



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620062, тел.: +7 (343) 375-45-07
контакт-центр: +7 (343) 375-44-44, 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный)
e-mail: rector@urfu.ru, www.urfu.ru
ОКПО 02069208, ОГРН 1026604939855, ИНН/КПП 6660003190/667001001

29 МАЙ 2025

№ 01.09 - 04/472

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по науке ФГАОУ ВО
«УрФУ имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина», доктор физико-
математических наук,
профессор
Германенко Александр Викторович

«29» мая 2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Коскова Михаила Андреевича
«Тепловая конвекция феррожидкости в протяженном замкнутом контуре:
терромагнитный механизм интенсификации течения», представленной на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности

1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность темы диссертации. Работа М.А. Коскова посвящена экспериментальному изучению интенсификации конвективного течения магнитной жидкости, находящейся в протяженном замкнутом гидродинамическом контуре с локальным источником нагрева под воздействием неоднородного магнитного поля. Установлено, что терромагнитный механизм конвекции существенно влияет на динамику течения жидкости, а также на сопутствующий теплоперенос вдоль контура. В ходе работы разработана, оптимизирована и протестирована экспериментальная установка для анализа тепловых потоков, вызванных течением магнитной жидкости в контуре, а также получена аналитическая модель, описывающая изучаемые явления и процессы. С использованием предложенной автором работы методики анализа результатов температурных измерений подтверждена возможность увеличения конвективного теплового потока вдоль контура в несколько раз за счет воздействия неоднородного

магнитного поля.

Полученные результаты имеют практическое значение для решения задач управления тепло- и массопереносом в охлаждающих системах, где теплоносителем выступает магнитная жидкость.

Структура и содержание диссертации. Текст диссертации содержит постановку задачи, обсуждение экспериментальных методов исследования и их теоретическое обоснование, а также полученные результаты и их анализ. При изложении выдержан научный стиль высокого уровня.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 122 страницы. Список литературы содержит 138 наименований.

Во **введении** дана общая характеристика работы, в которой приведены актуальность темы исследования, сформулирована цель и перечислены выполненные задачи, сформулированы научная новизна и выносимые на защиту положения, указаны теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой главе** приведен обзор исследований по тепловой конвекции в магнитных жидкостях с фокусировкой на двух механизмах: термогравитационном и термомагнитном. Введены числа Рэлея, характеризующие вклад каждого механизма в теплоперенос. На основе анализа литературы, сделан вывод, что теоретически предсказанное многократное усиление теплообмена за счет термомагнитной конвекции не подтверждается экспериментально из-за неоптимальной геометрии теплообменных систем. Автором диссертации предложено решение в виде протяженного замкнутого контура, максимизирующего вклад в теплоперенос пондеромоторной силы.

Во второй части главы систематизированы методы измерения и расчета теплофизических и магнитных свойств феррожидкостей, использованные в дальнейших экспериментах.

Во **второй главе** описана экспериментальная установка – вертикальный замкнутый контур с локальным источником нагрева магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле. Охлаждение установки осуществлялось термостатированным воздухом, что обеспечило постоянный коэффициент теплоотдачи вдоль контура, положенный в основу методики расчета объемного расхода и теплового потока.

Из решения уравнения теплопереноса следует экспоненциальное затухание температуры вдоль контура. Получены соотношения, связывающие показатель экспоненты со скоростью течения и объемным расходом. Число Нуссельта (безразмерный теплоток), определенное как отношение конвективного теплоток к молекулярному, обратно пропорционально квадрату показателя экспоненты.

Температурные измерения термопарами показали, что профили тепловых возмущений при различных мощностях нагрева аппроксимируются экспонентами (в пределах погрешности). Эксперимент с ундеканом подтвердил корректность модели для дальнейших исследований.

В третьей главе исследована интенсификация теплопереноса в магнитной жидкости под действием неоднородного магнитного поля. Внимание уделялось влиянию концентрации частиц на свойства магнитной жидкости и расположения источника поля. Эксперименты с четырьмя образцами феррожидкости (магнетит–керосин–олеиновая кислота) проведены в двух режимах: гравитационная конвекция (без поля) и смешанная (термомагнитная и гравитационная).

Данные в нулевом поле соответствуют универсальной зависимости числа Нуссельта от теплового числа Рэлея, тогда как магнитное воздействие смещает экспериментальные кривые в область больших чисел Нуссельта: в магнитном поле число Нуссельта возрастает в 2,5 – 3,5 раза. Максимальный эффект наблюдается при умеренной концентрации частиц (6 – 8 %), где компенсируются противоположные тенденции: снижение намагниченности при малой объемной доле частиц и рост вязкости при высокой.

Дополнительные эксперименты с повышенной напряженностью магнитного поля показали, что скорость течения при комбинированной конвекции на ~20% превышает значения, полученные с помощью аналитической модели, не учитывающей гравитационную конвекцию. Это свидетельствует о ее слабom, влиянии на скорость потока. Величина расхождения качественно согласуется с ожидаемым преобладанием термомагнитного механизма конвекции.

Поиск оптимального расположения источника магнитного поля относительно нагревателя проводился путем вертикального смещения полюсных наконечников. Эксперименты с образцом жидкости оптимальной концентрации выявили, что смещение поля вверх приводит к конкуренции термомагнитной и гравитационной конвекции, что проявляется в повышении температуры ниже нагревателя. Напротив, смещение вниз дает сонаправленность двух типов конвекции, усиливая теплоперенос. Максимальное значение числа Нуссельта зафиксировано при расположении источника в центре или на 5 мм ниже нагревателя, где градиент магнитного поля совпадает с областью максимального температурного возмущения. Этот эффект объясняется автором достижением максимума пондеромоторной силы, ответственной за термомагнитную конвекцию.

В четвертой главе исследовано подавление конвективного теплопереноса в сильном магнитном поле (190 кА/м), гипотетически вызванное образованием капельных агрегатов в магнитной жидкости. Эксперимент с несепарированным образцом жидкости (магнетит–керосин) показал полную остановку глобальной циркуляции при включении поля, сохраняющуюся даже после его отключения. Эффект объясняется осаждением агрегатов на стенках нагревателя вследствие магнитофореза.

Для проверки гипотезы методом магнитной сепарации удалены крупные частицы, ответственные за агрегацию. Повторный опыт с очищенной жидкостью продемонстрировал обратный эффект: включение поля снизило перепад температуры на нагревателе и увеличило температуру на удаленном участке контура. Результаты позволяют предположить, что капельные

агрегаты блокируют поток, а их устранение восстанавливает термомагнитную конвекцию, увеличивая теплоперенос.

В заключении сформулированы итоги выполненного исследования, а также представлены рекомендации по дальнейшей разработке темы.

В приложении в развернутом виде описано аналитическое решение задачи о распределении температуры в поперечном сечении трубки контура, которое было дано без вывода во второй главе.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Проведен анализ влияния термомагнитной конвекции на интенсивность теплопереноса в протяженном вертикальном замкнутом контуре при исключении конкуренции с термогравитационным течением. Экспериментально подтверждено, что в стационарном режиме температура вдоль охлаждаемого участка контура снижается по экспоненциальному закону. Надежность результатов обеспечена использованием простой и воспроизводимой методики температурных измерений.
2. Установлены аналитические соотношения, однозначно связывающие скорость течения жидкости, объемный расход и безразмерный тепловой поток (число Нуссельта) с декрементом затухания температуры. Управляющим параметром выступает безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Био), величина которого определена в рамках независимого эксперимента.
3. Доказано, что экспериментально измеренный декремент затухания температурного возмущения (показатель экспоненты) позволяет количественно оценить вклад термомагнитной конвекции в объемный расход жидкости и число Нуссельта без привлечения данных о физических свойствах жидкости.
4. Определена оптимальная объемная доля твердой фазы в магнитной жидкости (6 – 8 %), при которой достигается компромисс между противоречивыми требованиями к параметрам среды: высокой намагниченностью и низкой вязкостью. Это условие необходимо для максимальной интенсификации термомагнитной конвекции.
5. Сформулирована гипотеза, объясняющая различия в конвективном теплопереносе для феррожидкостей с разным дисперсным составом. Установлено, что наличие крупнодисперсной фракции приводит к образованию капельных агрегатов, их налипании на стенки трубки и блокировке глобальной циркуляции в контуре. Применение магнитной сепарации для очистки жидкости от крупных частиц устраняет данный эффект и обеспечивает увеличение безразмерного теплового потока.

Научная и практическая значимость заключается в дополнении знаний о тепловой конвекции магнитных жидкостей под комбинированным воздействием магнитного и гравитационного полей. Установлено, что многократное увеличение интенсивности теплопереноса достигается за счет оптимизации геометрии установки, концентрации и дисперсного состава частиц в жидкости. Результаты работы могут применяться как при проектировании пассивных систем охлаждения, так и при разработке новых

экспериментальных подходов к изучению термомагнитной конвекции.

Достоверность результатов обеспечена физически обоснованной постановкой экспериментов, применением адекватных моделей, а также использованием стандартизированных и апробированных методик измерения свойств магнитных жидкостей. Точность данных подтверждена калибровкой термонизмерительной аппаратуры и аккуратной математической обработкой первичных экспериментальных результатов с их последующей критической оценкой. Воспроизводимость результатов проверена в серии контрольных опытов.

Апробация работы. Работа представлялась на всероссийских конференциях и научных семинарах. Результаты работы опубликованы в семи статьях: пять из которых в журналах, входящих в перечень ВАК по специальности «Механика жидкости газа и плазмы» и базы данных Web of Science и Scopus.

По тексту диссертации следует сделать следующие **замечания**:

1. В диссертации явным образом не указано, что вызывает поток жидкости вдоль контура. Зависимость пондеромоторной силы от температуры не обязательно должна приводить к неустойчивости механического равновесия жидкости и к возникновению течения.
2. Изложение материала могло быть понятнее, если бы автор в первой главе конкретно сформулировал механизм влияния магнитного поля на теплоперенос в контуре. После прочтения становится ясно, что увеличение теплового потока связано с увеличением скорости течения жидкости, однако в тексте работы это нигде не прописано явно.
3. Насколько справедливо предположение о ламинарности течения в контуре и использование пуазейлевского профиля скорости?
4. Почему в предложенной автором модели процесса теплопереноса рассматривается однородная магнитная жидкость, в которой не учитываются перераспределение концентрации магнитных наночастиц (концентрационная неоднородность), возникающая за счет магнетофоретического транспорта?
5. В четвертой главе эксперимент свидетельствует об остановке конвективного течения в контуре под действием сильного магнитного поля. Автор утверждает, что причина этого – появление капельных агрегатов. Тем не менее, указанное утверждение гипотетическое. Есть ли альтернативные гипотезы, объясняющие результат эксперимента?

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертационная работа М.А. Коскова характеризуется полнотой и завершенностью, ясно написана, подробно иллюстрирована графиками и рисунками. Диссертационное исследование выполнено автором на высоком уровне и является завершенной научно-квалификационной работой.

Таким образом, представленная диссертация «Тепловая конвекция феррожидкости в протяженном замкнутом контуре: термомагнитный

механизм интенсификации течения» удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденных 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».

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, профессором, профессором кафедры теоретической и математической физики Зубаревым Андреем Юрьевичем. Отзыв обсужден и утвержден научном семинаре кафедры теоретической и математической физики УрФУ «05» мая 2025 г. Протокол № 100.089-06/05.

Заведующий кафедрой
теоретической и математической
физики ФГАОУ ВО «УрФУ имени
первого Президента России Б.Н.
Ельцина» д.ф.-м.н., доцент
620002, Российская Федерация,
Свердловская область, город
Екатеринбург, ул. Ленина, д. 51
Тел.: +7 (343) 3899477
e-mail: ekaterina.elfimova@urfu.ru

Елфимова Екатерина Александровна

Профессор кафедры теоретической и
математической физики ФГАОУ ВО
«УрФУ имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина», д.ф.-м.н.,
профессор
620002, Российская Федерация,
Свердловская область, город
Екатеринбург, ул. Ленина, д. 51
Тел.: +7 (343) 3899477
e-mail: A.J.Zubarev@urfu.ru

Зубарев Андрей Юрьевич

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»
Адрес: 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
Телефон: +7 (343) 375-45-07
e-mail: rector@urfu.ru

Подпись Елфимовой Е.А. и Зубарева А.Ю. подтверждаю:

