

## Отзыв

официального оппонента доктора физ.-мат. наук Мажоровой О.С.  
на диссертацию Зубовой Надежды Алексеевны на тему «Возникновение и нелинейные  
режимы конвекции многокомпонентных смесей в слоях и замкнутых полостях»  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
01.02.05 –Механика жидкости, газа и плазмы.

### Оценка актуальности темы диссертационной работы

Процессы конвективного тепломассопереноса в многокомпонентных системах находятся в настоящее время в центре внимания исследователей. В первую очередь это связано с той важной ролью, которую играют эти процессы в природных явлениях, технике и технологии. Отличительной особенностью конвекции в неизотермических многокомпонентных средах является взаимодействие между теплопроводностью и диффузией, осложненное перекрестными кинетическими эффектами - термодиффузией и диффузионной теплопроводностью. Это приводит к возникновению качественно новых, по сравнению с однокомпонентной средой, режимов конвекции. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что учет взаимодействия различных диссипативных механизмов и перекрестных эффектов является необходимым условием правильного описания процессов тепломассопереноса в многокомпонентных средах. Например, термодиффузия оказывает существенное влияние на распределение компонентов в месторождениях углеводородов, она используется для разделения изотопов, влияет на процессы в мантии Земли и т.д.

Описание и анализ тепломассопереноса в многокомпонентных средах предполагают знание коэффициентов переноса. Надежных данных здесь явно не достаточно и эксперименты по их получению интенсивно ведутся. Однако эти эксперименты в свою очередь требуют четкого представления об устойчивости состояния механического равновесия и конвективного движения жидкости. Общая теория конвективной устойчивости многокомпонентных сред в настоящее время разработана слабо. Таким образом, исследование условий возникновения конвекции, различных режимов движения и влияния на них внешних полей безусловно является актуальной проблемой, важной с теоретической и прикладной точек зрения. Диссертационная работа Н.А.Зубовой посвящена изучению указанных процессов.

### Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Во введении содержится подробный обзор литературы, обосновывается актуальность темы диссертационной работы, ее теоретическое и прикладное значение, формулируется цель исследований и основные полученные результаты. Приводится также краткое изложение содержания диссертации по главам.

Первая глава посвящена исследованию устойчивости механического равновесия бинарных смесей с отрицательными отношениями разделения и прямому численному моделированию нелинейных режимов термодиффузионной конвекции в подогреваемом сверху горизонтальном слое, квадратной и прямоугольной полостях. Устойчивость исследовалась путем численного решения линеаризованной задачи о развитии малых возмущений нестационарного основного состояния. Моделирование нелинейных режимов осуществлялось на основе уравнений термоконцентрационной конвекции в приближении Буссинеска.

Во второй главе вопросы устойчивости и нелинейные режимы конвекции изучаются для трехкомпонентных смесей. Здесь определяются границы монотонной и колебательной неустойчивости при различных условиях подогрева жидкости и различных значениях отношения разделения компонент; изучена структура течений, возникающих в результате потери устойчивости состояния механического равновесия; найдены зависимости времени наступления неустойчивости от величины силы тяжести.

В третьей главе исследуется влияние горизонтальных колебаний конечной амплитуды на развитие конвективного движения. Термовибрационная конвекция в бинарных смесях изучается для различных уровней тяжести. В начальный момент времени происходит мгновенный нагрев верхней границы при однородном распределении концентрации.

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертации.

#### Научная новизна и достоверность результатов

В процессе работы над диссертацией автором получены следующие новые результаты:

- на основе решения линеаризованных задач об эволюции малых возмущений состояния механического равновесия при заданном вертикальном градиенте температуры и однородном распределении концентрации получены степенные законы зависимости времени наступления конвекции и волнового числа наиболее опасных возмущений от величины силы тяжести;
- в тех же условиях изучены нелинейные режимы конвекции в бинарных и трехкомпонентных смесях; прослежена эволюция структуры течения и теплопереноса с увеличением числа Рэлея;

- для трехкомпонентных смесей с различными значениями отношения разделения компонент найдены границы монотонной и колебательной неустойчивости при нагреве снизу и сверху;
- численно исследована термовибрационная конвекция в бинарных и трехкомпонентных средах; выявлена зависимость структуры надкритических течений от вибрационного числа Рэлея в квадратной и вытянутой по горизонтали прямоугольной области.

Выводы и основные положения диссертации хорошо обоснованы. Они подтверждены тестированием используемых программных комплексов, сопоставлением результатов линейного и нелинейного анализа, сравнением, где это возможно, с результатами других авторов, опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях.

#### Практическая ценность исследований

Полученные в диссертационной работе сведения об устойчивости состояния механического равновесия и нелинейных режимах конвекции в бинарных и трехкомпонентных системах способствуют более глубокому пониманию особенностей процесса тепломассопереноса в многокомпонентных средах. Результаты проведенного исследования могут быть использованы при планировании и анализе экспериментов по определению коэффициентов переноса, для прогноза поведения многокомпонентных сред в природных и технологических процессах.

#### Замечания

Исследование термодиффузационной конвекции в многокомпонентных средах представляет собой сложную, нелинейную, многопараметрическую задачу. Прямой численный расчет соответствующей системы дифференциальных уравнений является эффективным методом ее изучения. Поэтому выбор автора в пользу численного решения методом конечных разностей нестационарных линеаризованных уравнений малых возмущений и полной нестационарных уравнений термодиффузационной конвекции является безусловно оправданным. Однако, в работе, где основным инструментом исследований является прямой расчет, вопросам обоснования надежности используемой вычислительной процедуры следовало бы уделить больше внимания. В диссертации, правда, приводится анализ влияния величины шага сетки по пространству на время наступления неустойчивости, но далеко не во всех расчетах используется оптимальный, с точки зрения проведенного анализа, пространственный шаг. Выбор шага по времени не обсуждается вовсе.

В качестве критерия возникновения конвекции в работе 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.

Перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключительная оценка

Работа выполнена на высоком научном уровне, содержит решение актуальных научных задач, имеющих важное теоретическое и практическое значение. Основные результаты работы хорошо обоснованы. Содержание исследований достаточно полно представлено в научных изданиях, докладывались на семинарах, на многих российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Тематика и содержание диссертационной работы соответствует специальности 01.02.05 –Механика жидкости, газа и плазмы. Работа Зубовой Надежды Алексеевны безусловно удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук по специальности 05.13.18

главный научный сотрудник

Федерального государственного учреждения

"Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша

Российской академии наук"

125047, Москва, Миусская пл., д.4, <http://www.keldysh.ru/>, +7 499 250 78 52,

magor@keldysh.ru

Мажорова Ольга Семеновна

26 сентября 2016

Подпись О.С.Мажоровой заверяю

Ученый секретарь ИПМ им.М.В.Келдыша

Кандидат физ.-мат. наук

Маслов А.И.

27 сентября 2016

