

На правах рукописи

Колчанов Николай Викторович

**ГРАВИТАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ
В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ).

Научный руководитель: **Пшеничников Александр Фёдорович**, доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Брацун Дмитрий Анатольевич**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной физики ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (г. Пермь).

Ряполов Петр Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск).

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится **14 марта 2019 г.** в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « ____ » февраля 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент



/ А.Л. Зуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Изучение тепловой конвекции в магнитной жидкости изначально было мотивировано возможностью управлять процессами теплопередачи при помощи внешнего магнитного поля. Исследования термомагнитной конвекции активно проводились в 60-70 годы прошлого века с целью её применения в устройствах теплопередачи, в том числе, в условиях низкой гравитации на космических аппаратах. Однако, с появлением тепловых труб, мощность теплопередачи которых в 10-100 раз превышала аналогичную характеристику устройств с магнитными жидкостями, активность исследований термомагнитной конвекции резко упала. Кроме того, высокая цена магнитной жидкости ограничивает её применения в устройствах теплообмена с большими объёмами жидкого теплоносителя. Несмотря на представленные ограничения, исследования конвекции в магнитной жидкости остаются актуальными в связи с разработкой малогабаритных устройств теплообмена, в которых из-за конструктивных особенностей тепловые трубы применить невозможно.

Еще одна причина повышенного интереса к конвекции в магнитных жидкостях – седиментация частиц. В магнитных жидкостях, являющихся коллоидными суспензиями, действие гравитационного поля Земли на коллоидные частицы приводит к их седиментации, а конкуренция между седиментацией и градиентной диффузией – к формированию барометрического распределения плотности по высоте, подобного распределению молекул воздуха в атмосфере. Масса коллоидных частиц в магнитных жидкостях на четыре – пять порядков превышает массу молекул азота и кислорода, поэтому характерные седиментационные расстояния для частиц измеряются не в километрах, а в сантиметрах. Появляется потенциальная возможность смоделировать в лабораторных условиях конвективные процессы, происходящие в атмосферах Земли и других планет, используя небольшие установки сантиметровых размеров. Такие эксперименты могут показать специфику конвективных течений, возникающих на фоне барометрического распределения плотности.

В неоднородно нагретых магнитных жидкостях появляется еще один механизм переноса частиц, связанный с термодиффузией частиц. После того, как в экспериментах Ж-К Бакри, Межулиса, Э.Я. Блумса и в аналитических работах К.И. Морозова в начале 2000-х годов было установлено, что коэффициент термодиффузии частиц в магнитной жидкости на 1-2 порядка выше по сравнению с молекулярными растворами, интерес к задаче о гравитационной конвекции в коллоидных суспензиях существенно вырос. Если иметь в виду термодиффузионное разделение частиц по размерам, то задача об устойчивости механического равновесия неоднородной по температуре магнитной жидкости становится актуальной, т.к. конвекция оказывается нежелательным процессом, стремящимся перемешать неоднородное распределение частиц в объёме.

Еще одна причина интереса к тепловой конвекции в магнитных жидкостях – формирование в коллоидном растворе агрегатов в результате Ван-дер-ваальсовых и магнитодипольных межчастичных взаимодействий и их потенциальное влияние

на конвективные течения. С одной стороны, наличие агрегатов в магнитной жидкости может существенно повлиять на пороговое значение числа Рэлея, а с другой – конвективные опыты могут дать дополнительную информацию о свойствах этих агрегатов.

Конвенция в горизонтальном слое исследуется с начала 20-го века, начиная с работ Рэлея (1916) и Бенара (1900, 1901), поэтому в обычных молекулярных жидкостях она изучена основательно. В случае магнитных жидкостей ситуация другая. Большинство методов исследования тепловой конвекции, применимых к обычным жидкостям, не подходят для магнитных жидкостей. В связи с этим степень разработанности темы диссертации остаётся недостаточной для ответов на вопросы, связанные с вышеперечисленными факторами.

Исследования, результаты которых содержатся в диссертации, проводились при поддержке проектов РФФИ № 12-08-31423 мол_а; № 16-31-00040 мол_а и гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (№ 4022.2014.1).

Цели и задачи диссертационной работы

Основной задачей работы является экспериментальное исследование гравитационной конвекции в подогреваемом снизу горизонтальном слое магнитной жидкости в условиях слабой и умеренной надкритичности с целью получения информации о конвективных течениях, их особенностях, зависимости структуры течения и интегрального теплопереноса от средней температуры и начального состояния магнитной жидкости. Все измерения проведены в нулевом магнитном поле, поэтому магнитные свойства коллоидного раствора проявляются только через магнитодипольные взаимодействия и образование агрегатов.

Научная новизна результатов

В отличие от предыдущих работ по конвекции в магнитных жидкостях в данной диссертационной работе основное внимание сфокусировано на конвекции в области умеренных надкритических режимов при $Ra_c < Ra < 3Ra_c$ (где Ra_c – критическое число Рэлея, соответствующее неустойчивости механического равновесия относительно слабых возмущений), седиментации агрегатов и интегральном тепловом потоке через плоский слой магнитной жидкости. В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие новые результаты:

1. Разработана, изготовлена и отъюстирована установка с тепловизионной системой, позволяющая визуализировать и измерять поля температур на границе горизонтального слоя магнитной жидкости.
2. Исследована структура конвективных течений в области умеренных чисел Рэлея, обнаружена нестационарная конвекция магнитной жидкости с упорядоченной пространственной структурой.
3. В жидкости с барометрическим распределением частиц и агрегатов по высоте обнаружены конвективные квазирегулярные колебания, с характерным периодом 7 – 9 мин. В отсутствие барометрического распределения колебания не возникают.
4. Критическое значение числа Рэлея Ra_c увеличивается, а число Ra , соответствующее границе нестационарных режимов, уменьшается примерно на 15 - 20%

при повышении средней температуры жидкости с 20 до 55 °С. Это интерпретируется как проявление зависимости седиментации агрегатов от температуры.

5. Несмотря на сложный состав магнитных жидкостей, существование в них седиментационных, диффузионных и термодиффузионных процессов, сложную нестационарную структуру надкритических конвективных течений, интегральный теплоперенос через плоский слой магнитной жидкости в нулевом внешнем магнитном поле однозначно определяется обычным тепловым числом Рэлея.

6. Показано, что конвективные течения с упорядоченной структурой в околокритической области чисел Ra возникают из-за присутствия агрегатов, размер которых больше размера отдельных частиц в шесть и более раз.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанная в рамках диссертационной работы тепловизионная система для исследования конвекции в горизонтальном слое может быть применена в других конвективных задачах. Разработанные для измерения вязкости магнитной жидкости оригинальные датчики уровня позволяют расширить область применения капиллярных вискозиметров на непрозрачные жидкости. Разнообразие конвективных режимов в слое магнитной жидкости в околокритической области чисел Ra не приводит к их существенному влиянию на интегральный теплопоток. Таким образом, при расчете тепловых потоков эти эффекты можно не учитывать.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. схема экспериментальной установки с тепловизионной системой, позволяющая измерять температурные поля на границе слоя магнитной жидкости;
2. зависимость структуры гравитационной конвекции в горизонтальном слое магнитной жидкости от начальных состояний системы;
3. существенное влияние средней температуры на конвективные колебания вблизи порога возникновения конвекции в магнитной жидкости;
4. в режиме развитой конвекции число Нуссельта является однозначной функцией числа Рэлея в пределах экспериментальной погрешности (2-3%) в широком интервале температур и теплофизических свойств магнитной жидкости;
5. утверждение о том, что формирование нестационарных режимов конвекции с упорядоченной пространственной структурой возможно только при наличии агрегатов, размеры которых больше 60 нм.

Методология и методы диссертационного исследования

При выполнении диссертационной работы использовались современные апробированные методы экспериментального исследования конвекции в магнитной коллоидной жидкости. Экспериментальная установка включала в себя датчик измерения теплового потока и систему тепловизионного наблюдения за конвекцией в горизонтальном слое. Датчик теплового потока состоял из нескольких термопар и твердой теплопроводной прослойки. Тепловизионные измерения поля температур с поверхности магнитного коллоида проводились при помощи тепловизора через стекло из LiF, которое входило в состав рабочей полости в качестве верхней границы и пропускало сквозь себя инфракрасное излучение. Тепловизор с охлаждаемой по циклу Стирлинга матрицей является на данный момент самым современным и чувствительным прибором, позволяющим различать объекты, температуры которых отличаются на 0.02 °С и больше. Ещё одной важной частью

системы тепловизионного наблюдения является система термостатирования верхней границы рабочей полости. Это оригинальная разработка автора диссертации. Она позволяет расширить возможности экспериментальной установки при конвективных исследованиях. Для анализа термограмм применялся метод построения трековых изображений. Для пульсаций температуры в точках на поверхности магнитного коллоида строились Фурье-спектры и вейвлет-диаграммы. Для измерения плотности и коэффициента объёмного расширения использовались пикнометры разных объёмов (5, 10, 25 мл), для измерения теплопроводности – стационарный метод плоского слоя. Измерение вязкости производилось с помощью капиллярного вискозиметра ВПЖ-2, оснащенного оригинальными датчиками, которые были разработаны автором для достижения основных целей диссертационной работы.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации обеспечивается проведением тестовых и чистовых опытов, а также качественным и количественным согласием с результатами более ранних работ других авторов, изучавших конвекцию в горизонтальном слое обычных жидкостей или в слое магнитной жидкости в другом диапазоне чисел Рэлея.

Апробация работы

Результаты работы представлялись на следующих конференциях: XVIII и XX Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь 2013, 2017); I-IV конференции «Пермские гидродинамические научные чтения» (Пермь 2013, 2014, 2015, 2016); Международной научной конференции «Фридмановские чтения» (Пермь 2013); XLII and XLIV International Summer School – Conference «Advanced Problems in Mechanics» (Санкт-Петербург 2014, 2016); X Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск 2014); Russian conference on Magneto Hydrodynamics (Пермь 2015); Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Математика и междисциплинарные исследования – 2016» (Пермь 2016); Международном симпозиуме «Неравновесные процессы в сплошных средах» в рамках Пермского Естественнонаучного форума «Наука и глобальные вызовы XXI века» (Пермь 2017); VI Российской конференции «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения» (Уфа 2017).

Личный вклад

Постановка задач и анализ результатов экспериментов, описанных в главах 2 и 3, осуществлялись автором совместно с научным руководителем Путиным Г.Ф. Анализ результатов эксперимента из главы 4 проводились автором при непосредственном участии научного руководителя Пшеничникова А.Ф. Автор разрабатывал, конструировал и настраивал все используемые в диссертационном исследовании измерительные системы (систему тепловизионного наблюдения, датчик теплового потока, модернизированный капиллярный вискозиметр ВПЖ-2 и др.). В ряде случаев в проведении конвективных экспериментов кроме автора участвовали студенты физического факультета ПГНИУ. Автором лично разрабатывались и реализовывались алгоритмы обработки результатов измерений.

Публикации

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 20 печатных работах [1]–[20]. Из них 2 статьи опубликованы в журнале, входящем в первый квартиль Web of Science, Scopus и рекомендованном ВАК, 3 статьи – в журнале с ненулевым импакт-фактором, входящем в седьмой дециль РИНЦ, 3 статьи – в различных сборниках докладов и материалах конференций, 12 работ – в тезисах докладов конференций.

Объём и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, включающего 200 наименований. Работа изложена на 115 листах и содержит 46 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится общая характеристика диссертационной работы, в которой прописываются: актуальность выбранной темы, основные цели, научная новизна результатов, их практическая и теоретическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, методы исследования, обоснованность и достоверность результатов исследования, список научных мероприятий, на которых апробировалась работа, личный вклад автора, число публикаций по теме диссертации, объём и краткое описание структуры текста диссертации.

В первой главе дается обзор литературы по теме диссертации. Сначала описываются состав и структурные особенности магнитных жидкостей. Затем большое внимание уделяется второму из ключевых понятий всей работы – конвекции. Рассматриваются статьи и другие литературные источники, посвящённые изучению гравитационной конвекции в горизонтальном слое однокомпонентной, бинарной, многокомпонентной молекулярной и магнитной жидкостей.

Вторая глава посвящена разработке и реализации методики наблюдения за тепловой конвекцией в горизонтальном слое жидкости с использованием тепловизора. Основной особенностью методики является применение прозрачных для инфракрасного излучения материалов (например, кристаллические соли NaCl, LiF и др.) при изготовлении рабочей полости. Во всех конвективных экспериментах, представленных в диссертации, горизонтальный слой жидкости моделировался рабочей полостью цилиндрической формы. Верхняя граница полости выполнялась из соли LiF, а нижняя – из алюминия. Боковые границы делались из органического стекла. Исследуемая жидкость заливалась в полость через латунные трубки, встроенные в боковую границу. Тепловизионные высокочувствительные измерения в условиях конвективного эксперимента были возможны только при наличии эффективной системы термостатирования верхней границы из LiF. На рис. 1 показана система термостатирования, разработанная в рамках диссертационной работы. Она устанавливалась над рабочей полостью и состояла из следующих деталей: деревянный корпус 1, регулировочные винты-ножки 2, вентиляторы 3, направляющая центральная труба 4, система рассекателей воздушного потока 5, медный трубчатый радиатор 6. Тепловизор размещался над системой термостатирования и через отверстие в центральной трубе 4 измерял поле температуры с поверхности исследуемых образцов жидко-

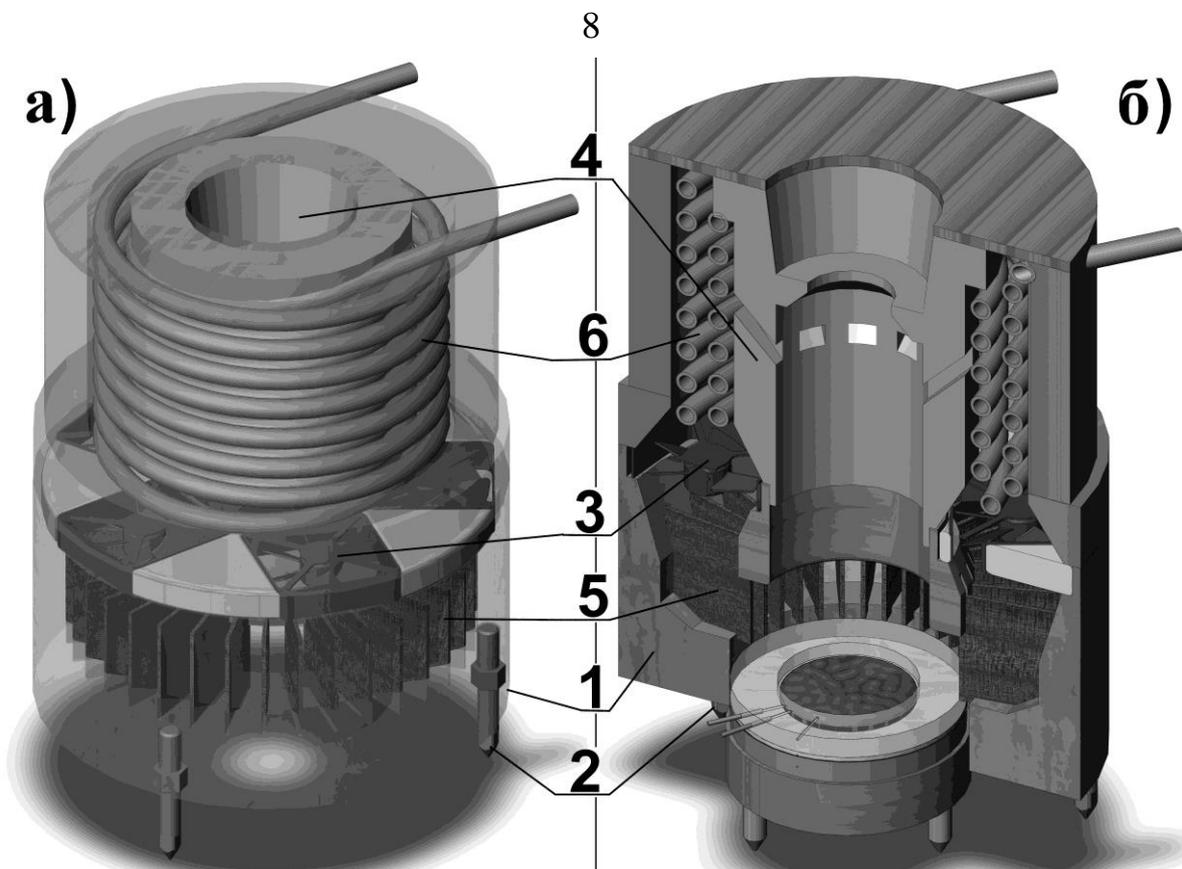


Рис. 1 Система термостатирования: а) внешний вид с прозрачным корпусом; б) вид диаметрального сечения.

стей. Температура воздуха, обдувающего верхнюю границу горизонтального слоя, и температура нижней границы слоя задавались при помощи двух жидкостных термостатов KRIO-VT-01.

Апробация проводилась с ундеканом и гексадеканом – однокомпонентными органическими жидкостями, отличающимися вязкостью. На основе ундекана сделана одна из двух магнитных жидкостей, конвекция которых изучалась в диссертации. По эмпирическим зависимостям числа Нуссельта от числа Рэлея $Nu(Ra)$, полученным по методу Шмидта-Мильвертона [1], определены критические числа Ra_c , начиная с которых в горизонтальном слое жидкости возбуждалась конвекция. Для ундекана Ra_c составило $(1.7 \pm 0.2) \cdot 10^3$, для гексадекана – $(1.72 \pm 0.03) \cdot 10^3$. Тепловизионный метод наблюдения позволил установить эволюцию конвективных течений с ростом Ra . На рис. 2 приведены термограммы с поверхности горизонтального слоя для режимов конвекции, характерных для однокомпонентных жидкостей. Пороговое значение Ra_c и другая информация о конвективных течениях согласуются с обобщёнными на карте режимов данными, представленными в работах [2] и [3].

В рамках тестирования разработанной системы тепловизионного наблюдения был проведен конвективный эксперимент с многокомпонентной молекулярной жидкостью – трансформаторным маслом. Конвективное течение в подогреваемом

[1] Schmidt R.J., Milverton S.W. On the instability of a fluid when heated from below // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1935. – Vol. 152. – №. 877. – P. 586-594.

[2] Гетлинг А.В. Конвекция Рэлея-Бенара. Структуры и динамика. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 248 с.

[3] Busse F.H. Non-linear properties of thermal convection // Rep. Prog. Phys. – 1978. – Vol. 41. – №. 12. – P. 1929.

снизу горизонтальном слое трансформаторного масла появлялось при меньших числах Рэлея, чем критическое значение такого для однокомпонентных жидкостей ($Ra_c = 1708$). Данный факт свидетельствует о наличии дополнительного, отсутствующего в однокомпонентных жидкостях, механизма массопереноса – нормальной термодиффузии. Конвективное поведение трансформаторного масла подобно поведению бинарной жидкости.

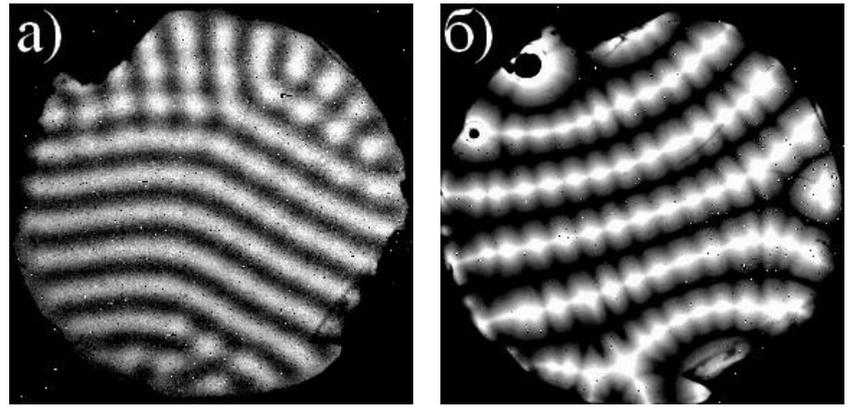


Рис. 2 Поля температур с поверхности горизонтального слоя однокомпонентной жидкости: а) стационарные квазидвумерные валы $Ra=1.85 \cdot 10^3$; б) стационарная двухмодовая конвекция $Ra = 2.5 \cdot 10^4$.

Зафиксированная в трансформаторном масле с ростом Ra последовательность конвективных режимов также наблюдалась в экспериментах ([⁴]) и теоретических расчётах ([⁵],[⁶]) по анализу конвекции бинарной молекулярной смеси с нормальной термодиффузией в задаче Рэлея-Бенара. Совпадение результатов, полученных новым методом, с результатами более ранних работ, в которых использовались теневые методы ([⁴], [⁷]) демонстрирует их достоверность. Можно сделать вывод о том, что при исследовании конвекции в магнитной жидкости на основе многокомпонентного молекулярного носителя (керосин, трансформаторное масло и др.) не следует исключать влияние термодиффузии компонент носителя, особенно вблизи порога устойчивости механического равновесия.

Так же во второй главе приводятся и анализируются результаты измерений вязкости магнитной жидкости, которые предшествовали конвективным экспериментам. Данные конвективных экспериментов описываются в главах 3 и 4. Измерение вязкости проводилось для двух образцов магнитных жидкостей: на основе керосина (МЖ_к) и на основе ундекана (МЖ_у). Для стабилизации МЖ_к и МЖ_у использовался один и тот же сурфактант – олеиновая кислота. Толщина поверхностного слоя ее молекул равнялась 2 нм. Средний размер магнетитовых частиц этих жидкостей был одинаковым и составлял 9-10 нм. Для целей опыта было подготовлено по четыре образца МЖ_к и МЖ_у со следующими значениями «гидродинамической» концентрации $\tilde{\varphi}$: 0.14, 0.23, 0.32 и 0.40. Величина $\tilde{\varphi}$ в 2.5 раза больше, чем объёмная доля твёрдой фазы частиц φ , т.к. кроме φ она включает в себя объёмную долю олеиновых оболочек.

[⁴] Moses E., Steinberg V. Stationary convection in a binary mixture // Physical Review A. – 1991. – Vol. 43. – №. 2. – P. 707.

[⁵] Jung C., Huke B., Lücke M. Subharmonic bifurcation cascade of pattern oscillations caused by winding number increasing entrainment // Physical review letters. – 1998. – Vol. 81. – №. 17. – P. 3651.

[⁶] Huke B., Lucke M. Convective patterns in binary fluid mixtures with positive separation ratios // Thermal Nonequilibrium Phenomena in Fluid Mixtures. . – 2002. – Vol. 584. – P. 334 – 354.

[⁷] Gal P. Le., Pocheau A., Croquette V. Square versus roll pattern at convective threshold // Physical review letters. – 1985. – Vol. 54. – №. 23. – P. 2501.

Для измерений вязкости был выбран капиллярный вискозиметр ВПЖ-2, который предназначен для прозрачных жидкостей и удобен для проведения многочисленных измерений. Определение уровня магнитной жидкости в резервуарах ВПЖ-2 затруднительно из-за её непрозрачности. В связи с этим был изготовлен специальный датчик уровня, чувствительный к изменению теплопроводности окружающей его среды. Он состоял из дифференциальной термопары, один из спаев которой был окружён тонкой медной проволокой. Через неё пропускался постоянный ток 0,2 А при напряжении 0,2 В. При размещении такого спая в различных по теплопроводности средах, в нашем случае, в воздухе и жидкости, ЭДС термопары была различной.

По окончании опытов были определены значения коэффициентов вязкости всех образцов магнитных жидкостей МЖ_к и МЖ_у при температурах 20, 30, 40 и 50 °С. Для сравнения результатов эксперимента с известными моделями ([⁸],[⁹]) построены графики (рис. 3) зависимости относительной вязкости от $\tilde{\varphi}$. По ним можно увидеть, что наиболее подходящей для аппроксимации полученных данных является модифицированная модель Чонга [¹⁰]. Методом подгонки, с использованием двух подгоночных коэффициентов, получен ряд других модификаций формулы Чонга для количественного описания концентрационной зависимости вязкости исследуемых образцов.

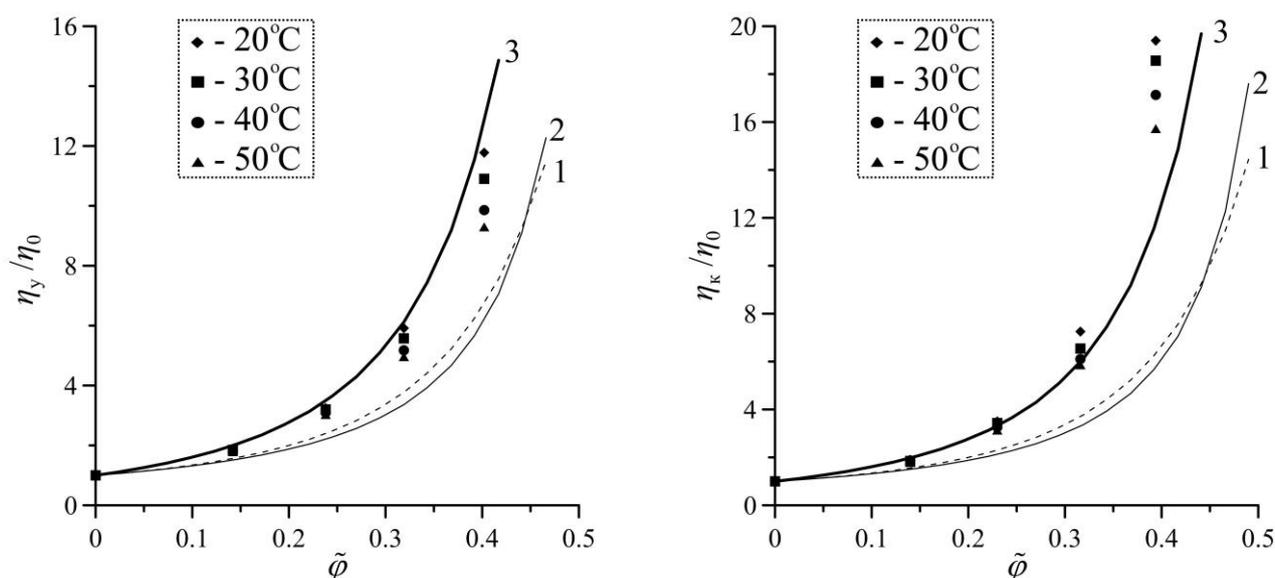


Рис. 3 Зависимость относительной вязкости МЖ_у (слева) и МЖ_к (справа) от «гидродинамической» концентрации частиц, где η_y , η_k и η_0 – вязкость МЖ_у, МЖ_к и жидкости-носителя соответственно. Кривая 1 – модель Вэнда [⁸], 2 – модель Чонга [⁹], 3 – модифицированная модель Чонга [¹⁰].

[⁸] Vand V. Viscosity of solution and suspensions // Journal of Physical and Colloid Chemistry. – 1948. – Vol. 52. – № 2. – P. 277-299.

[⁹] Chong J. S., Christiansen E. B., Baer A. D. Rheology of concentrated suspension // Journal of Applied Polymer Science. – 1971. – Vol. 15. – P. 2007-2021.

[¹⁰] Пшеничников А. Ф., Гилев В. Г. Реология и намагничённость концентрированных магнетитовых коллоидов // Коллоидный журнал. – 1997. – Т. 59. – № 3. – С. 372-379.

Третья глава посвящена исследованию гравитационной конвекции в горизонтальном слое керосиновой магнитной жидкости с объёмной долей магнетитовых частиц $\varphi=0.14$ со средним размером 10 нм. Метод наблюдения с применением тепловизора позволил провести количественные измерения в рабочей полости с высотой 3.0 мм и диаметром 58 мм вблизи порога возникновения конвекции при её мягком возбуждении.

Проведенные в эксперименте опыты делились на две серии, отличающиеся друг от друга выбором начального состояния жидкости. Перед началом измерений в серии №1 жидкость в течение двух недель находилась в неподвижном состоянии, после чего постепенно увеличивался перепад температур на границах слоя от 0 до 12 °С. В серии опытов №2 жидкость предварительно перемешивалась в течение двух суток посредством конвекции, возникающей при перепаде температур на границах слоя равном 12 °С. Далее значение перепада температур постепенно уменьшалось до 0 °С. В обеих сериях средняя температура магнитной жидкости в слое составляла 30 ± 1 °С.

В серии опытов №1 исследованный диапазон Ra разделился на три области (рис. 4): I – механическое равновесие жидкости, II – нестационарные квазирегулярные колебательные течения с упорядоченной пространственной структурой, III – нестационарное пространственно-временное поведения конвективных ячеистых структур. Возмущения температуры θ с течением времени в точке на поверхности магнитной жидкости, характерные для конвективного поведения II, приведены на рис. 5. Спектральный анализ временной зависимости $\theta(\tau)$ показал присутствие колебаний температуры с периодом 7-9 мин. Наблюдаемые колебания темпера-

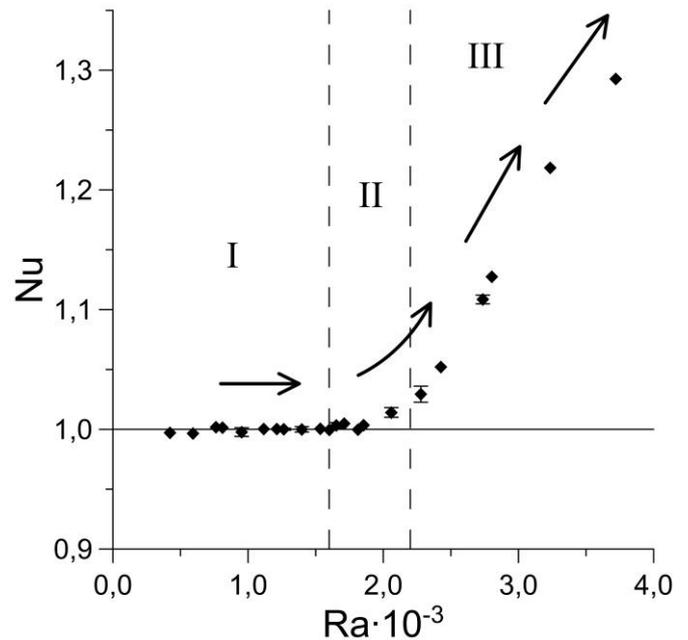


Рис. 4 Границы режимов конвекции в серии опытов №1 на графике Nu(Ra).

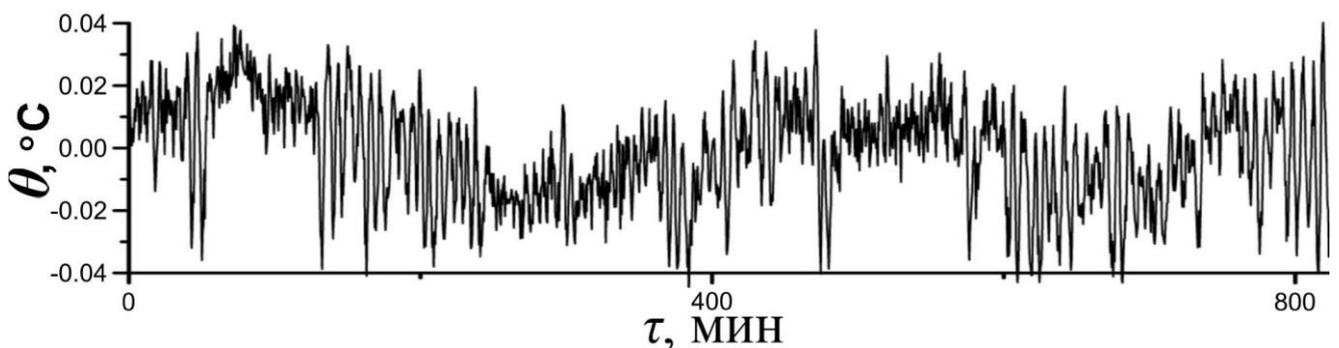


Рис. 5 Возмущения температуры в точке на поверхности магнитной жидкости с течением времени при $Ra = 2.0 \cdot 10^3$.

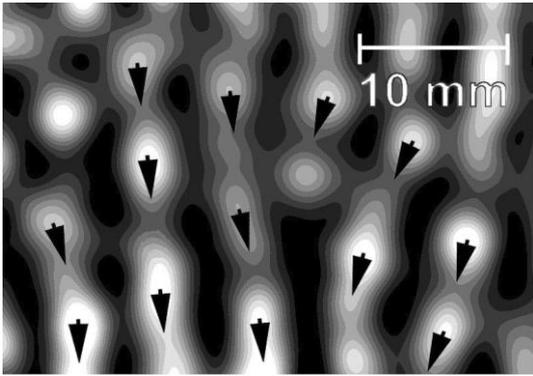


Рис. 6 Поле температур с поверхности магнитной жидкости в центральной области слоя при $Ra = 2.0 \cdot 10^3$.

туры были связаны с упорядоченным движением конвективных ячейчатых структур. На рис. 6 приведён пример поля температуры с поверхности магнитной жидкости вблизи верхней границы слоя. Более нагретые участки жидкости соответствуют светлым областям, менее нагретые участки жидкости – темным областям. Возникающие в объеме неоднородно нагретой магнитной жидкости конвективные ячейки перемещаются вдоль слоя так, как если бы они двигались по некоторому «каналу». На рис. 6 направление движения ячеек указано стрелками.

Дальнейший рост числа Ra , превышающего значение $2.2 \cdot 10^3$, приводил к исчезновению регулярных колебаний (режим III). Возмущения температуры изменялись нерегулярным образом на протяжении всего времени наблюдения, которое достигало в некоторых опытах 80 часов. Спектр сигнала $\theta(\tau)$ не имел выделенных частот. Данное нерегулярное поведение конвективных структур магнитной жидкости наблюдалось ранее в экспериментах [11], [12] и [13], где визуализация полей температуры производилась при помощи термочувствительной жидкокристаллической пленки.

При проведении опытов из

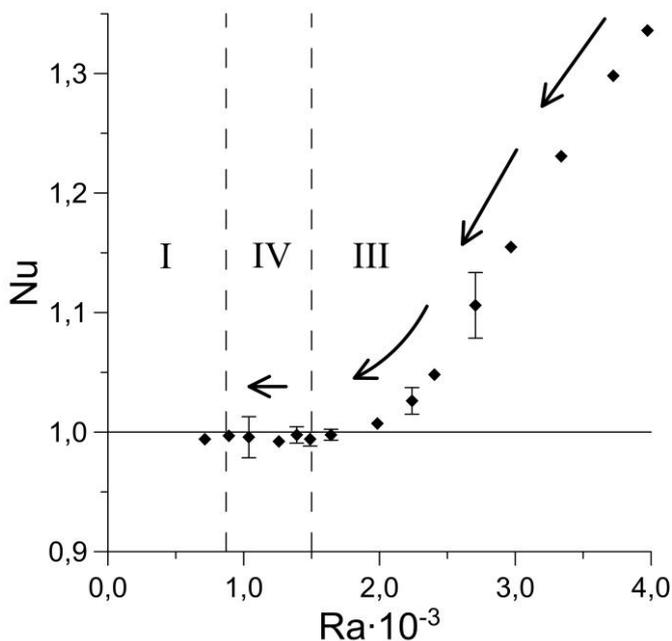


Рис. 7 Границы режимов конвекции в серии опытов №2 на графике $Nu(Ra)$.

серии №2 фиксировалась другая последовательность конвективных режимов по сравнению с опытами из серии №1. С уменьшением числа Рэлея от $4.6 \cdot 10^3$ до 0 наблюдались следующие режимы конвекции: III – режим нестационарного пространственно-временного поведения конвективных ячейчатых структур, IV – режим крупномасштабного вихревого движения температурных возмущений, I – механическое равновесие. На рис. 7 изображен график $Nu(Ra)$, на котором штриховыми линиями указаны границы перечисленных режимов. Крупномасштабный вихрь, охватывающий весь слой, оставался устойчивым на протяжении всего

[11] Bozhko A.A., Pilyugina T.V., Putin G.F., Shupenik D.V. Convective heat transfer in ferrocolloids // Heat Transfer Research. – 2000. – Vol. 31. – №. 5. – P. 341-349.

[12] Bozhko A.A., Putin G.F. Heat transfer and flow patterns in ferrofluid convection // Magnetohydrodynamics. – 2003. – Vol. 39. – №. 2. – P. 147-169.

[13] Bozhko A.A., Tynjala T. Influence of gravitational sedimentation of magnetic particles on ferrofluid convection in experiments and numerical simulations // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2005. – Vol. 289. – P. 281-284.

времени наблюдения, которое в некоторых экспериментах составляло порядка 5-6 суток.

На рис. 8 объединены данные о тепловом потоке из опытов обеих серий экспериментов. Несмотря на явные различия в конвективном поведении магнитной жидкости в околокритичной области чисел Ra , по этим данным видно, что графики зависимости $Nu(Ra)$ для серий опытов №1 и №2 совпадают в пределах погрешности эксперимента.

В рамках **четвёртой главы** рассматривается эксперимент по изучению влияния средней температуры на характеристики нестационарных режимов конвекции с упорядоченной пространственной структурой течений в ундекановой магнитной жидкости. Объёмная доля магнетитовой твёрдой фазы $\varphi = 0.14$, а средний размер частиц равен 9 нм. Рабочая полость, конфигурация которой подробно описана в главе 2, имела высоту 2.4 мм и диаметр 58 мм. Проведено несколько серий конвективных опытов при разных средних температурах магнитной жидкости (от 20 до 55 °С с шагом 5 °С). По экспериментальным данным построены графики зависимости $Nu(Ra)$ и получены графические изображения поля температуры (термограммы) с верхней границы слоя.

В исследовании зафиксировано конвективное поведение магнитной жидкости, для которого характерна пространственная организация конвективных структур. Каждая отдельная структура состояла из нисходящего устойчивого потока в центре структуры и неустойчивых восходящих потоков по краям. Графический анализ термограмм (рис. 9, верхний ряд) показывает, что белые пятна постепенно со временем прорисовывают на чёрном фоне белую «сетчатую» графическую структуру (далее «сетка»). Тёмные пятна образуются нисходящими потоками от верхней холодной границы к нижней горячей границе слоя и сохраняют своё местоположение на протяжении 80 минут. С ростом числа Рэлея происходит переход к конвективному

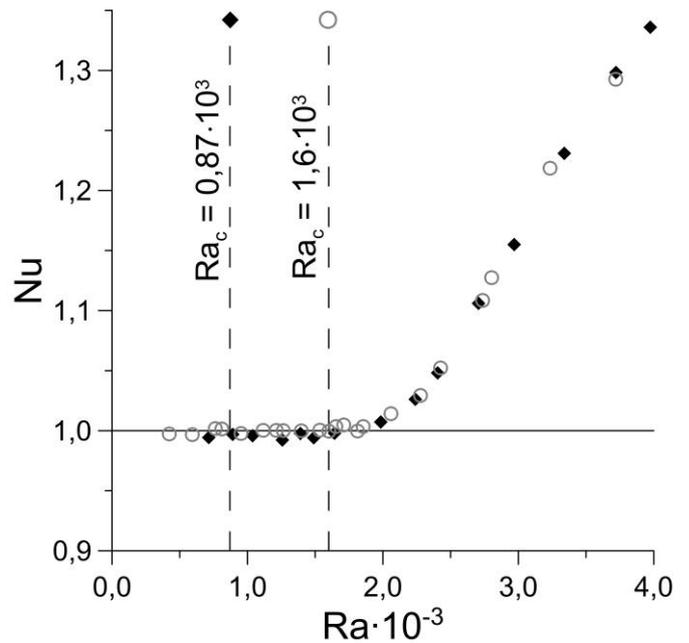


Рис. 8 Зависимость $Nu(Ra)$: круги — серия №1; ромбы — серия №2.

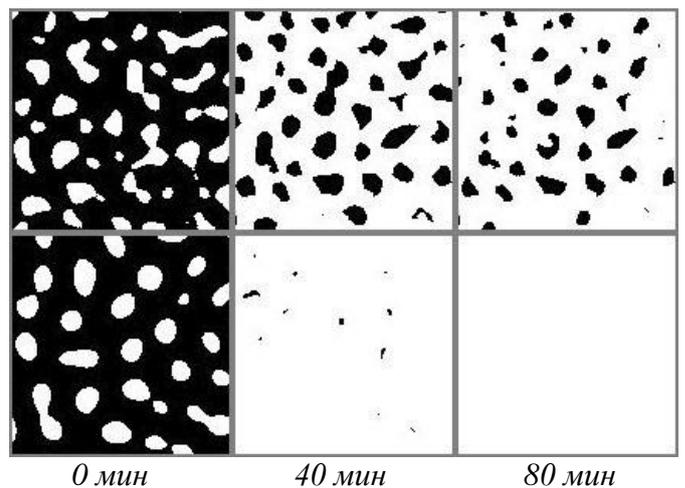


Рис.9. Трековые изображения при среднем значении температуры коллоида 20 °С. Конвекция с упорядоченной пространственной структурой — верхний ряд, нерегулярное пространственно-временное конвективное поведение — нижний ряд.

поведению, при котором светлые пятна на преобразованных в результате графического анализа изображениях (рис. 9, нижний ряд) в интервале времени 80 минут заполняют белым цветом всю расчётную область, и «сетка» не формируется.

Кроме графического анализа строились средние энергетические Фурье-спектры пульсаций температуры $\theta(\tau)$ в 25 точках в пределах расчётной области. На рис. 10 приведены характерные для наблюдаемых конвективных режимов графики зависимости средней относительной спектральной плотности энергии (\bar{E}) от частоты f . В целом, в представленном диапазоне частот можно выделить два интервала: низкочастотный (НЧ) интервал – от 0 до 0.05 мин^{-1} и высокочастотный (ВЧ) интервал – от 0.10 до 0.15 мин^{-1} . В случае конвекции с упорядоченной пространственной структурой (рис. 10, слева) максимальное значение спектральной плотности энергии из НЧ интервала (\bar{E}_L) во много раз превышает её максимальное значение из ВЧ интервала (\bar{E}_H). Для режима с нерегулярной конвекцией значения \bar{E}_L и \bar{E}_H соизмеримы (рис. 10, справа).

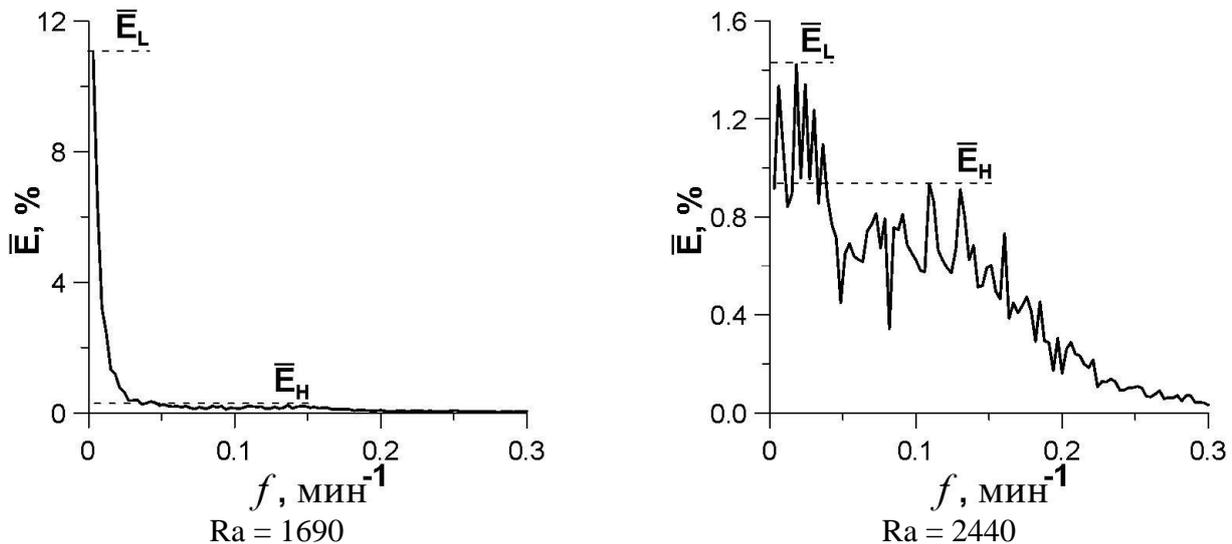


Рис. 10 Средняя относительная спектральная плотность энергии пульсаций при средней температуре магнитной жидкости $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Построена карта режимов (рис. 11), объединяющая данные всех опытов. Видно, что критическое значение числа Рэлея Ra_c увеличивается от $1.3 \cdot 10^3$ до $1.6 \cdot 10^3$ при повышении средней температуры жидкости с 20 до $55 \text{ }^\circ\text{C}$. Числа Ra , соответствующие верхней границе нестационарных режимов, уменьшаются с $2.1 \cdot 10^3$ до $1.8 \cdot 10^3$. Графики $Nu(Ra)$, полученные при различных средних температурах магнитной жидкости, совпадают (см. рис. 12). Это означает, что нестационарные конвективные режимы с упорядоченной пространственной структурой течений, возникающие вблизи порога устойчивости механического равновесия, не влияют на интенсивность полного теплового потока через слой магнитной жидкости.

На наш взгляд, формирование нестационарных режимов конвекции с пространственной упорядоченностью конвективных структур связано с влиянием

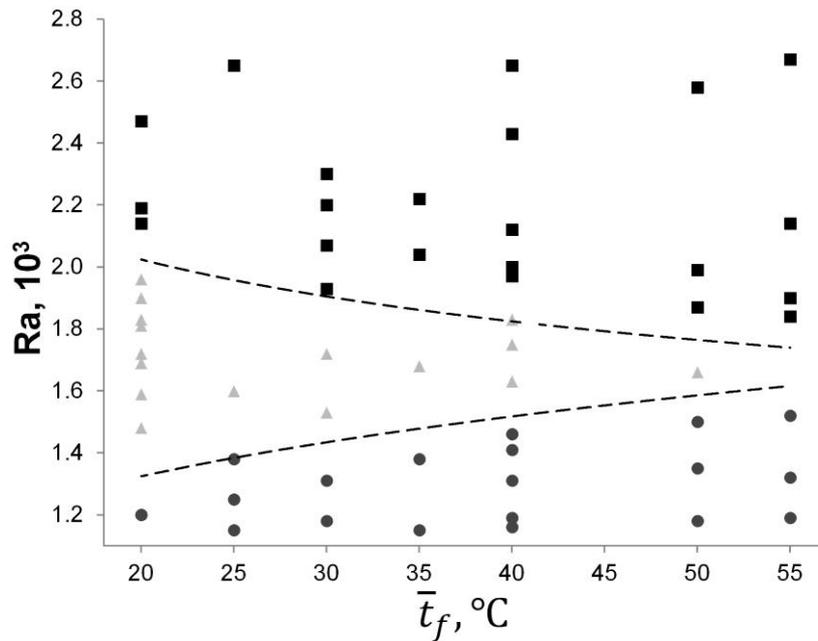


Рис. 11 Карта режимов конвекции магнитной жидкости при изменении средней температуры: «круги» – механическое равновесие; «треугольники» – конвекция с упорядоченной пространственной структурой; «квадраты» – нерегулярное пространственно-временное конвективное поведение

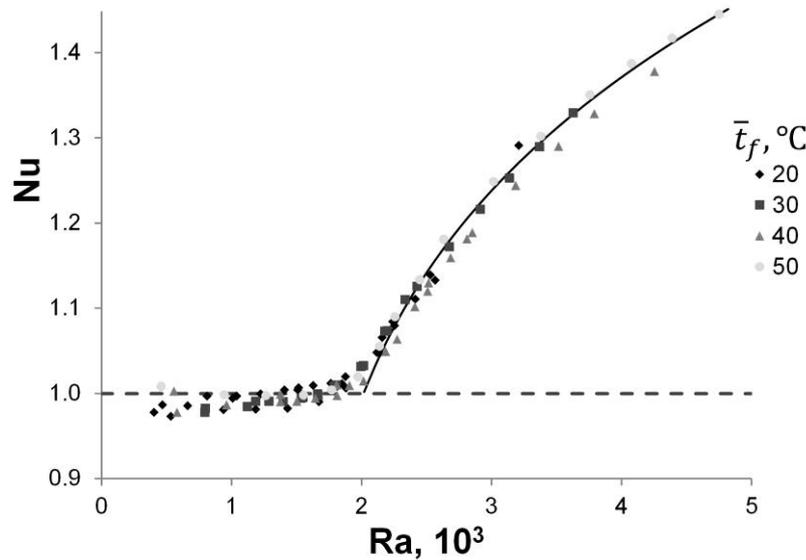


Рис. 12 Зависимости $Nu(Ra)$ при различных значениях средней температуры в слое магнитной жидкости. Сплошная линия соответствует аппроксимации.

конкурирующих механизмов массопереноса: седиментации и термодиффузии. На первый взгляд, седиментация не должна влиять на конвекцию в магнитной жидкости, т.к. характерная длина седиментации, рассчитанная для отдельной частицы, составляет 250 мм, что примерно в 100 раз больше толщины слоя. Но если допустить существование агрегатов, то длина седиментации становится соизмеримой с толщиной слоя, если размер агрегата больше 60 нм. Это значение, полученное в результате оценок, согласуется с результатами другой работы, в

которой предложена гипотеза о формировании квазисферических агрегатов из-за присутствия дефектов в защитных оболочках отдельных частиц ([¹⁴]).

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы, даются рекомендации и обсуждаются перспективы дальнейшего исследования гравитационной конвекции в горизонтальном слое магнитной жидкости.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана, изготовлена и отъюстирована тепловизионная система для наблюдения за тепловой конвекцией в горизонтальном слое магнитной жидкости. Главной особенностью установки является применение пластины LiF в качестве верхней границы слоя. Фторид лития прозрачен для инфракрасного излучения, что позволяет фиксировать поле температур на поверхности магнитной жидкости.

2. Исследована гравитационная конвекция двух образцов магнитных жидкостей, отличающихся реологическими свойствами. Впервые зафиксированы нестационарные конвективные режимы с упорядоченной пространственной структурой в надкритической области параметров ($1 < Ra/Ra_c < 1.5$). Построена карта этих режимов.

3. Проведены две серии опытов магнитной жидкости, отличающиеся начальными условиями. В жидкости с установившимся барометрическим распределением частиц и агрегатов обнаружены конвективные квазирегулярные колебания, с характерным периодом 7-9 мин. В отсутствие барометрического распределения колебания не возникают.

4. Для получения информации об универсальности числа Рэлея, как единственного параметра, определяющего начало и интенсивность тепловой конвекции в однокомпонентных жидкостях, проведены опыты с вариацией средней температуры магнитной жидкости. Показано, что критическое значение числа Рэлея Ra_c увеличивается, а числа Ra , соответствующие границе нестационарных режимов, уменьшается примерно на 15-20% при повышении средней температуры жидкости с 20 до 55 °С.

5. Несмотря на сложный состав магнитных жидкостей, существование в них седиментационных, диффузионных и термодиффузионных процессов, сложную нестационарную структуру надкритических течений в режиме развитой конвекции, безразмерный теплоток через плоский слой магнитной жидкости в нулевом внешнем поле однозначно определяется обычным тепловым числом Рэлея в пределах экспериментальной погрешности (2-3%). Такой вывод можно сделать, по крайней мере, в случаях, когда средняя температура менялась в пределах от 20 до 55 °С.

6. Получены дополнительные аргументы, подтверждающее существенное влияние агрегатов на формирование нестационарных режимов конвекции. Нестационарная конвекция с упорядоченной пространственной структурой связывается нами с наличием агрегатов, размеры которых больше 60 нм.

[¹⁴] Buzmakov V. M., Pshenichnikov A. F. On the structure of microaggregates in magnetite colloids // Journal of colloid and interface science. – 1996. – Vol. 182. – №. 1. – P. 63-70.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

1. Kolchanov N. V., Putin G. F. Gravitational convection of magnetic colloid in a horizontal layer // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – Vol. 89. – P. 90-101.
2. Kolchanov N. V., Arefyev I. M. Thermal convection in a layer of magnetic colloid based on a single-component fluid // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 111. – P. 1112-1120.
3. Казанцев М. Ю., Колчанов Н. В. О гравитационной конвекции в коллоидах // *Вестник Пермского университета. Серия: Физика*. – 2012. – Т. 22, № 4 – С. 79-82.
4. Колчанов Н. В., Калинина М. А. Режимы конвекции многокомпонентной молекулярной углеводородной смеси // *Вестник Пермского университета. Серия: Физика*. – 2015. – Т. 30, № 2.– С. 19-24.
5. Колчанов Н. В., Колесниченко Е. В. Вязкость магнитных жидкостей при различных концентрациях коллоидных частиц и температурах // *Вестник Пермского университета. Серия: Физика*. – 2017. – Т.38, № 4 – С. 37-44.
6. Колесниченко Е.В. Колчанов Н.В. Влияние агрегатов на тепловую конвекцию в горизонтальном слое магнитного коллоида // *Материалы международного симпозиума «Неравновесные процессы в сплошных средах» в рамках Пермского Естественнонаучного форума «Наука и глобальные вызовы XXI века»*. – Пермь, ПГНИУ, 2017.– С. 19-21.
7. Колчанов Н.В. Трековый и спектральный анализ конвекции магнитного коллоида на основе однокомпонентной жидкости носителя // *Материалы IV Всероссийской конференции «Пермские гидродинамические научные чтения»*.– Пермь, 2016.– С. 51-52.
8. Колчанов Н.В., Калинина М.А. Влияние средней температуры на возникновение колебательного режима конвекции в горизонтальном слое магнитной жидкости // *Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Математика и междисциплинарные исследования – 2016»*.– Пермь, 2016.– Р. 76-79.
9. Kolchanov N.V., Putin G.F. Nonlinear regimes of convection in a horizontal layer of colloidal magnetic fluid // *Abstractsof XLII Summer School – Conference «Advanced Problems in Mechanics»*.– Russia, St. Petersburg (Repino), 2014.– P. 71.
10. Kolchanov N.V., Kolchanova E.A., Kalinina M.A. Convection of ferrofluids and carrier fluids in a horizontal layer // *Abstracts of XLIV Summer School – Conference «Advanced Problems in Mechanics»*.– Russia, St. Petersburg, 2016.– P. 67.
11. Казанцев М.Ю., Колчанов Н.В. Спектральный анализ волновой конвекции в магнитной наножидкости // *Тезисы докладов XVIII Зимней школы по механике сплошных сред*.– Пермь, 2013. – С. 161.
12. Колчанов Н.В., Путин Г.Ф. Волновые структуры в горизонтальном слое магнитного коллоида при подогреве снизу // *Тезисы докладов международной научной конференции «Фридмановские чтения»*. Часть 2.– Пермь, 2013– С. 8.

13. Колчанов Н.В., Путин Г.Ф. Конвекция в магнитном коллоиде вблизи порога устойчивости механического равновесия // Тезисы докладов X Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии». – Новосибирск, 2014. – С. 118-121.
14. Kolchanov N.V., Putin G.F. Wave like temperature perturbations propagation along stationary convective rolls in a horizontal layer of magnetic fluid // Book of abstract of Russian conference on Magneto Hydrodynamics.– Russia, Perm, 2015.– P. 54.
15. Колчанов Н.В. О природе неустойчивости механического равновесия магнитного коллоида. // Тезисы докладов XX Зимней школы по механике сплошных сред. – Пермь, 2017. – С. 172.
16. Колчанов Н.В. Особенности гравитационной конвекции магнитного коллоида в горизонтальном слое. Эксперимент. // Тезисы докладов VI Российской конференции «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения». – Уфа, 2017. – С. 54.
17. Колчанов Н.В., Плотникова Ю.В. Особенности гистерезисного поведения ферромагнитного коллоида // Тезисы докладов конференции «Пермские гидродинамические научные чтения». – Пермь, 2013. – С. 25.
18. Колчанов Н.В., Плотникова Ю.В. Экспериментальное исследование волновых режимов конвекции в горизонтальном слое магнитного коллоида // Тезисы докладов конференции «Пермские гидродинамические научные чтения». – Пермь, 2014. – С. 37-38.
19. Колчанов Н.В., Калинина М.А. Гравитационная конвекция в горизонтальном слое магнитных жидкостей и жидкостей-носителей // Тезисы докладов конференции «Пермские гидродинамические научные чтения». – Пермь, 2015. – С. 31-32.
20. Kolesnichenko E., Kolchanov N. Dependence of magnetic fluid viscosity on concentration of solid particles and temperature // Book of abstract of Russian conference on Magneto Hydrodynamics. – Russia, Perm, 2018. – P. 63.