

На правах рукописи



Зубова Надежда Алексеевна

**ВОЗНИКНОВЕНИЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЖИМЫ  
КОНВЕКЦИИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ  
В СЛОЯХ И ЗАМКНУТЫХ ПОЛОСТЯХ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук

**Научный руководитель:**

Любимова Татьяна Петровна, доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

Мажорова Ольга Семеновна, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Вяткин Алексей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и экспериментальной физики ФГБУ ВО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет»

**Ведущая организация:**

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

Защита диссертации состоится “13” октября 2016 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.012.01 в ФГБУН Институт механики сплошных сред УрО РАН по адресу: 614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; тел: (342) 2378314; факс: (342) 2378487; сайт: [www.icmm.ru](http://www.icmm.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред УРО РАН.

Автореферат разослан “ ” 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.ф.-м.н., доцент



А.Л. Зуев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Конвективные явления в многокомпонентных смесях играют важную роль во многих природных и технологических процессах. Изучение таких процессов затрудняется наличием нескольких диффузионных механизмов (молекулярной диффузии, термодиффузии, бародиффузии), их нестационарностью и нелинейностью. Аналитическое решение задач гидродинамики многокомпонентных смесей удастся получить лишь в редких случаях. Поэтому часто единственным возможным методом исследования является численное моделирование.

Моделирование термодиффузионных процессов требует знания коэффициентов переноса, на измерение которых с необходимой точностью может повлиять наличие внешних полей, например, поля тяжести и вибрационного воздействия. Это обуславливает важность и актуальность с практической и фундаментальной точек зрения исследования конвективных явлений в многокомпонентных неизотермических жидких смесях при разных уровнях тяжести в отсутствие или при наличии вибраций.

Начиная с 2011 года, на Международной космической станции проводится серия экспериментов по измерению коэффициентов диффузии и термодиффузии в трехкомпонентных смесях в условиях микрогравитации. Одним из необходимых этапов планирования и подготовки экспериментов является численное моделирование.

Исследования, вошедшие в диссертацию, проводились в рамках следующих проектов: проект МИГ «Течения и тепло-массообмен в многокомпонентных и околокритических жидкостях при наличии вибраций. Моделирование, подготовка и проведение экспериментов на Международной Космической Станции», Соглашение № С-26/212 от 08.12.2011 г., рук. Т.П. Любимова; проект МИГ «Тепломассообмен в многокомпонентных и многофазных средах. От экспериментов в космосе к земным технологиям», Соглашение № С-26/004.03 от 12.01.2015 г., рук. Т.П. Любимова; проект «Высокопроизводительные вычисления в задачах механики сплошных сред» по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН «Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы. На-

правление 1. Математическое моделирование, управление и автоматизация», рук. Т.П. Любимова; грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации в 2014-2015 гг. НШ-4022.2014.1 «Нелинейные процессы в гидродинамических системах. Новые способы управления природными и технологическими процессами», рук. Т.П. Любимова, П.Г. Фрик, Г.Ф. Путин, В.Г. Козлов; грант Российского научного фонда № 14-21-00090 «Устойчивость, нелинейная динамика и управление поведением многофазных гидродинамических систем», рук. Т.П. Любимова.

**Целью работы** является исследование возникновения и нелинейных режимов термоконцентрационной конвекции бинарных и трехкомпонентных жидких смесей в плоском горизонтальном слое и прямоугольных полостях, нагреваемых сверху или снизу, при разных уровнях статического поля тяжести, в отсутствие или при наличии вибраций.

**Научная новизна** работы заключается в том, что в ней впервые:

1. Определены зависимости времени наступления неустойчивости и волнового числа наиболее опасных возмущений от концентрационного числа Релея (уровня тяжести) в бинарных жидких смесях с отрицательными отношениями разделения в прямоугольных полостях при нагреве сверху.
2. Получены данные о надкритических режимах конвекции бинарных смесей в прямоугольных полостях, нагреваемых сверху, при разных уровнях тяжести.
3. Найдены условия возникновения и надкритические режимы конвекции трехкомпонентных смесей с различными значениями отношений разделения компонент в квадратной полости при заданных вертикальных градиентах температуры и концентрации.
4. Получены данные о нелинейных режимах конвекции трехкомпонентных смесей с различными значениями отношений разделения компонент в квадратной полости при заданном вертикальном градиенте температуры и однородном распределении концентрации в начальный момент времени.

5. Исследована вибрационная конвекция трехкомпонентных смесей в прямоугольных полостях с заданными однородными вертикальными градиентами температуры и концентрации в условиях невесомости.

6. Показано, что вибрации, перпендикулярные градиенту температуры, ускоряют возникновение гравитационной конвекции бинарных смесей в нагреваемых сверху прямоугольных полостях в земных условиях и замедляют его в условиях микрогравитации.

**Методы диссертационного исследования.** Все исследуемые задачи решались численно методом конечных разностей. Линейная устойчивость состояний механического равновесия исследовалась путем решения нестационарных линеаризованных уравнений малых возмущений. Нелинейные режимы конвекции получались путем решения полных нестационарных нелинейных уравнений.

**Теоретическая и практическая значимость.** Полученные данные о наступлении неустойчивости и нелинейных режимах конвекции в бинарных и трехкомпонентных смесях, а также о влиянии на них вибрационного воздействия, важны с научной точки зрения для описания вкладов различных факторов в тепломассоперенос. Они могут быть использованы для прогнозирования поведения многокомпонентных смесей в природных и технологических процессах (распределение компонент в месторождениях углеводородов, геологические процессы в мантии Земли, разделение изотопов в жидких и газовых смесях и др.) и при планировании и подготовке экспериментов в условиях микрогравитации. Данные о влиянии вибраций могут быть использованы при разработке методов управления возникновением и развитием конвекции в многокомпонентных смесях.

#### **Автор защищает**

1. Результаты решения линеаризованных задач об эволюции малых возмущений состояния механического равновесия с постоянным вертикальным градиентом температуры и зависящим от времени вертикальным градиентом концентрации для бинарных смесей с отрицательными отношениями разделения в нагреваемых сверху плоском горизонтальном слое и квадратной полости при различных уровнях тяжести.

2. Результаты численного моделирования нелинейных режимов термоконцентрационной конвекции бинарных смесей в нагреваемых сверху прямоугольных полостях при различных уровнях тяжести.
3. Результаты численного исследования устойчивости механического равновесия и нелинейных режимов конвекции трехкомпонентных смесей в квадратной полости при заданных вертикальных градиентах температуры и концентрации.
4. Результаты численного моделирования нелинейных режимов термоконцентрационной конвекции трехкомпонентных смесей с разными значениями отношений разделения компонент в квадратной полости при заданном вертикальном градиенте температуры и однородном распределении концентрации в начальный момент времени.
5. Результаты исследования нелинейных режимов термовибрационной конвекции трехкомпонентных смесей в прямоугольных полостях с заданными вертикальными градиентами температуры и концентрации в условиях невесомости.
6. Результаты исследования нелинейных режимов термовибрационной конвекции бинарных смесей в прямоугольных полостях при мгновенном нагреве верхней границы и однородном распределении концентрации в начальный момент времени для различных уровней тяжести.

**Достоверность результатов** подтверждается тестированием используемых программ расчетов на задачах, исследованных ранее, в том числе другими авторами; соответствием данных, полученных разными методами, в том числе в рамках линейного и нелинейного подходов.

**Публикации и личный вклад автора.** Основные материалы диссертации изложены в 22 работах [1-22], из них 4 работы опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК [10, 11, 14, 21]. Во всех этих работах диссертант участвовал в постановке задач, выполнении численного моделирования, анализе его результатов, подготовке публикаций.

**Апробация работы.** Основные результаты, приведенные в диссертации, были представлены на следующих научных семинарах и конференциях: Всерос. конф. молодых ученых «Не-

равновесные процессы в сплошных средах», Пермь, 2012; IMT-10, Brussels, Belgium, 2012; 18-ая Зимняя школа по механике сплошных сред ИМСС УрО РАН, Пермь, 2013; ELGRA-2013, Vatican City, Rome, 2013; 2-я межд. конф. «Пермские гидродинамические научные чтения», Пермь, 2014; 5-я межд. научная школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах», Москва, 2014; 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, The Russian Federation, 2014; IMT-11, Bayonne, France, 2014; 3-я межд. конф. «Пермские гидродинамические научные чтения», Пермь, 2015; 19-ая Зимняя школа по механике сплошных сред ИМСС УрО РАН, Пермь, 2015; Пермский городской гидродинамический семинар им. Г.З. Гершуни и Е.М. Жуховицкого, 2015; International Conference on Computer Simulation in Physics and Beyond, Moscow, 2015; XXIV всерос. школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках», Пермь, 2015; 18 межд. конф. «Потоки и Структуры в Жидкостях», Калининград, 2015; IMT-12, Madrid, Spain, 2016.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, включающего обзор литературы, трех глав, заключения и списка литературы, содержащего 135 наименований. Диссертация содержит 82 рисунка. Общий объем диссертации составляет 170 страниц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **введении** представлен обзор литературы по теме диссертации и дана общая характеристика работы.

В **первой главе** представлены результаты численного исследования возникновения и нелинейных режимов термоконвекционной конвекции бинарных смесей с отрицательными отношениями разделения в плоском горизонтальном слое, квадратной и вытянутой по горизонтали прямоугольной полостях при нагреве сверху. Границы считаются твердыми и непроницаемыми для вещества; в случаях квадратной и прямоугольной полостей боковые границы предполагаются теплоизолированными. Для описания поведения жидкостей используются уравнения свободной термоконвекционной конвекции в приближении Буссинеска:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} &= -\nabla p + \nabla^2 \bar{u} + \text{RaPr}^{-1} (T + \psi C) \bar{\gamma}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) T &= \text{Pr}^{-1} \nabla^2 T, \\ \frac{\partial C}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) C &= \text{Sc}^{-1} (\nabla^2 C - \nabla^2 T), \quad \nabla \cdot \bar{u} = 0.\end{aligned}$$

Уравнения записаны в безразмерной форме. Они содержат следующие безразмерные параметры: отношение разделения смеси  $\psi = -C_0(1 - C_0)S_T\beta_C / \beta_T$ , число Прандтля  $\text{Pr} = \nu / \chi$ , число Релея  $\text{Ra} = g\beta_T\Delta TL^3 / (\nu\chi)$ , число Шмидта  $\text{Sc} = \nu / D$ . Здесь  $C_0$  – некоторое значение концентрации, принимаемое за начало отсчета,  $S_T$  – коэффициент Соре,  $\beta_T$  – коэффициент теплового расширения,  $\beta_C$  – коэффициент концентрационной зависимости плотности,  $\nu$  – вязкость смеси,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\chi$  – коэффициент температуропроводности,  $L$  – характерный размер полости,  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии,  $\bar{\gamma}$  – орт вертикальной оси.

При нагреве сверху благодаря эффекту термодиффузии тяжелая компонента бинарной смеси с отрицательным отношением разделения диффундирует к нагретой верхней границе, а легкая компонента – к холодной нижней границе. Величина разности концентраций  $\Delta C$  между верхней и нижней границами, характеризующая разделение смеси, растет со временем. В отсутствие тяжести монотонный рост  $\Delta C$  завершается выходом на постоянное значение. В земных условиях механическое равновесие смеси в некоторый момент времени теряет устойчивость, возникает конвективное движение, что сопровождается резким понижением величины  $\Delta C$ .

В диссертационной работе рассматриваются жидкие смеси. В таких смесях тепловые процессы происходят значительно быстрее диффузионных, поэтому можно считать, что вертикальный градиент температуры устанавливается мгновенно. В результате, возникает задача об устойчивости нестационарного состояния механического равновесия, в котором движение жидкости отсутствует, градиент температуры является вертикаль-



ным и постоянным, а концентрация зависит от вертикальной координаты и времени.

В разделах 1.1 и 1.2 исследована устойчивость механического равновесия бинарных жидких смесей с отрицательными отношениями разделения в нагреваемых сверху плоском горизонтальном слое (раздел 1.1) и квадратной полости (раздел 1.2). Устойчивость исследовалась путем численного решения линеаризованных задач об эволюции малых возмущений нестационарного основного состояния описанного выше вида. Время наступления неустойчивости  $t^*$  определялось с помощью критерия<sup>1</sup>, согласно которому при  $t = t^*$  скорость нарастания возмущений становится равной скорости изменения основного состояния. Расчеты показали, что время наступления неустойчивости уменьшается, а волновое число наиболее опасных возмущений растет с повышением уровня тяжести. Результаты, представленные в виде степенных законов, хорошо согласуются с имеющимися в литературе экспериментальными данными.

Разделы 1.3 и 1.4 посвящены прямому численному моделированию нелинейных режимов термоконцентрационной конвекции бинарных смесей в квадратной (раздел 1.3) и вытянутой по горизонтали прямоугольной (раздел 1.4) полостях при заданном вертикальном градиенте температуры и однородном распределении концентрации в начальный момент времени. Время наступления неустойчивости  $t^*$  в нелинейных расчетах определялось по достижению максимального значения величины  $\Delta C$ . Расчеты показали, что возникающее при  $t = t^*$  течение имеет многовихревую структуру и сосредоточено вблизи горизонтальных границ полости, распределение концентрации примеси приобретает пальцеобразную форму (Рис.1). При понижении уровня тяжести число вихрей и расстояние между пальцами уменьшаются. Сопоставление зависимостей времени наступления неустойчивости и пространственного периода возникающих структур от концентрационного числа Релея с результатами, полученными при решении линейных задач о временной эволю-

---

<sup>1</sup> Kim M.C., Choi C.K., Yeo J.-K. The onset of Soret-driven convection in a binary mixture heated from above // Phys. Fluids. 2007. Vol. 19. № 8. P. 084103.

ции малых возмущений, показало хорошее согласие.

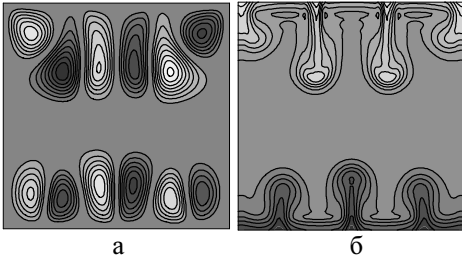


Рис. 1. Изолинии функции тока (а) и концентрации воды (б) для смеси вода-изопропанол в условиях земной тяжести. Светлые (темные) области соответствуют большему (меньшему) значению функции тока и концентрации

**Вторая глава** посвящена численному исследованию возникновения и нелинейных режимов конвекции трехкомпонентных смесей в квадратной полости с твердыми, непроницаемыми для вещества границами. На горизонтальных границах поддерживаются постоянные разные температуры, вертикальные границы теплоизолированы. Уравнения свободной термоконвекционной конвекции для смеси из  $n$  компонент записываются в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} &= -\nabla p + \nabla^2 \bar{u} + \text{Ra Pr}^{-1} (T + \mathbf{I} \cdot \mathbf{C}) \bar{\gamma}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) T &= \text{Pr}^{-1} \nabla^2 T, \\ \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \mathbf{C} &= \mathbf{SC} (\nabla^2 \mathbf{C} - \boldsymbol{\psi} \nabla^2 T), \quad \nabla \cdot \bar{u} = 0. \end{aligned}$$

Здесь  $\mathbf{C} = (C_1, \dots, C_{n-1})^T$  – транспонированный вектор концентраций,  $\mathbf{I} = (1, \dots, 1)$  – единичный вектор,  $\mathbf{SC} = \nu^{-1} \mathbf{BDB}^{-1}$  – матрица безразмерных параметров,  $\{\mathbf{SC}\}_{ij} = (\beta_{C_i} / \beta_{C_j}) \text{Sc}_{ij}^{-1}$ ,  $\text{Sc}_{ii} = \nu / D_{ii}$  – числа Шмидта,  $\boldsymbol{\psi} = -\beta_T^{-1} \mathbf{BD}^{-1} \mathbf{D}_T$  – вектор относительный разделения,  $\mathbf{D}$  – матрица коэффициентов молекулярной диффузии,  $\mathbf{D}_T = C_0 (1 - C_0) \mathbf{D}_T^*$  – вектор коэффициентов термодиффузии (величину  $\mathbf{D}_T^*$  также называют коэффициентом термодиффузии),  $\mathbf{B} = \text{diag}\{\beta_{C_1}, \dots, \beta_{C_{n-1}}\}$  – диагональная матрица коэффициентов концентрационной зависимости плотности. От-

метим, что в главах 2 и 3 для удобства сопоставления с имеющимися в литературе данными для концентрации выбраны единицы измерения, отличающиеся от используемых в главе 1. Для всех рассматриваемых в главах 2 и 3 задач конвекции трехкомпонентных смесей предполагается, что применена процедура диагонализации матрицы  $\mathbf{D}$ , позволяющая исключить коэффициенты перекрестной диффузии.

В разделе 2.1 решена задача линейной устойчивости механического равновесия трехкомпонентных смесей в квадратной полости при заданных вертикальных градиентах температуры и концентраций компонент. Определены границы монотонной и колебательной неустойчивостей при нагреве снизу (Рис.2, кривые 1 и 2) и граница монотонной неустойчивости при нагреве сверху (Рис.2, кривая 3).

В разделе 2.2 исследованы нелинейные режимы конвекции трехкомпонентных смесей в квадратной полости при заданных вертикальных градиентах температуры и концентраций компонент. Расчеты проведены для смесей с разными значениями отношений разделения компонент, а также для реальной смеси додекан-изобутилбензол-тетралин с компонентами, взятыми в равных долях. В последнем случае отношения разделения обеих компонент смеси положительны, так что при нагреве сверху смесь устойчива, а при подогреве снизу возникает монотонная неустойчивость.

В разделе 2.3 исследованы нелинейные режимы конвекции трехкомпонентных смесей в квадратной полости при заданном вертикальном градиенте температуры, соответствующем нагреву сверху, и однородных распределениях концентраций компонент в начальный момент времени, при разных уровнях тяжести. Расчеты проведены для трехкомпонентных смесей с компонентами, обладающими в одном случае отрицательными отношениями разделения, а в другом случае – отношениями разделения разных знаков. Показано, что возникающее при наступлении неустойчивости течение имеет многовихревую структуру, оно сосредоточено вблизи горизонтальных границ полости, распределения концентраций компонент с отрицательными отношениями разделения приобретают пальцеобразную форму, изолинии компонент с положительными отношениями разделе-

ния деформируются слабо. Найдены зависимости времени наступления неустойчивости от уровня тяжести. Сопоставление со случаем бинарной смеси показало, что добавление компоненты с положительным отношением разделения оказывает стабилизирующее действие, а компоненты с отрицательным отношением разделения – дестабилизирующее действие.

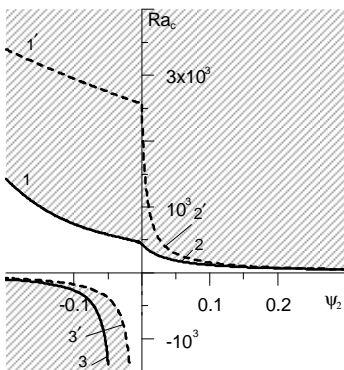


Рис. 2

Рис. 2. Зависимости критического числа Рейля от отношения разделения: сплошные линии – трехкомпонентная смесь с  $Pr = 10$ ,  $Sc_1 = 100$ ,  $Sc_2 = 1000$  и  $\psi_1 = 0.3$ , штриховые линии – бинарная смесь при  $Pr = 10$ ,  $Sc_2 = 1000$ ; кривые 1 и 1' – границы колебательной неустойчивости; 2, 2' и 3, 3' – границы монотонной неустойчивости; заштрихованы области неустойчивости

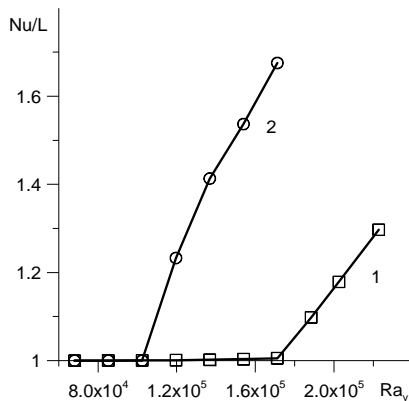


Рис. 3

Рис. 3. Безразмерный тепловой поток на единицу длины через нижнюю стенку полости в зависимости от величины вибрационного числа Рейля для трехкомпонентной смеси. 1 – квадратная полость, 2 – прямоугольная полость

В третьей главе исследовано влияние горизонтальных вибраций конечной амплитуды и частоты на возникновение и нелинейные режимы термоконцентрационной конвекции многокомпонентных смесей в квадратной и вытянутой по горизонтали прямоугольной полостях с твердыми, непроницаемыми для вещества границами. На горизонтальных границах поддерживаются постоянные разные температуры, вертикальные границы

теплоизолированы.

В разделе 3.1 приведена постановка задачи. Уравнения термоконцентрационной конвекции многокомпонентной смеси в приближении Буссинеска, записанные в системе отчета колеблющейся полости, имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \nabla \vec{u} &= -\nabla p + \nabla^2 \vec{u} + \frac{\text{Ra}}{\text{Pr}} (T + \mathbf{I} \cdot \mathbf{C}) \vec{\gamma} + \frac{\text{Ra}_v}{\text{Pr}} \cos(\Omega t) (T + \mathbf{I} \cdot \mathbf{C}) \vec{j}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \nabla T &= \frac{1}{\text{Pr}} \nabla^2 T, \\ \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial t} + \vec{u} \nabla \mathbf{C} &= \text{SC}(\nabla^2 \mathbf{C} - \psi \nabla^2 T), \quad \nabla \cdot \vec{u} = 0. \end{aligned}$$

Здесь  $\text{Ra}_v = a\omega^2 \beta_r \Delta T L^3 / (v\chi)$  – вибрационное число Релея,  $\Omega = \omega H^2 / \nu$  – безразмерная частота вибраций,  $\vec{j}$  – единичный вектор в направлении вибраций.

Раздел 3.2 посвящен исследованию вибрационной конвекции бинарных смесей с отрицательными отношениями разделения в квадратной полости и прямоугольной полости с отношением сторон 5:1 в отсутствие тяжести. В начальный момент времени верхняя граница мгновенно нагревается, распределение концентрации однородно. Расчеты для прямоугольной полости показали, что при вибрациях малой интенсивности наблюдается слабое среднее течение, состоящее из двух пар вихрей, расположенных вблизи боковых границ; в центральной части полости среднее течение практически отсутствует (средние поля и характеристики получались путем осреднения мгновенных величин по периоду вибраций). С увеличением вибрационного числа Релея, при значении  $\text{Ra}_v$ , примерно равном  $10^5$ , в центральной части полости возникают конвективные ячейки с  $k \approx 3.1$ .

Расчеты<sup>2</sup>, проведенные с помощью осредненного подхода, для плоского горизонтального слоя бинарной смеси с отношением разделения, равным  $-0.427$ , при продольных высокочастотных вибрациях в условиях невесомости, показали, что при  $\text{Ra}_{\text{va}} = (\beta_r a \omega \Delta T L)^2 / (2v\chi) \approx 2306$  квазиравновесное состояние,

---

<sup>2</sup> Lyubimova T.P. High-frequency vibration effect on the stability of a horizontal layer of ternary fluid // Eur. Phys. J. E. 2015. V. 38. P. 43.

в котором среднее течение отсутствует, теряет устойчивость по отношению к возмущениям с волновым числом  $k = 3.2$  ( $Ra_{va}$  – вибрационное число Релея, используемое в качестве безразмерного параметра, характеризующего интенсивность вибраций в осредненном подходе). Для рассматриваемых значений числа Прандтля и безразмерной частоты вибраций ( $Pr = 10.85$ ,  $\Omega = 445$ ) значение  $Ra_{va} = 2306$  соответствует  $Ra_v$ , примерно равному  $10^5$ . Это позволяет сделать вывод, что изменение структуры среднего течения связано с неустойчивостью квазиравновесия жидкости в центральной части полости.

В случае квадратной полости при вибрациях малой интенсивности также наблюдается слабое четырехвихревое среднее течение. Этот режим аналогичен среднему течению в виде двух пар вихрей вблизи боковых границ в прямоугольной полости, но теперь из-за близости боковых стенок вихри прижаты друг к другу. С увеличением интенсивности вибраций происходит переход к среднему течению в виде одного диагонального вихря и двух малых вихрей в углах полости. Изменение структуры среднего течения в квадратной полости, как и в случае прямоугольной полости, сопровождается изменением угла наклона кривой, определяющей зависимость безразмерного теплового потока от значения вибрационного числа Релея (Рис.3).

В разделе 3.3 исследована вибрационная конвекция трехкомпонентных смесей в квадратной и вытянутой в горизонтальном направлении прямоугольной полостях при заданных вертикальных градиентах температуры и концентрации в условиях невесомости. Найдено, что, как и в случае бинарной смеси, при достижении некоторой интенсивности вибраций происходит перестройка структуры среднего течения, связанная с неустойчивостью квазиравновесного состояния в центральной части полости и сопровождаемая изменением угла наклона кривой, определяющей зависимость безразмерного теплового потока от значения вибрационного числа Релея.

В разделе 3.4 исследовано влияние вибраций на нелинейные режимы конвекции бинарных смесей с отрицательными отношениями разделения в прямоугольных полостях при мгновенном нагреве верхней границы и однородном распределении

концентрации в начальный момент времени при различных уровнях тяжести. Найдено, что, как и в отсутствие вибраций, в некоторый момент времени наблюдается резкое уменьшение разности концентраций  $\Delta C$  между центрами верхней и нижней границ, связанное с гравитационной неустойчивостью. Расчеты показали, что вибрации ускоряют возникновение гравитационной конвекции в земных условиях и замедляют его в условиях микрогравитации.

В **заключении** представлены основные результаты и выводы диссертации.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Исследована временная эволюция малых возмущений механического равновесия бинарных смесей в нагреваемых сверху плоском горизонтальном слое и квадратной полости при заданном вертикальном градиенте температуры и однородном распределении концентрации в начальный момент времени. Найдено, что время наступления неустойчивости уменьшается, а волновое число наиболее опасных возмущений растет с увеличением уровня тяжести по степенным законам. Полученные результаты хорошо согласуются с имеющимися в литературе экспериментальными данными.

2. Исследованы нелинейные режимы конвекции бинарных и трехкомпонентных смесей в прямоугольных полостях при заданном вертикальном градиенте температуры (нагрев сверху) и однородном распределении концентрации в начальный момент времени при различных уровнях тяжести. Найдено, что в некоторый момент времени возникает конвективное течение, имеющее многовихревую структуру и сосредоточенное вблизи горизонтальных границ полости, а распределение концентрации примеси приобретает пальцеобразную форму, прослежена эволюция течения и теплопереноса с увеличением числа Релея. Показано, что добавление компоненты с положительным отношением разделения оказывает стабилизирующее действие, а компоненты с отрицательным отношением разделения – дестабилизирующее действие.

3. Исследована устойчивость механического равновесия трехкомпонентных смесей с различными значениями отношений разделения компонент в квадратной полости при

заданных вертикальных градиентах температуры и концентрации. Найдены границы монотонной и колебательной неустойчивостей при нагреве снизу и граница монотонной неустойчивости при нагреве сверху.

4. Исследовано влияние горизонтальных вибраций на возникновение и нелинейные режимы конвекции бинарных и трехкомпонентных смесей в прямоугольных полостях. Показано, что в отсутствие тяжести при достижении некоторой интенсивности вибраций происходит перестройка структуры течения, связанная с неустойчивостью квазиравновесия жидкости в центральной части полости и сопровождающаяся изменением угла наклона кривой, определяющей зависимость безразмерного теплового потока от вибрационного числа Релея. Найдено, что вибрации ускоряют возникновение гравитационной конвекции при нагреве сверху в земных условиях и замедляют его в условиях микрогравитации.

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. Зубова Н.А., Любимова Т.П. Конвекция тройной смеси в замкнутой полости // Всерос. конф. молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах»: тез. докл., Пермь, 2012. С. 27.
2. Lyubimova T., Shevtsova V., Zubova N., Melnikov D. Vibration influence on instability of binary fluid with negative Soret effect in square cavity heated from above // IMT-10. Abstr. Brussels, Belgium, 2012. P. 46.
3. Lyubimova T.P., Zubova N.A. Soret-driven convection of ternary mixtures in a rectangular cavity // 39th COSPAR Scientific Assembly. Abstr. Mysore, India, 2012. P. 124.
4. Зубова Н.А., Любимова Т.П. Конвекция тройной смеси в замкнутой полости // Вестник Пермского университета. Сер. Физика, № 4 (22), 2012. С. 56-60.
5. Зубова Н.А., Любимова Т.П. Конвекция тройной смеси с отрицательным эффектом соре в квадратной полости, нагреваемой сверху // XVIII Зимняя Школа по механике сплошных сред: тез. докл. Пермь, 2013. С. 144.
6. Lyubimova T.P., Zubova N.A. Soret-induced instability of a binary mixture in square cavity heated from above // 29th American



Society for Gravitational and Space Research and 5th International Symposium for Physical Sciences in Space. Abstr. Orlando, Florida, USA, 2013. P. 58.

7. Lyubimova T.P., Zubova N.A. The influence of static gravity level on a Soret-driven convection of ternary mixture in square cavity heated from above // ELGRA-2013. Abstr. Vatican City, Rome, 2013. P. 109.

8. Lyubimova T.P., Zubova N.A. Onset and nonlinear regimes of the ternary mixture convection in a square cavity // IMT-11. Abstr. Bayonne, France, 2014. P. 78.

9. Lyubimova T.P., Zubova N.A. Onset of Soret-driven convection of binary fluid in square cavity heated from above at different gravity levels // 40th COSPAR Scientific Assembly. Abstr. Moscow, The Russian Federation, 2014. G0.1.14827.

**10. 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.**

**11. 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 Science and Technology. 2014. Vol. 26 (4). P. 241-247.**

12. Зубова Н.А., Любимова Т.П. Устойчивость механического равновесия тройной смеси в квадратной полости при вертикальном градиенте температуры // 2-ая межд. конф. Пермские гидродинамические научные чтения: сб. материалов конф., Пермь, 2014. С. 27-28.

13. Любимова Т.П., Зубова Н.А. Влияние вибраций на неустойчивость бинарной жидкости с отрицательным эффектом Соре в квадратной полости, подогреваемой сверху // 5-я межд. научная школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах»: сб. материалов школы. Москва, 2014. С. 188-189.

**14. 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. Vol. 38. P. 19.**

15. Зубова Н.А., Любимова Т.П. Влияние уровня статической тяжести на индуцированную эффектом Соре конвекцию

трехкомпонентной смеси в квадратной полости при нагреве сверху // XIX Зимняя школа по механике сплошных сред: тез. докл., Пермь, 2015. С. 127.

16. Зубова Н.А., Любимова Т.П. Вибрационная конвекция трехкомпонентных смесей в замкнутых полостях в условиях невесомости // 3-я всерос. конф. Гидродинамические научные чтения: сб. материалов конф., Пермь, 2015. С. 27-28.

17. Зубова Н.А., Любимова Т.П. Нелинейные режимы конвекции трехкомпонентных смесей в квадратной полости при установившемся вертикальном градиенте температуры // XXIV всерос. школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках»: сб. материалов конф., Пермь, 2015. С. 162-165.

18. Зубова Н.А., Любимова Т.П. Линейная устойчивость механического равновесия трехкомпонентных смесей в квадратной полости при вертикальном градиенте температуры // 6-ая межд. научная школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах»: сб. материалов школы, Калининград, 2015. С. 181-183.

19. Lyubimova T.P., Zubova N.A. Onset of convection in ternary mixture with negative Soret effect in square cavity heating from above at various gravity levels // Fluxes and structures in fluids. Proceedings of Int. conf. 2015. P. 141-143.

20. Lyubimova T.P., Zubova N.A. Vibrational convection of ternary mixtures in rectangular cavities in zero gravity conditions // International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond. Abstr. Moscow, 2015. P. 88.

**21. 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. Vol. 681. P. 012041.**

22. Lyubimova T., Zubova N. Onset and non-linear regimes of Soret-induced convection in binary mixtures heated from above // IMT-12. Abstr. Madrid, Spain, 2016. P. 104.