

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации

Шарифулина Вадима Альбертовича

«Конвекция в жидкости со степенной зависимостью плотности от

температуры при заданном потоке тепла»,

представленной на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность исследований. Конвекция жидкости и газа — самое распространенное движение во Вселенной. Известно, что для описания конвекции используют модифицированные уравнения Навье-Стокса в приближении Буссинеска. Аппроксимация Буссинеска, вообще говоря, основывается на двух гипотезах (допущениях):

1. Традиционно пренебрегают зависимостью плотности жидкости от давления, то есть считают, что уравнение непрерывности среды можно эквивалентно заменить уравнением несжимаемости.
2. Плотность жидкости описывается линейным законом зависимости от температуры, которая учитывается только в массовых силах (силе Архимеда).

Несмотря на многочисленные приложения уравнений Обербека-Буссинеска для теоретических исследований и обоснования экспериментальных и натуральных наблюдений, существуют жидкости и газы, конвекция которых не может быть удовлетворительно описана линейной аппроксимацией плотности от температуры. В этом случае наблюдается инверсия плотности, которая присуща воде, жидкому висмуту и гелию и многим другим жидким средам. Необходимо отметить, что в этом случае плотность зависит от температуры по степенному закону. Нужно еще упомянуть, что к настоящему времени накоплены данные о зависимости плотности не только от температуры, но и от давления.

Диссертационная работа В.А. Шарифулина посвящена теоретическому исследованию тепловой конвекции жидкости со степенной зависимостью плотности от температуры при подогреве снизу (классический механизм генерации конвекции) с помощью локального или распределенного источника тепла заданной мощности.

Таким образом, решение краевых задач в точной и приближенной постановках является актуальной и важной задачей неизотермической гидродинамики с плотностью жидкости, нелинейно зависящей от температуры. До настоящего времени имеется существенный пробел в

аналитических и численных решениях задач течения жидкостей с нелинейными реологическими соотношениями плотности относительно температуры и можно только констатировать отсутствие определенного запаса точных решений уравнений движения, позволяющих изучить течения жидкостей и исследовать их гидродинамическую устойчивость.

Структура и содержание диссертации. Диссертация объемом 145 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, состоящего из 138 наименований. В диссертационной работе содержится 40 рисунков и 1 таблица.

Во **введении** автором диссертационной работы обосновывается актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследований, указана научная новизна и практическая значимость научных результатов, выносимых на защиту.

В **первой главе** диссертационной работы представлен обзор публикаций об исследовании конвективных факелов от локальных и линейных источников тепла. Обсуждаются и анализируются механизмы генерации конвекции в бесконечном горизонтальном плоском слое жидкости с заданным вертикальным потоком тепла на его границах. Критически осмыслены научные работы по нелинейным режимам конвекции жидкости с инверсией плотности относительно температуры для различной геометрии исследуемой области течения. Благодаря библиографическому обзору сформулирована актуальность и цели исследования. Из него очевидна новизна результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

Во **второй главе** вычислены новые точные решения задачи о конвективном факеле, индуцированном линейным и точечным источником тепла с заданной мощностью тепловыделения в жидкости со степенной зависимостью плотности от температуры. Использовалось приближение пограничного слоя для уравнений Обербека-Буссинеска. Полученные два решения в конечном виде (формулы выражены через элементарные гиперболические функции) проанализированы и определена область применимости полученных зависимостей для гидродинамических полей.

В **третьей главе** рассматривается механизм генерации конвекции в бесконечном горизонтальном слое жидкости с температурной инверсией плотности по квадратичному закону. Гидродинамическая устойчивость исследовалась аналитически в длинноволновом приближении путем разложения по малому параметру (квадрату волнового числа) и численно методом стрельбы с использованием метода Рунге-Кутты-Фельберга для возмущений с конечной длиной волны. Результатом исследования является

карта устойчивости гидродинамической устойчивости конвективного течения жидкости с инверсией плотности.

Четвертая глава посвящена анализу возникновения неустойчивости и плоских надкритических режимов для замкнутой прямоугольной горизонтальной полости. Исследование устойчивости было проведено при следующих граничных условиях: верхняя граница полости полагается свободной, а остальные границы твердыми. На горизонтальных границах (твердой нижней и свободной верхней) задан постоянный тепловой поток, боковые границы полагаются теплоизолированными с линейным распределением плотности от температуры. В качестве модельной жидкости взята вода, для которой такие граничные условия с удовлетворительной точностью выполняются при температуре, близкой к стандартным комнатным значениям. Для решения задачи использовался двухполевой метод, разработанный в пермской гидродинамической школе. Благодаря этому методу решение задачи богато проиллюстрировано графиками.

В заключении приведены выводы по результатам диссертационного исследования и рекомендации по будущим исследованиям по конвективным течениям со степенной зависимостью плотности от температуры.

Научная новизна. В представленной к защите диссертации в качестве основных научных результатов можно выделить:

1. В приближении пограничного слоя для уравнений конвекции найдены новые точные решения задач о конвективном факеле над линейным и точечным источниками тепла в жидкости с произвольным степенным показателем плотности (инверсии плотности) от температуры при определенных значениях числа Прандтля.
2. Решена задача о генерации естественной конвекции в бесконечном горизонтальном слое жидкости при постоянном тепловом потоке на твердой нижней и свободной верхней границах при инверсии плотности. Аналитически выведен границы длинноволновой неустойчивости и методами вычислительной гидродинамики обнаружена и исследована область ячеистой неустойчивости. Данный эффект гидродинамической неустойчивости невозможен в конвективном течении жидкости с линейной аппроксимацией плотности от температуры.
3. Определено влияние значения точки инверсии на устойчивость механического равновесия и надкритические режимы конвекции жидкости с тепловой инверсией плотности в прямоугольной горизонтальной полости с отношением характерных масштабов, равным двум.

Научная и практическая значимость работы. В диссертационной работе полученные результаты важны для понимания особенностей проникающей конвекции в областях, где затруднены или невозможны прямые натурные измерения (в прудах, в озерах, в недрах планет и звезд, в технических устройствах и технологических процессах. Точные решения, полученные при проведении диссертационного исследования, могут быть использованы при проектировании технических устройств, использующих жидкости с температурной инверсией плотности. Полученные точные решения могут быть использованы при тестировании численных алгоритмов и для конструирования новой теории гидродинамической устойчивости неклассических несжимаемых и сжимаемых жидкостей.

Достоверность и обоснованность результатов, представленных в диссертации результатов обеспечивается корректной постановкой задач, безошибочным использованием аппарата математического анализа и механики сплошных сред. Достоверность результатов вычислений подтверждается «машинной» сходимостью численных решений и качественным и количественным согласованием с предельными случаями, рассмотренными в экспериментальных и теоретических работах других специалистов по теоретической и экспериментальной гидродинамике.

Результаты, представленные в диссертационной работе В.А. Шарифулина, прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях, представлены и обсуждены на научных семинарах и опубликованы в 18 печатных работах, 7 из которых в научных статьях, входящих в Перечень ВАК и международные научные базы данных.

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат ясно, полно и правильно отражает структуру, основные результаты и выводы диссертации.

Замечания по диссертации и автореферату. При ознакомлении с диссертационной работой и авторефератом диссертации не возникает существенных замечаний по представлению материала. В работе имеется небольшое число неточностей и опечаток, не влияющих на восприятие научных результатов. Тем не менее отмечу некоторые дискуссионные и досадные моменты, возникшие при ознакомлении с диссертацией и авторефератом:

1. В диссертации и автореферате допущена досадная неточность — неправильно указано количество глав диссертационного исследования.
2. Мне кажется, что в диссертации было пронумеровано избыточно много формул. С одной стороны, это должно помочь при чтении, но когда видишь, например, ссылку на формулу (2.100), то это вызывает

недоумение. Кроме того, на многие нумерованные формулы отсутствуют ссылки по тексту.

3. При численных решениях выводы о сходимости основывались на «машинной» сходимости. Всегда при уменьшении шага сетки наблюдалась близость к известным результатам?
4. Диссертация очень хорошо и наглядно проиллюстрирована графическим материалом, но хотелось бы иногда иметь больший размер рисунков и наличие стрелок при иллюстрации функции тока — траекторий движения жидких частиц.

Заключение. Диссертационная работа **Шарифулина Вадима Альбертовича «Конвекция в жидкости со степенной зависимостью плотности от температуры при заданном потоке тепла»** соответствует требованиям Постановления Правительства РФ 842 от 24 сентября 2013 г. «О порядке присуждения ученых степеней» с изменениями и дополнениями №335 от 30 июля 2014 г., 21 апреля, 2 августа 2016. Я уверен, что автор диссертации достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Профессор кафедры
информационных технологий и систем управления
Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РтФ
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Доктор физико-математических наук
(01.02.05 (1.1.9) – Механика жидкости, газа и плазмы)
Просвиряков Евгений Юрьевич

26.10.2022 года

Почтовый адрес: 620002, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Номер телефона: +7(343) 375-48-78, +79826545223
E-mail: evgen_pros@mail.ru

Подпись Евгения Юрьевича Просвирякова заверяю:

ученый секретарь
ФГАОУ ВО
«УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»



В.А. Морозова