ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

д-р. физ.-мат. наук, профессора
М.С. Кракова

на диссертационную работу Коскова Михаила Андреевича «Тепловая конвекция феррожидкости в протяженном замкнутом контуре: термомагнитный механизм интенсификации течения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность темы исследования. Работа М.А. Коскова представляет собой экспериментальное изучение усиления конвективного течения магнитной жидкости в замкнутом гидродинамическом контуре с локальным нагревом под действием неоднородного магнитного поля. Эта проблема известна с середины 60-х годов прошлого века, но всё еще остается актуальной, в особенности в связи с приложениями в ситуациях, когда гравитационная естественная конвекция оказывается неэффективной: при отсутствии гравитации или при малых размерах охлаждаемых конструкций, например в микроэлектронике. Актуальность исследований сохраняется в связи с отсутствием детальных достоверных экспериментальных и теоретических исследований. Автору в значительной степени удалось устранить этот недостаток.

В рамках исследования разработана и оптимизирована экспериментальная установка, а также предложена аналитическая модель, описывающая распределение тепловых потоков. Применение новой методики обработки температурных данных подтвердило возможность увеличения конвективного теплового потока в несколько раз за счет подбора параметров феррожидкости и магнитного поля.

Полученные результаты имеют практическую ценность для проектирования систем охлаждения с магнитожидкостными теплоносителями, где требуется контроль тепло- и массопереноса.

Оценка содержания работы. Диссертация включает постановку задачи, описание экспериментальных методов с их теоретическим обоснованием; изложена в научном стиле. Работа разделена на введение, четыре главы, заключение и приложение (общий объем — 122 страницы). Список литературы содержит 138 ссылок.

Во **введении** представлена общая характеристика работы, включающая

обоснование актуальности темы, формулировку цели и задач исследования, описание научной новизны, а также теоретической и практической значимости. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена явлениям термогравитационной и термомагнитной конвекции в магнитных жидкостях. Введены числа Рэлея, оценивающие вклад в теплоперенос этих механизмов. Далее обсуждаются методы измерения теплофизических и магнитных свойств феррожидкостей, использованные в исследовании.

Во **второй главе** описана экспериментальная установка — замкнутый контур с локальным нагревом и магнитным полем. Охлаждение воздухом обеспечило постоянный коэффициент теплоотдачи, позволив рассчитать объемный расход и теплопоток.

Решение уравнения теплопереноса показало экспоненциальное затухание температуры в контуре, что соответствует экспериментальным данным. При этом число Нуссельта оказывается обратно пропорциональным квадрату декремента затухания.

Эксперименты с н-ундеканом выявили соответствие температурных профилей экспоненциальной модели (погрешность в допустимых пределах), что обосновало ее применение в дальнейших исследованиях.

В **третьей главе** изучено усиление теплопереноса магнитной жидкостью под действием неоднородного магнитного поля. Эксперименты с образцами разной концентрации частиц (6–8% — оптимальная) показали рост числа Нуссельта в 2,5–3,5 раза в магнитном поле. Максимальный эффект достигается при компенсации снижения намагниченности (низкая концентрация) и роста вязкости (высокая).

Смещение источника поля вверх от нагревателя вызывает конкуренцию термомагнитной и гравитационной конвекции и ослабление течения, вниз — их сонаправленное действие и усиление теплопереноса. Максимум числа Нуссельта зафиксирован при расположении источника в центре или немного ниже нагревателя, где градиент поля совпадает с максимумом температурного возмущения.

Дополнительные опыты по измерению скорости течения феррожидкости подтвердили преобладание термомагнитного механизма конвекции над термогравитационным.

Четвертая глава посвящена течению феррожидкости в сильном магнитном поле. Эксперимент показал блокировку сквозного течения в контуре, сохраняющуюся после отключения магнитного поля. Гипотеза о том, это происходит из-за образования в жидкости капельных агрегатов проверена эксперименте с феррожидкостью, предварительно подвергнутой магнитной

сепарации. После удаления крупных частиц включение поля, наоборот, в несколько раз усилило конвекцию. Сделан вывод о том, что капельные агрегаты блокируют поток, их удаление восстанавливает конвективный теплоперенос.

В **заключении** перечислены основные выводы и направления дальнейшей разработки темы.

Приложение содержит дополнения ко второй главе диссертации.

Высокая степень **обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, достоверности результатов** обеспечена тщательно продуманной и аккуратно выполненной постановкой экспериментов с использованием калиброванной аппаратуры, проверенных методик измерений и расчёта характеристик магнитных жидкостей, тщательной математической обработкой первичных экспериментальных данных и воспроизводимостью результатов в контрольных опытах, использованием теоретической модели, корректно описывающей гидродинамическое течения феррожидкости в магнитном поле, а также согласованностью с результатами других авторов в общих областях изменения параметров.

В диссертации содержится **ряд новых результатов**, связанных с ключевыми закономерностями термомагнитной конвекции в вертикальном замкнутом контуре, среди которых следует особенно отметить:

1. Экспериментальное подтверждение экспоненциального затухания температуры вдоль охлаждаемого участка вертикально расположенного контура в стационарном режиме течения по нему магнитной жидкости за счет локального нагрева.
2. Разработанную автором диссертации аналитическую модель теплообмена, позволяющую установить соотношения, связывающие скорость течения, объемный расход магнитной жидкости и число Нуссельта с декрементом затухания температуры, где управляющим параметром выступает число Био.
3. Показано, что показатель затухания температуры вдоль контура позволяет оценить вклад термомагнитного механизма в теплоперенос вдоль контура, без данных о свойствах конкретной жидкости.
4. Обнаружено, что максимальная интенсификация теплопереноса достигается при объемной доле магнетита 6–8 %. При больших концентрациях и при наличии в жидкости крупнодисперсных частиц течение блокируется и интенсификация тепопереноса снижается. Однако удаление крупных частиц предотвращает образование капельных агрегатов и блокировку течения, восстанавливает конвекцию, увеличивая теплопоток.

Научное значение работы заключается в демонстрации многократного усиления теплопереноса за счет термомагнитной конвекции через оптимизацию параметров магнитной жидкости и теплообменного устройства.

Практическое значение диссертационной работы состоит в том, что результаты применимы в проектировании пассивных систем охлаждения и разработке новых методов изучения конвекции.

Результаты исследования опубликованы в семи статьях: пять в перечне ВАК и международных базах Scopus, Web of Science. Работа **апробирована** на многочисленных научных конференциях и семинарах.

Оценка диссертации. В целом текст диссертации написан в ясным, грамотным языком; аккуратно оформлен и иллюстрирован графиками.

По содержанию диссертации можно сделать следующее **замечание**:

В диссертационной работе в первой главе указаны значения коэффициента теплового расширения жидкости-основы ($\beta = 7{,}7\cdot 10^{-4}$ K^{-1}), и температурного коэффициента намагниченности магнитной жидкости ($\beta_m = 5\cdot 10^{-3}$ K^{-1}), которые отличаются в два раза. Между тем во многих работах в качестве температурного коэффициента намагниченности жидкости используется коэффициент теплового расширения жидкости-основы, что снижает точность представляемых результатов. Поэтому к недостатку работы я бы отнес отсутствие в работе тех результатов по определению коэффициента β_m, которые автор представил в статье [2] и которые придали бы полученным результатам законченный вид.

Приведенное замечание не влияет на общую положительную оценку работы.

Заключение

В целом, диссертация М.А. Коскова является научно-квалификационной работой, в которой приведены результаты, позволяющие оценить их как решение актуальной научной задачи интенсификации конвективных течений и усиления теплопереноса. Работа хорошо написана и в достаточной степени иллюстрирована. Представленные в диссертации результаты достоверны, выводы обоснованы.

Автореферат соответствует установленным требованиям и полностью отражает основное содержание диссертации.

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».

Официальный оппонент,
профессор кафедры ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии» Белорусского национального технического университета, д-р физ.-мат. наук, профессор

/ Краков Михаил Самуилович

23 мая 2025 г.

Подпись Кракова Михаила Самуиловича заверяю,

Белорусский национальный технический университет
Адрес: 220013, Республика Беларусь, г. Минск, проспект Независимости, д. 65
Телефон: +375 17 293 96 24
e-mail: krakov@bntu.by

Проректор по научной работе БНТУ
К.В. Якушенко
27.05.2025