

На правах рукописи



**Косков Михаил Андреевич**

**Тепловая конвекция феррожидкости в протяжённом замкнутом контуре: термомагнитный механизм интенсификации течения**

Специальность 1.1.9 —  
«Механика жидкости, газа и плазмы»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Пермь — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермском государственном национальном исследовательском университете».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
**Сморodin Борис Леонидович.**

Официальные оппоненты: **Краков Михаил Самуилович,**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры ЮНЕСКО «Энергосбережение  
и возобновляемые источники энергии» Белорусского  
национального технического университета, г. Минск.

**Виноградова Александра Сергеевна,**  
кандидат физико-математических наук,  
научный сотрудник лаборатории физико-химиче-  
ской гидродинамики НИИ механики ФГБОУ ВО  
«Московский государственный университет им.  
М. В. Ломоносова», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образова-  
тельное учреждение высшего образования «Уральский  
федеральный университет имени первого Президента  
России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится 19 июня 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного  
совета 24.1.201.01 (Д 004.036.01) при Федеральном государственном бюджетном  
учреждении науки «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского  
отделения Российской академии наук» (филиал — Институт механики сплошных сред  
УРО РАН) по адресу: 614068, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; [www.icmm.ru](http://www.icmm.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики  
сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба  
направлять по адресу: 614068, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; [www.icmm.ru](http://www.icmm.ru),  
ученому секретарю диссертационного совета 24.1.201.01 (Д 004.036.01).

Автореферат разослан \_\_\_\_ \_\_\_\_\_ 2025 года.

Телефон для справок: +7 (342) 237-84-61.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.1.201.01 (Д 004.036.01),  
д-р физ.-мат. наук



Зуев Андрей Леонидович

## Общая характеристика работы

### Актуальность и степень разработанности темы исследования

Информация о свободных конвективных течениях неизотермических жидкостей, получаемая в контролируемых условиях лабораторных экспериментов, необходима для понимания и контроля процессов теплообмена и теплопереноса. Особый интерес представляют магнитные жидкости, поскольку в них реализуется дополнительный термомагнитный механизм управления течением, обусловленный зависимостью намагниченности от температуры. Использование магнитной жидкости в качестве теплоносителя — перспективный метод улучшения характеристик теплообменных устройств. Задача интенсификации теплопередачи с использованием магнитных жидкостей остаётся актуальной, несмотря на то, что она впервые обозначена в теоретических работах Р. Розенцвейга ещё в 60-х годах XX века. Теоретические оценки предсказывают многократное усиление теплопотока, тогда как эксперименты и численное моделирование (R. Zanella 2019) зачастую завершаются скромным результатом — интенсификацией теплообмена на несколько десятков процентов. Это противоречие предпочтительно разрешить с учётом дополнительных требований: простота конструкции теплообменного устройства и возможность управления теплопотоком.

Экспериментальные исследования конвективных течений магнитных жидкостей выполнялись в России (Г. П. Богатырёв, Г. Ф. Путин, А. Ф. Глухов, А. А. Божко, В. Г. Гилёв, Н. В. Колчанов, А. С. Сидоров), Японии (Н. Yamaguchi, К. Fumoto), Китае (Q. Li, W. Lian), Латвии (E. Blums, A. Mezulis) и Белоруссии (В. Г. Баштовой, М. С. Краков). Теоретическими и численными исследованиями конвективной устойчивости, а так же течений неоднородно нагретой магнитной жидкости занимались: P. N. Kaloni, J. X. Lou, M. Lücke, М. И. Шлиомис, А. Ф. Пшеничников, Б. Л. Смородин, С. А. Суслов и другие. Изучались течения в сосудах различной геометрии: горизонтальном и вертикальном слоях, связанных каналах, ячейках Хеле–Шоу, кубе и шаре. Методики измерения свойств магнитных жидкостей разрабатываются в работах А. В. Лебедева, А. С. Иванова, П. А. Ряполова.

**Целью** диссертационной работы является определение условий, обеспечивающих наибольшую интенсивность тепловой (гравитационной и термомагнитной) конвекции феррожидкости в замкнутом контуре, определение скорости течения и безразмерного теплопотока (числа Нуссельта) в этих условиях.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Спроектирована, изготовлена и протестирована экспериментальная установка, состоящая из теплообменного устройства в виде замкнутого протяжённого гидродинамического контура и дополнительного оборудования, обеспечивающего проведение температурных измерений в контролируемых условиях теплообмена.
2. Получено аналитическое решение задачи о конвективном переносе тепла магнитной жидкостью вдоль охлаждаемого участка контура, применимое как в ситуации размещения нагревателя во внешнем градиентном магнитном поле, так и в нулевом магнитном поле.

3. Разработан метод анализа результатов температурных измерений, позволяющий рассчитать скорость потока жидкости в контуре, её объёмный расход и безразмерный тепловой поток (число Нуссельта). Метод апробирован в экспериментах с однокомпонентной жидкостью.
4. Изучено влияние объёмной доли магнитных наночастиц в феррожидкости, напряжённости внешнего магнитного поля и места расположения его источника на интенсификацию теплопереноса за счёт термомагнитной конвекции.
5. Исследованы особенности конвективного теплопереноса при воздействии сильного магнитного поля на контур с магнитной жидкостью, подверженной концентрационному расслоению с образованием капельных агрегатов. Проведены контрольные опыты над магнитной жидкостью, устойчивой к образованию капельных агрегатов, определившие роль последних в интенсификации или ослаблении течения.

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

1. Проанализирована степень влияния термомагнитной конвекции на интенсивность теплопереноса вдоль протяжённого вертикального замкнутого контура с исключением конкуренции термогравитационного и термомагнитного течений. Важную роль при этом играли простота и надёжность температурных измерений. Экспериментально доказано, что в режиме стационарного течения температура вдоль охлаждаемой части контура спадает экспоненциально.
2. Получены аналитические зависимости, однозначно связывающие скорость течения жидкости, объёмный расход и безразмерный тепловой поток (число Нуссельта) с показателем экспоненты. Единственным управляющим параметром в этих соотношениях выступает безразмерный коэффициент теплоотдачи — число Био, надёжно определённое в независимом эксперименте.
3. Показано, что измеренного в эксперименте декремента затухания температурного возмущения (показателя экспоненты) достаточно для того, чтобы однозначно судить о величине вклада термомагнитной конвекции в объёмный расход жидкости и число Нуссельта. Информация о свойствах жидкости для этого не требуется.
4. Экспериментально установлена доля твёрдой фазы в магнитной жидкости, при которой удовлетворяются противоречивые условия интенсификации термомагнитной конвекции: высокая намагниченность и низкая вязкость раствора.
5. Предложена гипотеза, объясняющая существенное отличие конвективного теплопереноса феррожидкостями с различным дисперсным составом частиц. Жидкость с крупнодисперсной фракцией при воздействии сильного магнитного поля блокирует глобальное циркуляционное течение в контуре благодаря формированию капельных агрегатов. Очищенный от крупных частиц путём магнитной сепарации коллоидный раствор, напротив, даёт шестикратное увеличение безразмерного теплотокса за счёт термомагнитной конвекции в сильном магнитном поле.

**Практическая значимость** заключается в том, что результаты проведённых исследований расширяют знания о тепловой конвекции магнитных жидкостей под действием магнитного и гравитационного полей, демонстрируя возможность многократного повышения интенсивности теплопереноса за счёт правильного выбора геометрии установки, концентрации и дисперсного состава частиц в жидкости. Результаты востребованы как в практических задачах конструирования пассивных охлаждающих устройств, так и при постановке новых экспериментов.

### **Методология и методы исследования**

Проведены эксперименты с использованием вертикального гидродинамического контура, выполненного из тонкой трубки круглого сечения. Подвод тепла осуществлялся на коротком вертикальном участке контура, отвод — обдувом всей внешней поверхности трубки термостатированным воздухом. Неоднородное магнитное поле, источником которого служили плоские полюсные наконечники ферритового магнитопровода, накладывалось на участок контура вблизи нагревателя. В контрольных опытах источник поля демонтировался. Контур заполнялся магнитными жидкостями типа «магнетит–керосин–олеиновая кислота» умеренных концентраций. Интенсивность стационарного интегрального конвективного теплопотока вдоль контура рассчитывалась по результатам температурных измерений поверхности трубки медь–константановыми термопарами. В расчётах использовались методы регрессионного анализа. Окончательные результаты представлялись в безразмерном виде — взаимосвязи числа Нуссельта и теплового числа Рэлея.

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

1. Оптимальная геометрия магнитожидкостного теплообменного устройства в виде протяжённого замкнутого контура с сосредоточенным источником тепла, размещённом во внешнем неоднородном магнитном поле, наиболее градиентная область которого накладывалась на выходное сечение нагревателя, позволяет при равных тепловых числах Рэлея увеличить число Нуссельта в 2–4 раза за счёт термомагнитной конвекции.
2. Скорость течения жидкости, её объёмный расход и тепловой поток вдоль протяжённого замкнутого контура корректно описываются двумерной аналитической моделью теплообмена, при условии постоянства числа Био вдоль охлаждаемого участка контура. Предсказываемое моделью экспоненциальное затухание температуры вдоль контура подтверждается в экспериментах.
3. Отношение вкладов термомагнитной и термогравитационной конвекций в интегральный теплоперенос вдоль протяжённого замкнутого контура однозначным образом рассчитывается по результатам измерений температуры поверхности контура при условии постоянства коэффициента теплоотдачи.
4. Интенсивность конвективного теплопереноса в сильно неоднородном магнитном полекратно возрастает при использовании в качестве теплоносителя магнитной жидкости, удовлетворяющей одновременно требованиям малой вязкости и высокой намагнитченности с исключением образования капельных агрегатов.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается физической обоснованностью постановки эксперимента и используемых моделей, применением общепринятых и апробированных методов измерения и расчёта свойств магнитных жидкостей, тщательной настройкой термоизмерительной аппаратуры, тщательной математической обработкой первичных экспериментальных данных и критическим анализом полученных результатов, согласованностью и повторяемостью результатов многократно проведённых тестовых опытов, учётом доступных результатов работ других авторов.

### **Апробация работы**

Результаты работы представлялись на следующих конференциях и семинарах: 19-я Международная плесская конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям (Иваново, 8–11 сентября 2020 г.), XXII Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 22–26 марта 2021 г.), VII международная ставропольская конференция по магнитным коллоидам (Ставрополь, 5–9 сентября 2021 г.), XX Юбилейная Всероссийская с международным участием плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям (Плес, 1–30 сентября 2022 г.), Пермские гидродинамические научные чтения (Пермь, 5–7 октября 2022 г.), VIII Ставропольская международная конференция по магнитным коллоидам ISCMC2023 (Ставрополь, 10–14 сентября 2023 г.), XXI Всероссийская с международным участием плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям (Плес, 10–13 сентября 2024 г.), XXIV Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 24–28 февраля 2025 г.), Пермский гидродинамический семинар (Пермь, 6 марта 2025 г.), Научный семинар Института механики сплошных сред (Пермь, 12 марта 2025 г.).

### **Личный вклад**

Автором самостоятельно выполнены все экспериментальные работы, представленные в диссертации, а именно: проектирование и изготовление экспериментальной установки [A5], измерение её параметров включая напряжённость магнитного поля в месте размещения нагревателя [A3], измерение вязкости и расчёт теплофизических свойств исследуемых жидкостей [A4]. Автором самостоятельно выполнены все температурные измерения и предложена методика их анализа, основанная на полученных автором аналитических формулах [A5], [A6], с использованием которой автором измерены числа Нуссельта [A1; A2], [A4], [A5], [A6; A7] и скорость течения магнитной жидкости [A3]. Вывод упрощённых формул в п. 2.4.3 главы 2 [A4], обсуждение и интерпретация результатов производились совместно с соавтором д-р. физ.-мат. наук, проф. А. Ф. Пшеничниковым.

Все представленные в диссертации и выносимые на защиту положения получены автором лично.

### **Публикации**

Результаты по теме диссертации изложены в 16 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 3 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 2 — в прочих рецензируемых журналах, 9 — в сборниках трудов конференций и тезисах докладов.

## Содержание работы

Во **введении** даны актуальность и степень разработанности темы исследования, сформулирована цель и задачи работы, отражена научная новизна и практическая значимость работы, приведены выносимые на защиту положения.

В **первой главе** представлен обзор литературы по теме диссертации. Первая часть обзора посвящена двум механизмам тепловой конвекции магнитной жидкости: термогравитационному и термомагнитному. Вводятся тепловое и магнитное числа Рэлея, определяющие вклады указанных типов конвекции в интенсивность теплопереноса

$$\text{Ra} = \frac{g\beta\rho r_1^3}{\eta a} \Delta T, \quad \text{Ra}_m = \frac{\mu_0\beta_m M |\nabla H| r_1^3}{\eta a} \Delta T, \quad (1)$$

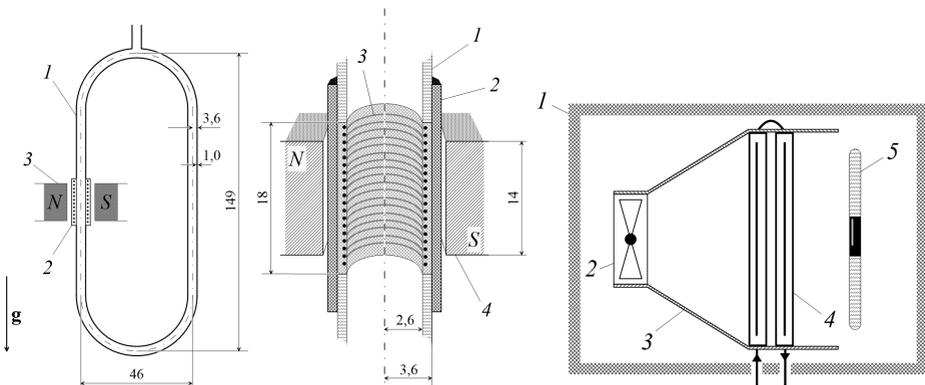
где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ;  $\rho$ ,  $\beta$ ,  $\eta$ ,  $a$  — плотность, коэффициент объёмного теплового расширения, вязкость, и температуропроводность жидкости соответственно;  $M$ ,  $\beta_m = -M^{-1}(\partial M/\partial T)$  — её намагничённость и температурный коэффициент намагничённости;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ . Градиент напряжённости магнитного поля —  $\nabla H$ , характерный размер сосуда —  $r_1$  и характерный перепад температуры —  $\Delta T$ . Приводятся теоретические оценки, из которых следует потенциальная возможность кратного усиления теплопереноса за счёт термомагнитной конвекции. В конкретных задачах, в том числе экспериментальных [1; 2], усиление теплообмена оказывается значительно меньшим, чем ожидалось из оценок. Причина — неподходящая для термомагнитной конвекции геометрия теплообменных устройств. Предлагается способ решения этой проблемы путём использования в качестве теплообменника протяжённого замкнутого контура. Во второй части главы приводятся расчётные формулы и методики измерений свойств магнитных жидкостей, необходимые для диссертационного исследования.

Во **второй главе** дано описание экспериментальной установки и результаты тестовых опытов, обосновывается методика измерений.

Эксперименты проводились в вертикальном замкнутом контуре овальной формы, изготовленном из тонкой стеклянной трубки круглого сечения (рис. 1а). Нагреватель клеивался в разрез вертикального участка контура и охватывался неоднородным магнитным полем, созданным полюсными наконечниками намагничивающей системы (рис. 1б). Оставшаяся, охлаждаемая часть контура обдувалась потоком термостатированного воздуха (рис. 1в), который отводил тепло непосредственно с поверхности контура без использования радиаторов.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  с поверхности контура измерен в независимом эксперименте и равен  $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Пространственная однородность коэффициента теплоотдачи легла в основу методики измерений объёмного расхода жидкости и интегрального теплового потока через поперечное сечение трубки при стационарной конвекции. Путём решения уравнения Фурье–Кирхгофа [3] показано, что температурное возмущение вдоль охлаждаемой части контура затухает экспоненциально:

$$T \propto \exp(-kz/L), \quad (2)$$



а) Контур. 1 — трубка, 2 — нагреватель, 3 — магнитная система. б) Устройство нагревателя. 1 — трубка, 2 — эбонитовый цилиндр, 3 — обмотка, 4 — полусные наконечники. в) Схема воздушного термостата. 1 — теплоизолирующий кожух, 2 — вентилятор, 3 — диффузор, 4 — теплообменник, 5 — контур.

Рисунок 1 — Основные элементы экспериментальной установки. Размеры в мм.

где  $L = 35\text{ см}$  — длина контура,  $z$  — продольная координата, отсчитанная от центра нагревателя. При анализе решения задачи о теплопереносе получены соотношения, связывающие показатель экспоненты  $k$  со скоростью течения жидкости на оси трубки  $v_0$  и её объёмным расходом  $q_V$ :

$$v_0 = \frac{6\text{Bi}(4+\text{Bi})}{(6+4\text{Bi}+0,75\text{Bi}^2)} \cdot \frac{aL}{r_1^2 k}, \quad q_V = \frac{\pi r_1^2 v_0}{2}, \quad (3)$$

где  $r_1 = 2,6\text{ мм}$  — внутренний радиус трубки,  $\text{Bi} = \alpha r_2 / \lambda$  — число Био,  $r_2 = 3,6\text{ мм}$  — внешний радиус трубки,  $\lambda$  — теплопроводность жидкости.

В работе также получено выражение для безразмерного интегрального теплового потока — числа Нуссельта  $\text{Nu}$ . Оно определено как отношение конвективного теплопотока вдоль трубки к молекулярному теплопотоку без учёта тепловых потоков внутри стенок [4]:

$$\text{Nu} = \frac{4\text{Bi}(3+\text{Bi})}{(6+4\text{Bi}+0,75\text{Bi}^2)} \cdot \frac{1}{b^2 k^2}. \quad (4)$$

Важно отметить, что число Нуссельта обратно пропорционально произведению квадрата пространственного декремента затухания температуры  $k$  на геометрический параметр  $b = r_1 / L$ . В эксперименте  $b = 7,4 \cdot 10^{-3} \ll 1$  (рис. 1а), а температурное возмущение затухает на расстоянии порядка длины контура ( $k \sim 1$ ), что соответствует многократному превышению конвективного теплопотока над молекулярным.

Температурные измерения производились при помощи медь–константановых термопар, горячие спаи которых находились на поверхности контура (рис. 2), а

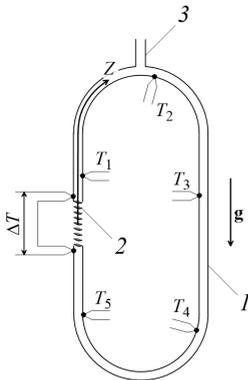


Рисунок 2 — Схема размещения сплавов термопар на поверхности контура и система координат. 1 — трубка, 2 — нагреватель, 3 — отвод.

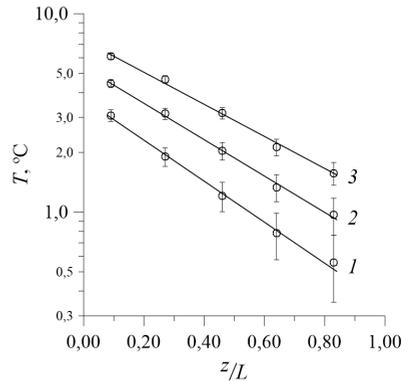


Рисунок 3 — Установившаяся температура вдоль контура с ундеканом при  $\Delta T$ : 1 — 3,8, 2 — 5,5 и 3 — 7,4 °C. Точки — эксперимент, линии — аппроксимации экспонентами.

холодные поддерживались при температуре охлаждающего воздуха. Перепад температуры  $\Delta T$  измерялся дополнительной термопарой, горячий и холодный спаи которой находились вблизи верхнего и нижнего концов нагревателя соответственно.

При проверке предположения (2) контур заполнялся *n*-ундеканом. Установившиеся при различных мощностях нагревателя профили температуры вдоль контура аппроксимировались экспонентами по методу наименьших квадратов. Как видно из рис. 3 экспериментальные точки легли на аппроксимирующие кривые в пределах погрешности. Этот результат — основной аргумент в пользу применимости формул (3; 4) в дальнейших экспериментах.

**Третья глава** посвящена интенсификации теплопереноса в контуре за счёт термомагнитной конвекции магнитной жидкости во внешнем неоднородном магнитном поле. Рассмотрены два фактора влияющие на теплоперенос: объёмная доля магнитных наночастиц в жидкости  $\varphi_s$  и расположение источника магнитного поля относительно нагревателя.

Для получения информации о влиянии концентрации магнитных частиц использовано четыре образца феррожидкости типа «магнетит–керосин–олеиновая кислота». Образцы получены путём разбавления керосином базовой концентрированной жидкости и потому имели одинаковый дисперсный состав. Некоторые свойства образцов приведены в таблице 1. Каждый образец использовался в двух сериях конвективных опытов: 1) в режиме только гравитационной конвекции в нулевом магнитном поле и 2) в режиме смешанной (термомагнитной и гравитационной) конвекции при наложении градиентного магнитного поля с амплитудой напряжённости 23 кА/м на нагреваемый участок контура. Дополнительно, проводились поверочные эксперименты с чистым керосином, выступавшим предельным случаем магнитной жидкости с нулевой концентрацией частиц. Пример установившихся профилей

температуры вдоль контура с магнитной жидкостью приведён на рис. 4. Как и в случае с ундеканом (рис. 3) экспериментальные профили хорошо аппроксимируются загибающимися экспонентами. При включении магнитного поля, инициирующего термомагнитную конвекцию, наклон аппроксимирующих кривых  $k$  уменьшается, что говорит об усилении теплопереноса. Принятое в опытах по тепловой конвекции представление результатов эксперимента в виде зависимости числа Нуссельта (4) от теплового числа Рэлея (1) показано на рис. 5. Как и ожидалось, результаты всех опытов в нулевом магнитном поле ложатся на одну универсальную кривую. В магнитном поле безразмерный тепловой поток оказывается в 2,5–3,5 раза больше. Максимальный вклад термомагнитной конвекции в теплоперенос наблюдается в образцах с  $\varphi_s = 0,06–0,08$ . При меньшей концентрации интенсивность конвекции уменьшается за счёт уменьшения намагниченности, при большей — за счёт увеличения вязкости. В случае умеренных концентраций эти механизмы компенсируют друг друга.

Таблица 1 — Свойства образцов магнитной жидкости и керосина при 27 °С.

	$\rho, \text{г/см}^3$	$\varphi_s$	$a \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$\eta, \text{мПа} \cdot \text{с}$	$M_\infty, \text{кА/м}$	$\langle m \rangle \cdot 10^{19}, \text{А} \cdot \text{м}^2$
Керосин	0,78	0,000	7,0	1,07	—	—
Обр. 1	0,96	0,040	7,6	1,63	—	—
Обр. 2	1,05	0,061	7,9	2,26	21,0	1,66
Обр. 3	1,13	0,078	8,1	2,72	—	—
Обр. 4	1,22	0,100	8,4	3,74	—	—
Базовый	1,45	0,151	9,2	—	52,0	1,61

$M_\infty$  — намагниченность насыщения,  $\langle m \rangle$  — средний магнитный момент частиц.

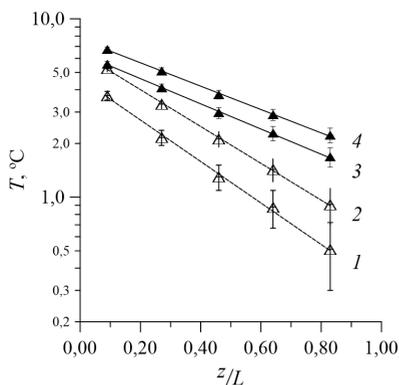


Рисунок 4 — Установившиеся профили температуры в опытах с образцом № 1. В нулевом магнитном поле при  $\Delta T$ : 1 — 4,5 °С, 2 — 6,3 °С. В градиентном поле 3 — 5,3 °С, 4 — 6,4 °С.

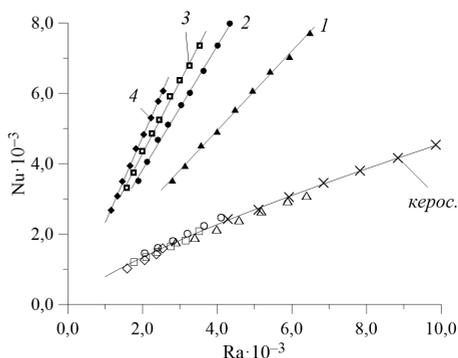


Рисунок 5 — Число Нуссельта в зависимости от теплового числа Рэлея. Тёмные символы соответствуют опытам в градиентном магнитном поле, светлые — в нулевом поле. Нумерация кривых соответствует табл. 1.

Дополнительные опыты, направленные на измерение скорости течения в режиме комбинированной термомагнитной и гравитационной конвекции (3) при различных мощностях нагревателя  $P$  проводились с образцом №2 (табл. 1). Амплитуда напряжённости магнитного поля была повышена до  $H_{\max} = 29 \text{ кА/м}$ . Результаты измерений показаны точками 1 на рис. 6. Кривая 2 соответствует аналитическому расчёту, выполненному д-р. физ.-мат. наук, проф. А. Ф. Пшеничниковым без учёта гравитационной конвекции. В расчёте использовалась аппроксимация распределения магнитного поля в окрестности нагревателя (рис. 7), построенная на основании результатов измерения напряжённости поля в воздушном зазоре намагничивающей системы (рис. 16). Результат расчёта скорости течения магнитной жидкости хорошо приближается степенным законом 3 ( $v_0 \propto P^{0,523}$ ) близким к корневому. Экспериментальные точки лежат выше теоретической кривой на 16–20%. Это расхождение говорит о заметном, но относительно слабом влиянии гравитационной конвекции на скорость конвективного течения по сравнению с влиянием термомагнитной, что качественно соответствует эксперименту.

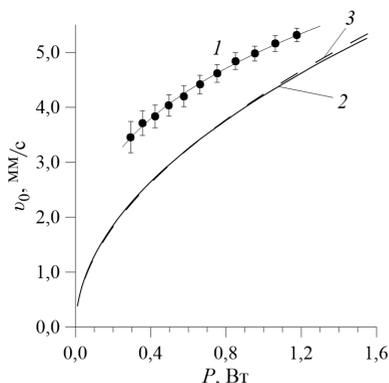


Рисунок 6 — Скорость течения в зависимости от мощности нагревателя. 1 — эксперимент в режиме комбинированной конвекции, 2 — расчёт для термомагнитной конвекции, 3 — степенной закон:  $v_0 \propto P^{0,523}$ .

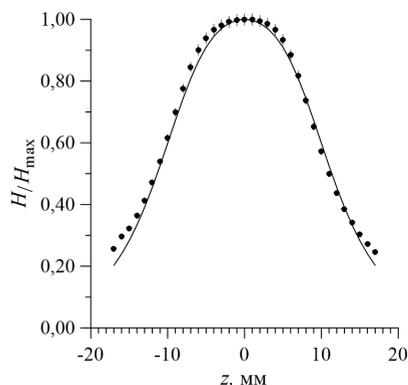


Рисунок 7 — Магнитное поле в воздушном зазоре намагничивающей системы, нормированное на его амплитудное значение. Точки — эксперимент, сплошная линия — аппроксимация.

Поиск оптимального расположения источника неоднородного магнитного поля относительно нагревателя производился в экспериментах со смещением полюсных наконечников магнитной системы по вертикали относительно положения, показанного на рис. 16. Амплитуда напряжённости магнитного поля составляла  $29 \text{ кА/м}$ . В этих опытах использовался образец магнитной жидкости с оптимальной объёмной долей кристаллического магнетита  $\varphi_s = 0,073$ . При смещении источника поля вверх наблюдалось повышение температуры снизу от нагревателя (рис. 8), что говорило о течении жидкости против оси  $z$  (см. рис. 2) и конкуренции термомагнитной и гравитационной конвекции. Напротив, при смещении полюсных наконечников к центру

и ниже нагреваемого участка наблюдалось согласованное направление двух видов конвекции и усиление теплопереноса. Как следует из зависимостей  $Nu(Ra)$  (рис. 9), наибольший вклад термомагнитной конвекции в безразмерный теплопоток обнаружен при расположении источника поля в центре и на 5 мм ниже нагревателя. Такой результат объясняется качественным анализом формулы для некомпенсированной гидростатическим давлением пондеромоторной (объёмной) силы  $-\mu_0\beta_m T M \nabla H$ , вызывающей термомагнитную конвекцию [5]. Модуль этой силы максимален, при наложении наиболее градиентной области поля на выходное сечение нагревателя, где температурное возмущение  $T$  максимально. В эксперименте это достигалось при расположении полюсных наконечников вблизи центра нагревателя.

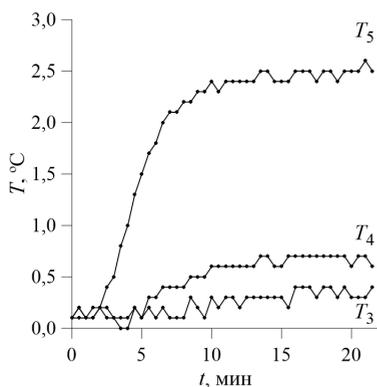


Рисунок 8 — Температура поверхности контура в зависимости от времени работы нагревателя при смещении полюсных наконечников на 10 мм выше середины нагревателя.

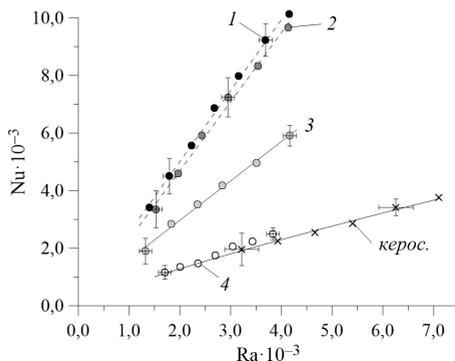


Рисунок 9 — Число Нуссельта в зависимости от теплового числа Рэлея в опытах с размещением источника магнитного поля 1 — в центре нагревателя, на 2 — 5 и 3 — 10 мм ниже. В нулевом магнитном поле 4 и в опытах с керосином (×).

**Четвертая глава** посвящена обнаруженному соискателем экспериментально явлению ослабления конвективного теплопереноса при наложении сильного градиентного магнитного поля на участок контура вблизи нагревателя. Выдвигается предположение о «тромбировании» контура каплевыми агрегатами [6], образующимися в магнитной жидкости под воздействием сильного поля. Гипотеза аргументируется результатами опыта, проведённого с очищенным от крупных частиц, ответственных за формирование агрегатов, образцом магнитной жидкости.

В эксперименте, демонстрирующем остановку охватывающего контур течения, использовалась магнитная жидкость типа «магнетит в керосине» приготовленная стандартным методом химического осаждения [5] без дополнительных мер по удалению из раствора крупных частиц. Разбавление жидкости керосином не производилось, поскольку сравнительно высокая концентрация магнетита ( $\varphi_s = 0,090$ ) требовалась для большей наглядности результата опыта. Этот результат представлен в виде

термограмм на рисунке 10, где  $t$  — время работы нагревателя. Сначала (рис. 10а), в нулевом магнитном поле, устанавливается глобальная гравитационная конвекция. При включении сильного, с амплитудой напряжённости 190 кА/м, магнитного поля сигнал с удалённых от нагревателя (рис. 2) термопар  $T_2, T_3$  уменьшается до нуля, что говорит об остановке охватывающего контур течения. Такая ситуация сохраняется в течение суток. Далее, магнитное поле выключается (рис. 10б), однако восстановления глобальной циркуляции не наблюдается. Меняется лишь сигнал термопар  $T_1$  и  $\Delta T$ , реагирующих на локальную конвекцию вблизи нагревателя. Причиной тому предполагается образование капельных агрегатов в сильном поле и их осаждение на стенках нагревателя вследствие магнитофореза.

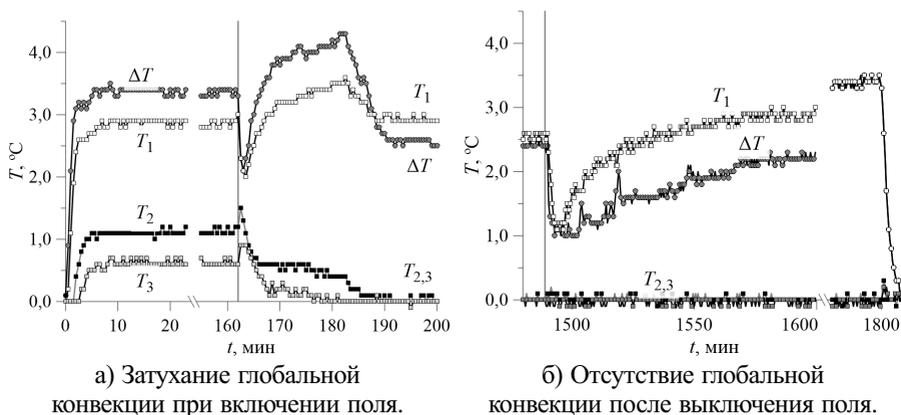


Рисунок 10 — Термограммы опыта, демонстрирующего ослабление тепловой конвекции в сильном магнитном поле. Моменты включения и выключения поля показаны вертикальными линиями.

Для исключения влияния капельных агрегатов на термомангнитную конвекцию, путём магнитной сепарации подготовлен образец магнитной жидкости не содержащий крупных частиц. Процесс сепарации заключался в длительном воздействии на сосуд с раствором сильного магнитного поля, образовании и осаждении на стенках сосуда капельных агрегатов с последующим отбором оставшейся жидкости. В качестве исходной использовалась магнитная жидкость с умеренной (4,12 %) объёмной долей магнетита. Свойства исходного и сепарированного образцов приведены в таблице 2.

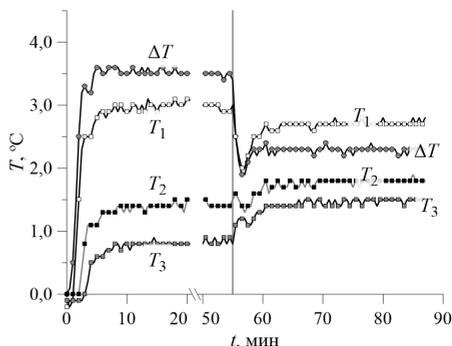
Таблица 2 — Свойства исходной и сепарированной магнитной жидкости.

	$\rho, \text{г/см}^3$	$\varphi_s$	$\eta, \text{мПа}\cdot\text{с}$	$M_\infty, \text{кА/м}$	$\langle m \rangle \cdot 10^{19}, \text{А}\cdot\text{м}^2$	$\chi_0$
Исход.	0,963	0,0412	1,59	11,3	2,9	0,860
Сепар.	0,944	0,0369	1,57	10,1	2,6	0,656

$\chi_0$  — начальная магнитная восприимчивость.

Представленный выше эксперимент (рис. 10) проведён повторно с сепарированной жидкостью. Термограмма, демонстрирующая изменения температуры вдоль контура при включении сильного поля показана на рис. 11. В отличие от предыдущего опыта, перепад температуры  $\Delta T$  на нагревателе уменьшается и температура  $T_3$  на противоположном вертикальном участке петли увеличивается, что говорит об усилении конвективного теплопереноса.

Рисунок 11 — Термограмма, демонстрирующая усиление конвективного теплопереноса магнитной жидкостью при включении (вертикальная линия) сильного магнитного поля.



В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Спроектирована, изготовлена и протестирована оригинальная экспериментальная установка для исследования теплового конвективного течения магнитной жидкости в локально нагреваемом сбоку замкнутом вертикальном протяжённом контуре, коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности которого поддерживается постоянным.
2. Экспериментально показано, что в условиях стационарной конвекции вдоль охлаждаемой части контура устанавливается экспоненциальное распределение температуры.
3. Впервые построена двумерная модель теплообмена в контуре, позволяющая рассчитать скорость потока жидкости, объёмный расход и безразмерный интегральный тепловой поток (число Нуссельта) через определяемые в эксперименте показатели экспоненты и число Био.
4. Впервые установлено, что наибольшее усиление теплопереноса за счёт термомагнитной конвекции достигается при использовании в контуре магнитной жидкости с объёмной долей кристаллического магнетита 6–8%.
5. По результатам температурных измерений определена характерная скорость комбинированной (гравитационной и термомагнитной) конвекции в замкнутом контуре. В магнитном поле напряжённостью 29 кА/м амплитуда скорости варьировалась от 3 до 6 мм/с, нелинейно увеличиваясь с мощностью нагревателя.
6. Впервые установлено, что наложение области с наибольшим градиентом магнитного поля на выходное сечение нагревателя обеспечивает максимальный

- конвективный теплоперенос при прочих равных условиях. При этом в магнитном поле с амплитудой 29 кА/м интенсивность конвективного теплопереноса увеличивается в два–четыре раза по сравнению с конвекцией в нулевом поле.
7. Предложена гипотеза, объясняющая сильное влияние дисперсного состава частиц на интенсивность конвекции формированием в магнитной жидкости капельных агрегатов. Впервые показано, что использование феррожидкости, очищенной от частиц, ответственных за формирование капельных агрегатов, позволяет использовать магнитное поле с амплитудой до 190 кА/м и получить усиление безразмерного интегрального теплопотока в шесть и более раз.

## Публикации автора по теме диссертации

### В изданиях из списка ВАК РФ

- A1. *Косков, М. А.* Конвекция магнитной жидкости в замкнутом гидродинамическом контуре [Текст] / **М. А. Косков**, А. Ф. Пшеничников // Вестник Пермского университета. Физика. — 2021. — № 2. — С. 14–22.
- A2. *Косков, М. А.* Терромагнитная конвекция в гидродинамическом контуре: роль капельных агрегатов [Текст] / **М. А. Косков**, А. Ф. Пшеничников // Вестник Пермского университета. Физика. — 2023. — № 4. — С. 45–54.

### В изданиях, входящих в международную базу цитирования Web of Science

- A3. *Pshenichnikov, A. F.* Thermomagnetic pump and thermomagnetic convection in a closed hydrodynamic loop [Текст] / A. F. Pshenichnikov, **M. A. Koskov** // Physics of Fluids. — 2024. — Vol. 36, no. 092023.
- A4. *Косков, М. А.* Терромагнитная конвекция феррожидкости в вертикальном гидродинамическом контуре: интенсификация теплообмена в магнитном поле [Текст] / **М. А. Косков**, А. Ф. Пшеничников // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2022. — Т. 162, 6(12). — С. 926–940.

### В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

- A5. *Koskov, M.* Technical framework for studying thermomagnetic convection in an extended closed loop [Текст] / **M. Koskov** // Magnetohydrodynamics. — 2022. — Vol. 58, no. 3. — P. 267–274.

### В прочих рецензируемых изданиях

- A6. *Косков, М. А.* Конвекция феррожидкости в замкнутом контуре: анализ температурного поля [Текст] / **М. А. Косков** // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. — 2022. — Т. 12, № 2. — С. 166–182.
- A7. *Косков, М. А.* Влияние расположения источника неоднородного магнитного поля на интенсивность терромагнитной конвекции в замкнутом контуре [Текст] / **М. А. Косков** // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 52–64.

## Список литературы

1. *Blums, E.* Magnetoconvective heat transfer from a cylinder under the influence of a nonuniform magnetic field [Текст] / E. Blums, A. Mezulis, G. Kronkalns // *Journal of Physics: Condensed Matter*. — 2008. — Vol. 20, no. 20 204128.
2. Influence of thermomagnetic convection and ferrofluid thermophysical properties on heat transfers in a cylindrical container heated by a solenoid [Текст] / R. Zanella [et al.] // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. — 2019. — Vol. 469. — P. 52–63.
3. *Исаченко, В. П.* Теплопередача [Текст] / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — М. : Энергия, 1975. — 487 с.
4. *Остроумов, Г. А.* Свободная конвекция в условиях внутренней задачи [Текст] / Г. А. Остроумов. — М.-Л. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952.
5. *Берковский, Б. М.* Магнитные жидкости [Текст] / Б. М. Берковский, В. Ф. Медведев, М. С. Краков. — М. : Химия, 1989.
6. *Peterson, E. A.* Reversible, field induced agglomeration in magnetic colloids [Текст] / E. A. Peterson, D. A. Krueger // *Journal of Colloid and Interface Science*. — 1977. — Vol. 62, no. 1. — P. 24–34.

*Косков Михаил Андреевич*

Тепловая конвекция феррожидкости  
в протяжённом замкнутом контуре: термомагнитный механизм интенсификации течения

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_