

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Шарифулина Вадима Альбертовича «Конвекция в жидкости со степенной зависимостью плотности от температуры при заданном потоке тепла», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

**Актуальность исследований.** Неослабевающий интерес к изучению закономерностей конвективного теплообмена в текучих средах объясняется их повсеместным присутствием и использованием в разнообразных технологиях. Конвекция, связанная с существованием тепловой и/или плотностной неоднородности в жидкости, представляет один из самых распространённых видов течений. Особое внимание привлекает проникающая конвекция, обусловленная одновременным сосуществованием и взаимодействием устойчивых и неустойчивых слоёв жидкой среды. В природе подобные условия возникают и в пресных водоёмах за счёт аномалии теплового расширения, присущего воде вблизи температуры 4 °С, и в мантии Земли благодаря формированию лёгкого дифференциата в подошве мантии, и в атмосфере – вследствие синоптической, внутрисуточной или внутрисезонной изменчивости. Проникающая конвекция имеет важное значения в гидробиологии – в средних широтах сохранение гидробионта возможно только потому, что естественные водоёмы не промерзают до дна именно в силу этого явления. Инверсия плотности воды связана с дипольным строением её молекул, и в диапазоне от 0 до 10 °С хорошо описывается не линейной, а квадратичной зависимостью функции плотности от температуры. Известны и другие специфичные жидкости с уравнениями состояния  $\rho(T)$  в виде степенных зависимостей, обеспечивающих корректное описание инверсии удельного объёма, которая может существенно влиять на структуру конвективных режимов и их устойчивость. Кроме того, важным фактором, влияющим на параметры конвективных течений и возможные формы неустойчивости, является граничный температурный режим, определяющий характер и степень неоднородности теплового поля. Таким образом, актуальность тематики исследований, выполненных в диссертационной работе Шарифулина В. А. «Конвекция в жидкости со степенной зависимостью плотности от температуры при заданном потоке тепла», не вызывает сомнений, а сама работа представляет как теоретический, так и практический интерес.

**Структура и содержание диссертации.** Диссертация состоит из введения, в котором обосновывается актуальность тематики, формулируются цели и задачи, описывается методология исследования, четырёх глав, заключения и списка литературы, содержащего 138 наименований. Общий объём работы составляет 145 страниц.

*В первой главе* анализируются современное состояние изучаемых проблем и известные результаты исследований конвективных восходящих струй над точечными и линейными тепловыми источниками и процессов теплообмена в жидкости с инверсией плотности, отмечены неполнота результатов или отсутствие отдельных данных для некоторых рассматриваемых задач.

*Во второй главе* в рамках приближения пограничного слоя получены точные решения задач о конвективном факеле от линейного и точечного источников тепла с заданной мощностью тепловыделения. Обсуждается область применимости построенных решений.

*Третья глава* посвящена исследованию устойчивости слоя жидкости со свободной границей при заданном тепловом потоке. Исследуется влияние присутствия температурной инверсии плотности и положения точки инверсии на пороговые характеристики и наиболее опасные моды неустойчивости.

*В четвёртой главе* представлены результаты исследования условий возникновения конвекции в жидкости с верхней свободной границей, заполняющей прямоугольную полость с теплоизолированными боковыми стенками, при заданном тепловом потоке на остальных внешних границах. Изучена эволюция плоских надкритических режимов при изменении геометрии области течения жидкости с линейной зависимостью плотности от температуры. Для жидкости с инверсией плотности исследовано влияние положения точки инверсии на устойчивость механического равновесия и форм надкритических течений в слабо вытянутой полости.

*В заключении* сформулированы основные результаты диссертации.

**Научная новизна.** К настоящему моменту хорошо известны фундаментальные результаты исследований проникающей конвекции, проведённые G. Veronis, B. Straughan, L. Payne, J. Whitehead и др. Тем не менее многие вопросы, связанные с процессами тепло- и массопереноса в условиях сосуществования контактирующих слоёв жидких сред с устойчивой и неустойчивой плотностной стратификацией, в том числе тогда, когда указанные условия обеспечиваются инверсией плотности рабочей жидкости, остаются открытыми. К настоящему времени не вполне изучены роль граничных тепловых режимов и свойств границ, равно как и характер влияния геометрии области течения на формирование возникающих режимов конвекции.

В диссертационной работе Шарифулина В. А. получены новые результаты, вносящие вклад в теорию конвективной устойчивости и связанные с методами аналитического и численного исследования процессов конвективного теплообмена в жидкостях с инверсией удельного объёма. Научная новизна представленных результатов состоит в следующем:

1. Построены обобщения автомодельных преобразований, полученных ранее в рамках постановок задач конвекции, учитывающих линейную зависимость плотности от температуры, на случай жидкости со степенной зависимостью  $\rho(T)$ , позволяющие получить новые точные решения задач о конвективном факеле от

линейного и точечного источников тепла. Определён диапазон значений показателя инверсии, при которых гарантируется корректное применение приближения пограничного слоя.

2. Исследована устойчивость механического равновесия слоя жидкости с квадратичной зависимостью плотности от температуры в условиях заданного постоянного теплового потока на внешних границах. Аналитически определены границы длинноволновой неустойчивости. Установлено, что присутствие максимума плотности и изменение его положения внутри слоя могут приводить к смене типа и формы наиболее опасных возмущений.

3. Изучено влияние геометрии области течения, а именно аспектного отношения плоской полости, на пороговые характеристики неустойчивости жидкости с линейным уравнением состояния  $\rho(T)$ . Численно показано, что в слабо и умеренно вытянутой области проявляется длинноволновая природа неустойчивости. В полости с отношением сторон 5:1 в широком интервале изменений числа Грасгофа возможна реализация различных стационарных состояний, в том числе с несимметричной топологией; исследованы гистерезисные переходы между ними.

4. Исследована устойчивость состояния механического равновесия и надкритических режимов конвекции в жидкости с тепловой инверсией плотности в слабо вытянутой полости при положениях точки инверсии, отвечающих ячеистой и длинноволновой природе неустойчивостей. Изучено влияние интенсивности подогрева на структуру надкритических режимов. Показано, что изменение интенсивности тепловой накачки за счёт увеличения величины теплового потока, приводит к усложнению топологии течений и формированию многовихревых режимов со сложной симметрией.

**Обоснованность и достоверность результатов** диссертационной работы обусловлена выбором корректных, физически обоснованных математических моделей, использованием строгих математических методов теории устойчивости, применением апробированных численных методов и сравнением результатов работы с известными данными, полученными другими авторами для предельных случаев.

**Научное и практическое значение** работы заключается в выявлении условий возникновения неустойчивостей в жидкости с инверсией плотности и определении закономерностей формирования различных надкритических режимов конвекции при различной интенсивности внешней тепловой нагрузки, характеризующейся величиной теплового потока. Знание критических параметров устойчивости и внутренних механизмов, приводящих к потере устойчивости основного состояния, является чрезвычайно важным для понимания особенностей проникающей конвекции, которая может возникать как в естественных водоёмах, так и в резервуарах для хранения и транспортировки текучих сред. Результаты диссертации могут быть полезны при постановке физических экспериментов с целью определения эмпирических характеристик/коэффициентов, отсутствующих в справочной литературе.

Полученные точные решения могут быть использованы в качестве бенчмарков при разработке и тестировании численных методов, при анализе сингулярностей и верификации приближённых моделей.

**Оценка диссертации.** По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:

1. На стр. 45 отмечено, что для численного решения задачи (2.30) – (2.32) используется метод Рунге – Кутты – Фельберга 4-5 порядка, для чего исходная система (2.30), (2.31) преобразуется к нормальной системе обыкновенных дифференциальных уравнений (2.54). Однако задача (2.54) – (2.55) является краевой задачей, в которой часть граничных условий задана на правой границе отрезка интегрирования. Каким образом удалось применить вышеупомянутый метод для решения задачи (2.54) – (2.55) эквивалентной исходной? По-видимому, диссертант использовал некий аналог метода стрельбы, который весьма критичен к выбору начального приближения. Если это так, то как осуществлялся выбор начальных приближений? Кроме того, при использовании этого метода не гарантируется единственность найденного решения.
2. В п. 2.1 приведены результаты численного решения задачи о плоском конвективном факеле над линейным источником тепла, полученные для различных значений показателя инверсии  $\gamma$  при некоторых фиксированных значениях числа Прандтля  $Pr$ . Соответствуют ли выбранные значения  $Pr$  реальным жидкостям с показателями инверсии  $\gamma = 2, 3$  или использованы модельные значения?
3. На рисунках 4.6 (стр. 103), 4.8 (стр. 105), 4.10 (стр. 106) представлены зависимости удельной кинетической энергии конвективного движения  $E$  и среднего значения функции тока  $\psi$  от числа Грасгофа  $Gr$  для систем с различным аспектным отношением  $L$ . На каждом из указанных рисунков представлены две кривые – сплошная и штриховая. При этом ни в тексте, ни в подписях к рисункам не описано чему соответствуют сплошные линии. Аналогичное замечание относится к рисунку 4.20 (стр. 126).
4. При решении задачи о возникновении конвекции в вытянутой полости с аспектным отношением  $L = 5$  показана множественность стационарных вторичных режимов, часть из которых характеризуется несимметричной топологией. В диссертации никак не обсуждается с чем связана несимметричность течений, возникающих в результате потери устойчивости, то есть каковы причины/механизмы, вызывающие формирование таких режимов в рамках **симметричной** постановки.

Помимо высказанных выше, можно сделать ряд технических замечаний:

5. На стр. 16 и 21 вводится безразмерное нормированное отклонение температуры  $v$ , однако в уравнениях (1.5) и (1.17) для обозначения температуры используется символ  $\theta$ .

6. В тексте имеется дублирование фрагментов текста, которого можно было избежать, используя соответствующие ссылки (например, задача (1.25), (1.26) полностью совпадает с задачей (1.15), (1.16), а общие соображения относительно её нелинейности дословно повторяют второй абзац сверху на стр. 18).
7. Подписи на рисунках 2.1 – 2.6 выполнены на английском языке.
8. В последнем слагаемом в уравнении импульса системы уравнений (3.1) в качестве обозначения коэффициента теплового расширения используется символ  $\alpha_2$ . Ниже, в формуле, определяющей функцию давления  $p_0$  в однопараметрическом семействе решений (3.3), соответствующих состоянию механического равновесия, и в уравнении состояния (3.4) присутствует символ  $\alpha$ , очевидно отвечающий тому же самому коэффициенту.
9. В тексте автореферата в разделе «Структура и объём диссертации» указано, что диссертация состоит из трёх глав, хотя работа содержит 4 главы.
10. Имеется ряд других опечаток, синтаксических и пунктуационных неточностей в тексте.

Сделанные замечания не снижают высокой положительной оценки результатов диссертационной работы, их научной и практической значимости.

**Заключение по диссертации.** Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. В целом можно заключить, что диссертация Шарифулина В. А. «Конвекция в жидкости со степенной зависимостью плотности от температуры при заданном потоке тепла», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы, соответствует паспорту специальности и может рассматриваться как завершённая научно-квалификационная работа, которая выполнена на высоком научном уровне и вносит вклад в развитие теории конвективной устойчивости. В работе приведены результаты аналитического и численного исследования условий возникновения конвекции в жидкостях со степенной зависимостью плотности от температуры. К несомненным достоинствам работы следует отнести анализ гистерезисных переходов между различными надкритическими режимами в задаче о возникновении конвекции в ограниченном жидком объёме с верхней свободной границей и анализ влияния граничного теплового режима на тип наиболее опасных возмущений в жидкости с инверсией плотности. Результаты работы представлены на всероссийских конференциях и с достаточной полнотой опубликованы в 18 печатных работах, из них 7 – в ведущих журналах, входящих в перечень ВАК в действующей редакции и международные системы цитирования Web of Science и Scopus. Автореферат диссертации полно и правильно отражает её содержание.

По актуальности, новизне, научной и прикладной значимости, диссертационная работа Шарифулина Вадима Альбертовича «Конвекция в жидкости со степенной зависимостью плотности от температуры при заданном потоке тепла»

удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, согласно Положению о присуждении учёных степеней в текущей редакции, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

Заведующий отделом дифференциальных уравнений механики, ведущий научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (ИВМ СО РАН) доктор физико-математических наук

Бекежанова Виктория Бахытовна

01.11.2022

660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

Тел.: (391) 290-51-42, e-mail: [vbek@icm.krasn.ru](mailto:vbek@icm.krasn.ru)

Подпись Виктории Бахытовны Бекежановой удостоверяю:

Ученый секретарь ИВМ СО РАН

к.ф.-м.н.



Вяткин Александр Владимирович

Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИВМ СО РАН), 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

Тел.: (391) 290-51-42, e-mail: [sek@icm.krasn.ru](mailto:sek@icm.krasn.ru)