

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)  
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 19.06.2025 № 150

О присуждении Коскову Михаилу Андреевичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация "Тепловая конвекция феррожидкости в протяжённом замкнутом контуре: термомагнитный механизм интенсификации течения" по специальности 1.1.9 – "Механика жидкости, газа и плазмы" принята к защите 17.04.2025, протокол № 144, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018.

Соискатель Косков Михаил Андреевич 1996 г. рождения, в 2021 г. с отличием окончил магистратуру ФГАОУ ВО "Пермский государственный национальный исследовательский университет"(ПГНИУ) по направлению «Прикладные математика и физика». 31.08.2025 г. заканчивается срок аспирантуры очной формы обучения ПГНИУ по научной специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы. В настоящее время соискатель работает младшим научным сотрудником лаборатории динамики дисперсных систем Института механики сплошных сред ФГБУН "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук". Диссертация выполнена на кафедре физики фазовых переходов ПГНИУ.

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики фазовых переходов ПГНИУ Смородин Б.Л.

**Официальные оппоненты:**

1. Краков Михаил Самуилович, доктор физико-математических наук (01.02.05), профессор, профессор кафедры ЮНЕСКО "Энергосбережение и возобновляемые источники энергии", Белорусский национальный технический университет, г. Минск;
2. Виноградова Александра Сергеевна, кандидат физико-математических наук (01.02.05), научный сотрудник лаборатории физико-химической гидродинамики НИИ механики ФГБОУ ВО "Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова", г. Москва;

дали положительные отзывы на диссертацию

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина" (ФГАОУ ВО УрФУ), г. Екатеринбург, в своем положительном заключении, составленным Елфимовой Е.А., д.ф.-м.н., доцентом, заведующим кафедрой теоретической и математической физики; Зубаревым А.Ю., д.ф.-

м.н., профессором, профессором кафедры теоретической и математической физики, и утвержденном проректором по науке УрФУ, д.ф.-м.н., профессором Германенко А.В., указала, что диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в области экспериментального исследования интенсификации конвективного течения феррожидкости под воздействием неоднородного магнитного поля. Актуальность работы обусловлена существенным влиянием термомагнитного механизма конвекции на динамику течения жидкости и сопутствующий теплоперенос. Выполненное исследование имеет важное значение для практических задач управления тепло- и массопереносом в охлаждающих системах, где теплоносителем является магнитная жидкость. Представленная диссертационная работа "Тепловая конвекция феррожидкости в протяжённом замкнутом контуре: термомагнитный механизм интенсификации течения" удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Косков Михаил Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – "Механика жидкости, газа и плазмы".

**Соискателем опубликовано** 7 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. **Косков М.А.** Конвекция феррожидкости в замкнутом контуре: анализ температурного поля // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 166-182.

*Детально изложен метод обработки результатов измерений температуры вдоль охлаждаемой части гидродинамического контура, заполненного магнитной жидкостью; получена формула для расчёта числа Нуссельта. Авторский вклад Коскова М.А. в публикацию составляет 100%.*

2. **Косков М.А.**, Пшеничников А.Ф. Конвекция магнитной жидкости в замкнутом гидродинамическом контуре // Вестник Пермского университета. Физика. – 2021. – № 2. – С. 14-22. (ВАК).

*Представлено описание экспериментальной установки и методики обработки результатов температурных измерений, основанной на интегральной модели теплообмена в контуре, а также продемонстрировано увеличение числа Нуссельта в 2-4 раза под действием термомагнитной конвекции. Авторский вклад Коскова М.А. в публикацию составляет 50%.*

3. **Косков М.А.**, Пшеничников А.Ф. Термомагнитная конвекция в гидродинамическом контуре: роль капельных агрегатов // Вестник Пермского университета. Физика. – 2023. - № 4. – С. 45-54. (ВАК).

*Показано ослабление конвективного теплопереноса феррожидкостью под воздействием сильного магнитного поля; выдвинута гипотеза о блокировании течения в контуре капельными агрегатами, которая аргументируется экспериментом с образцом очищенной от крупных частиц магнитной жидкости, устойчивым к образованию агрегатов, использование которого усиливает конвективный теплопоток. Авторский вклад Коскова М.А. в публикацию составляет 50%.*

4. **Косков М.А.** Влияние расположения источника неоднородного магнитного поля на интенсивность термомагнитной конвекции в замкнутом контуре // Известия Юго-

Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2024. – Т. 14, № 3. – С. 52-64.

*Экспериментально определено расположение источника неоднородного магнитного поля относительно нагреваемого участка контура, при котором вклад термомагнитной конвекции в теплоток вдоль контура максимален. Авторский вклад Коскова М.А. в публикацию составляет 100%.*

5. Pshenichnikov A.F., **Koskov M.A.** Thermomagnetic pump and thermomagnetic convection in a closed hydrodynamic loop // *Physics of Fluids*. – 2024. – Vol. 36, № 9. – Art. id. № 092023. (WoS, Scopus Q1).

*Соискателем проведены измерения физических свойств магнитной жидкости, измерена напряжённость магнитного поля в месте размещения нагреваемого участка контура, проведены измерения скорости потока магнитной жидкости при комбинированной (термомагнитной и гравитационной) конвекции в зависимости от мощности нагревателя. Авторский вклад Коскова М.А. в публикацию составляет 20%.*

6. **Косков М.А.**, Пшеничников А.Ф. Термомагнитная конвекция феррожидкости в вертикальном гидродинамическом контуре: интенсификация теплообмена в магнитном поле // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2022. –Т. 162, № 6(12). – С. 926-940. (ВАК, Scopus Q3).

*Исследован вклад термомагнитного механизма конвекции в перенос тепла вдоль гидродинамического контура феррожидкостями с различной объемной концентрацией и одинаковым дисперсным составом магнитных частиц; установлена оптимальная для интенсификации теплопереноса концентрация феррожидкости. Авторский вклад Коскова М.А. в публикацию составляет 50%.*

7. **Koskov M.A.** Technical framework for studying thermomagnetic convection in an extended closed loop // *Magneto hydrodynamics*. – 2022. – Vol. 58, № 3. – P. 267-274. (Scopus Q3).

*Приведено детальное описание экспериментальной установки, включающее измерение коэффициента теплоотдачи с поверхности контура, а также кратко упомянут метод обработки результатов температурных измерений, в котором учтена неоднородность температуры жидкости в поперечном сечении трубки контура. Авторский вклад Коскова М.А. в публикацию составляет 100%.*

Публикации содержат в сумме 84 страницы и в полной мере отражают основные научные результаты работы. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы:** от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Кракова М.С. В отзыве представлена оценка содержания работы, отмечается актуальность темы исследования, обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, достоверность результатов и их новизна, а также научное и практическое значение. Оппонент отмечает замечание по диссертации:

- замечание по поводу указанного в работе коэффициента теплового расширения жидкости-основы и формулы для расчёта температурного коэффициента намагничённости магнитной жидкости;

2. Положительный отзыв официального оппонента Виноградовой А.С. В отзыве отмечено, что полученные в диссертационной работе результаты расширяют представления о конвективных течениях феррожидкостей в условиях совместного действия теплового, гравитационного и магнитного полей. Эти результаты применимы как для разработки новых методов исследования конвективных течений, так и для проектирования новых систем, позволяющих контролировать и интенсифицировать теплоотвод. Оппонент отмечает следующие замечания:

- замечание о происхождении образцов феррожидкостей и внесении избытка олеиновой кислоты (глава 3, с. 52) при разбавлении образцов;
- вопрос о причине различий некоторых свойств образцов, представленных в табл. 2 и 3;
- замечание относительно применимости формулы (3.1), справедливой в случае слабых магнитных полей, в ситуации, когда напряжённость магнитного поля в жидкости достаточно велика для проявления нелинейных эффектов, а также влияния этих эффектов на сравнение результатов расчёта с экспериментом;
- замечание относительно приведённого в п. 3.3 значения коэффициента объёмного теплового расширения;
- замечание относительно представленного в диссертации значения намагниченности насыщения образца феррожидкости № 2 из п. 3.1;
- вопрос о возможности в общем случае выяснить максимальное значение напряжённости магнитного поля, при котором отсутствует влияние капельных агрегатов на теплоперенос;
- вопрос относительно проверки гипотезы о капельных агрегатах механическим вскрытием контура, и о том, как капельные агрегаты удалялись из контура;
- замечание, касающееся постановки эксперимента с магнитной сепарацией образца феррожидкости в главе 4;
- отмечена опечатка на с. 91;
- замечание относительно теплофизических параметров образцов: № 1 (таблица. 3) и образца из п. 4.2, а также относительно корректности сравнения результатов экспериментов с этими образцами.

3. Положительный отзыв ведущей организации ФГАОУ ВО УрФУ. В отзыве отмечается, что диссертация удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденных постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 предъявляемым к кандидатским диссертациям, а полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и существенную практическую значимость. Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- замечание относительно неуказанной причины появления конвективного течения в контуре;
- замечание, связанное с изложением информации о влиянии магнитного поля на теплоперенос в контуре;
- вопрос, касающийся справедливости предположения о ламинарном характере течения и профиле скорости;
- вопрос, касающийся учёта явления магнетофореза в предлагаемой модели теплопереноса;

- вопрос об альтернативных гипотезах, объясняющих блокировку течения в сильном магнитном поле;

**На автореферат поступило 5 отзывов:**

1. Положительный отзыв от Балашою М.А., к.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника лаборатории нейтронной физики ММНИО "Объединенный институт ядерных исследований", г. Дубна (2 замечания);
2. Положительный отзыв от Вяткина А.А. к.ф.-м.н., декана физического факультета ФГБОУ ВО "Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет", г.Пермь(без замечаний);
3. Положительный отзыв от Закиняна А.Р., д.ф.-м.н., доцента, заведующего кафедрой теоретической и математической физики ФГАОУ ВО "Северо-Кавказский федеральный университет", г. Ставрополь (без замечаний);
4. Положительный отзыв от Зубарева Н.М., д.ф.-м.н., члена-корреспондента РАН, главного научного сотрудника лаборатории нелинейной динамики ФГБУН "Институт электрофизики УрО РАН", г.Екатеринбург (без замечаний);
5. Положительный отзыв от Ряполова П.А., д.ф.-м.н., доцента, декана естественно-научного факультета ФГБОУ ВО "Юго-Западный государственный университет", г. Курск.(1 замечание).

**В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:**

- замечание, связанное с избыточными формулировками в общей характеристике работы;
- замечание, касающееся обозначений на рисунках, представленных в автореферате;
- замечание, касающееся отсутствия информации о значениях и методах оценки погрешности свойств феррожидкостей;

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

**официальные оппоненты** являются одними из ведущих специалистов в области физической гидродинамики, имеют большое число публикации с результатами теоретических и экспериментальных работ; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

**ведущая организация** ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина", г. Екатеринбург, является одним из ведущих научных центров в области исследования свойств магнитных жидкостей. В университете активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования по следующим научным направлениям: статистическая термодинамика жидкостей, статические и динамические свойства магнитных жидкостей, межчастичные корреляции и массоперенос в магнитных жидкостях. Отзыв ведущей организации, содержащий подробную, по главам, характеристику содержания диссертационной работы; высокую положительную оценку актуальности темы исследования, достоверности, новизны, теоретической и практической значимости изложенных результатов обсужден и одобрен на заседании научного

семинара кафедры теоретической и математической физики Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО УрФУ в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработана** оригинальная экспериментальная установка для исследования комбинированной (термомагнитной и термогравитационной) конвекции феррожидкости в протяженном замкнутом контуре с расположенными на вертикальном участке источниками тепла и магнитного поля;

**предложена** теоретическая модель, позволяющая рассчитывать вклады термомагнитной и термогравитационной конвекции в тепловой поток по результатам измерения температуры вдоль охлаждаемой части контура;

**доказано**, что наложение неоднородного магнитного поля на нагреваемый участок контура, заполненного феррожидкостью умеренной концентрации, откуда удалены капельные агрегаты, увеличивает тепловой поток (число Нуссельта) в 2 – 4 раза в поле умеренной напряженности и до 6 раз в сильном поле;

**введена** комбинация безразмерных параметров, позволяющая универсальным образом описывать течение феррожидкости при совместном воздействии гравитационного и неоднородного магнитного полей.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**Доказано**, что вклады термомагнитных ponderomotorных сил в скорость течения феррожидкости и сопутствующий теплоперенос вдоль замкнутого контура значительно превышают те же вклады сил плавучести.

**Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):**

**использован** новый метод измерения скорости течения жидкости, ее объемного расхода и конвективного теплопотока вдоль гидродинамического контура;

**изложены** результаты измерений безразмерного теплового потока (числа Нуссельта) феррожидкостей вдоль протяженного замкнутого контура в неоднородном магнитном поле и без поля, предложена интерпретация этих результатов;

**раскрыты** ключевые факторы, влияющие на интенсивность теплопереноса потоком феррожидкости в неоднородном магнитном поле;

**изучено** влияние концентрации и дисперсного состава феррожидкости, напряженности и локализации градиентного магнитного поля на интенсивность теплопереноса вдоль контура;

**проведена модернизация** аналитической модели конвективного теплопереноса в длинной трубке с учетом неоднородности распределения температуры в ее поперечном сечении.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработана и внедрена** новая методика измерения вклада термомагнитной конвекции в тепловой поток вдоль контура, не требующая информации о свойствах феррожидкости;

**определены** параметры феррожидкости и теплообменного устройства оптимальные для усиления теплопереноса за счет термомагнитной конвекции;

**создана** объединяющая нагреватель и источник неоднородного магнитного поля система, обеспечивающая интенсивное течение феррожидкости вдоль контура и возможность управления параметрами этого течения;

**представлены** рекомендации по использованию феррожидкостей в качестве теплоносителей в перспективных пассивных охлаждающих устройствах;

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ:** измерения проведены после тщательного тестирования и настройки термоизмерительной аппаратуры и характеризуются воспроизводимостью и непротиворечивостью результатов;

**теория** построена на известных и общепринятых моделях тепловой конвекции феррожидкостей;

**идея базируется** на обобщении передового опыта теоретического и экспериментального исследования теплопереноса феррожидкостями под действием внешнего магнитного поля;

**использовано** сравнение полученных в эксперименте результатов с известными из литературы данными других авторов, а также с аналитическим расчетом скорости конвективного течения феррожидкости, выполненном без учета вклада сил плавучести;

**установлено** согласие полученных экспериментальных данных с теоретическими оценками и результатами аналитического расчета;

**использованы** проверенные методики определения теплофизических параметров, магнитных свойств и дисперсного состава феррожидкостей;

**Личный вклад соискателя состоит** в изготовлении экспериментальной установки, разработке методики измерений и получении всех экспериментальных результатов; участии в постановке задачи, обсуждении и интерпретации результатов, а также в написании статей.

**Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается** наличием последовательного плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней" № 842, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г.: в ней содержится решение задачи об определении условий, обеспечивающих наибольшую интенсивность комбинированной термомагнитной и гравитационной конвекции феррожидкости в замкнутом контуре: оптимальной геометрии теплообменного устройства, дисперсном составе и концентрации магнитных наночастиц в феррожидкости, а также месте приложения и напряжённости градиентного магнитного поля.

На заседании 19 июня 2025 г. диссертационный совет принял решение присудить Коскову М.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного электронного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, участвовавших в заседании (в том числе 2 человека в удаленном интерактивном режиме), из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введено на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 15, против – 0, воздержался – 0, не проголосовало – 0.

Заместитель председателя  
диссертационного совета Д 004.036.01  
д.ф.-м.н., профессор,  
Роговой Анатолий Алексеевич



\_\_\_\_\_ / Роговой А.А

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 004.036.01  
д.ф.-м.н., доцент  
Зуев Андрей Леонидович

\_\_\_\_\_ / Зуев А.Л.

20 июня 2025 г.

М.П.