

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ
им. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТ СО РАН)
проспект Академика Лаврентьева, 1
г. Новосибирск, 630090
Тел.: (383)330-90-40; 330-84-80; факс 330-84-80
Эл. почта: director@itp.nsc.ru
ИНН/КПП 5408100040/540801001
ОКПО 03534009 ОГРН 1025403648786

От 01.11.2022 № 15314 -01/803
На _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор федерального
государственного бюджетного
учреждения науки «Институт
теплофизики им. С.С. Кутателадзе»
Сибирского отделения Российской
академии наук (ИТ СО РАН),
академик.

Маркович Дмитрий Маркович



10 ноября 2022 г.

Отзыв ведущей организации

федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе» Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) на диссертационную работу Шарифулина Вадима Альбертовича на тему «Конвекция в жидкости со степенной зависимостью плотности от температуры при заданном потоке тепла», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа Шарифулина В.А. посвящена теоретическому исследованию термогравитационных течений жидкостей, у которых имеется точка инверсии плотности, как у воды при 4°C. Получены новые точные, в том числе аналитические, решения для теплового факела, рассмотрена линейная и нелинейная устойчивость таких течений. Обнаружены бифуркации новых многоячеистых режимов и гистерезис при переходе между таким режимами. Текст диссертации состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, перечня основных публикаций по теме диссертации. Диссертация изложена на 148 страницах, содержит 40 рисунков, 1 таблицу, а также библиографический список, включающий 138 наименований. Тема и содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Актуальность темы.

Актуальность темы исследования обусловлена потребностями развития теории свободно конвективных течений для ситуаций, когда изменение плотности жидкости

при увеличении температуры меняет знак, а также практической значимостью изучения особенностью течений в водоёмах в зимнее время, когда в объёме жидкости есть точка инверсии плотности, что может существенно повлиять на режимы термогравитационной конвекции и, соответственно, на экологию рек и озёр.

Общая характеристика работы.

Во **введении** рассмотрены актуальность и степень разработанности темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, сформулированы методология и методы исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и обоснована достоверность результатов.

Первая глава посвящена обзору литературы по конвективным факелам и работам по термогравитационной конвекции для жидкостей при инверсии плотности с ростом температуры в замкнутых полостях. На основании проведённого обзора сформулированы задачи исследования, в том числе о конвективном движении при заданных тепловых потоках на нижней твердой и верхней свободной поверхностях и при изменении положения точки инверсии.

Во **второй главе** в рамках теории пограничного слоя представлены новые точные решения для задач о конвективном факеле, в которых плотность жидкости может меняться от температуры по степенному закону. Указана область применимости построенных решений и их физический смысл. Проводится сравнение полученных результатов с результатами других авторов. Построенные решения затем использовались для валидации численных методов расчёта термогравитационной конвекции с инверсией плотности.

В **третьей главе** рассматривается двумерная задача линейной устойчивости термогравитационной конвекции в горизонтальном слое жидкости, когда инверсия представлена в виде зависимости плотности жидкости от квадрата отклонения температуры от температуры инверсии, а в тепловой задаче задаётся тепловой поток. Аналитически получено асимптотическое решение в пределе бесконечно больших длин волн, которое показало, что неустойчивость в этом случае возможна только при условии, что точка инверсии находится выше определённого в работе критического расстояния от нижней нагретой границы. Был проведён численный расчёт для конечного диапазона волновых чисел и показано, что с уменьшением расстояния точки инверсии от нижней границы наиболее опасные возмущения становятся все более коротковолновыми (таблица 3.1, с.88), что свидетельствует о появлении цепочки вихрей, при этом в вертикальном направлении также появляются вихри, но меньшей интенсивности (рис. 3.11 с.89, рис. 3.12 с.90).

Глава 4 содержит исследования термогравитационной конвекции в прямоугольной области. Рассмотрены полости с соотношением длины к высоте от $L=1:1$ до $5:1$. Рассмотрены задачи как с линейной зависимостью плотности от температуры, так и задачи с точкой инверсии плотности. На горизонтальных границах задавался тепловой поток, вертикальные границы были теплоизолированы. Расчеты проводились на прямоугольной сетке методом конечных разностей для нестационарной нелинейной задачи в переменных функция тока - вихрь. Судя по приведённым графикам, изучались стационарные режимы течения, которые устанавливались после введения определённых возмущений. Указывается, что практически во всех расчётах наблюдался порог интенсивности возмущений, при преодолении которого возникало нетривиальное решение. Затем изменялось число Грасгофа и находилось новое решение. Возникали как одноячейстые, так и многоячейстые решения. При этом в такой постановке задачи наблюдалась неединственность решений и явление гистерезиса. С уменьшением числа Грасгофа находились критические числа Грасгофа бифуркаций новых решений путём экстраполяции зависимостей кинетической энергии течения и средней функции тока от числа Грасгофа. Для случая обычной термогравитационной конвекции при $L=5$ обнаружена неединственность решений (рис. 4.15 с.110) и переход течения с режима на режим, сопровождающийся гистерезисом. При этом, несмотря на симметричную постановку задачи возникали и устойчивые несимметричные режимы. В случае термогравитационной конвекции с инверсией плотности наблюдался многоячейстый режим и гистерезис при $L=2$, однако с приближением точки инверсии к верхней холодной границе режим становился одноячейстым и единственным.

В **заключении** представлены итоги выполненного исследования, а также сформулированы рекомендации, перспективы разработки темы.

Автореферат соответствует тексту рукописи диссертации.

Научная новизна результатов диссертации. Научная новизна изложенных в работе результатов заключается в получении новых точных решений, результатов линейной устойчивости течения с инверсией плотности, наблюдении новых устойчивых режимов течения в прямоугольной полости, явления гистерезиса и неединственности этих решений, потери симметрии некоторых решений. Новые научные результаты опубликованы в российских и международных журналах.

Достоверность и обоснованность результатов диссертации. Достоверность результатов подтверждается применением апробированных и хорошо себя зарекомендовавших методов аналитического и численного исследования, сравнением полученных результатов с известными теоретическими результатами других авторов.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты имеют теоретическое значение для описания процессов тепломассообмена в средах, в которых наблюдается инверсия плотности. Практическая значимость обусловлена, в частности, существенным влиянием точки инверсии на режимы термогравитационной конвекции для природных и искусственных водоёмов при определённых погодных условиях.

Личный вклад автора. Автором диссертации проведены аналитические и численные вычисления. Постановка задач, обсуждение и анализ результатов осуществлены автором совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

Замечания по рукописи диссертации:

1. В формуле (1.14) с.18 ошибки.
2. Текст, начиная последнего абзаца с.18 до формулы (1.16) с.19, полностью совпадает с текстом 3 абзаца с.22 вплоть до формулы (1.26).
3. В формуле (2.65) с.55 пропущен знак производной «штрих».
4. В формуле (3.26) в левой части оператор Лапласа Δ , а в правой части Δ_i , при этом оператор Δ_i не определён.
5. При численных расчётах методом Рунге-Кутты-Фельдберга (с.84) с автоматическим выбором шага не указана относительная точность расчёта.
6. В главе 4 приведены нестационарные нелинейные уравнения: (4.5), (4.6) (с.94) и (4.47), (4.48) (с.117). Тем не менее результаты расчётов, представленные на графиках этой главы, свидетельствуют, что они относятся к стационарным решениям. По-видимому, полученные решения есть результат временной эволюции решений к стационарным решениям. В работе об этом ничего не сказано. Если решалась нестационарная задача, то необходимо указать какой численный метод был использован и каковы его параметры (аппроксимация, порядок точности в расчётах). Для нелинейных задач с конвективными ячейками это важно. Если решалась стационарная задача, то как обеспечивалась сходимость к решению нелинейного уравнения?
7. Нет данных, свидетельствующих о достаточности сетки 64×128 . Особенно возникают вопросы, когда числа Грасгофа достигают 20000, а также в ситуации, когда в расчётной области появляется много вихрей. Обычно приводят тестовые расчёты, которые снимают такие вопросы.
8. Для получения нетривиального численного решения вводились возмущения на завихренность. Вводились ли независимые возмущения на функцию тока? Как будут зависеть результаты, если возмущения будут а) обладать симметрией, б) обладать сильной асимметрией? Если вводить такие возмущения для полученных новых стационарных решений, к каким решениям придём?

9. Работа посвящена плоским задачам термогравитационной конвекции. В частности, это касается задачи линейной устойчивости. Имеются ли свидетельства, о том, что двумерные возмущения наиболее опасные?

Указанные замечания не снижают положительной оценки диссертации. Результаты работы опубликованы в российских и международных журналах из Перечня ВАК, представлены на российских и международных конференциях.

Заключение. Диссертация «Конвекция в жидкости со степенной зависимостью плотности от температуры при заданном потоке тепла» представляет собой научно-квалификационную работу, выполненную на современном исследовательском уровне, в которой представлены новые результаты теоретического исследования режимов термогравитационной конвекции жидкостей с инверсией плотности. Диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9-11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней», а её автор Шарифулин Вадим Альбертович заслуживает присвоения ему учёной степени ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа и отзыв были обсуждены и одобрены на научном семинаре лаборатории 6.3 федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе» Сибирского отделения Российской академии наук 25 октября 2022 года, протокол № 22-01.

Отзыв составил:

Заведующий лабораторией 6.3 Института теплофизики СО РАН
доктор физико-математических наук,
профессор

Яворский Николай Иванович

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе» Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)
Адрес: 630090, Новосибирск, пр-т акад. Лаврентьева, д. 1
Тел.: +7-383-330-90-40, e-mail: director@itp.nsc.ru, сайт: <http://www.itp.nsc.ru/>