

На правах рукописи



Шефер Илья Александрович

**УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХСЛОЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ
В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ ПРИ ДИФФУЗИОННОМ
ИСПАРЕНИИ**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Бекежанова Виктория Бахытовна

Официальные оппоненты: **Дёмин Виталий Анатольевич**, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», заведующий кафедрой теоретической физики
Пухначёв Владислав Васильевич, член-корреспондент Российской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория прикладной и вычислительной гидродинамики, главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»

Защита состоится «31» мая 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.129.01, созданного на базе Федерального государственного учреждения науки Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН: <http://www.itp.nsc.ru>

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просьба направлять на имя учёного секретаря диссертационного совета 24.1.129.01 по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1 (email: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «___» апреля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН



Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Конвективные течения с испарением/конденсацией являются объектом всесторонних исследований на протяжении нескольких десятилетий. Интерес к изучению процессов тепломассопереноса в условиях фазовых переходов вызван бурным развитием биотехнологий и химической индустрии, стремительным прогрессом технологий жидкостного охлаждения и термостабилизации электронных устройств (таких как микротеплообменники в силовых установках, системы жизнеобеспечения космических станций, электродвигатели космических спутников нового поколения и т.п.), а также разработкой экспериментальных методов исследования многофазных систем. Детальный анализ влияния различных факторов на структуру течений с испарением необходим для дальнейшего улучшения и модификации существующих жидкостных технологий, в которых в качестве рабочих сред используются испаряющиеся жидкости и парогазовые смеси.

В настоящее время нет общей теории для описания динамики систем сред, находящихся в разных агрегатных состояниях. Большинство теоретических и численных исследований выполняются в рамках математических моделей, основанных на фундаментальных законах классической механики сплошных сред и термодинамики. В частности, используются уравнения Навье – Стокса или их аппроксимации (например приближение Обербека – Буссинеска), которые дополняются уравнениями и соотношениями, позволяющими учесть фазовые переходы и присутствие испаряемого компонента. С точки зрения математического моделирования основные трудности состоят в определении способа описания фазовых взаимодействий, формулировке граничных условий, учитывающих фазовый переход на границе раздела сред, и выборе замыкающих соотношений, обеспечивающих корректность постановок соответствующих задач испарительной конвекции. Эти условия и соотношения выводятся на основе некоторых гипотез относительно поверхности раздела и происходящих физических процессов, которые гарантируют выполнение законов сохранения.

Как правило, для изучения характеристик тепломассообмена в двухфазных системах широко применяется прямое численное моделирование, которое представляет мощный инструмент для изучения процессов переноса в жидких средах. Однако численные исследования зачастую весьма трудоёмки и требуют значительных временных затрат. Кроме того, возможности прогнозирования на основе данных, полученных в рамках вычислительного эксперимента, очень ограничены, поскольку каждый расчёт, как и эксперимент, проводится для фиксированного набора параметров. Другая методология математического моделирования явлений конвективного переноса в жидкостных системах с фазовыми превращениями основана на применении точных решений определяющих уравнений. Вопросам построения точных решений и их апробации для описания двухслойных течений со слабым испарением

посвящены работы Шлиомиса М. И., Якушина В. И., Гончаровой О. Н., Кузнецова В. В., Резановой Е. В. С помощью точных решений можно систематически исследовать влияние всех факторов (теплофизических свойств рабочих сред, геометрии системы, интенсивности действующих в системе сил, граничных режимов для основных характеристик и т. п.) на топологию течения, кинематические, тепловые и концентрационные характеристики конвективных режимов и параметры фазовых переходов. Результаты экспериментов позволяют верифицировать математическую модель, оценить физическое правдоподобие теоретических результатов, полученных на основе точных решений, и установить условия и границы применимости как самих моделей, так и точных решений.

Испарение вызывает охлаждение поверхностного слоя жидкости, что приводит к формированию потенциально неустойчивой стратификации среды и изменению поверхностного натяжения. Это влечёт проявление неустойчивостей различной природы. Основная часть исследований по устойчивости испаряющихся жидкостей выполнена в рамках приближения тонкого слоя, односторонних моделей или касается случаев, когда анализируются условия, при которых в изначально неподвижной жидкости, в том числе двухслойной, возникает конвекция (работы Орона А. (Oron A.), Колине П. (Colinet P.), Непомнящего А. А., Ажаева В., Шкляева О. с соавторами). В работах Кина Т. (Qin T.), Григорьева Р. и Ксу Г.-Ф. (Xu G.-F.) устойчивость двухфазных систем в замкнутых областях изучается на основе полных двусторонних двумерных моделей, при этом используются методы прямого численного моделирования. Анализ возможных механизмов неустойчивости и поиск условий, обеспечивающих устойчивость основного состояния, необходимы как при подготовке экспериментов, так и на предварительных стадиях разработки специального оборудования, в котором в качестве рабочей среды используются испаряющиеся жидкости. Точные решения позволяют не только проанализировать влияние различных факторов и типа граничных условий на параметры возникающих режимов, но и эффективно исследовать устойчивость жидкостных систем с помощью классических методов теории устойчивости. Изучение характеристик неустойчивости необходимо для более глубокого понимания роли отдельных механизмов тепломассопереноса, интерпретации результатов наблюдений, а также при прогнозировании исходов экспериментов по изучению неизотермических течений в условиях фазовых переходов.

Целью диссертационной работы является систематическое изучение характеристик тепломассобмена в системе жидкость – газ в условиях диффузионного испарения в миниканалах на основе точных решений. Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- провести анализ точных решений уравнений тепломассопереноса в рамках различных постановок краевых задач, сформулированных на основе двусторонней модели испарительной конвекции;

- исследовать линейную устойчивость точных решений, описывающих совместные течения испаряющейся жидкости и спутного парогазового потока, относительно малых нестационарных возмущений в пространстве параметров задачи;
- получить пороговые характеристики и карты режимов неустойчивости, изучить условия и особенности формирования разных типов неустойчивости.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- впервые построено точное решение уравнений термоконцентрационной конвекции, описывающее течения в двухслойной системе жидкость – газ с продольным градиентом температуры и позволяющее корректно учесть вклад неоднородного режима испарения на межфазной границе. На основе сравнения теоретических данных, полученных с помощью нового точного решения, и результатов экспериментов выполнен анализ различных постановок краевых задач испарительной конвекции, выделены содержательные постановки, обеспечивающие качественное согласование теоретических и экспериментальных данных;
- впервые на основе точных решений проведено систематическое изучение характеристик конвективных режимов в двухфазных системах жидкость – газ, возникающих в условиях диффузионного испарения, во всем пространстве параметров соответствующих задач; предложено расширение классификации Наполитано режимов двухслойных течений с термокапиллярной границей раздела;
- впервые с исчерпывающей полнотой проведено исследование линейной устойчивости стратифицированных двухфазных течений с однородным испарением в миниканалах, описываемых точным решением определяющих уравнений, относительно плоских и пространственных возмущений, определены критические характеристики устойчивости, проведена селекция мод, построены карты режимов неустойчивости. Установлен преимущественно колебательный характер режимов неустойчивости, определены частоты осцилляций наиболее опасных возмущений, возникающих в форме упорядоченных конвективных (ячеистых) или термокапиллярных (продольных) структур в жидкости;
- впервые показано стабилизирующее влияние деформируемости межфазной границы на характеристики устойчивости течений испаряющейся жидкости, увлекаемой спутным газовым потоком.

Теоретическая и практическая значимость. Диссертация носит теоретический характер. Теоретическая значимость состоит в получении систематических результатов, имеющих фундаментальное значение для понимания процессов тепломассообмена в двухфазных системах с диффузионным испарением на границе раздела жидкость – газ. Проведённые исследования

позволили установить и описать типичные режимы испарительной конвекции в двухслойной системе, наблюдаемые в экспериментах, в широких диапазонах изменения управляющих параметров, объяснить основные механизмы неустойчивости возникающих конвективных режимов, установить основные закономерности формирования пространственной неустойчивости. Результаты вносят вклад в теорию испарительной конвекции и конвективной устойчивости, могут служить теоретической основой для построения иерархии математических моделей и дальнейшего развития подходов к описанию фазовых переходов в жидкостных системах.

С практической точки зрения результаты могут быть использованы при прогнозировании исходов теплофизических экспериментов, связанных с изучением неизотермических течений жидкостей с испарением за счёт продува газа, а также при разработке экспериментальных методов исследования конвекции в условиях фазовых переходов для определения управляющих воздействий, обеспечивающих устойчивость исходных режимов течений. Полученные точные решения могут быть использованы для восстановления ряда эмпирических характеристик (параметров Сорэ и Дюфура, коэффициента концентрационного расширения плотности газа), отсутствующих в справочной литературе.

Методы исследования. При исследовании математических постановок задач испарительной конвекции и точных решений используются методы общей теории дифференциальных уравнений и уравнений математической физики. Устойчивость конвективных течений исследуется методом линеаризации. Для численного решения возникающих спектральных задач используется метод ортогонализации Абрамова – Годунова. Для проведения численных расчётов и визуализации результатов реализованы авторские коды в среде MATLAB.

Положения, выносимые на защиту.

1. Новое точное решение задачи испарительной конвекции, учитывающее неоднородный характер испарения на межфазной границе.
2. Результаты аналитического исследования конвективных режимов в двухслойной системе жидкость – газ в условиях диффузионного испарения, полученные на основе точных решений уравнений термоконцентрационной конвекции.
3. Результаты исследований линейной устойчивости совместных течений испаряющейся жидкости и спутного потока газа в миниканале относительно плоских и пространственных возмущений, в том числе в случае деформируемой межфазной границы; пороги возникновения и карты режимов неустойчивости в пространстве параметров задачи.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается использованием адекватной, физически обоснованной модели испарительной конвекции, строгих математических методов теории устойчивости, примене-

нием апробированных численных методов с контролем точности, сравнением результатов работы с известными теоретическими и экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих семинарах, совещаниях и конференциях: Международном симпозиуме «Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics – BIFD» (Paris, France, 2015); Международной конференции «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» (Новосибирск, 2015); X Международной конференции «Two-phase Systems for Ground and Space Applications» (Kyoto, Japan, 2015); XVI Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Красноярск, 2015); Международном симпозиуме и школе молодых учёных «Interfacial Phenomena and Heat Transfer» (Новосибирск, 2016); Всероссийской конференции «Нелинейные волны: теория и новые приложения» (Новосибирск, 2016); Российско-французском семинаре «Mathematical Hydrodynamics» (Новосибирск, 2016); Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых (Ялта, 2016); Всероссийской конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и механики» и Всероссийской молодежной школе-конференции (Абрау-Дюрсо, 2016); Всероссийской конференции с участием зарубежных учёных «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения» (Бийск, 2017; Красноярск, 2020); Международной молодежной научно-практической конференции с элементами научной школы «Прикладная математика и фундаментальная информатика» (Омск, 2019, 2020, 2021, 2022); Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019); Всероссийской конференции с международным участием «Пермские гидродинамические научные чтения» (Пермь, 2018, 2020, 2022); Мини-симпозиуме «Задачи механики деформируемых сред с поверхностями раздела» в рамках 27-ой Международной конференции по численным методам решения задач теории упругости и пластичности, посвящённой 100-летию со дня рождения Н. Н. Яненко (Красноярск, 2021); Конференции международных математических центров мирового уровня (Сочи, 2021); Объединённом семинаре ИВМ СО РАН и СФУ «Математическое моделирование в механике» (руководитель д.ф.-м.н. Андреев В. К., Красноярск); Семинаре ИГиЛ СО РАН «Прикладная гидродинамика» (руководители член-корреспондент РАН Пухначёв В. В., д.ф.-м.н. Ерманюк Е. В., Новосибирск); Семинаре ИГиЛ СО РАН «Математические модели механики сплошной среды», (руководители член-корреспондент РАН Плотников П. И., д.ф.-м.н. Старовойтов В. Н., Новосибирск); Семинаре ИМ СО РАН (руководитель д.ф.-м.н. Блохин А. М., Новосибирск); Семинаре «Физическая гидродинамика» ИТ СО РАН (руководитель академик РАН Алексеев С. В., Новосибирск); Семинаре по теоретической физике ПГНИУ (руководитель д.ф.-м.н. Дёмин В. А., Пермь); Семинаре лаборатории интенсифика-

ции процессов теплообмена ИТ СО РАН (руководитель член-корреспондент РАН Кабов О. А., Новосибирск).

Исследования по теме диссертации выполнялись автором в рамках:

- научных проектов, поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований в 2014-2020 гг.: № 14-01-00067 «Конвективные движения с поверхностями раздела и их устойчивость», № 14-08-00163 «Теоретическое и экспериментальное исследование процессов тепломассопереноса в двухслойных конвективных течениях с испарением», № 17-01-00229 «Сопряжённые конвективные движения в плоских и цилиндрических областях с неклассическим энергетическим условием на границе раздела», № 17-08-00291 «Неклассические задачи термокапиллярной конвекции в двухслойных системах», № 18-41-242005 «Теоретическое и экспериментальное исследование процессов тепломассообмена в двухфазных системах термического контроля» (совместно с Правительством Красноярского края);
- научного проекта 22-11-00243 «Построение иерархии моделей испарительной конвекции на основе точных решений», поддержанного Российским научным фондом.

Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2022-876).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 8 статей в печатных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК [1–8].

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в постановках исследуемых задач, реализации аналитических и численных методов решения, получении, интерпретации и апробации результатов. В работах [1, 2, 6] автору принадлежат результаты расчётов спектральной задачи, анализ режимов течений и типов неустойчивости; в [3] соискателем выполнен анализ влияния термодиффузионного эффекта на параметры возникающих конвективных режимов; для визуализации результатов в [2–4] использован авторский код; в [8] диссертантом получены условия применимости точного решения для описания режимов с неоднородными испарением.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трёх приложений. Общий объём работы — 146 страниц, 45 рисунков и 17 таблиц. Список литературы содержит 150 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, даётся обзор современного состояния изучаемых проблем и дана общая характеристика работы.

Первая глава содержит постановку задачи испарительной конвекции о совместном движении испаряющейся жидкости и парогазовой смеси в бесконечном горизонтальном канале с твёрдыми внешними границами (рисунок 1).

В разделе 1.1 формулируются предположения, которые лежат в основе используемой математической модели, построенной в рамках двухстороннего подхода, когда межфазная граница Γ считается термокапиллярной поверхностью раздела, допускающей массоперенос за счёт испарения диффузионного типа. В качестве определяющих уравнений используются уравнения Обербека–Буссинеска, дополненные уравнением диффузии, описывающим перенос пара в несущем газе, и слагаемыми, отвечающими эффектам термодиффузии и диффузионной теплопроводности, проявляющимся в газовом слое в присутствии испаряемого компонента:

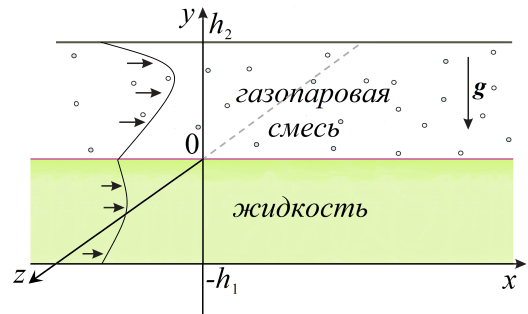


Рисунок 1 – Схема течения

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}_j}{\partial t} + (\mathbf{v}_j \cdot \nabla) \mathbf{v}_j &= -\frac{1}{\rho_j} \nabla p_j + \nu_j \Delta \mathbf{v}_j - \mathbf{g}(\beta_j T_j + \delta_j^2 \gamma C), \quad \text{div } \mathbf{v}_j = 0, \\ \frac{\partial T_j}{\partial t} + \mathbf{v}_j \cdot \nabla T_j &= \chi_j (\Delta T_j + \delta_j^2 \alpha_C \Delta C), \quad \frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{v}_2 \cdot \nabla C = D(\Delta C + \alpha_T \Delta T_2). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь и всюду ниже индексы $j = 1$ и $j = 2$ используются для обозначения характеристик жидкого и газопарового слоя соответственно, $\mathbf{v} = (u, v, w)$ — вектор скорости, p — модифицированное давление (задаёт отклонение истинного давления жидкости $\tilde{p}$ от гидростатического, $p = \tilde{p} - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$, $\mathbf{x} = (x, y, z)$), $\mathbf{g}$ — вектор силы тяжести, T — температура, C — концентрация пара в газе, ρ — средняя плотность, ν , χ , D , β , γ — коэффициенты кинематической вязкости, температуропроводности, диффузии пара, объёмного и концентрационного расширения соответственно, α_C , α_T — параметры Дюфура и Соре, δ_j^2 — символ Кронекера.

Система уравнений (1) допускает точное стационарное решение^{1,2}

$$\begin{aligned} u_j &= u_j(y), \quad v_j = 0, \quad w_j = 0, \quad p_j = p_j(x, y), \\ T_j &= (A + a_2^j y)x + \vartheta_j(y), \quad C = (b_1 + b_2 y)x + \phi(y), \end{aligned} \quad (2)$$

которое используется для описания установившихся течений испаряющейся жидкости, увлекаемой спутным газовым потоком. Параметры решения A , a_2^j , b_1 , b_2 и аддитивные компоненты $\vartheta_j(y)$, $\phi(y)$ искомых функций температуры и концентрации определяются в процессе решения соответствующей

¹Шлиомис М. И., Якушин В. И. Конвекция в двухслойной бинарной системе с испарением // Сб. трудов : Ученые записки Пермского госун-та, серия Гидродинамика. – 1972. – № 4. – С. 129-140.

²Гончарова О. Н., Резанова Е. В. Пример точного решения стационарной задачи о двухслойных течениях при наличии испарения на границе раздела // ПМТФ. – 2014. – № 2. – С. 68-79.

краевой задачи; A и b_1 трактуются как продольные градиенты температуры и концентрации на межфазной поверхности.

Формулируются возможные варианты граничных условий на внешних границах области течения, сохраняющие корректность постановки рассматриваемой краевой задачи. Для функций температуры T_j и паросодержания C структура точного решения (2) позволяет задавать условия первого и второго рода. Соотношения, задающие линейное относительно продольной координаты распределение температуры

$$T_1(x, -h_1) = A_1x + \vartheta^-, \quad T_2(x, h_2) = A_2x + \vartheta^+, \quad (3)$$

моделируют внешнюю тепловую нагрузку, характер которой определяется значениями соответствующих коэффициентов. В общем случае, при $A_1 \neq A_2$ и $\vartheta^- \neq \vartheta^+$, тепловое поле характеризуется результирующим градиентом A_ϑ , который является наклонным и может быть неоднородным. Допускается замена условий Дирихле (3) на обеих стенках канала или на одной из них условиями Неймана, при этом могут быть заданы как нулевой, так и ненулевой потоки тепла. Следует учесть, что полное выражение для потока тепла на верхней стенке должно учитывать вклад эффекта Дюфура:

$$(T_{2y} + \alpha_c C_y)|_{y=h_2} = 0. \quad (4)$$

Обсуждается необходимость учёта в условиях на границах, контактирующих с парогазовым слоем, слагаемых, учитывающих вклад термодиффузионных эффектов.

Граничные условия на Γ являются следствиями законов сохранения и принципов термодинамики. В силу предположения о диффузионном характере испарения, вызванного прокачкой газа, связанные с ним эффекты учитываются только в условии теплового баланса на границе раздела: $\kappa_1 T_{1y} - \kappa_2 T_{2y} - \alpha_c \kappa_2 C_y = -LM$; при этом конвективный перенос массы через Γ не рассматривается. Здесь L — скрытая теплота парообразования, $M = -D\rho_2 (C_y + \alpha_T T_{2y})$ характеризует массовую скорость испарения (количество жидкости, испаряющейся с единицы площади межфазной поверхности за единицу времени). Параметр M является дополнительной количественной характеристикой, которая может использоваться для сравнения теоретических и экспериментальных результатов. Впервые отмечено, что решение позволяет описывать режимы не только с постоянным ($M = M_0 = \text{const}$), но и с неоднородным испарением, когда скорость испарения изменяется вдоль канала по линейному закону $M = M(x) = M_0 + M_x x$. В качестве замыкающего соотношения задаётся расход газа R_g в верхнем слое.

Даётся физическая интерпретация решения (2): оно трактуется как решение, описывающее конвекцию на рабочем участке протяжённого канала.

Длина рабочего участка L_h определяется на основе анализа значений функций температуры и паросодержания.

В разделе 1.2 ставится задача об устойчивости изучаемого точного решения. Указывается способ обезразмеривания физических величин и параметров, описываются возникающие критерии подобия. Приводится результат линеаризации определяющих уравнений (1) и граничных условий вблизи стационарного решения (2) в виде системы уравнений для малых пространственных возмущений скорости $\mathbf{U}_j = (U_j, V_j, W_j)$, давления P_j , температуры Θ_j и концентрации S для двух случаев: в первом поверхность раздела сохраняется плоской, в другом – межфазная граница может деформироваться под действием возникающих возмущений. Решение задачи об устойчивости ищется в виде нормальных волн — функций, пропорциональных $\exp[i(\alpha_x \xi + \alpha_z \zeta - \lambda \tau)]$, где α_x, α_z — волновые числа вдоль осей x и y соответственно, $\lambda = \lambda_r + i\lambda_i$ — комплексный декремент, ξ, ζ, τ — безразмерные пространственные переменные и время. Для трёхмерной задачи об устойчивости не удаётся построить аналог преобразования Сквайра, сводящего её к эквивалентной плоской постановке, поэтому в диссертации отдельно рассматриваются случаи плоских и пространственных возмущений.

Во **второй главе** на примере системы сред «HFE7100 – азот» анализируются основные характеристики двухслойных течений с испарением, полученные с помощью точного решения (2) в рамках постановок, в которых в качестве граничного соотношения для функции концентрации пара на верхней стенке используется условие второго рода: $(C_y + \alpha_T T_{2y})|_{y=h_2} = 0$.

В разделах 2.1 и 2.2 рассмотрено влияние интенсивности гравитационного воздействия и геометрии системы на величину массовой скорости испарения, приведены основные типы течений и описаны механизмы, определяющие топологическую и тепловую картину конвективных режимов, возникающих при однородном (с постоянной скоростью M) испарении. Показано, что решение (2) позволяет описать формирование чисто термокапиллярных, смешанных и пуазейлевских типов течений, структура которых определяется балансом действующих в системе сил.

Чисто термокапиллярные течения отличает возвратное движение во всём объёме жидкой фазы, обусловленное преобладающим действием сил Марангони, и присутствие горячего термоклина на межфазной поверхности (рисунки 2(а–в)). Для смешанных характерно формирование зон противотока как в жидком, так и в газовом слое, вызванное конкуренцией термокапиллярных сил и касательных напряжений, индуцируемых трением газа о межфазную поверхность. Отличительной особенностью этого класса течений является поле температуры с холодным термоклином внутри жидкой фазы, так что в жидком слое сосуществуют области с неустойчивой и устойчивой температурной стратификацией (рисунки 2(г–е)). При пуазейлевском режиме профили скорости в обеих средах близки к параболическим, а вблизи меж-

фазной поверхности образуется холодный слой (рисунки 2(ж – и)). Основными механизмами, определяющими гидродинамическую и тепловую структуру таких течений, являются прокачка газа, за счёт которой в системе происходит более интенсивное испарение, и гравитационное воздействие, подавляющее силы Марангони. Решение (2) предсказывает, что уменьшение величины гравитационного ускорения g , толщины жидкого слоя h_1 и увеличение толщины газопарового слоя h_2 приводит к доминированию эффекта Марангони над напряжениями сдвига.

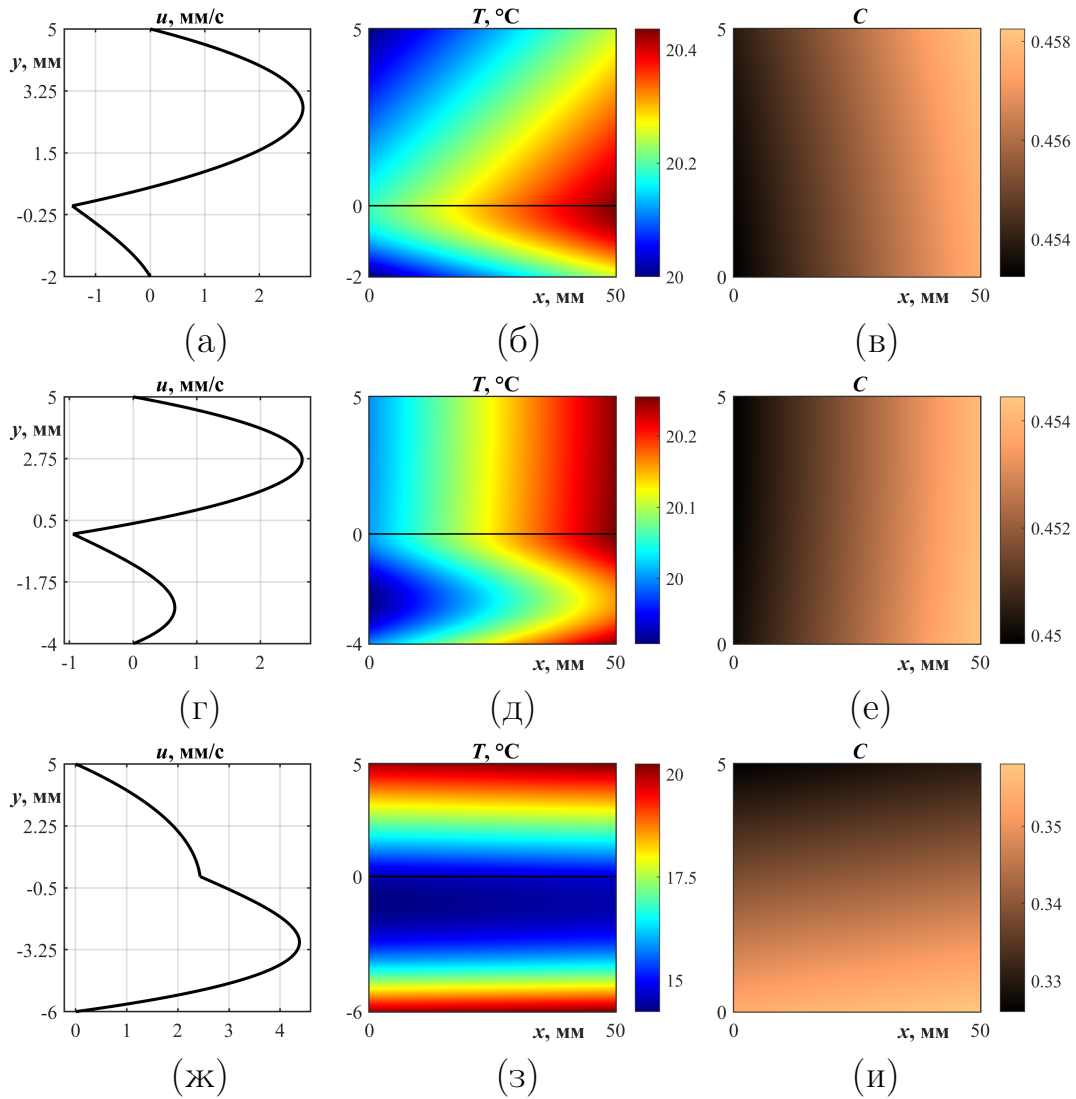


Рисунок 2 – Распределения продольной скорости (а, г, ж), температуры (б, д, з) и концентрации пара (в, е, и) в системе с $h_2 = 5$ мм при $g = 9.81$ м/с², $R_g = 9.6 \cdot 10^{-6}$ кг/(м·с), $A_1 = A_2 = 5$ К/м: (а–в) — $h_1 = 2$ мм, чисто термокапиллярный режим; (г–е) — $h_1 = 4$ мм, смешанный режим; (ж–и) — $h_1 = 6$ мм, пузырялевский режим

В разделе 2.3 обсуждается вопрос целесообразности учёта термодиффузионных эффектов в используемой постановке задачи. Отмечено, что при малых значениях A и малых толщинах жидкого слоя h_1 учёт эффекта Соре приводит к незначительным изменениям паросодержания в газовом слое.

С ростом h_1 и A изменения концентрации пара за счёт термодиффузии могут превышать 5 %. Показано, что в условиях разной тепловой нагрузки (при $A_1 \neq A_2$, в этом случае величина поверхностного градиента A вычисляется через значения A_j и другие параметры задачи), приложенной на стенках канала, в некотором диапазоне значений продольных градиентов температур эффект Соре может приводить к сдвигу точки росы. Сделан вывод, что при моделировании конвективных течений с испарением в системе сред «НФЕ-7100 – азот» вклад эффекта Соре следует учитывать для более точного описания параметров возникающих режимов.

Параграф 2.4 содержит результаты анализа особенностей течений с различной заданной тепловой нагрузкой на твёрдых стенках, включая случай комбинированных температурных граничных режимов. В п. 2.4.1 получены следующие оценки качественного влияния величины теплового градиента A на основные характеристики течения: $u_j \sim A$; $T_j, C \sim A^2$. Отмечено, что изменение величины A (в случае как равных, так и различных продольных градиентов A_j) приводит к последовательному переходу от чисто термокапиллярных режимов к смешанным и затем к пуазейлевским (или наоборот, в зависимости от знака A). В п. 2.4.2 рассмотрен случай, когда в системе с помощью граничных условий задаётся дополнительный поперечный перепад температур, характеризующийся величиной $\vartheta_* = \vartheta^- - \vartheta^+$, где ϑ^- и ϑ^+ – заданные значения температуры на нижней и верхней стенке соответственно (см. условия (3)). Показано, что управляя значением ϑ_* даже в достаточно узком диапазоне значений (порядка 1-3 градусов), можно добиться существенной перестройки поля температуры, обеспечивая формирование режимов с потенциально устойчивой ($\vartheta_* < 0$) или неустойчивой ($\vartheta_* > 0$) температурной стратификацией. При этом, в силу вида точного решения, наличие ненулевого поперечного перепада температур не приводит к перестройке поля скорости. Раздел 2.4.3 посвящён анализу характеристик конвективных течений в канале, на верхней стенке которого задан граничный тепловой режим (4). Установлено, что в этом случае в газовом слое, контактирующем с теплоизолированной стенкой, формируется практически однородное в вертикальном направлении тепловое поле (с поперечным градиентом $\partial T_2 / \partial y$, близким к нулю), но топологически новых классов течений не возникает.

В разделе 2.5 обсуждается влияние скорости газового потока на параметры режимов течений в двухслойной системе. Показано, что, управляя величиной расхода газа R_g , можно добиться смены типа течения: увеличение R_g всегда приводит к переходу от чисто термокапиллярного режима к смешанному или от смешанного к пуазейлевскому за счёт растущего влияния сдвиговых напряжений на границе раздела. Анализ изменений массовой скорости испарения M , вызванных изменением расхода R_g , показал, что вне зависимости от граничного теплового режима, интенсификация скорости испарения может быть достигнута за счёт увеличения скорости прокачки газа. Получен-

ный результат полностью подтверждается данными экспериментов³. Решение предсказывает линейный характер зависимости массовой скорости испарения от расхода газа. Строго говоря, экспериментальные зависимости $M(R_g)$ носят нелинейный характер и представлены в виде линий тренда, однако для большинства конфигураций в достаточно широком диапазоне изменений R_g они могут быть с достаточной точностью аппроксимированы линейными.

Анализ всех возможных корректных постановок краевых задач, в которых учитывается неоднородный характер испарения, проводится в разделе 2.6. Апробация граничных условий для функций температуры и паросодержания выполняется на основе сравнения расчётных и экспериментальных³ значений относительных изменений массовой скорости испарения ΔM для системы сред «этанол – воздух». Установлено, что наилучшее качественное и количественное совпадение (рисунок 3) обеспечивается при использовании упрощённого условия Неймана для функции концентрации пара на верхней стенке канала и условий Дирихле (3) для функций температуры, задающих линейный нагрев на обеих внешних границах. Указаны условия, гарантирующие приемлемое количественное соответствие. На основе точного решения, полученного в рамках постановки, обеспечивающей лучшее совпадение теоретических и экспериментальных результатов, исследовано влияние расхода газа на характеристики течений с неоднородным испарением в горизонтальном канале. Отмечена доминирующая роль поверхностных эффектов в формировании возникающих конвективных режимов.

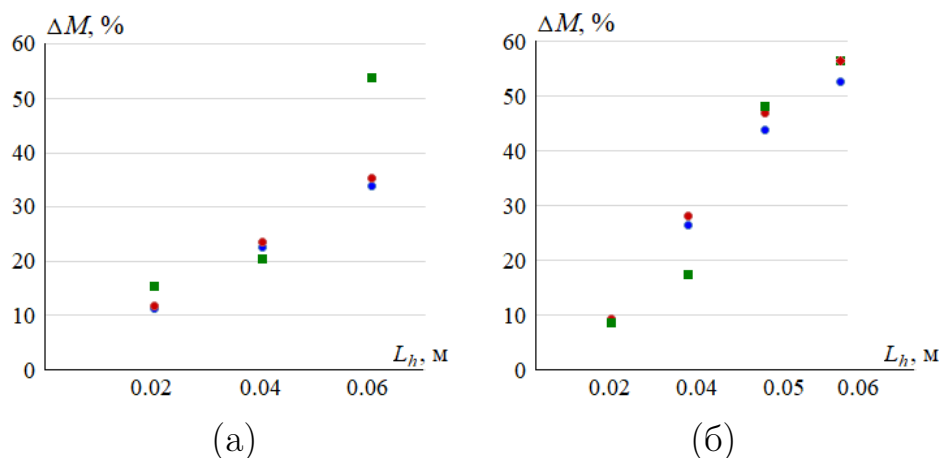


Рисунок 3 – Сравнение относительных изменений ΔM для системы «этанол – воздух» на рабочих участках различной протяжённости L_h с экспериментальными данными³ при $h_1 = h_2 = 3$ мм, $A_2 = 0$: (а) — $R_g = 5.76 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с); (б) — $R_g = 3.55 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с); ■ — экспериментальные значения; ● — $A_1 = -2.5$ К/м; ● — $A_1 = -1$ К/м

³Люлин Ю.В. и др. Влияние протяжённости межфазной поверхности на интенсивность испарения горизонтального слоя жидкости под действием потока газа // Теплофизика и аэромеханика. – 2020. – Т. 27, № 1. – С. 121-125.

В разделе 2.7 даётся расширение классификации Наполитано типов течений, которые могут быть описаны изучаемыми точными решениями. Показано, что расширение классификации за счёт добавления подклассов течений смешанного и пуазейлевского типа возможно при одновременной реализации граничных условий (3) с $A_1 \neq A_2$, допустимой в рамках постановки, учитывающей перенос массы через границу раздела. Описаны основные физические механизмы, обеспечивающие формирование всех возможных классов течений.

В **третьей главе** исследуется устойчивость совместных течений с однородным испарением ($M = \text{const}$) в системе сред «HFE7100 – азот» относительно плоских возмущений. Результаты решения соответствующей задачи об устойчивости (при $\alpha_z \equiv 0$, $W_j \equiv 0$) получены в виде нейтральных кривых $A(\alpha_x)$, определяющих пороговые характеристики устойчивости — значения градиента A , при которых происходит потеря устойчивости.

В разделе 3.1 анализируется эволюция топологии нейтральных кривых и форм неустойчивости при изменении толщин слоёв рабочих сред и интенсивности гравитационного воздействия в условиях равной тепловой нагрузки ($A_1 = A_2$, $\vartheta^- = \vartheta^+$), приложенной на внешних стенках канала. Показано, что увеличение толщины жидкого слоя h_1 дестабилизирует течение (рисунок 4(а)) за счёт ослабления влияния термокапиллярного эффекта. Рост касательных напряжений на Γ при уменьшении высоты газового слоя h_2 также имеет дестабилизирующее влияние (рисунок 4(б)). Решение задачи об устойчивости подтверждает наблюдаемый экспериментально колебательный характер неустойчивости в двухфазных системах с испарением. Рассчитаны значения фазовых скоростей возникающих возмущений для систем разной геометрии. Проведена селекция мод, установлено, что с увеличением толщины жидкого слоя происходит перестройка формы плоских возмущений от термокапиллярных мелкомасштабных структур к конвективным ячейкам, вызванная сменой типа основного течения и трансформацией поля температуры (см. рисунок 5). В условиях пониженной гравитации реализуется термокапиллярная неустойчивость; в ряде случаев может наблюдаться сосуществование термокапиллярного и конвективного механизмов неустойчивости, которому отвечают разные формы наиболее опасных характеристических возмущений. Установлено, что для всех рассмотренных конфигураций существует тепловая нагрузка, характеризуемая величиной A , при которой основное течение становится неустойчивым.

Влияние поперечного перепада температуры на критические характеристики неустойчивости и типы наиболее опасных возмущений исследуется в разделе 3.2. Показано, что при нагреве снизу даже незначительный перепад в 1 градус ($\vartheta_* = 1$) дестабилизирует течение, существенно расширяя область неустойчивости. Нагрев сверху оказывает стабилизирующее влияние: в условиях когда верхняя стенка канала горячее нижней, возможна реализация устойчивых режимов при малых температурных градиентах A во всём

рассматриваемом диапазоне значений волновых чисел α_x . Установлено, что дополнительная температурная накачка приводит к росту фазовой скорости возникающих возмущений.

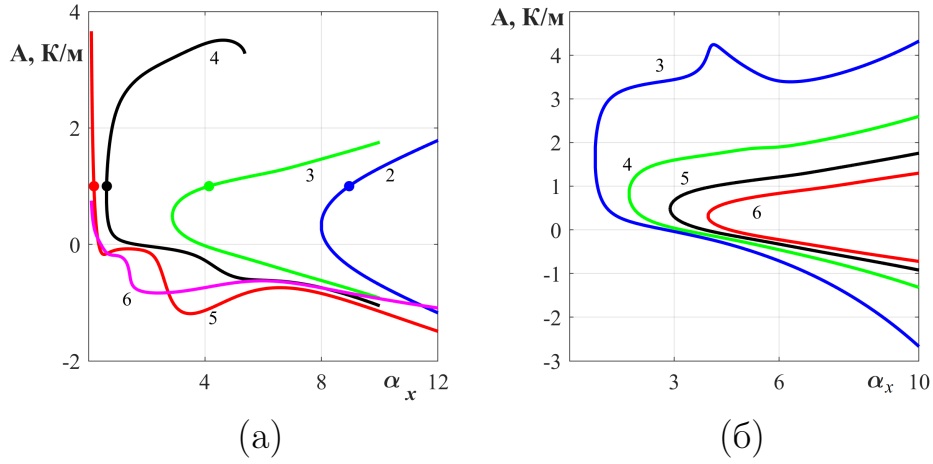


Рисунок 4 – Нейтральные кривые $A(\alpha_x)$: (а) — $h_2 = 5$ мм, номера кривых соответствуют значениям h_1 , (б) — $h_1 = 3$ мм, номера кривых соответствуют значениям h_2 . Области неустойчивости лежат справа от кривых

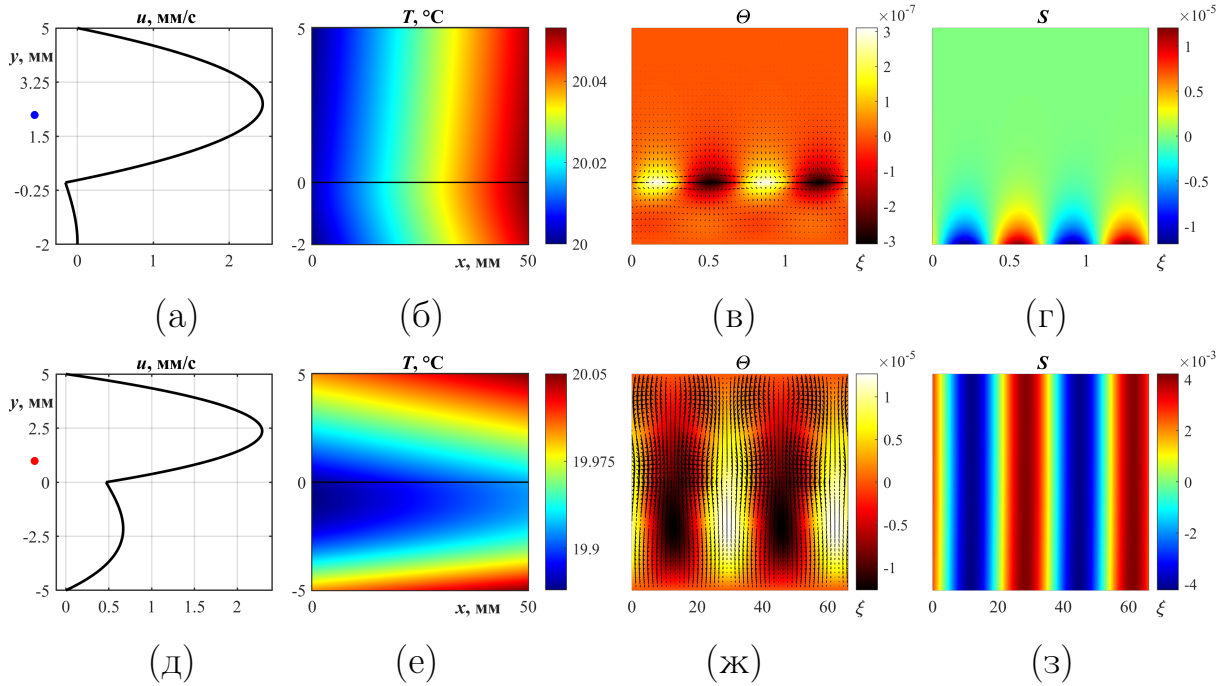


Рисунок 5 – Перестройка полей скорости (а, д) и температуры (б, е) основного течения и форм наиболее опасных возмущений скорости, температуры (в, ж) и концентрации (г, з) в системе при $A = 1$ К/м с изменением толщины жидкого слоя

Устойчивость двухслойного течения с испарением в канале с теплоизолированной верхней стенкой изучается в разделе 3.3. Обнаружено слабое стабилизирующее влияние смены граничного теплового режима на верхней стенке,

обусловленное однородностью теплового поля в вертикальном направлении в верхнем слое (при этом не возникает условий для интенсивного конвективного движения в газовой фазе, которое может дестабилизировать всю двухслойную систему).

Параграф 3.4 посвящён исследованию влияния скорости газопарового потока на устойчивость основного течения. Установлено, что стабилизирующее/дестабилизирующее действие дополнительных касательных напряжений, индуцированных прокачкой газа, зависит от степени выраженности и направления действия сил Марангони. При сонаправленном действии термокапиллярных и сдвиговых напряжений ($A < 0$) имеет место расширение области устойчивости, при этом фазовая скорость возмущений растёт с увеличением расхода R_g . При разнонаправленном действии указанных механизмов ($A > 0$) рост касательных напряжений, вызванных продувом газа, имеет дестабилизирующее влияние, которое сопровождается падением фазовой скорости опасных возмущений.

В **четвертой главе** исследуется устойчивость решения (2) относительно пространственных возмущений. Результаты решения соответствующей задачи об устойчивости получены в виде нейтральных поверхностей $A(\alpha_x, \alpha_z)$. Показано, что для большинства рассмотренных конфигураций пространственные возмущения являются более опасными, чем плоские. Пространственная неустойчивость в двухфазной системе проявляется в форме валиковой конвекции, для которой характерно возникновение упорядоченных продольных и поперечных структур различной топологии.

В разделе 4.1 изучено влияние геометрии системы, интенсивности гравитационного воздействия и дополнительного нагрева снизу на пороговые характеристики пространственной неустойчивости в случае недеформируемой межфазной границы. Описаны характерные формы возникающих возмущений, которые зависят от типа основного течения. Отмечено стабилизирующее влияние термокапиллярного эффекта. В условиях конкурентного сосуществования термокапиллярного и конвективного механизмов неустойчивость может проявляться в форме вихревых структур со сложной симметрией и тепловых структур с разной локализацией, в том числе с двухрядной упаковкой.

Влияние деформируемости границы раздела под действием возмущений на характеристики устойчивости анализируется в разделе 4.2. Показано, что для рассматриваемых конфигураций и условий (определяются толщинами слоёв h_j и величиной g) при малых температурных градиентах всегда возможно существование устойчивых режимов течений (рисунок 6). Изменение баланса сил приводит к смене типа наиболее опасных возмущений. В системе с тонким жидким слоем наиболее опасными являются плоские возмущения, т. е. сначала неустойчивость будет проявляться в форме поперечных валов, дрейфующих вдоль потока (см. пример на рисунке 7 (а)). Образование поперечных двумерных волн на поверхности испаряющейся жидкости, увле-

каемой спутным газовым потоком, с последующим развалом в трёхмерные структуры подтверждено экспериментально⁴. С увеличением h_1 до 5 мм сначала в жидком слое будут возникать термокапиллярные продольные структуры, отвечающие «спиральным» возмущениям с $\alpha_x = 0$ (см. пример на рисунке 7(в)). При пониженной гравитации термокапиллярный эффект имеет дестабилизирующее влияние: в тонких слоях неустойчивость проявляется при меньших значениях градиента A (рисунок 6(б)) в форме «спиральных» возмущений.

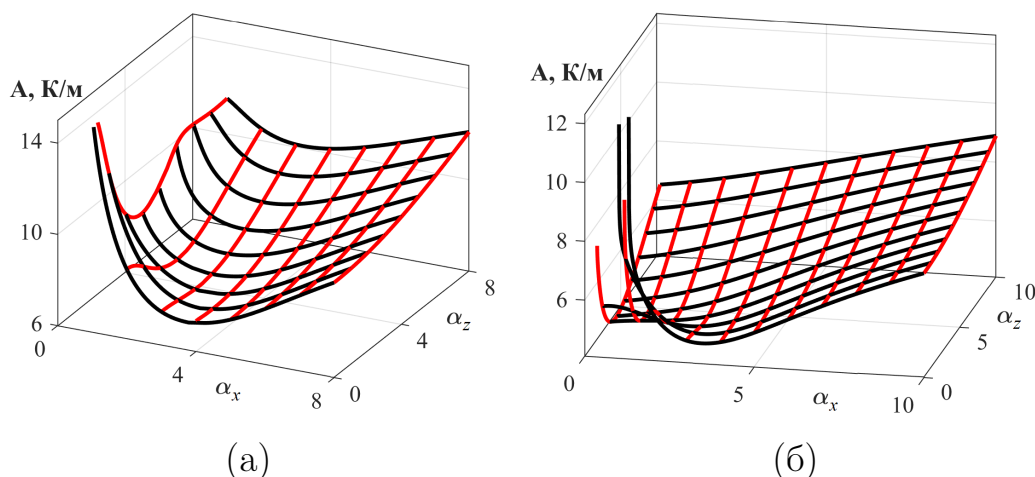


Рисунок 6 – Нейтральные поверхности $A(\alpha_x, \alpha_z)$ для системы с $h_1 = 3$ мм, $h_2 = 5$ мм при $R_g = 9.6 \cdot 10^{-6}$ кг/(м·с): (а) — $g = 9.81$ м/с², (б) — $g = 0.981$ м/с². Области неустойчивости лежат выше поверхностей

Приложение 1 содержит описание алгоритма вычисления неизвестных констант, однозначным образом определяющих рассматриваемое решение по заданным граничным условиям, для случая постоянной скорости испарения.

В **Приложении 2** изложен алгоритм вычисления неизвестных констант, входящих в выражения для искомых функций, которые описывают двухфазные стратифицированные течения с неоднородным испарением.

В **Приложении 3** приведены физико-химические параметры рабочих сред, которые использовались при расчётах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведено систематическое изучение характеристик теплообмена в двухслойной системе жидкость–газ в условиях диффузионного испарения. Исследовано влияние различных факторов (толщин слоёв рабочих сред, интенсивности гравитационного воздействия, расхода газа, граничных тепловых режимов) на параметры конвективных течений, включая характеристики устойчивости.

Основные результаты, полученные в диссертации:

⁴Kabov O. A. et al. Evaporation and flow dynamics of thin, shear-driven liquid films in microgap channels // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2011. – Vol. 35, № 5. – P. 825-831.

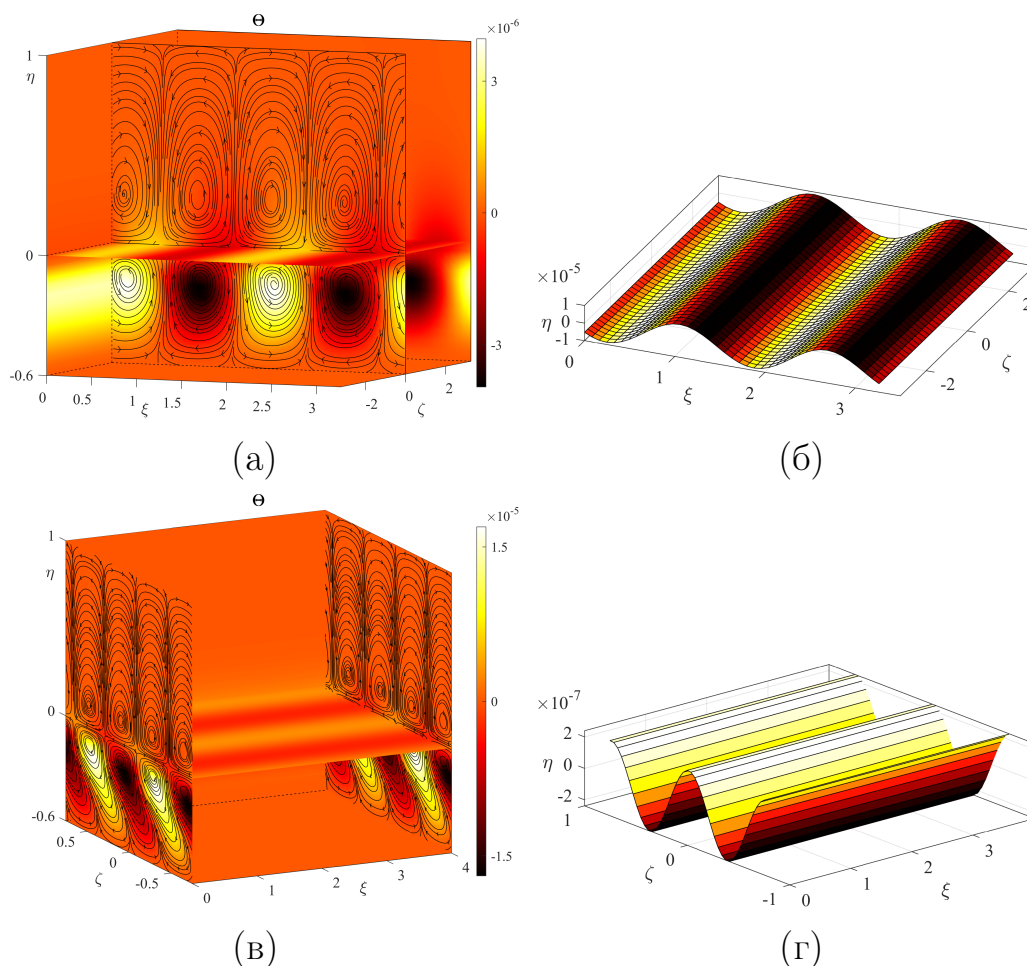


Рисунок 7 – Типичные формы возмущений (а, в) и соответствующие деформации межфазной границы (б, г) в системе с $h_1 = 3$ мм: (а, б) – поперечные волны; (в, г) – продольные структуры

1. В рамках модели испарительной конвекции изучено одно точное решение уравнений Обербека – Буссинеска, описывающее установившееся совместное течение жидкости и спутного потока газа в миниканале. Построено обобщение точного решения на случай неоднородного испарения. На основе указанных точных решений проведена классификация режимов течений. Показана возможность управления режимами течений через входные параметры задачи. На основе сравнения с экспериментальными данными выделены типы граничных условий и варианты постановок краевых задач, обеспечивающие наилучшее качественное и количественное описание конвективных режимов с неоднородным испарением.

2. Впервые проведено систематическое исследование линейной устойчивости точного решения, описывающего двухслойные течения с постоянной скоростью испарения, относительно плоских и пространственных возмущений. Определены пороги конвективной устойчивости при изменении конфигурации волны возмущения, гравитационного воздействия, толщины слоёв рабочих сред, расхода газа, поперечного перепада температуры. Установлено,

что в рассматриваемой системе всегда реализуется колебательная неустойчивость, которая проявляется формированием дрейфующих вдоль потока гидродинамических и тепловых структур. Отмечено стабилизирующее влияние термокапиллярного эффекта.

3. Изучен спектр характеристических возмущений, построены карты режимов неустойчивости. Показано, что для большинства конфигураций наиболее опасными являются пространственные возмущения. С помощью точного решения описано возникновение режимов пространственной неустойчивости в форме валиковой конвекции с различной топологией упорядоченных продольных и поперечных структур, наблюдаемых в теплофизических экспериментах.

4. Впервые на основе точного решения исследованы характеристики устойчивости течений в двухфазной системе с испарением в случае деформируемой поверхности раздела рабочих сред. Установлено, что учёт деформируемости границы жидкость – газ приводит к повышению порога устойчивости относительно пространственных возмущений. Стабилизирующее влияние указанного свойства межфазной границы обусловлено расходом энергии возмущений на деформации границы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [1] Резанова Е. В., Шефер И. А. О влиянии тепловой нагрузки на характеристики течения с испарением // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2017. – Т. 20, № 2(70). – С. 83-92.
- [2] Бекежанова В. Б., Гончарова О. Н., Резанова Е. В., Шефер И. А. Устойчивость двухслойных течений жидкости с испарением на границе раздела // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2017. – № 2. – С. 23-35.
- [3] Bekezhanova V. B., Goncharova O. N., Shefer I. A. Analysis of an exact solution of problem of the evaporative convection (review). Part I. Plane case // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2018. – V. 11(2). – P. 178-190.
- [4] Bekezhanova V. B., Goncharova O. N., Shefer I. A. Analysis of an exact solution of problem of the evaporative convection (review). Part II. Three-dimensional flows // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2018. – V. 11(3). – P. 338-351.
- [5] Шефер И. А. Влияние геометрии системы на устойчивость течения испаряющейся жидкости // Прикладная математика и механика. – 2018. – Т. 82, № 2. – С. 207-218.
- [6] Bekezhanova V. B., Shefer I. A. Influence of gravity on the stability of evaporative convection regimes // Microgravity Science and Technology. – 2018. – V. 30. – P. 543-560.
- [7] Шефер И. А. Влияние поперечного перепада температур на устойчивость двухслойных течений жидкости с испарением // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2019. – № 5. – С. 15-25.
- [8] Bekezhanova V. B., Goncharova O. N., Shefer I. A. Solution of a two-layer flow problem with inhomogeneous evaporation at the thermocapillary interface // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2021. – V. 14(4). – P. 404-413.