

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата физико-математических наук, научного сотрудника

Виноградовой Александры Сергеевны

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»

Диссертационная работа М.А. Коскова посвящена экспериментальному исследованию течений неизотермической магнитной жидкости, возникающих в вертикальном замкнутом контуре под действием неоднородного магнитного поля, и возможностью интенсификации теплопереноса, связанного с этими течениями. В работе определены условия, при которых термомагнитное течение наиболее эффективно осуществляет отвод тепла, а именно: за счет тщательного выбора характеристик магнитной жидкости и параметров магнитного поля конвективный теплопоток вдоль контура может кратно увеличиться.

Актуальность темы исследования диссертанта обусловлена необходимостью расширения фундаментальных знаний о способах интенсификации конвективных течений магнитной жидкости в условиях совместного действия магнитного, теплового и гравитационного полей. Возможность эффективного управления тепло- и массопереносом в системах охлаждения с магнитожидкостными теплоносителями обеспечивает практическую значимость полученных результатов, внося вклад в создание новой базы для автоматизированных систем управления и контроля на основе магнитных жидкостей.

В диссертации представлены постановка задачи, описание экспериментальных методов и их теоретическое обоснование, сформулированы полученные результаты. Текст диссертации написан в научном стиле. Работа включает введение, четыре главы, заключение и приложение (общий объем — 122 страницы). Список литературы содержит 138 источников.

Во **введении** представлена общая характеристика работы, включающая обоснование актуальности темы, постановку цели и задач исследования, описание научной новизны, а также теоретической и практической значимости. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор работ, посвященных тепловой конвекции магнитных жидкостей с акцентом на термогравитационный и термомагнитный механизмы ее возникновения. Обсуждаются тепловое и магнитное числа Рэлея. Отмечено, что теоретически возможное многократное усиление теплообмена за счет термомагнитной конвекции не зафиксировано экспериментально из-за неоптимальной конструкции теплообменных систем, рассмотренных в различных работах. Для разрешения данного противоречия предложено использовать протяженный замкнутый контур. Также в первой главе систематизированы методы измерения и расчета теплофизических и магнитных свойств феррожидкостей, примененные в последующих экспериментах.

Во **второй главе** приведены характеристики экспериментальной установки, представляющей собой вертикальный протяженный замкнутый контур с локальным нагревом, расположенный в неоднородном магнитном поле. Охлаждение обеспечивалось обдувом термостатированным воздухом, что гарантировало постоянный коэффициент теплоотдачи. Это позволило разработать методику расчета объемного расхода и теплового потока.

Автором работы получено решение уравнения теплопереноса, которое выявило экспоненциальное затухание температуры вдоль контура. Установлены зависимости, связывающие

показатель экспоненты со скоростью течения и объемным расходом жидкости. Число Нуссельта, определенное как отношение конвективного теплопотока к молекулярному, оказалось обратно пропорционально квадрату показателя экспоненты.

Температурные измерения, выполненные при помощи термопар, подтвердили, что профили температуры вдоль контура при разной мощности нагрева аппроксимируются экспонентами. Справедливость применимости модели для дальнейших исследований доказана экспериментами с ундеканом.

Третья глава посвящена исследованию усиления теплопереноса течением магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле. Основное внимание уделено влиянию концентрации частиц и пространственного положения источника поля на теплоперенос. Эксперименты проведены с четырьмя образцами феррожидкости «магнетит–керосин–олеиновая кислота» в режиме гравитационной конвекции (магнитное поле выключено) и режиме смешанной конвекции (в неоднородном магнитном поле).

Показано, что магнитное воздействие увеличивает число Нуссельта в 2,5–3,5 раза по сравнению со случаем отсутствия поля. Максимальный эффект наблюдается при объемной концентрации наночастиц в 6–8 %. В этом случае снижение намагниченности при малой доле частиц и рост вязкости при высокой доле частиц взаимно компенсируются.

Проведен поиск оптимального расположения источника поля. Смещение вверх полюсных наконечников вызывает конкуренцию конвективных механизмов (рост температуры ниже нагревателя), тогда как смещение вниз синхронизирует их, усиливая теплоперенос. Максимальное число Нуссельта достигнуто при расположении источника в центре или на 5 мм ниже нагревателя, когда область с наибольшим градиентом поля накладывается на выходное сечение нагревателя, где магнитная жидкость имеет наибольшую температуру.

Четвертая глава исследует блокировку конвективного течения и связанного с ним теплопереноса в сильном магнитном поле (максимальной напряженностью в 190 кА/м). Эксперимент с неочищенным образцом магнетит–керосиновой феррожидкости показал отсутствие сквозного течения через контур при включении магнитного поля. Это состояние блокировки сохранялось и после отключения поля. Данное поведение магнитной жидкости в контуре объясняется осаждением капельных агрегатов на стенках нагревателя вследствие магнитофореза. Опыт с очищенным с помощью магнитной сепарации образцом выявил усиление интенсивности течения и теплопереноса от нагревателя.

В **заключении** изложены основные выводы исследования и предложены направления для дальнейшего развития темы, включая перспективы практического применения полученных результатов.

В **приложение** (дополнение ко второй главе) вынесено аналитическое решение задачи о распределении температуры в поперечном сечении контура.

Научная новизна работы обоснована, в диссертации сформулированы новые результаты, полученные автором впервые. Среди них хочется выделить следующее:

1. Выполнен анализ термомагнитного течения и связанного с ним теплопереноса в вертикальном замкнутом контуре. Экспериментально доказано экспоненциальное уменьшение температуры вдоль охлаждаемого участка в стационарном режиме теплообмена.
2. Получены аналитические зависимости, связывающие скорость течения жидкости, объемный расход и число Нуссельта с показателем спада температуры вдоль контура. Ключевым параметром выступает число Био, значение которого определено в независимом эксперименте.
3. Показано, что экспериментально измеренный декремент затухания (показатель экспоненты) позволяет количественно оценить вклад термомагнитного течения в объемный расход и число

Нуссельта.

4. Установлена оптимальная объемная доля магнетита в растворе, обеспечивающая баланс между его намагниченностью и вязкостью, что важно для усиления отвода тепла терромагнитным конвективным течением.
5. Предложена гипотеза для объяснения различия в интенсивности теплопереноса для магнитных жидкостей с разным дисперсным составом твердой фазы. Показано, что в сильных магнитных полях в жидкости с крупными частицами блокируется глобальное течение, а в образце после магнитной сепарации теплоток увеличивается.

Научная и практическая значимость диссертации заключается в расширении представлений о конвективных течениях магнитных жидкостей в условиях совместного действия теплового, гравитационного и магнитного полей. Экспериментально показано, что многократное увеличение теплопереноса обеспечивается благодаря оптимизации взаимного расположения источника нагрева жидкости и области неоднородности магнитного поля, а также концентрации и дисперсного состава наночастиц твердой фазы феррожидкости.

Полученные результаты применимы для проектирования новых систем, позволяющих контролировать и интенсифицировать отвод тепла, а также для разработки новых методов исследования конвективных течений.

Высокая степень **обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**, а также **достоверности результатов** подтверждена тщательной подготовкой экспериментов, использованием апробированных методик измерения свойств магнитных жидкостей и моделей, адекватно описывающих процессы теплопереноса и взаимодействия жидкости с магнитным полем. Точность экспериментальных результатов обеспечена калибровкой термоизмерительной аппаратуры и строгой математической обработкой данных. Серия контрольных экспериментов подтверждает воспроизводимость выводов.

Результаты исследования прошли **апробацию** на всероссийских конференциях и научных семинарах. По теме работы опубликовано семь статей в рецензируемых журналах, из которых две изданы в журналах, рекомендованных ВАК, а три — в периодических научных журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus.

По тексту и содержанию диссертации имеется ряд **вопросов и замечаний**:

1. В тексте диссертации неоднократно упоминается, что образцы магнитной жидкости типа «магнетит–керосин–олеиновая кислота», использованные в исследовании, были синтезированы стандартным методом химического осаждения, однако не сказано, кто их синтезировал. Также в главе 3 на с. 52 указано, что при разбавлении базового образца для предотвращения коагуляции и выпадения раствора в осадок вносился небольшой избыток олеиновой кислоты, однако не уточнено, сколько олеиновой кислоты добавлялось в каждом из четырех случаев. Количество добавленной олеиновой кислоты должно повлиять на свойства образцов, представленных в таблице 3.
2. Из сравнения таблиц 2 и 3 можно предположить, что образец из таблицы 2 – это образец № 3 из таблицы 3, но у них не совпадают коэффициент объемного теплового расширения и динамическая вязкость.
3. В тексте диссертации нигде не написано, что формула (3.1) верна только в случае малых полей, когда намагниченность магнитной жидкости линейно зависит от напряженности поля. Однако, напряженность магнитного поля внутри феррожидкости достаточно велика (до 22 кА/м) и при этих значениях нелинейность кривой намагничивания становится существенной, что видно из экспериментально измеренной кривой намагничивания (см. рис. 3.3). Для линейного участка магнитная восприимчивость равна 1,56 (см. табл. 4), а для расчетов берется в два раза меньшее

значение 0,8. Кажется, что для нахождения скорости потока жидкости на оси трубки контура стоило использовать общую формулу, учитывающую зависимость $M=M(H)$, тем более что эта экспериментально измеренная зависимость известна. Возможно, что различие между численным решением уравнения (3.1) и экспериментальными точкам на рис. 3.12 связано не только с учетом в уравнении (3.1) влияния гравитационной конвекции, но и с этим вышеуказанным несоответствием.

4. Новый оптимальный по концентрации образец, о котором идет речь в §3.3, по всем параметрам находится между образцами № 2 и № 3 из §3.1, см. табл. 3 и 5, но не по параметру коэффициента объемного теплового расширения (0,68 не между 0,6 и 0,64).
5. По экспериментально измеренной кривой намагничивания (рис. 3.15) методом магнитогранулометрического анализа была рассчитана намагниченность насыщения в 20,7 кА/м. Этот образец с объемной долей твердой фазы 0,073 более концентрированный, чем образец № 2 из §3.1 с объемной долей твердой фазы 0,061. Это означает, что и намагниченность насыщения у него должна быть больше, а она у образца №2 21,0 кА/м (см. табл. 4). Связано ли это с погрешностью метода дифференциальной прогонки, которым измеряются кривые намагничивания, или же имеется ошибка в приведенных значениях? Кстати, в статье [2] из списка литературы утверждается, что у того же самого образца № 2 намагниченность насыщения составляет 20,2 кА/м.
6. В §4.1 на с. 82 делается вывод о том, что для данного образца магнитной жидкости увеличение амплитуды магнитного поля с 29 кА/м до 190 кА/м не только не усиливает глобальную термомагнитную конвекцию, но и блокирует сравнительно слабую гравитационную. Хочется понять, возможна ли в общем случае произвольного образца магнитной жидкости какая-нибудь оптимизация: как понять, до какого значения есть смысл увеличивать поле?
7. §4.1 основан на гипотезе о тромбировании контура каплевыми агрегатами. Казалось бы, эту гипотезу можно проверить прямым вскрытием контура. Например, в §4.1 на с. 85 указано, что спустя приблизительно 30 ч после основного эксперимента при включении нагревателя область вблизи нагревателя вновь «прогревается», но глобальное течение в контуре отсутствует. Как контур очищался от тромба, чтобы его можно было использовать в дальнейших экспериментах?
8. За исходный образец (до сепарации) в §4.2 взята магнитная жидкость с такими физическими свойствами (см. таблицу 7), при которых даже у исходного образца каплевыми агрегатами могло и не образовываться (см. для сравнения похожие образцы из §3.1). Однако в §4.3 нет сравнения исходного образца (в котором в сильном поле могли и не образоваться каплевые агрегаты) и сепарированного (без каплевыми агрегатами). Почему-то изучен только сепарированный образец. Для надежности и наглядности следовало бы взять образец из §4.1 (в котором в сильном поле образуются каплевые агрегаты) и его сепарировать.
9. В §4.3 на с. 91 написано, что для сравнения берется образец жидкости № 4 из табл. 3. Это опечатка. Должен быть образец жидкости № 1 из табл. 3.
10. На рис. 4.15 для сравнения с сепарированным образцом в сильном поле (190 кА/м) приведены результаты опытов в умеренном поле (29 кА/м) с образцом жидкости № 1 (см. табл. 3), который описан как «близкий по теплофизическим параметрам к сепарированному образцу». С этим нельзя согласиться. Этот образец близок по значениям плотности, объемной доли твердой фазы и вязкости, но сильно отличается по величине среднего магнитного момента частиц (1,6 против 2,9) и функции распределения частиц по диаметрам магнитных ядер (см. рис. 3.4 и рис. 4.12). Вместо этого сравнения с образцом жидкости № 1 (см. табл. 3) из §3.1 следовало провести сравнение с исходным образцом из §4.2, который и был изначально взят для сепарирования.

Перечисленные вопросы и замечания не ставят под сомнение достоверность основных

результатов и справедливость выводов диссертационной работы, а также не влияют на общее положительное мнение о работе.

Заключение. Диссертационная работа М.А. Коскова полна и последовательна, написана понятно. Работа содержит необходимое количество иллюстративного материала. Диссертационное исследование выполнено автором самостоятельно, на высоком уровне и является завершенной научно-квалификационной работой в области экспериментального изучения теплопереноса магнитными жидкостями под воздействием внешнего магнитного поля. Экспериментальная методика, изложенная в диссертации, применима в других исследованиях тепловой конвекции.

Аннотация соответствует установленным требованиям и полностью отражает основное содержание диссертации.

Таким образом, представленная диссертационная работа «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 «О порядке присуждения ученых степеней», 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

научный сотрудник

лаборатории физико-химической гидродинамики

НИИ механики МГУ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет

имени М.В. Ломоносова»,

кандидат физико-математических наук

Виноградова Александра Сергеевна

2 июня 2025 г.

119192, г. Москва, Мичуринский проспект, д. 1

НИИ механики МГУ

www.imec.msu.ru

тел.: +7(495)939-59-74

e-mail: alexandra.vinogradova@imec.msu.ru

Подпись А.С. Виноградовой заверяю

И.о. директора НИИ механики МГУ,
ФГБОУ ВО «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»,
профессор