

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., доцента Д.А. Брацун
на диссертацию Колчанова Николая Викторовича «**Гравитационная конвекция в горизонтальном слое магнитной жидкости**», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа Н.В. Колчанова посвящена исследованию классической тепловой конвекции Рэлея-Бенара в плоском горизонтальном слое, подогреваемом снизу, которая возникает в специфической среде, представляющей собой магнитную жидкость. Изначально, в 60-70 гг. прошлого века, изучение тепловой конвекции в магнитной жидкости было мотивировано возможностью управлять процессами теплопередачи при помощи внешнего магнитного поля. И хотя с тех пор возможности практического применения магнитных жидкостей в указанной области значительно сузились из-за появления новых современных материалов и достаточно высокой цены изготовления, интерес к исследованию свойств магнитных жидкостей не уменьшился. Во-первых, магнитная жидкость является одним из классических примеров активных сред, исследования которых энергично разворачиваются в последние годы. Важной особенностью таких жидкостей является способность элементов среды к самодвижению. У магнитных жидкостей это свойство проявляется при наложении внешнего магнитного поля. Во-вторых, магнитные жидкости оказались удобными объектами по исследованию свойств термодиффузии, так как эффект Сорэ в этих средах проявляет себя гораздо сильнее, чем в обычных жидкостях. А в-третьих, вне контекста зависимости от внешнего магнитного поля, магнитные жидкости оказались интересными сами по себе, представляя собой многокомпонентную среду, в которой наблюдаются эффекты седиментации, межчастичного взаимодействия, образование агрегатов наночастиц, влияния молекул поверхностно активных веществ и т.д. Всё вместе сказанное определяет высокую **актуальность** рассматриваемого диссертационного исследования.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы, содержащей 200 наименований, включая публикации соискателя. Общий объём диссертации составляет 115 страниц, включая 46 рисунков и 5 таблиц.

Во **введении** обозначены цель и задачи исследования, ее новизна, научная значимость, а также приведено краткое содержание диссертации. В **первой главе** дается обзор литературы по теме диссертации. **Вторая глава** посвящена разработке и реализации установки для экспериментального исследования гравитационной конвекции в горизонтальном слое магнитной жидкости с использованием высокочувствительного тепловизора. Приводится описание метода и разработанной системы тепловизионного наблюдения. Представлены результаты тестовых конвективных экспериментов с использованием однокомпонентных (гексадекана и ундекана) и многокомпонентной (трансформаторного масла) молекулярных жидкостей. Описываются конвективные режимы, наблюдаемые в перечисленных жидкостях при подогреве снизу с ростом числа Рэлея Ra . Описывается разработанный и используемый при измерениях вязкости специальный датчик уровня, который чувствителен к изменению теплопроводности окружающей его среды. Подробно обсуждаются экспериментальная установка и методика измерения вязкости. **Третья глава** посвящена экспериментальному исследованию гравитационной конвекции в горизонтальном слое керосиновой магнитной жидкости с 14%-ным объёмным содержанием магнетитовых частиц, средний размер которых составляет 10 нм. Проведенные в эксперименте опыты делятся на две серии, отличающиеся друг от друга выбором начального состояния жидкости. Перед проведением измерений в серии №1 жидкость в течение двух недель находилась в неподвижном состоянии (механическом равновесии), после чего постепенно увеличивался перепад температур на границах слоя. В серии опытов №2 жидкость предварительно перемешивалась в течение двух суток посредством

конвекции, возникающей при перепаде температур на границах слоя. Далее значение перепада температур постепенно уменьшалось до докритической температуры. Представленные результаты двух серий опытов позволили выявить основные типы конвективных течений в горизонтальном слое вблизи порога устойчивости механического равновесия. В серии опытов №1 зафиксировано три режима конвекции: I – механическое равновесие жидкости; II – упорядоченное движения температурных возмущений вдоль горизонтального слоя; III – нерегулярное поведения конвективных ячеистых структур. При проведении опытов из серии №2 наблюдалась другая последовательность конвективных режимов: I – механическое равновесие; IV – режим крупномасштабного вихревого течения; III – режим нерегулярного поведения. Показано, что зависимость конвективных процессов, наблюдаемых в горизонтальном слое магнитной жидкости, от ее начального состояния, связана с образованием и седиментацией агрегатов. В рамках **четвертой главы** проведен эксперимент по изучению влияния средней температуры магнитной жидкости на характеристики колебательных режимов конвекции в горизонтальном слое ундекановой магнитной жидкости. Проведено несколько серий конвективных опытов при разных средних температурах жидкости. Построены графики зависимости числа Нуссельта Nu от числа Рэлея Ra и получены графические изображения поля температуры (термограммы) с верхней границы слоя. В исследовании зафиксирован конвективный режим, при котором наблюдалась слабо меняющаяся во времени пространственная организация конвективных структур. Показано, что зависимость конвективных процессов, наблюдаемых в горизонтальном слое магнитной жидкости, от средней температуры, связана с образованием и седиментацией агрегатов. В **заключении** представлены основные результаты и выводы диссертационной работы, приведены рекомендации и перспективы дальнейшего исследования гравитационной конвекции в горизонтальном слое магнитной жидкости.

Кажется удивительным, что спустя более 60 лет после создания магнитной жидкости, на неё до сих пор можно взглянуть как на сплошную среду, физические свойства которой требует тщательного исследования. Вероятно, это плата за чрезмерное увлечение в первые десятилетия исследованием отклика магнитных жидкостей на воздействие внешнего магнитного поля. Тем не менее, именно такое исследование составляет содержание данной работы. Необходимо отметить, что **большинство результатов** диссертационной работы **получено впервые**. Хорошее впечатление оставляет список публикаций соискателя. Основные результаты диссертации опубликованы в профессиональном международном журнале по тепломассообмену *International Journal Heat and Mass Transfer*, который имеет один из самых высоких импакт-факторов среди журналов по механике жидкости. Это также подчеркивает **научную новизну** полученных результатов. Среди **новых результатов**, полученных в диссертации, можно выделить обнаружение сложных нестационарных режимов конвекции магнитной жидкости вблизи порога потери устойчивости механического равновесия среды в задаче Рэлея-Бенара. Подобные явления ранее были обнаружены в некоторых однородных средах (керосин, трансформаторное масло), но для магнитной жидкости были продемонстрированы впервые. Это поведение связывается в работе с эффектом термодиффузии, осложненного процессом седиментации магнитных частиц в поле тяжести. Эффект срабатывает в сравнительно узком диапазоне параметров, так как при усилении нагрева система в конце концов выходит на стандартные режимы конвекции, которые присущи классической постановке задачи Рэлея-Бенара.

Сильное впечатление производит тщательно продуманная и виртуозно изготовленная сложная экспериментальная установка. Дело в том, что магнитная жидкость относится к непрозрачным средам, поэтому традиционный набор инструментов экспериментатора для наблюдения течений здесь не подходит. Диссертант остановил свой выбор на тепловизионной системе для снятия термограмм, для внедрения которой ему пришлось решить множество больших и малых технических задач, которые включают в себя подбор высокотеплопроводной пластины в качестве верхней границы слоя (выполненная из достаточно экзотичного

и токсичного материала - литиевой соли плавиковой кислоты), создания сложной системы термостатирования как внутри экспериментальной установки, так и снаружи (разработка и поддержание специальных мер по тепловой дисциплине в лаборатории), подключение и настройка тепловизора, разработку разнообразных методов обработки изображений термограмм, которые по-сути являлись единственным источником информации о поведении конвективной системы. По капризности и чувствительности входящих в неё независимых подсистем и большому количеству элементов оборудования, работу которых необходимо было согласовать, изготовленная диссертантом экспериментальная установка является одной из самых сложных, по крайней мере из тех, которые видел оппонент. Разработанный комплекс является уникальным для г. Перми и может быть использован для дальнейшего изучения магнитных жидкостей, а также других жидких сред, в которых непосредственное наблюдение за кюветой затруднено. Во всём этом, несомненно, заключается **практическая значимость** представленной диссертации.

Диссертационная работа Колчанова Н.В. не лишена недостатков и некоторых методологических просчетов, в некоторых местах рождает желание подискутировать. Перед тем как перейти к существенным вопросам, следует отметить, что по точности и грамотности используемых выражений данная работа не является лучшей из тех, что попадали в руки оппонента. В тексте встречаются опечатки, неудачные выражения, жаргонизмы. Приведем некоторые характерные примеры:

1. *«Еще одна причина повышенного интереса к конвекции в коллоидных растворах, включая магнитные жидкости, - седиментация частиц... Появляется потенциальная возможность смоделировать в лабораторных условиях конвективные процессы, происходящие в атмосферах Земли и других планет, используя небольшие установки сантиметровых размеров».* (стр.4)

Очень сомнительно, что процессы в несжимаемых средах могут моделировать атмосферные явления.

2. *«...где Ra_c – критическое число Рэлея, соответствующее неустойчивости механического равновесия относительно слабых возмущений».* (стр.6)

Механическое равновесие жидкости в классической задаче Рэлея-Бенара ниже порога абсолютно устойчиво по отношению к любым возмущениям.

3. *«...Первый обзор конвекции в горизонтальном слое жидкости был сделан Чендасекаром в монографии [65]».* (стр.17)

Фамилию известного индийского физика S. Chandrasekhar в русском написании принято записывать как «Чандрасекар».

4. *«...Из теории устойчивости такое состояние жидкости является условно устойчивым, т.е. устойчивость неподвижного состояния, как уже было сказано ранее, сохраняется, если число Ra не превышает критического значения Ra_c ».* (стр.17)

И опять неудачное высказывание из области теории гидродинамической устойчивости. Нет такого термина «условно устойчивое состояние»!

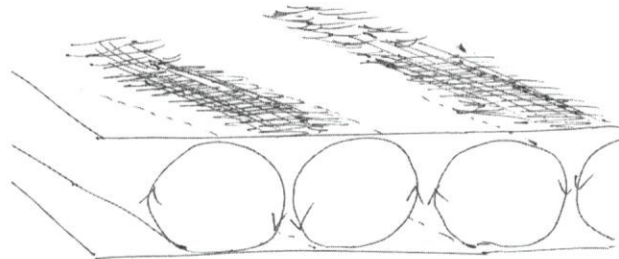
5. *«Рабочая полость состоит из верхней, нижней и боковых границ».* (стр.31)

Крайне неудачное выражение!

Выражение «эмперическое соотношение» на стр. 40 повергло оппонента в уныние. Термин греческого происхождения, означающий «опыт», должен по идее быть профессиональным выражением для любого экспериментатора и использоваться в текстах без ошибок.

Перейдем к более существенным замечаниям к работе:

1. Диссертант правильно аргументирует использование тепловизора тем, что магнитная жидкость не является прозрачной, поэтому традиционные способы наблюдения движения жидкости здесь не применимы. В качестве верхней границы полости автор использует пластину из фторида лития, которая обладает прекрасной пропускной способностью по отношению к инфракрасному излучению. Таким образом, появляется возможность получать термограммы с поверхности жидкости, примыкающей к пластине. Диссертант замечает, что наиболее яркие и темные точки термограммы соответствуют наиболее нагретым и холодным местам поверхности. По мнению оппонента, такого замечания совершенно не достаточно для того, чтобы показать читателю каким образом читать поверхностные термограммы. Существенным недостатком работы является отсутствие какой-либо вводной справочной информации о том, как выглядят реальные течения и их термограммы на конкретных примерах.



Если для случая рэлеевских валов можно догадаться, как выглядит соответствующая поверхностная термограмма (см. рисунок), то для более сложных случаев это сделать уже не так просто. Уже из рисунка выше ясно, что позиция конвективного вала не совпадает с полосами. А, например, термограмма на рис. 11 диссертации выглядит для оппонента совершенно загадочной. Диссертант уверенно заявляет, что здесь наблюдается «поперечно валиковая неустойчивость» и ссылается на монографию А.В. Гетлинга. Основные иллюстрации надкритических движений в задаче Рэля-Бенара А.В. Гетлинг взял из работ Буссе с коллегами. Эти же картинки воспроизведены, например, в монографии Гершуни, Жуховицкого и Непомнящего (1989). Визуализации надкритических течений Буссе, которые получены традиционными методами в прозрачных жидкостях, весьма разнообразны. Вполне можно представить себе, что на термограмме на рис.11 мы видим спицевидную неустойчивость. А вот поперечно-валиковая неустойчивость, приведенная Буссе совершенно не похожа на термограмму диссертанта.

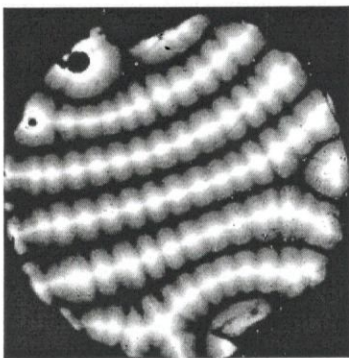


Рис. 11 из диссертации
Колчанова Н.В.

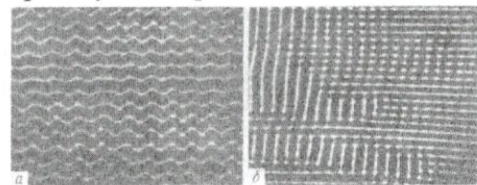


Рис. 159. Неустойчивости стационарных конвективных валов: а) зигзаговая, б) типа поперечных валов (фото из работы [58]; силиконовое масло, $Pr \approx 100$)

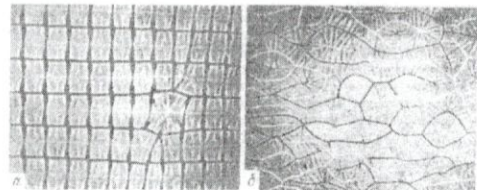


Рис. 160. Пределные структуры неустойчивости конвективных валов: а) бимодальная (фотография из работы [58]; силиконовое масло, $Pr \approx 100$), б) «спицевидная» (фотография из [56]; метиловый спирт, $Pr \approx 7$)

Стр. 266 монографии Гершуни, Жуховицкого, Непомнящего (1989)

В итоге, хотелось бы услышать от диссертанта сводку простых правил, как читать термограммы сложных (часто нестационарных) течений, которым посвящена его диссертация и увидеть хотя бы пару конкретных примеров соответствия термограмм и структур течения в деталях.

2. В важном разделе 2.3.2 диссертации приводятся результаты экспериментов с трансформаторным маслом. Эти эксперименты предназначены для тестирования работы установки, использующей тепловизор, на примере обычной, хотя и многокомпонентной жидкости. Такая система уже может демонстрировать вблизи порога возбуждение сложных нерегулярных режимов конвекции благодаря эффекту термодиффузии. Следует отметить, что впервые влияние эффектов термодиффузии на конвекцию Рэлея-Бенара было обнаружено в экспериментальной работе (Le Gal P., Pocheau A., Croquette V. Square versus roll pattern at convective threshold // PRL. 1985. V.54. No.23. P. 2501), что вызвало большую дискуссию в литературе того времени, так как авторы первоначально называли другие причины для эффекта. Точку в дискуссии была поставлена работой (Moses E., Steinberg V. Competing patterns in a convective binary mixture // PRL. 1986. V.57. No.16. P. 2018), где вопрос подробно разбирается. Обе работы в диссертации цитируются, но не в нужном контексте. Важно отметить, что эксперименты в работе Le Gal *et al* (1985) были проведены с силиконовым маслом, чьи характеристики весьма близки к характеристикам трансформаторного масла (силиконовые масла часто используются в трансформаторах). Таким образом, автор диссертации упустил замечательную возможность сравнить свои результаты с результатами работы 1985 года. Это тем более важно, что наблюдения и измерения конвективной системы в работе Le Gal *et al* (1985) производились традиционным способом, так как силиконовое масло прозрачно. Кстати, в работе 1985 года вблизи порога наблюдалась весьма похожая последовательность режимов конвекции, включая квадратные ячейки и колебания.

Таким образом, важнейший вопрос о том, насколько выбранная диссертантом система наблюдения за конвекцией посредством поверхностных термограмм искажает реальный конвективный сигнал, остается совершенно не освещенным. Досадно, но именно в разделе 2.3.2 автор не приводит никаких конкретных эмпирических данных, включающих сам сигнал, его Фурье-спектры, вейвлет-диаграммы и т.д.. Поясню свою мысль: в работе Le Gal *et al* (1985) записи конвективных колебаний, записанных в центре полости, выглядят очень чистыми по сравнению с подобными колебаниями диссертанта, полученными, правда, для магнитной жидкости (для однородной жидкости данные в диссертации не представлены). Хотелось бы понять - является ли это следствие избранного метода наблюдений или более сложного поведения самой магнитной жидкости? Вероятно, предоставление на защите экспериментальных данных для колебательного режима в трансформаторном масле (анализ θ , Фурье-спектр, вейвлет-диаграмма), сопровождаемое комментарием диссертанта, было бы достаточным.

3. В работе есть еще один досадный методологический промах. В основной содержательной главе 3 диссертации автор отмечает, что результаты этой главы получены с использованием магнитной жидкости на основе керосина. При этом сам же автор на странице 48 отмечает, что чистый керосин (без магнитных частиц), как и трансформаторное масло, является многокомпонентной жидкостью, и поэтому способен демонстрировать эффект термодиффузии. Простая логика исследования требовала провести серию тестовых экспериментов с чистым керосином, чтобы потом четко зафиксировать какой дополнительный эффект привносит в среду взвесь магнитных частиц в керосине. Вместо этого, диссертант взял в качестве "тестовой жидкости" трансформаторное масло и проделал полноценное исследование с ним. В результате в несомненно красивых и значимых результатах главы 3 мы не можем вычленить эффект собственно магнитных

частиц от термодиффузии самого керосина. Здесь требуются какие-то комментарии диссертанта о стратегии и эволюции его исследований.

Сделанные замечания не умаляют достоинств работы Н.В. Колчанова, она выполнена на высоком научном уровне и представляет собой ценное научное исследование актуальных проблем механики жидкости. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для науки и практики. Достоверность основных представленных в работе результатов не вызывает сомнений. Тема работы соответствует специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Основные результаты диссертации, выносимые на защиту, представлены в открытой печати в виде статей в журналах из перечня ВАК. Автореферат диссертации правильно и достаточно полно отражает её содержание.

Таким образом, диссертационная работа «Гравитационная конвекция в горизонтальном слое магнитной жидкости» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертационным работам по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», а ее автор, Колчанов Николай Викторович, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой Прикладной физики Пермского национального исследовательского политехнического университета,
доктор физ.-мат. наук, доцент



Д.А. Брацун

22.02.2019

ФИО оппонента: Брацун Дмитрий Анатольевич

Почтовый адрес: Кафедра Прикладной физики,

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

614990, Пермь, ул. Профессора Поздеева, 11

Телефон: +7 (342) 239-14-14

E-mail : DABracun@pstu.ru

Организация: ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

Должность: заведующий кафедрой

Я, Брацун Дмитрий Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку

Подпись

Брацун Д.А.

ЗАВЕРЯЮ:

Ученый секретарь ПНИПУ

В.И. Макаревич

25 февраля 2019 г.