

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и инновациям
ФГАОУ ВО «Пермский государственный
национальный исследовательский
университет»

кандидат физико–математических наук
Владимир Александрович Ирха



Ирха

2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Пермский государственный национальный исследовательский университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертационная работа Коскова Михаила Андреевича «Тепловая конвекция феррожидкости в протяженном замкнутом контуре: термомагнитный механизм интенсификации течения» выполнена на кафедре физики фазовых переходов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

В 2019 г. М.А. Косков окончил бакалавриат ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по направлению «Физика», в 2021 г. окончил магистратуру ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», по направлению «Физика», профиль подготовки 03.04.01 «Прикладные математика и физика» с присвоением квалификации «магистр».

В период подготовки диссертации (с 25 августа 2021 г. по настоящее время) соискатель ученой степени кандидата физико–математических наук Косков Михаил Андреевич обучался в очной аспирантуре ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» на кафедре физики фазовых переходов, по направлению подготовки 01.06.01– «Математика и механика», специальность 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

С 2019 г. по 2021 г. работал в Институте механики сплошных сред в должности инженера, с 2021 г по настоящее время работает в Институте механики сплошных сред в должности младшего научного сотрудника, с 2021 г. по 2025 г. в ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» в должности ассистента на кафедре физики фазовых переходов.

Справка № 486 о сдаче кандидатских экзаменов (история и философия науки – «отлично», английский язык – «отлично», научная специальность 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы» – «отлично») выдана 14 февраля 2025 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

Научный руководитель – Смородин Борис Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики фазовых переходов Пермского государственного национального исследовательского университета.

По итогам обсуждения на расширенном заседании кафедры физики фазовых переходов физико-математического института принято следующее заключение:

Актуальность темы диссертационной работы.

В работе проводится экспериментальное исследование процессов интенсификации теплового конвективного течения магнитной жидкости в протяженном контуре, расположенном в неоднородном магнитном поле. Термомагнитный механизм конвекции оказывает значительное влияние на интенсивность течения, создаваемого локальным нагревателем, и сопутствующий теплоперенос вдоль контура. В ходе работы сконструирована, отестирована и оптимизирована экспериментальная установка; получена аналитическая модель теплопереноса; разработана методика и проведены тепловые измерения, доказывающие возможность кратного увеличения теплотока вдоль контура.

Знание характера и понимание особенностей течений магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле актуально для практических задач управления массо- и теплопереносом в технологических системах.

Цель работы – создание условий максимальной интенсификации термомагнитного течения в протяженном замкнутом контуре и получение информации о сопутствующем теплопереносе.

Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации

Автор самостоятельно выполнил все представленные в диссертации экспериментальные работы: проектирование и изготовление экспериментальной установки, измерение её параметров, включая напряжённость магнитного поля в месте размещения нагревателя, измерение вязкости и расчёт теплофизических свойств исследуемых образцов жидкости; провел все температурные измерения и предложил методику их анализа, основанную на полученных автором аналитических формулах (измерены числа Нуссельта и скорость течения магнитной жидкости); интерпретировал часть результатов глав 2 - 4 диссертации и написал статьи 1, 4, 7 из списка работ (см. ниже); выступал на научных конференциях с докладами по теме диссертации. Вывод упрощённых формул из раздела 2.4.3, обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с соавтором д-р. физ.-мат. наук, проф. А. Ф. Пшеничниковым.

Представленные в диссертации и выносимые на защиту основные положения получены автором лично.

Степень достоверности результатов проведенных соискателем исследований обеспечивается физической обоснованностью постановки эксперимента и используемых моделей; применением общепринятых и апробированных методов измерения, расчёта и анализа свойств магнитных жидкостей; тщательной тарировкой шкал термоизмерительной аппаратуры и математической обработкой первичных экспериментальных данных; критическим анализом полученных результатов, согласованностью и повторяемостью результатов многократно проведённых тестовых опытов, учётом доступных результатов работ других авторов.

Научная новизна

1. Проанализировано влияние термомагнитного конвективного механизма на интенсивность теплопереноса вдоль протяжённого вертикального замкнутого контура при исключении противодействия термомагнитного и термогравитационного течений. Особое внимание уделено конструкции установки и измерительной системы, обеспечивающей простоту и надёжность температурных измерений. Экспериментально доказано, что при

стационарном течении температура вдоль охлаждаемой части контура спадает экспоненциально.

2. Получены аналитические соотношения, однозначно связывающие скорость течения магнитной жидкости, ее объёмный расход и безразмерный тепловой поток (число Нуссельта) с показателем затухания температуры вдоль контура. Управляющим параметром в этих соотношениях выступает число Био, надёжно определённое в независимом эксперименте.

3. Показано, что экспериментальные данные о величине декремента затухания - температурного возмущения (показателя экспоненты) достаточны для однозначного заключения о величине вклада термомагнитной конвекции в объёмный расход жидкости и число Нуссельта. Дополнительной информации о свойствах жидкости для этого не требуется.

4. Экспериментально установлена объёмная доля твёрдой фазы в ферромагнитной жидкости, удовлетворяющая необходимым для значительной интенсификации термомагнитного течения противоречивым требованиям: низкой вязкости и высокой намагниченности магнитной жидкости.

5. Обоснован вывод о сильном влиянии дисперсного состава магнитной жидкости на интенсивность конвективного теплопереноса. Жидкость с крупнодисперсной фракцией при воздействии сильного магнитного поля блокирует глобальное сквозное течение в контуре и соответствующий теплоперенос. Очищенный с помощью магнитной сепарации от крупных частиц коллоидный раствор, даёт шестикратный рост теплотокла в сильном магнитном поле за счёт термомагнитной конвекции.

Практическая значимость заключается в том, что экспериментальное исследование течения неизотермических магнитных жидкостей в замкнутом протяженном контуре дополняет знания об их поведении под действием магнитного и гравитационного полей. При подборе оптимальных свойств магнитной жидкости и взаимного расположения нагревателя и источника магнитного поля продемонстрирована возможность значительного повышения интенсивности конвективного теплопереноса, благодаря воздействию на контур градиентного магнитного поля; результаты работы будут востребованы в практических задачах конструирования пассивных охлаждающих устройств, а также при постановке новых экспериментов.

Ценность научных работ соискателя обусловлена тем, что в них

1. Найдена оптимальная геометрия магнитожидкостного теплообменного устройства в виде протяженного контура (выходное сечение локального нагревателя размещено в наиболее градиентной области магнитного поля). Это позволяет за счёт термомагнитной конвекции увеличить число Нуссельта в 2 – 4 раза при фиксированном тепловом числе Релея.

2. Установлено, что скорость конвективного течения феррожидкости вдоль протяжённого замкнутого контура, её объёмный расход и тепловой поток корректно описываются, предложенной автором диссертации двумерной аналитической моделью теплообмена, при условии постоянства числа Био вдоль охлаждаемого участка контура. Предсказываемое моделью экспоненциальное затухание температуры вдоль контура подтверждается в экспериментах.

3. Показано, что отношение вкладов термогравитационной и термомагнитной конвекции в интегральный теплоперенос вдоль протяжённого замкнутого контура однозначным образом рассчитывается по результатам измерений температуры поверхности контура при условии постоянства коэффициента теплоотдачи.

4. Экспериментально доказано, что в сильно неоднородном магнитном поле интенсивность конвективного течения кратно возрастает при использовании магнитной жидкости, удовлетворяющей требованиям малой вязкости, высокой намагниченности, с

блокировкой образования капельных агрегатов.

Диссертация соответствует требованиям п. 14 Положения № 842 "О порядке присуждения ученых степеней". Соискатель ученой степени отмечает в диссертации обстоятельство использования в диссертации результатов научных работ, выполненных соискателем ученой степени лично и (или) в соавторстве.

Диссертация соответствует специальности 1.1.9 - Механика жидкости, газа и плазмы.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научных конференциях и семинарах:

1. 19-я Международная плесская конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям. Иваново, 8–11 сентября 2020 г.
2. XXII Зимняя школа по механике сплошных сред. Пермь, 22–26 марта 2021 г.
3. VII международная ставропольская конференция по магнитным коллоидам. Ставрополь, 5–9 сентября-2021 г.
4. XX Юбилейная Всероссийская с международным участием плесская-научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям. Плес, 1–30-сентября 2022 г.
5. VIII Ставропольская международная конференция по магнитным-коллоидам ISCMC2023. Ставрополь, 10–14 сентября 2023 г.
6. XXI Всероссийская с международным участием плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям. Плес, 10–13 сентября 2024 г.
7. XXIV Зимняя школа-по механике сплошных сред. Пермь, 24–28 февраля 2025 г.
8. Пермский гидродинамический семинар. Пермь, 2025 г.
9. Научный семинар Института-механики сплошных сред. Пермь, 2025 г.

Полнота изложения материалов диссертации.

Все основные результаты диссертационной работы полностью изложены в 7 работах, пять из которых – статьи в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК.

1. **М.А. Косков**, Конвекция феррожидкости в замкнутом контуре: анализ температурного поля // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2022. – 12. – № 2. – С. 166–182.
2. **М.А. Косков**, А.Ф. Пшеничников, Конвекция магнитной жидкости в замкнутом гидродинамическом контуре // Вестник Пермского университета. Физика. – 2021. – № 2. – С. 14–22. (ВАК)
3. **М.А. Косков**, А. Ф. Пшеничников, Термомагнитная конвекция в гидродинамическом контуре: роль капельных агрегатов// Вестник Пермского университета. Физика. –2023. – № 4. – С. 45–54. (ВАК)
4. **М.А. Косков**, Влияние расположения источника неоднородного магнитного поля на интенсивность термомагнитной конвекции в замкнутом контуре// Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2024. – 14 – № 3. – С. 52–64.
5. A.F. Pshenichnikov, **M.A. Koskov**, Thermomagnetic pump and thermomagnetic convection in a closed hydrodynamic loop, Physics of Fluids. – 2024. – V. 36. – 9. (WoS, Scopus)
6. **М.А. Косков**, А.Ф. Пшеничников, Термомагнитная конвекция феррожидкости в вертикальном гидродинамическом контуре: интенсификация теплообмена в магнитном поле // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2022. – 162 – № 6(12). – С 926–940. (WoS, Scopus)
7. **M. Koskov**, Technical framework for studying thermomagnetic convection in an extended closed loop // Magnetohydrodynamics. – 2022. – V. 58. – № 3. 267–274. (Scopus)

Перечисленные выше публикации полностью соответствуют теме диссертационного исследования. Основные положения содержательных глав диссертации изложены в статьях, напечатанных в рецензируемых журналах из перечня, рекомендованного ВАК: вторая глава [2; 6; 7], третья глава [5-6], четвертая глава [3].

Диссертация «Тепловая конвекция феррожидкости в протяженном замкнутом контуре: термомагнитный механизм интенсификации течения» Коскова Михаила Андреевича соответствует паспорту специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы» по физико–математическим наукам.

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые на защиту, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. При выполнении диссертационной работы Косков Михаил Андреевич проявил себя как квалифицированный научный работник, способный ставить и решать теоретические и практические задачи.

Диссертация Коскова Михаила Андреевича «Тепловая конвекция феррожидкости в протяженном замкнутом контуре: термомагнитный механизм интенсификации течения» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико–математических наук по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Заключение принято на расширенном заседании кафедры физики фазовых переходов Физико–математического института ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

В голосовании приняли участие 21 человек. Результаты голосования: «за» – 21 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 6 от «06» марта 2025 г.



Барулина Марина Александровна,
д.ф.–м.н, директор Физико–математического,
института, председатель заседания кафедры
нанотехнологий и микросистемной техники



Скачкова Елена Александровна,
начальник отдела сопровождения учебного процесса
Физико–математического института, секретарь
заседания кафедры нанотехнологий и
микросистемной техники

01 апреля 2025 г.

ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», 614990, г. Пермь, ул. Буковская, 15, тел. 8 (342) 2396227, факс (342) 2371611
e-mail: info@psu.ru



Барулина М.А.
Скачкова Е.А. заверяю
ченую секретарь
Е.А. Скачкова