394–398.
9. Smolentsev S., Moreau R., Abdou M. Characterization of key magnetohydrodynamic phenomena in PbLi flows for the US DCLL blanket // *Fusion Engineering and Design*. — 2008. — Vol. 83, no. 5-6. — Pp. 771–783.
10. Park J. H., Cho W. D. Intermetallic and Electrical Insulator Coatings on High Temperature Alloys, Properties in Liquid-Lithium Environments // *Material and Manufacturing Process*. — 1995. — Vol. 10, no. 5. — Pp. 971–986.
11. Мельников И. А. и др. Исследование теплообмена жидкого металла при течении в вертикальной трубе с неоднородным обогревом в поперечном магнитном поле // *Теплоэнергетика*. — 2013. — no. 5. — P. 52.
12. Черныш Д. Ю., Лучинкин Н. А., Беляев И. А. Экспериментальное исследование теплообмена при смешанной МГД-конвекции жидкого металла в наклонном канале // *Тепловые процессы в технике*. — 2018. — Vol. 10, no. 3-4. — Pp. 101–106.
13. Limits of strong magneto-convective fluctuations in liquid metal flow in a heated vertical pipe affected by a transverse magnetic field / I. Belyaev, P. Sardov, I. Melnikov, P. Frick // *International Journal of Thermal Sciences*. — 2021. — Vol. 161. — P. 106773.
14. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. — 2012.

15. Shercliff J. A. The flow of conducting fluids in circular pipes under transverse magnetic fields // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1956. — Vol. 1, no. 6. — Pp. 644–666.
16. Roberts P. H. Singularities of Hartmann layers // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. — 1967. — Vol. 300, no. 1460. — Pp. 94–107.
17. Мельников И. А. Исследование гидродинамики и теплообмена МГД-течений в вертикальной трубе в поперечном магнитном поле: Дис. ...канд. техн. наук / Нац. исслед. ун-т МЭИ. — М., 2014.
18. Шестаков А. А. Экспериментальное исследование характеристик теплообмена при течении жидкого металла в вертикальной трубе в поперечном магнитном поле: Дис. ... канд. техн. наук / Национальный исследовательский университет МЭИ. — М., 2012.
19. Поддубный Иван Игоревич. Исследование гидродинамики и теплообмена жидкого металла в прямоугольном канале применительно к условиям термоядерного реактора: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Нац. исслед. ун-т МЭИ. — Москва, 2017. — Р. 20.
20. Artemov V. I. et al. Numerical investigation of the effect of the wall properties on downward mercury flow and temperature fluctuations in a vertical heated pipe under a transverse magnetic field // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2024. — Vol. 218. — P. 124746.
21. Akhmedagaev R., Zikanov O., Listratov Y. Magnetoconvection in a horizontal duct flow at very high Hartmann and Grashof numbers // *Journal of Fluid Mechanics*. — 2022. — Vol. 931. — P. A29.
22. Макаров Максим Валентинович. Численный анализ турбулентных МГД-течений при смешанной конвекции в трубах: Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 1.3.14 / ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ». — Москва, 2024. — Р. 20
23. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. — М.: Рипол Классик, 1950. — Р. 678.
24. Валуева Е. П., Свиридов В. Г. Введение в механику жидкости. — М.: Издательство МЭИ, 2007. — Р. 310.
25. Филоненко Г. К. Формула для коэффициента гидравлического сопротивления гладких труб // *Известия ВТИ*. — 1948. — no. 10. — Р. 162.
26. Lyon R. N. Liquid metal heat transfer coefficients // *Chemical Engineering Progress*. — 1951. — Vol. 47. — Pp. 75–79.
27. Seban R. A., Shimazaki T. T. Heat transfer to a fluid flowing turbulently in a smooth pipe with walls at constant temperature // *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. — 1951. — Vol. 73, no. 6. — Pp. 803–807.
28. Mixed Convection of a Molten Salt Simulant in a Horizontal Pipe under a Transverse Magnetic Field/ R.F. Rakhimov, N.E. Balabaev, N.Yu. Pyatnitskaya, E.A. Belavina, I.A. Belyaev// *Journal of Engineering Thermophysics*. — 2026. — T. 35, № 4.

29. Экспериментальное исследование магнитоконвективных пульсаций и импульсных возмущений в жидкометаллических потоках для систем охлаждения термоядерных реакторов / Н. Е. Балабаев, Р. Ф. Рахимов, Я. И. Листратов, И. А. Беляев // *Тепловые процессы в технике*. — 2025. — Vol. 17, no. 12. — Pp. 557–568.
30. Балабаев Н. Е., Лучинкин Н. А., Беляев И. А. О пространственной локализации проявления магнитоконвективных пульсаций потока в вертикальных трубах с опускным течением жидкого металла // *Вестник ОИВТ РАН*. — 2025. — Vol. 18, no. 2. — Pp. 27–31.
31. Ognerubov DA, Listratov Ya I. An investigation into the effect of Prandtl number on heat transfer in a liquid metal flow in a round tube at a constant peclet number // *Thermal Engineering*. — 2024. — Vol. 71, no. 12. — Pp. 1076–1082.
32. Wall conductivity effect on magneto-convective fluctuations in a mercury flow / N. E. Balabaev, I. A. Belyaev // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. — 2026. — T. 121. — C. 110533. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2026.110533>.
33. Гидравлическое сопротивление круглой трубы при течении жидкого металла в поперечном магнитном поле / Н. А. Лучинкин, Н. Е. Балабаев, Л. А. Федосеев, Е. М. Шенягин, И. А. Беляев // *Письма в Журнал технической физики*. — 2024. — Т. 50, вып. 21. — С. 47–50. — URL: <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.21.58960.20012>.
34. Генин Л. Г., Свиридов В. Г. Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах. — М.: Изд-во МЭИ, 2001. — С. 200.
35. Sommeria Joël, Moreau Ren' e. Why, how, and when, MHD turbulence becomes two-dimensional // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1982. — Vol. 118. — Pp. 507–518.
36. Belyaev I., Frick P., Razuvanov N., Sviridov E., Sviridov V. Temperature fluctuations in a nonisothermal mercury pipe flow affected by a strong transverse magnetic field // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2018. — Vol. 127. — Pp. 566–572.