

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.012.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ  
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 13.10.2016 № 130

О присуждении Зубовой Надежде Алексеевне, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Возникновение и нелинейные режимы конвекции многокомпонентных смесей в слоях и замкнутых полостях» по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 26.07.2016, протокол № 116 диссертационным советом Д 004.012.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России от 11.04.2012 № 105/нк.

Соискатель Зубова Надежда Алексеевна 1986 года рождения, в 2008 г. окончила программу бакалавриата, а в 2010 г. магистратуру в ГОУ ВПО «Пермский государственный университет». В 2013 г. окончила аспирантуру очной формы обучения в ФГБУН Институт механики сплошных сред УрО РАН по научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы. В настоящее время работает инженером лаборатории вычислительной гидродинамики ИМСС УрО РАН. Диссертация выполнена в лаборатории вычислительной гидродинамики ИМСС УрО РАН.

**Научный руководитель** – доктор физико-математических наук, профессор, Любимова Татьяна Петровна, заведующий лабораторией вычислительной гидродинамики ИМСС УрО РАН.

**Официальные оппоненты:**

Мажорова Ольга Семеновна, доктор физико-математических наук, профессор ФГБУН Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН;

Вяткин Алексей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент ФГБОУ ВО Пермский государственных гуманитарно-педагогический университет.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Южный Федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, в своем положительном заключении, составленным Цибулиным Вячеславом Георгиевичем, д.ф.-м.н., доцентом, профессором кафедры вычислительной математики и математической физики, подписанным Жуковым Михаилом Юрьевичем, д.ф.-м.н., профессором, заведующим кафедрой вычислительной математики и математической физики и утвержденным проректором по организации научной и проектно-инновационной деятельности ЮФУ И.К.Шевченко, указала, что диссертация представляет собой закон-

ченное исследование, имеющее научное и практическое значение, в котором изучены нелинейные режимы конвекции бинарных и трехкомпонентных жидких смесей в плоском горизонтальном слое и прямоугольных полостях, нагреваемых сверху или снизу, при разных уровнях силы тяжести, в том числе при наличии вибраций; диссертация полностью удовлетворяет критериям Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Соискателем опубликовано 22 работы, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК. Наиболее значительные работы:

1. Любимова Т.П., Зубова Н.А. Устойчивость механического равновесия тройной смеси в квадратной полости при вертикальном градиенте температуры // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т.7. №2. С. 200-207.
2. Lyubimova T.P., Zubova N.A. Onset of convection in a ternary mixture in a square cavity heated from above at various gravity levels // Microgravity Sci. Technol. 2014. V. 26 (4). P.241-247.
3. Lyubimova T.P., Zubova N.A. Onset and nonlinear regimes of the ternary mixture convection in a square cavity // The European Physical Journal E. 2015. V. 38. P.19.
4. Lyubimova T.P., Zubova N.A., Shevtsova V.M. Vibrational convection of ternary mixtures in rectangular cavities in zero gravity conditions // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 681. P. 012041.

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы:** от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Мажоровой Ольги Семеновны. В отзыве указано, что диссертация выполнена на высоком научном уровне, содержит решение актуальных задач; представленные сведения об устойчивости механического равновесия и нелинейных режимах конвекции в бинарных и трехкомпонентных смесях способствуют более глубокому пониманию особенностей процесса тепломассопереноса в многокомпонентных средах. Оппонент отмечает, что в работе обоснованию надежности вычислительной процедуры следовало бы уделить больше внимания. Не во всех расчетах используется оптимальный, с точки зрения проведенного анализа влияния величины шага сетки по пространству на возникновение конвекции, пространственный шаг. Выбор шага по времени не обсуждается вовсе. В качестве критерия возникновения конвекции используется равенство энергии возмущения и энергии основного состояния, но вопрос о том, является ли используемая разностная схема консервативной в том смысле, как это имеет место в исходной математической задаче, остается открытым.

2. Положительный отзыв официального оппонента Вяткина Алексея Анатольевича. В отзыве указано, что диссертация выполнена на хорошем уровне и представляет собой ценное научное исследование актуальных проблем механики жидкости; новые результаты имеют существенное значение для науки и космических технологий. Оппонент отмечает, что в работе встречается два написания имени ученого: Релей и Рэлей. Назва-

ния некоторых разделов диссертации предполагают описание надкритических режимов конвекции, в то время как основное внимание уделяется времени наступления неустойчивости и структуре возникающей конвекции. Во введении указаны два экспериментальных проекта (IVIDIL и DCMIX), проведенных на Международной космической станции, имеющих отношение к теме диссертационной работы. При этом в работе отсутствуют количественные сравнения с результатами этих экспериментов.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается актуальность темы диссертации, теоретическая и практическая значимость работы, основные научные результаты и их достоверность. В отзыве приводятся несколько замечаний. Из текста диссертации не ясно, проводились ли исследования влияния характеристик расчета (разрешение пространственной сетки, шаг по времени) на представленные результаты. Требуется объяснения возможность диагонализации матрицы коэффициентов молекулярной диффузии. В диссертационной работе присутствует небольшое количество опечаток, а во введении имеются некоторые формулы, для которых не приведены обозначения. В диссертационной работе отсутствуют подробности программной реализации используемых методов, которые могли быть описаны в Приложении.

На автореферат поступило 8 положительных отзывов, из них 1 отзыв – без замечаний от: Гончаровой О.Н., д.ф.-м.н., доцента, главного научного сотрудника Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск;

7 отзывов с замечаниями от: Бердникова В.С., д.ф.-м.н., доцента, заведующего лабораторией свободноконвективного теплообмена Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск; Демина В.А., д.ф.-м.н., доцента, заведующего кафедрой теоретической физики и Гаврилова К.А., к.ф.-м.н., декана физического факультета ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь; Мелких А.В., д.ф.-м.н., доцента, профессора кафедры технической физики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург; Перминова А.В., к.ф.-м.н., доцента, доцента кафедры общей физики ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь; Рыжкова И.И., д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника Института вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск; Соболевой Е.Б., д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва; Тарунина Е.Л., д.ф.-м.н., профессора, профессора кафедры прикладной математики и информатики ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь.

В качестве замечаний отмечено следующее: при формулировке задач непонятно, как учитывается зависимость плотности сред от концентраций. Явным образом не выписаны соответствующие числа Рэлея (или Грасгофа); не всегда понятны граничные условия для температуры на границах расчетных областей; формулировки п.5 на стр.5 и п.4 на стр. 16 неудачны; при упоминании системы уравнений тепловой конвекции бинарных жидкостей была бы уместна ссылка на классическую работу И.Г. Шапошникова

(К теории конвективных явлений в бинарной смеси // ПММ, т. 17, 1953), в которой впервые выводится эта система уравнений; интересно было бы выяснить, имеется ли прямая связь между количеством “конвективных пальцев” на рис.1 и коэффициентом термодиффузии; чем обусловлен выбор горизонтальных вибраций и чему равна амплитуда вибраций по сравнению с характерными размерами системы; что имеется в виду при употреблении термина “нестационарное основное состояние механического равновесия”; в системе уравнений на стр. 13 отсутствует геометрический параметр, появляющийся вследствие определения частоты вибраций и числа Релея посредством различных линейных размеров расчетной полости; некорректно записано определение вектора коэффициентов термодиффузии на стр. 10; не указано отношение разделения для бинарной смеси и отношение разделения второго компонента тройной смеси в подписи к рис. 2, в связи с этим непонятно, с чем связано резкое понижение границы устойчивости при подогреве сверху при переходе от бинарной к тройной смеси; мало сведений об используемых численных кодах, непонятно также, имеется ли вклад автора в разработку численных кодов; не указано влияние изменений пространственной сетки на интегральные характеристики решения; не всегда приведены параметры моделируемых смесей; не пояснено, почему в постановке задачи пренебрегается такими диффузионными механизмами, как эффект Дюфора и эффект бародиффузии, а также зависимостями диффузионных коэффициентов от температуры.

В отзывах отмечено, что диссертация выполнена на высоком научном уровне, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых не вызывает сомнения, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

**официальные оппоненты** являются одними из ведущих специалистов в области механики жидкости и газа, имеют большое число публикаций с результатами теоретических и экспериментальных работ по изучению конвективных явлений многокомпонентных смесей, осложненных наличием внешних полей, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

**ведущая организация ЮФУ** является одним из ведущих университетов страны, и хорошо известна своими достижениями в области механики жидкости и газа, в университете активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования в области гидродинамической устойчивости.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработана** методика численного исследования, позволяющий проводить расчеты конвекции многокомпонентной смеси, заполняющей прямоугольную полость, при влиянии разных уровней стационарного поля тяжести и вибрационного воздействия;

**предложен** подход к определению времени наступления неустойчивости при решении задачи об эволюции малых возмущений нестационарного основного состояния для многокомпонентной смеси;

**доказана** перспективность использования критерия, основанного на равенстве скорости роста возмущений и обратному характерному диффузионному времени основного состояния, для определения времени наступления неустойчивости;

**введена** классификация установившихся режимов термоконцентрационной конвекции многокомпонентных смесей в прямоугольных полостях.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказано:**

– время наступления неустойчивости в бинарных смесях уменьшается, а волновое число наиболее опасных возмущений растет по степенным законам с увеличением концентрационного числа Релея;

– течение, возникающее после потери устойчивости, имеет многовихревую структуру и сосредоточено вблизи горизонтальных границ полости, а распределение концентрации примеси приобретает пальцеобразную форму;

– добавление компоненты с положительным отношением разделения оказывает стабилизирующее действие, а компоненты с отрицательным отношением разделения – дестабилизирующее действие;

– в отсутствие силы тяжести при достижении некоторой интенсивности вибраций происходит перестройка структуры течения, связанная с неустойчивостью квазиравновесия жидкости в центральной части полости;

– вибрации ускоряют возникновение гравитационной конвекции при нагреве сверху в земных условиях и замедляют его в условиях микрогравитации.

**Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов)**

**использован** комплекс численных методов исследования устойчивости механического равновесия и нелинейных режимов конвекции жидких смесей;

**изложены** результаты решения линейных и нелинейных задач конвекции многокомпонентных смесей в плоском горизонтальном слое и прямоугольных полостях при разных уровнях силы тяжести, в отсутствие и при наличии вибраций;

**раскрыты** особенности поведения неоднородно нагретых многокомпонентных смесей в условиях земной и пониженной гравитации;

**изучено** влияние силы тяжести и вибраций, перпендикулярных градиенту температуры, на течение многокомпонентных смесей в слоях и прямоугольных полостях;

**проведена модернизация** алгоритмов численного исследования конвекции бинарных и трехкомпонентных смесей в замкнутых полостях.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработана** программа, позволяющая проводить численное моделирование нелинейных режимов конвекции трехкомпонентных смесей в прямоугольных полостях в отсутствие и при наличии вибраций, пригодная для подготовки экспериментов по влиянию вибраций на конвекцию трехкомпонентных смесей;

**определены** условия возникновения неустойчивости равновесия бинарных и трехкомпонентных смесей в прямоугольных полостях в зависимости от уровня статической тяжести;

**создана** программа для численного исследования эволюции малых возмущений нестационарного основного состояния бинарных смесей в горизонтальном плоском слое и прямоугольной полости, являющаяся основой для определения условий возникновения неустойчивости механического равновесия бинарных и трехкомпонентных смесей;

**представлены** результаты численного моделирования нелинейных режимов конвекции бинарных и трехкомпонентных смесей, в том числе при наличии вибраций.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**теория** построена на известных и проверяемых приближениях механики жидкости и газа;

**идея базируется** на обобщении имеющегося опыта численного исследования устойчивости механического равновесия бинарных смесей и численного моделирования нелинейных режимов конвекции бинарных систем;

**использованы** современные апробированные численные методы;

**установлено** качественное и количественное соответствие результатов, полученных автором с помощью разных методов, а также с теоретическими и экспериментальными данными, имеющимися в литературе.

**Личный вклад соискателя состоит** в участии в постановке задач, разработке и отладке программ расчетов, проведении вычислений, участии в анализе результатов и подготовке публикаций.

**Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается** наличием последовательного плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.

На заседании 13 октября 2016 г. диссертационный совет принял решение присудить Зубовой Н.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 10 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 18, против – 1, недействительных бюллетеней – 0.

Зам. председателя

диссертационного совета

 / Роговой Анатолий Алексеевич

Ученый секретарь

диссертационного совета

 / Зув Андрей Леонидович

13.10.2016 г.

М.П.