

УТВЕРЖДАЮ

Проректор – начальник Управления научной  
политики и организации научных  
исследований МГУ,  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
Федянин Андрей Анатольевич



2019 г.

### ОТЗЫВ

**ведущей организации – Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования «Московский  
государственный университет имени М.В. Ломоносова»  
на диссертацию Сидорова Александра Сергеевича  
«Термомагнитная конвекция в вертикальном слое магнитной жидкости»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости газа и плазмы**

**Актуальность темы диссертации.** Работа Сидорова А.С. посвящена исследованию термогравитационной конвекции магнитной жидкости и влиянию на нее однородного магнитного поля. В работе затрагиваются современные проблемы, включающие в себя ряд фундаментальных задач, активно изучаемых в последнее десятилетие: тепло- и массоперенос в наножидкостях, термомагнитная конвекция, влияние седиментации и термофореза коллоидных частиц на конвективные течения, периодические процессы вблизи порога конвекции.

Экспериментальные исследования проводились в плоских кюветах в форме параллелепипеда, а также в двух плоских вертикальных каналах, связанных друг с другом. Конвекция в плоской вертикальной кювете, подогреваемой сбоку, хорошо исследована для однокомпонентных жидкостей и бинарных растворов. Эксперименты с магнитными жидкостями в магнитном поле выполнялись впервые.

Понимание закономерностей конвекции и теплообмена магнитных жидкостей имеет прикладное значение. Во многих случаях теплообмен за счет термомагнитной конвекции может оказаться более эффективным в сравнении с гравитационной конвекцией, например, в микроэлектромеханических системах или в условиях микрогравитации на борту космических аппаратов.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в том, что в ней впервые:

1. Экспериментально исследованы различные режимы конвективных течений в вертикальном плоском слое магнитной жидкости при нагревании сбоку в приложенном однородном магнитном поле;
2. Экспериментально обнаружен режим суперпозиции стационарных вертикальных валов и термомагнитных волн, описанный ранее в теоретических расчетах;
3. Обнаружено влияние на устойчивость основного подъёмно-опускного течения в вертикальном слое, подогреваемого сбоку, ориентации вектора магнитного поля в горизонтальной плоскости;
4. Обнаружен периодический режим термогравитационной конвекции в вертикальном слое магнитной жидкости, подогреваемого сбоку. Показано, что причина такого режима – термофорез частиц поперек слоя;
5. Изучены особенности конвективных течений в вертикальном слое магнитного коллоида с начальным неоднородным распределением частиц в отсутствие и в присутствии магнитного поля;
6. Обнаружена периодическая смена направления термогравитационного конвективного течения магнитной жидкости в связанных вертикальных каналах при подогреве снизу. Показано, что термофорез частиц поперек каналов может быть причиной этого явления.

**Научная и практическая значимость работы** заключается в том, что результаты диссертационного исследования вносят вклад в создание теории конвекции магнитных жидкостей и способствуют пониманию сложных процессов, происходящих в наножидкостях, связанных с транспортом твердых частиц. Результаты экспериментов могут быть полезны при разработке магнитожидкостных датчиков и теплообменных устройств. Понимание влияния приложенного магнитного поля на конвективный теплоперенос важно для разработки эффективных теплообменных устройств, в которых используется термомагнитный механизм конвекции. Изготовленные экспериментальные установки и разработанные методики можно использовать для проведения других научно-исследовательских работ.

**Апробация работы.** Результаты работы представлялись на российских и международных научных конференциях. Основные результаты исследования были представлены и обсуждены на научных семинарах.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования опубликованы в 35 печатных работах, из них 5 статей опубликованы в журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus и входящих в список ВАК.

**Достоверность результатов** обосновывается воспроизводимостью экспериментов, проведением специальных дополнительных расчетов и тестов для отработки методик визуализации и сопоставлением результатов с известными теоретическими расчетами. Основные физические свойства магнитной жидкости, влияющие на конвективное течение, определялись в специальных дополнительных экспериментах.

**Оценка содержания диссертации.** Диссертационная работа состоит из

введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во **введении** обоснованы актуальность, новизна и научная значимость работы, сформулированы основные положения, обозначены цели и задачи исследования.

**Первая глава** посвящена описанию современного состояния исследований в области конвекции магнитных жидкостей. Проведен обзор литературы с задачами по термомагнитной конвекции.

Во **второй главе** описана методика проведения экспериментов по конвекции магнитной жидкости в узкой вертикальной прямоугольной кювете, подогреваемой сбоку. Представлено подробное описание экспериментальной установки. Описаны методики визуализации и измерения поля температуры на поверхности жидкости с помощью жидкокристаллических пленок и с помощью тонкой пластины и тепловизора. Приведены основные физические параметры магнитных жидкостей и описаны дополнительные эксперименты по их измерению.

В **третьей главе** представлены результаты экспериментов по исследованию взаимодействия термомагнитных и термогравитационных конвективных течений в вертикальном слое магнитной жидкости, помещенном в горизонтальное магнитное поле. Показано, что потеря устойчивости основного подъемно-опускного конвективного течения связана с формированием системы вертикальных термомагнитных валов. Подробно описаны структуры конвективных течений, которые согласуются с теоретическими расчетами.

Показано, как нормальная так и тангенциальная (по отношению к широкой плоскости кюветы) компоненты магнитного поля влияют на устойчивость исходного конвективного потока. Нормальная компонента поля за счет термомагнитной силы дестабилизирует основное течение, а тангенциальная составляющая поля подавляет возмущения, соответствующие вертикальным термомагнитным валам и тем самым, препятствует их развитию.

**Четвертая глава** посвящена изучению влияния концентрационных неоднородностей частиц на конвективные течения магнитного коллоида. Показано, что специально созданные седиментационные неоднородности концентрации частиц влияют на развитие конвекции, приводят к формированию сложных конвективных структур. Также показано, что сама конвекция может быть причиной перераспределения частиц за счет термофореза.

В **заключении** приведены итоги работы, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Следует отметить полученные в диссертации **основные результаты**:

1. Обнаружена пороговая потеря устойчивости основного термогравитационного конвективного течения в вертикальном слое хорошо перемешанной магнитной жидкости, наблюдаемая в виде вертикальных термомагнитных валов. Показано, что нормальная компонента магнитного поля способствует неустойчивости основного термогравитационного течения, а тангенциальная компонента служит стабилизирующим фактором.
2. Показано, что термофорез коллоидных частиц в горизонтальном направлении является причиной периодического изменения направления конвективного течения магнитной жидкости в вертикальных каналах, связанных друг с другом, при

- подогреве снизу (в отсутствии магнитного поля).
3. В вертикальном слое магнитной жидкости при подогреве сбоку обнаружен режим конвекции, когда основное термогравитационное течение периодически разрушается возникающими внизу слоя горизонтальными валами (в отсутствии магнитного поля). Показано, что именно термофорез частиц и вызванное им перераспределение концентрации частиц в магнитной жидкости отвечает за это.
  4. Обнаружено, что в вертикально стратифицированном по плотности магнитном коллоиде развитие основного конвективного течения начинается формированием системы горизонтальных валов (в отсутствии магнитного поля).
  5. Показано, что начальные вертикальные градиенты концентрации влияют на развитие термомагнитной конвекции в вертикальном слое магнитной жидкости, подогреваемой сбоку: система вертикальных термомагнитных валов, характерная для хорошо перемешанной магнитной жидкости, распадалась на отдельные мелкомасштабные структуры.

К недостаткам работы можно отнести следующее:

1. Глава 3 начинается с изложения теоретической постановки задачи о термомагнитной конвекции в вертикальном слое магнитной жидкости, подогреваемой сбоку. К сожалению, только после прочтения нескольких страниц становится ясно, что излагаются результаты работы С.А.Суслова (Suslov S.A. Thermomagnetic convection in a vertical layer of ferromagnetic fluid // Phys. Fluids. 2008. V. 20. P. 084101(36)). При этом не введена часть обозначений (и вообще, отсутствует список обозначений), например, параметр  $\chi$ . На стр. 52 в предпоследней строке опечатка в формуле для  $\chi^*$ . Также равенство на последней строке этой страницы в общем случае не верно.
2. На стр. 84 в пятой и девятой строке ошибочно употребляется слова «градиент поля» вместо «поле». Именно влияние на течение направления однородного приложенного магнитного поля, а не его градиента, исследуется в данной работе.
3. В главе 4 утверждается, что в подогреваемом сбоку слое магнитной жидкости из-за термофореза возникает вертикальный градиент концентрации, который и приводит к возникновению отдельного горизонтального вихря внизу слоя жидкости. Хотелось бы более подробного объяснения механизма возникновения такого вихря.
4. Следует отметить некоторые недочеты в стиле изложения, например, на стр. 113 написано: «если магнитная жидкость находилась... в горизонтальном положении».

Отмеченные недостатки не меняют общей положительной оценки диссертации Сидорова А.С. и носят рекомендательный характер для последующих исследований автора.

### **Заключение**

Диссертация Сидорова Александра Сергеевича «Термомагнитная конвекция в вертикальном слое магнитной жидкости», является законченной научно-квалификационной работой в области экспериментального исследования конвекции магнитных жидкостей, соответствующей специальности 01.02.05 – Механика

жидкости газа и плазмы. Работа написана понятным научным языком и подробно проиллюстрирована. Автореферат в достаточном для понимания объеме отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа «Термомагнитная конвекция в вертикальном слое магнитной жидкости» соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Сидоров Александр Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости газа и плазмы.

Отзыв обсужден и утвержден на заседании секции физико-химической газодинамики Ученого совета НИИ механики ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», протокол № 3 от 18 сентября 2019 года.

Присутствовало на заседании 9 человек. В обсуждении приняли участие 4 человека. Результаты голосования: «за» – 9, «против» – 0, «воздержалось» – 0.

Профессор  
доктор физико-математических наук,  
председатель секции Ученого совета,  
заведующий лабораторией физико-химической гидродинамики  
НИИ механики МГУ

Полянский Виталий Александрович

Профессор  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник лаборатории физико-химической гидродинамики НИИ  
механики МГУ

Налетова Вера Арсеньевна

Подписи В.А. Полянского и В.А. Налетовой заверяю

Зам. директора НИИ механики МГУ,  
доктор физико-математических наук

Н.А. Остапенко

**Сведения о ведущей организации:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет и М.В. Ломоносова»

Почтовый адрес: 119991 г. Москва, Ленинские горы, 1.

Тел.: (495) 939-10-00

Электронная почта: [info@rector.msu.ru](mailto:info@rector.msu.ru)

Web-сайт: <http://www.msu.ru>