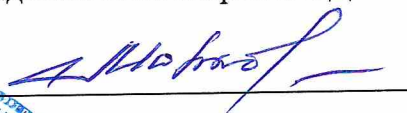


УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТ СО РАН
академик РАН Маркович Д. М.





«10» июня 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация «Устойчивость двухслойных течений в горизонтальном канале при диффузионном испарении» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук выполнена на кафедре математического моделирования и процессов управления Института математики и фундаментальной информатики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет».

В 2014 году Шефер Илья Александрович с отличием окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет» по направлению «Прикладная математика и информатика».

В 2018 году Шефер Илья Александрович окончил очную аспирантуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет» по направлению подготовки 01.06.01 Математика и механика. Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2022 году Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель – Бекежанова Виктория Бахытовна, доктор физико-математических наук, заведующий отделом дифференциальных уравнений механики Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения Федерального государственного

бюджетного научного учреждения Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность работы

Потребность в теоретическом изучении конвективных течений в многофазных системах обусловлена широким применением жидкостей в качестве рабочих сред в теплофизике, материаловедении, пищевой и химической промышленности, микроэлектронике, аэрокосмической индустрии. Результаты математического моделирования конвективного теплообмена не только позволяют развивать новые подходы для описания динамики течений, но и служат теоретической основой экспериментальных методов исследования газожидкостных систем, тем самым стимулируя интенсивное развитие наукоёмких технологий. В теоретических исследованиях особое внимание уделяется обоснованию корректного описания изучаемых явлений и исследованию влияния разнородных механизмов во всём пространстве параметров задачи. Общепринятый подход при изучении процессов теплопереноса основан на использовании уравнений Навье – Стокса и переноса тепла и их аппроксимаций. Одним из способов достоверного анализа является использование точных решений групповой природы определяющих уравнений, наследующих естественные свойства симметрии, заложенные при выводе указанных уравнений. Точные решения позволяют выделить доминирующие и вторичные эффекты, определяющие гидродинамическую и тепловую структуру конвективных течений, установить пороговые характеристики устойчивости режимов и механизмы, приводящие к потере устойчивости основного состояния системы, проводить адекватное сравнение теоретических результатов с данными экспериментов. Кроме того, на основе данных, полученных с помощью точных решений, может быть построена иерархия математических моделей для описания конвекции в многофазных системах в условиях осложняющих факторов (фазовые переходы, термодиффузионные эффекты, быстропеременные температурные поля и т.п.).

Диссертация И. А. Шефера посвящена исследованию режимов конвекции в системе жидкость – газ с термокапиллярной границей раздела, допускающей фазовый переход диффузионного типа, и их линейной устойчивости на основе точных решений. В работе проводится исчерпывающее исследование характера и степени влияния различных физико-химических факторов на характеристики совместных адвективных течений испаряющейся жидкости и спутного потока, обсуждаются возможности управления установившимися режимами за счёт внешних воздействий и возможные механизмы неустойчивости указанных течений; получены критические

характеристики устойчивости. Результаты исследований позволяют прогнозировать исход лабораторных экспериментов, связанных с разработкой методов интенсификации теплообмена в технологиях жидкостного охлаждения, и незаменимы при поиске новых технологических решений, развивающих методики термического осушения или нанесения покрытий. В связи со всем вышеизложенным, актуальность темы диссертации не подлежит сомнению.

Целью диссертационной работы является моделирование и изучение характеристик тепломассообмена в системе «жидкость – газ» в условиях диффузионного испарения в миниканалах.

Поставлены и решены следующие **задачи**:

- посредством точных решений исследовать влияние на характеристики режимов испарительной конвекции в горизонтальном канале следующих параметров и факторов: величины расхода газа, величины гравитационного ускорения, величины поперечного перепада температуры, граничного теплового режима и термодиффузионных эффектов, неоднородного характера испарения;

- исследовать устойчивость точного решения, описывающего стационарное течение жидкости, увлекаемой спутным ламинарным потоком газа, с постоянной скоростью испарения относительно плоских возмущений, определить пороги устойчивости;

- исследовать устойчивость указанного решения относительно пространственных возмущений, в том числе в случае деформируемости границы раздела;

- провести анализ влияния параметров системы на свойства спектра характеристических возмущений, получить карты возможных режимов неустойчивости.

Научная новизна:

1. Построено обобщение одного точного решения, описывающего установившееся совместное течение жидкости и спутного потока газа, на случай неоднородного испарения. На основе сравнения теоретических результатов, полученных с помощью точного решения, с известными экспериментальными данными проведена апробация граничных условий для функций температуры и концентрации; определены постановки задач, обеспечивающие получение физически содержательных результатов.

2. Впервые определены пороги конвективной устойчивости точного решения, описывающего двухслойные течения в системе жидкость – газ с постоянной

скоростью испарения, относительно плоских и пространственных возмущений в пространстве параметров задачи.

3. Изучен спектр характеристических возмущений, проведена селекция мод. Впервые построены карты режимов неустойчивости адвективных течений в двухслойной системе в условиях фазовых превращений, показано стабилизирующее влияние термокапиллярного эффекта.

4. Обнаружено, что наиболее опасными являются пространственные возмущения, которые приводят к формированию продольных термокапиллярных структур в жидком слое или к реализации режимов течений, при которых в жидком слое сосуществуют продольные и поперечные пространственные валы.

5. Установлено, что деформация межфазной границы может оказывать стабилизирующее влияние; имеет место повышение порога устойчивости относительно пространственных возмущений, что объясняется поглощением энергии возмущений на деформации поверхности раздела.

Теоретическая и практическая значимость.

Результаты вносят вклад в теорию конвекции и конвективной устойчивости и могут служить основой для построения иерархии моделей испарительной конвекции и обобщений/уточнений постановок задач или приближённых моделей для описания конвекции в жидкостных системах, сопровождающейся фазовыми превращениями первого рода. Результаты могут быть использованы при разработке и подготовке экспериментальных методов исследования испарительной конвекции в двухфазных системах, а также для восстановления эмпирических характеристик рабочих сред, таких как коэффициент концентрационного расширения плотности, коэффициент диффузии пара в газе, параметры Соре и Дюфура, отсутствующих в справочной литературе. Построенные точные решения могут служить тестовыми примерами при разработке и апробации численных методов.

Достоверность результатов обеспечивается использованием математических моделей испарительной конвекции, основанных на фундаментальных физических законах сохранения и принципах термодинамики, и корректных постановок краевых задач, классических методов теории дифференциальных уравнений, строгих математических методов теории устойчивости, применением апробированных численных методов, сравнением результатов работы с доступными экспериментальными данными.

Личный вклад автора. Основные научные результаты, включённые в диссертацию и выносимые автором на защиту, получены соискателем

самостоятельно. Соискатель непосредственно участвовал в постановках исследуемых задач, реализации аналитических и численных методов исследования, получении, интерпретации и апробации полученных результатов.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации обсуждались и докладывались на следующих конференциях: Международный симпозиум «Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics – BIFD» (Paris, France, 2015); Международная конференция «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» (Новосибирск, 2015); X Международная конференция «Two-phase Systems for Ground and Space Applications» (Kyoto, Japan, 2015); XVI Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Красноярск, 2015); Международный симпозиум и школа молодых учёных «Interfacial Phenomena and Heat Transfer» (Новосибирск, 2016); Всероссийская конференция «Нелинейные волны: теория и новые приложения» (Новосибирск, 2016); Российско-французский семинар «Mathematical Hydrodynamics» (Новосибирск, 2016); Всероссийская конференция «Актуальные проблемы прикладной математики и механики» и Всероссийская молодежная школа-конференция (Абрау-Дюрсо, 2016); Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых учёных (Ялта, 2016); Всероссийская конференция с участием зарубежных учёных «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения» (Бийск, 2017; Красноярск, 2020); Международная молодежная научно-практическая конференция с элементами научной школы «Прикладная математика и фундаментальная информатика» (Омск, 2019, 2020, 2021); Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019); Всероссийская конференция с международным участием «Пермские гидродинамические научные чтения» (Пермь, 2018, 2020); Минисимпозиум «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); Конференция международных математических центров мирового уровня (Сириус, Сочи, 2021).

Список основных публикаций по материалам диссертации, опубликованных в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Резанова, Е. В. О влиянии тепловой нагрузки на характеристики течения с испарением / Е. В. Резанова, И. А. Шефер // Сибирский журнал индустриальной математики. 2017. Т. 20. № 2(70). С. 83-92.

2. Бекежанова, В. Б. Устойчивость двухслойных течений жидкости с испарением на границе раздела / В. Б. Бекежанова, О. Н. Гончарова, Е. В. Резанова, И. А. Шефер // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2017. № 2. С. 23-35.

3. Bekezhanova, V. B. Analysis of an exact solution of problem of the evaporative convection (review). Part I. Plane case / V. B. Bekezhanova, O. N. Goncharova, I. A. Shefer // Journal of Siberian federal university. Math. and Physics. 2018. № 11(2). P. 178-190.

4. Bekezhanova, V. B. Analysis of an exact solution of problem of the evaporative convection (review). Part II. Three-dimensional flows / V. B. Bekezhanova, O. N. Goncharova, I. A. Shefer // Journal of Siberian federal university. Math. and Physics. 2018. № 11(3). P. 338-351.

5. Шефер, И. А. Влияние геометрии системы на устойчивость течения испаряющейся жидкости / И. А. Шефер // Прикладная математика и механика. 2018. Т. 82. № 2. С. 207-218.

6. Bekezhanova, V. B. Influence of gravity on the stability of evaporative convection regimes / V. B. Bekezhanova, I. A. Shefer // 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 / И. А. Шефер // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2019. № 5. С. 15-25.

8. Bekezhanova, V. B. Solution of a two-layer flow problem with inhomogeneous evaporation at the thermocapillary interface / V. B. Bekezhanova, O. N. Goncharova, I. A. Shefer // Journal of Siberian federal university. Math. and Physics. 2021. № 14(4). P. 404-413.

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация «Устойчивость двухслойных течений в горизонтальном канале при диффузионном испарении» Шефера Ильи Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Решение принято на проведенном в режиме видеоконференции заседании семинара «Физическая гидродинамика» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. Председатель заседания – академик РАН Алексеенко Сергей Владимирович. На заседании присутствовало 20 человек, в том числе 1 академик РАН, 1 член-корр. РАН, 7 докторов и 10 кандидатов наук.

Результаты голосования: «за» - 20 человек, «против» - 0, «воздержалось» - 0, протокол № 5 от 16 декабря 2021 г.



Председатель семинара
Алексеев Сергей Владимирович
академик РАН,



Секретарь семинара
Кабардин Иван Константинович
к.т.н, с.н.с лаборатории
моделирования ИТ СО РАН