

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Сидорова Александра Сергеевича «**Термомагнитная конвекция в вертикальном слое магнитной жидкости**», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 –  
Механика жидкости, газа и плазмы

### **Актуальность проблемы**

Диссертационная работа Сидорова А.С. посвящена исследованию термомагнитной конвекции магнитной жидкости вблизи порога неустойчивости. В работе представлены экспериментальные исследования, выполненные лично автором, с целью получения новой информации о структурах и режимах термомагнитных и термогравитационных конвективных течений в прямоугольной полости и связанных вертикальных каналах. Экспериментальные результаты получены в ходе продолжительных (почти 10 лет), хорошо спланированных, трудоемких наблюдений. Представленные результаты обладают убедительной наглядностью, сопровождаются хорошей интерпретацией и теоретическими оценками. Представленная работа позволяет сократить разрыв между теоретическими (преимущественно – численными) и экспериментальными исследованиями термомагнитной конвекции в магнитных жидкостях, что может быть полезным при конструировании магнитожидкостных датчиков и теплообменников, поэтому **тема диссертации является актуальной.**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы на 147 позиций; изложена на 138 страницах, содержит 54 рисунка и 2 таблицы.

**Во введении** обсуждается актуальность выбранной темы, сформулированы цель, новизна, научная и практическая значимость работы, апробация работы и основные положения, выносимые на защиту.

**В 1-ой главе** очень кратко обсуждается современное состояние исследований в указанной области знаний, объясняется механизм термомагнитной конвекции в магнитных жидкостях, обсуждаются управляющие безразмерные параметры задачи: тепловые, концентрационные и магнитные числа Грасгофа и Рэлея.

**Во 2-ой главе** описан объект исследований и экспериментальные установки для изучения свойств магнитной жидкости и термомагнитной конвекции в них. Отдельного упоминания заслуживает подробное описание методики и самодельной установки для измерения температуропроводности магнитной жидкости. Основное внимание главы посвящено способам визуализации конвективных структур и измерению температурного поля поверхности жидкости (обсуждаются два способа визуализации – с помощью жидкокристаллического термоиндикатора и тепловизора). Приводится обоснование выбора геометрии и конструкции ячейки, представляющей собой вертикальный прямоугольный слой, толщина которого на порядок меньше ширины, которая, в свою очередь, в 3-4 раза меньше высоты. Даны оценки безразмерных параметров, определяющих размеры и конструкцию

ячейки, а также характерные времена релаксации, определяющие поведение изучаемой системы. Вычислены погрешности измерения температуры поверхности жидкости. Представлены результаты тестовых опытов (без магнитной жидкости), позволяющих убедиться в работоспособности предложенной методики, обосновать связи между наблюдаемыми сигналами и измеряемыми величинами. Дается описание экспериментальной установки для изучения конвекции в вертикальном слое при обогреве сбоку, исследуется однородность внешнего магнитного поля, вызывающего термомагнитную конвекцию в исследуемых образцах.

**В 3-ей главе** приведены основные результаты диссертации, посвященные исследованию термомагнитной и термогравитационной конвекции в магнитной жидкости. Исследуется термомагнитная гидродинамическая устойчивость течения в вертикальном слое, записывается система уравнений, описывающая механические, термодинамические и электромагнитные процессы в объекте исследования. Анализируется карта течений в вертикальном слое магнитной жидкости, помещенном во внешнее однородное магнитное поле. Карта течений наглядно показывает возможность существования различных типов течений: стационарного подъемно-опускного, стационарного термомагнитного течения в виде валов, течения в виде термогравитационных волн, а также течений в виде термомагнитных волн с различными волновыми числами. Приводятся результаты экспериментов, подтверждающих правильность теоретических предсказаний. Эксперименты посвящены отысканию критических режимов (момент начала конвекции), результаты представлены в виде графиков, разделенных на области, соответствующие различным конвективным режимам. Показана эволюция структуры конвективных течений по мере увеличения прикладываемого магнитного поля. В конце главы приводится обобщенная экспериментальная диаграмма термомагнитной устойчивости термогравитационного течения магнитной жидкости в вертикальном слое при обогреве сбоку для различных углов наклона вектора магнитного поля.

**В 4-ой главе** изучается влияние начального (стратифицированного) состояния магнитной жидкости на появление и развитие термомагнитной конвекции в образце. Приводится описание и результаты остроумного эксперимента, позволяющего убедительно продемонстрировать влияние пространственного перераспределения коллоидных частиц (за счет термодиффузии) на смену направления слабого конвективного движения магнитной жидкости в связанных вертикальных каналах. Эксперимент является повторением аналогичных исследований, проведенных ранее с немагнитными жидкостями (Путин Г.Ф., Глухов А.Ф., 2010). Эксперимент является виртуозным и поучительным сразу по двум причинам: во-первых, демонстрируется сильное влияние термофореза коллоидных частиц на формирование концентрационной стратификации коллоида, а, во-вторых, показывается значительное влияние этой стратификации на конвективный массоперенос в жидкости. В этой главе представлен также второй эксперимент, носящий, правда, скорее качественный, чем количественный,

характер, и всё с той же целью, что и предыдущий эксперимент – наглядно показать влияние начальных условий на конвекцию в магнитной жидкости. Эксперимент демонстрирует эволюцию конвективных структур, образующихся в начале эксперимента благодаря конкуренции тепловой и концентрационной подъемной сил. Изначально формирующиеся система коротковолновых конвективных валов диаметром порядка толщины слоя трансформируется в единое подъемно-опускное течение за счет плавного конвективного перемешивания и, следовательно, устранения изначального концентрационного расслоения в системе. В качестве дополнительных сведений об эксперименте приводится сравнение траекторий движения границ валов, полученных экспериментально и численно (вычисления проведены Черепановым И.Н. и Смородиным Б.Л.), что, по всей видимости, говорит о единстве эксперимента и теории в вопросе термомагнитной и термогравитационной конвекции в магнитных жидкостях.

#### **Оценка новизны и достоверности**

В диссертационной работе установлены новые закономерности термомагнитных и термогравитационных конвективных течений в магнитных жидкостях. Экспериментально получена карта режимов и структур конвективных термомагнитных течений в вертикальном плоском слое, подогреваемом сбоку. Экспериментально обнаружен режим суперпозиции стационарных вертикальных валов и термомагнитных волн. Изучено влияние концентрационной стратификации магнитной жидкости на конвективные течения. Продемонстрирована возможность влияния термофореза магнитных частиц поперек конвективного потока в каналах, что может приводить к изменению основного конвективного потока вплоть до смены его направления.

Достоверность большинства результатов диссертационного исследования обеспечивается удачными пробными и юстировочными экспериментами, использованием типовых методик магнитных и теплофизических измерений. Наблюдается воспроизводимость экспериментальных наблюдений, анализируется погрешность измерений. Большинство полученных экспериментальных результатов находится в хорошем качественном и количественном согласии с теоретическими оценками, данными численного моделирования.

#### **Практическая значимость**

Диссертация посвящена вопросам тепло- массопереноса в магнитных жидкостях. Результаты исследования могут быть использованы при конструировании магнитоуправляемых систем охлаждения. Практическая значимость диссертации обусловлена насущной проблемой отвода тепла от высокопроизводительных электронных микросхем в условиях микрогравитации, когда классическая термогравитационная конвекция отсутствует и единственной возможностью перемешать неоднородную по температуре магнитную жидкость остаётся термомагнитная конвекция.

#### **Замечания**

По содержанию диссертации могут быть сделаны следующие замечания:

1. При представлении экспериментальных результатов в диссертации принято указывать напряженность внешнего магнитного поля  $H_{out}$ , воздействующего на образец магнитной жидкости (далее - МЖ), а не величину магнитного поля в самом образце  $H_{in}$ , что, конечно, неправильно, так как влияние магнитного поля на термомагнитную конвекцию определяется через пондеромоторную силу  $M(H_{in})grad(H_{in})$ , в которую входит модуль вектора намагниченности жидкости  $M=M(H_{in})$  и градиент модуля вектора напряженности магнитного поля  $H_{in}$ .

Аргументация в пользу примененного упрощения, приведенная на стр. 51, оправдывающая использование  $H_{out}$  во всех уравнениях диссертации, является неубедительной. Автор пишет (цитата): «Уравнения (3.1)-(3.3) описывают безындукционное приближение, когда течение жидкости не влияет на намагниченность и магнитное поле в среде». Я не согласен по нескольким причинам. Во-первых, система уравнений (3.1)-(3.3) не содержит уравнений Максвелла, и поэтому в равной степени справедлива как для индукционного, так и для безындукционного приближений (магнитофоретическая сила Кельвина в уравнении Навье-Стокса (3.2) записана корректно, для самого общего случая). Во-вторых, под безындукционным приближением обычно понимается ситуация, когда магнитная жидкость находится в состоянии насыщения, т.е. поле (в т.ч. размагничивающее), создаваемое контейнером с МЖ, пренебрежимо мало в сравнении с внешним полем. Это соответствует ситуации, когда восприимчивость  $\chi \approx 0$  (т.е. когда намагниченность  $M$  достигает своего значения насыщения  $M \approx M_s$ ). Это условие не достигается ни в одном из представленных в диссертации эксперименте: внешнее поле  $H_0$ , генерируемое катушками Гельмгольца, ожидаемо не превышает 35 кА/м. Согласно приведенной на Рис. 2.1 кривой намагничивания образца МЖ, такое поле неспособно намагнитить жидкость и до половины значения намагниченности насыщения  $M \approx M_s/2$ . Поэтому во всех экспериментах  $\chi \sim 1$  и пренебрегать в таком случае полем, создаваемым МЖ, нельзя.

2. В связи с замечанием № 1 автоматически возникает следующее замечание: в экспериментах с «наклонным» магнитным полем, когда силовые линии однородного внешнего магнитного поля ориентированы под некоторым углом  $\alpha_{out}$  к плоскости слоя, необходимо учитывать, что этот угол внутри жидкости (т.е. тот, которые на самом деле и определяет режим термомагнитной конвекции), другой  $\alpha_{in} \neq \alpha_{out}$ . Автор обсуждает стабилизирующее и дестабилизирующее действие тангенциальной и нормальной компонент напряженности магнитного поля на термомагнитную конвекцию, однако неправомерное использование безындукционного приближения не позволяет автору корректно вычислять нормальную компоненту поля  $H_{in}$  (тангенциальные компоненты, конечно, в силу граничных условий, равны).

3. В главе 2 диссертации нет в явном виде информации о том, какой тип термодинамических граничных условий реализуется в том или ином эксперименте. Так, некоторые измерения в плоском вертикальном слое производится при термостатировании одной из широких сторон с помощью термостата (что

позволяет говорить о постоянстве температуры этой стенки, т.е.  $T = \text{const}$ ), а вторая сторона кюветы при этом находится в соприкосновении с окружающим воздухом. Автор пишет, что температура воздуха в лабораторном помещении поддерживалась постоянной с помощью кондиционера, однако такой информации недостаточно для того, чтобы однозначно определить тип реализованного граничного условия. Более того, в некоторых опытах использовался вентилятор для принудительного обдува образца, что усложняет интерпретацию, так как от скорости обдува зависит конечный результат. На стр. 41 приводится значение подобранного коэффициента теплоотдачи в воздух при включенном вентиляторе. Можно показать, что при отличии температуры стенки кюветы и воздуха на 25 С тепловой поток составляет примерно  $625 \text{ Вт/м}^2$ . При этом оценка тепловых потерь на излучение по формуле Стефана-Больцмана предсказывает величину того же порядка –  $170 \text{ Вт/м}^2$ , однако это нигде в диссертации не обсуждается.

4. Выражения для характерного диффузионного времени установления концентрационных профилей, приведённые на с. 13 и с. 101, отличаются множителем  $\pi^2$ . Какое из них использовалось?

5. На стр. 44 заявлено, что ЭДС медь-константановых термопар составляла  $40 \text{ мкВ/К}$ . Это значение, во-первых, не является константой, а зависит от измеряемой температуры  $T$ . Во-вторых, подобные термопары рекомендуется самостоятельно проверять в градуировочных опытах (среднее значение термоЭДС, получаемое в лабораторных опытах при комнатных температурах оказывается примерно равным  $38 \text{ мкВ/К}$ ). Можно сделать вывод, что автор такие градуировочные опыты не проводил.

6. К диссертации также имеются и формальные замечания:

- Глава 1 диссертации, представляющая собой обзор литературы по теме исследования, является очень краткой – всего лишь 7 (Семь) страниц, хотя сам список литературы достаточен и включает 147 наименований. Не хватает обсуждения преимуществ и недостатков предшествующих работ, сопоставление с результатами других авторов, в т.ч. коллег по кафедре «Общей физики» ПГНИУ, а именно – Краузиной М.Т. и Божко А.А.;
- В тексте встречаются неудачные выражения: на стр. 31 «Погрешность измерений температуры ... складывается из погрешностей термостатов...», на стр. 97 «Конвекция всегда предполагает наличие температурных неоднородностей...», на стр. 100 «...магнитная жидкость на основе ундекана, где тяжелых фракций нет, а коллоидные частицы есть», «График экспериментальной интенсивности...», на стр. 105 «..температурная подъемная сила».

Однако отмеченные недостатки несколько не снижают научного значения диссертации и не уменьшают ценности проделанной Сидоровым А.С. экспериментальной работы. Объяснением моего итогового суждения о диссертации, несмотря на указанные замечания, является то, что в диссертации

исследуется пороговый процесс (нарушение механической устойчивости гидродинамической системы) и структура течений, возникающих в околокритическом режиме. Автор диссертации не выносит на защиту ни методику измерений, ни высокую точность полученных измерений, наоборот, подчеркивается качественный характер полученных наблюдений (справедливо отмечается, например, что погрешность определения температуры составляет около 30%), их наглядность и общность для всех магнитных жидкостей.

Представленная диссертация является завершенной научно-исследовательской работой. Диссертация имеет существенное значение для развития науки о физико-химических свойствах высокодисперсных магнитных наноматериалов (магнитной жидкости).

Материалы работы апробированы на научных конференциях Всероссийского и Международного уровня. Основные положения работы полностью отражены в **опубликованных работах**, 5 (Пять) из которых опубликованы в журналах, входящих в систему цитирования Web of Science, Scopus и входящих в список ВАК. Содержание автореферата и диссертации совпадает.

#### **Заключение**

Диссертационная работа **Сидорова Александра Сергеевича** на тему **«Терромагнитная конвекция в вертикальном слое магнитной жидкости»** является завершенной научной квалификационной работой, и соответствует критериям, установленным п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. Диссертация соответствует квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК России, к диссертациям на соискание степени кандидата наук, а ее автор, **Сидоров Александр Сергеевич**, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Дата: 15.11.2019 г.

Официальный оппонент, заведующий лабораторией «Динамики дисперсных систем» Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ИМСС УрО РАН»), кандидат физико-математических наук, доцент

Иванов Алексей Сергеевич

Подпись А.С. Иванова заверяю.

Подтверждаю, что А.С. Иванов не входит в состав членов диссертационного совета Д 004.036.01, утвержденных приказом Минобрнауки России N 87/нк от 26 января 2018 г.

Ученый секретарь ИМСС УрО РАН, к.ф.-м.н.  Юрлова Наталья Алексеевна

Я, Иванов Алексей Сергеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

e-mail: [lesnichiy@icmm.ru](mailto:lesnichiy@icmm.ru), Тел.: 8-912-78-658-36

Почтовый адрес:

614013, г. Пермь, ул. Акад. Королёва, 1

Лаборатория «Динамики дисперсных систем» ИМСС УрО РАН,

web-сайт: <http://www.icmm.ru/>