

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

SIBERIAN
FEDERAL
UNIVERSITY



СИБИРСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

660041, РОССИЯ, Красноярск, проспект Свободный, 79
телефон (391)2-44-82-13, тел./факс (391)2-44-86-25
http://www.sfu-kras.ru, e-mail: office@sfu-kras.ru

№ _____
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

проректор по образовательной
деятельности ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный
университет»,
Светлана Павловна Басаласва



« 15 » мая 2019 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации на диссертационную работу Резановой Екатерины Валерьевны на тему «Моделирование конвективных течений с учётом тепломассопереноса на границах раздела», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация Резановой Екатерины Валерьевны «Моделирование конвективных течений с учетом тепломассопереноса на границах раздела» соответствует специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, является завершённым научным исследованием в плане поставленных задач, имеет научную ценность и практическую значимость.

1. Актуальность. В настоящее время в связи с развитием наукоемких технологий, широкого круга прикладных задач возникает необходимость более полного и точного описания явлений тепло- и массопереноса в различных моделях конвективных движений. Это – пленочные испарители, тепловые трубы, двухфазные системы охлаждения. Двухфазные системы, в которых взаимодействуют жидкие и газообразные фазы одного рабочего вещества, или спутные потоки смесей паров и инертных газов, составляют основу современных космических технологий (процессы в топливных баках, двигателях, системах терморегулирования и жизнеобеспечения и т.п.). Математическое моделирование процессов тепло- и массообмена в жидких средах позволяют понять и объяснить особенности многих физических

явлений, протекающих в замкнутых и/или бесконечных областях с неподвижными границами, а также в областях с движущимися границами, которые могут являться неизвестными (свободными) и подлежащими определению. При этом во многих процессах необходимо учитывать интенсивность испарения или конденсации на границе раздела. Это приводит к усложнению части граничных условий на поверхностях раздела по сравнению с классическими. Поэтому исследование конкретных задач механики жидкости с уточнёнными условиями на границе раздела несомненно является актуальной задачей.

2. Содержание работы. Диссертация Резановой Е.В. изложена на 158 страницах (включая 34 рисунка и одну таблицу) и состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 133 наименований и 5-ти приложений.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и решаемые задачи. Приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту. Обсуждаются научная новизна, практическая значимость и достоверность проведённых исследований. Кроме того, дан литературный обзор близких по теме диссертации работ.

В **первой главе** построены точные решения, описывающие стационарные двухслойные течения жидкости и газа в горизонтальном слое с учетом эффекта Соре и Дюффора в газопаровом слое и испарения на границе раздела. Проведена классификация течений и их анализ в рамках поставленных граничных условий. Выделены три класса течений в зависимости от доминирующих сил: чисто термокапиллярное, смешанное и пуазейлевское. Проведено сравнение экспериментальных и аналитических результатов исследования испарения жидкости на поверхности раздела в системах «НFE7100 – азот» и «этанол – воздух».

Вторая глава посвящена изучению движения тонкого слоя вязкой теплопроводной жидкости, стекающей по наклонной неравномерно нагретой подложке в условиях спутного потока газа и испарения на термокапиллярной границе раздела. Выведены эволюционные уравнения, определяющие толщину слоя жидкости как для модели Навье-Стокса, так и для модели Обербека-Буссинеска. Эти эволюционные уравнения учитывают влияние гравитации, капиллярных и термокапиллярных сил, характер нагрева подложки на интенсивность испарения жидкости. Дан численный алгоритм расчёта задачи о движении жидкости с учётом испарения тонкого слоя.

В **третьей главе** исследуется, в отсутствии гравитации, движение слоя с плоскими границами для специального трёхмерного поля скоростей. Построен численный алгоритм решения возникающей начально-краевой задачи о деформации слоя в случае действия на свободных границах термокапиллярных сил и дополнительных касательных напряжений.

Четвёртая глава посвящена численному моделированию динамики жидкого сферически симметричного слоя, содержащего газовый пузырёк. На границах сферического слоя выполняются кинематическое и динамическое условия, закон Генри, условия баланса энергии и непрерывности температуры. Проведен вычислительный эксперимент в задаче о формировании микробаллона жидкого стекла в полной, тепловой и квазистермической постановках.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

В **приложении 1** приведен вид коэффициентов в формуле (1.66); в 2 – аналитические результаты по влиянию эффектов Соре; в 3 – физико-химические параметры четырёх жидких сред; в 4 – коэффициенты СЛАУ (2.58); в 5 – метод прогонки решения систем разностных уравнений (3.29).

3. Научные результаты и их новизна. В диссертационной работе Резановой Е.В.

1) изучены механизмы, определяющие структуры стационарных однонаправленных двухслойных течений с учётом испарения, эффектов Марангони, Соре и Дюфура. Проведено сравнение результатов экспериментов и аналитических расчётов на основе точного решения; получены их качественные и количественные совпадения.

2) получены эволюционные уравнения, определяющие положение свободной границы стекающего тонкого слоя по наклонной поверхности, с учётом испарения. Численно исследовано влияние интенсивности гравитации, угла наклона подложки, граничного теплового режима на скорость утоньшения слоя жидкости.

3) построен численный алгоритм решения задачи о деформации свободного жидкого слоя со специальным трёхмерным полем скоростей. На его основе оценено влияние различных типов граничного теплового режима и дополнительных касательных напряжений на динамику слоя и процессы переноса тепла.

4) впервые, на примере формирования стеклянной оболочки, численно изучена задача в полной, тепловой и квазистатической постановках об

эволюции сферической оболочки в зависимости от внешнего теплового режима, давления и начальной плотности газа.

4. Достоверность и обоснованность результатов. Обоснованность и достоверность результатов диссертации основывается на корректности постановок задач, использовании апробированных численных методов и алгоритмов, сравнением результатов расчётов с имеющимися экспериментальными данными.

5. Значимость выводов и рекомендаций диссертанта для науки и практики. Изученные в диссертации отдельные задачи вносят определённый вклад в понимание конвективных движений жидкостей и теплопереноса на границах раздела. Стационарные точные решения специального вида позволяют дать оценку влияния испарения, эффектов термодиффузии, граничного теплового режима, расхода газа на характер и структуру течений. Проведённые вычислительные эксперименты в задаче о формировании определённых типов течений тонких жидких плёнок по нагретой подложке выявляют роль отдельных механизмов: сил плавучести, эффектов испарения и Марангони, расхода тепла на парообразование, изменения удельного объёма. Формирование сферических микробаллонов имеет важное применение при разработке композиционных материалов (сферопласты) и сенсibilизаторов эмульсионных взрывчатых веществ. Полученные результаты могут быть использованы при постановке экспериментов по изучению конвективных течений жидкости и спутного потока газа с учётом эффектов испарения.

6. Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат диссертации соответствует её содержанию.

7. Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати. Основные результаты диссертации доложены на всероссийских и международных конференциях и напечатаны в виде полнотекстовых публикаций докладов, опубликованы в 14 работах, которые соответствуют теме диссертации и с достаточной полнотой отражают содержание, выводы и заключение диссертации. Все статьи входят в издания из перечня ВАК РФ, из них 10 статей в журналах, включённых в базы цитирования SCOPUS и WOS.

8. Недостатки по оформлению и содержанию диссертации.

1) Название диссертации представляется слишком общим. В действительности же решаются отдельные задачи, почти не связанные между собой. В первой главе рассматривается стационарная задача, в остальных –

нестационарные. В третьей главе в задаче нет массопереноса. Поэтому нельзя сделать выводов о моделировании общих конвективных течений с учётом тепломассопереноса на границах раздела.

2) Замечания по первой главе:

2.1. Условия (1.49), (1.50) имеют место для недеформируемой поверхности раздела. Поэтому после формулы (1.51) предложение «При решении задач с недеформируемой границей раздела...» не имеет смысла. Условие (1.50) не ставится, если число Вебера (или капиллярное число) велико (мало), когда нет гравитации; при её наличии возникает требование на число Бонда. В диссертации сразу предположено, что граница раздела плоская, см. по этому поводу Зейтунян Р.Х. УФН, 1998, т. 168 [117]. При больших числах Вебера надо задавать условие (1.51) и условие замкнутости потока в первой жидкости и задача будет другой!

2.2. Решение вида (1.6) не является **новым**. Его представление, с указанием теоретико-групповой природы, имеется в работе: Андреев В.К. «Решение Бириха уравнений конвекции и некоторые его обобщения» - Красноярск, ИВМ СО РАН, 2010. – 68 с. на стр. 55. Поэтому можно говорить об «интерпретации», «детализации» этого решения для иных граничных условий – об определении постоянных. Кстати, условия существования однонаправленных стационарных течений бинарных смесей в модели Обербека-Буссинеска даны в работе: Андреев В.К., Степанова И.В. МЖГ, 2016, № 2.

2.3. Классификация (стр. 69) течений является **тривиальной**, если представить поле скоростей в безразмерной форме, см. работы [6], [12], [117].

3. На стр. 120 читаем: «Отметим, что здесь и далее уравнение переноса тепла используется без учёта диссипативной функции». Почему? Ведь процесс формирования оболочки – быстропротекающий, и градиент скорости может быть большим.

4. На стр. 128, а также в заключении написано: «исследована модель динамики сферического слоя ...». Однако, выполнен лишь только вычислительный эксперимент для оболочки из жидкого стекла, который не исчерпывает математическое моделирование процесса. Конечно, если учесть работы [19-21] научного руководителя, то можно говорить об исследовании математической модели.

9. Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертациям. Сделанные замечания не являются существенными. Они скорее относятся к недостаточной проработке научной литературы

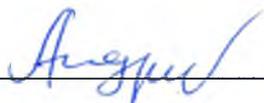
диссертантом. Диссертационная работа является завершённым научным исследованием, в плане поставленных задач, выполнена на достаточно высоком научном уровне. В ней выполнен большой объём аналитических и численных исследований конвективных конкретных движений жидкостей в областях с границами раздела, сопровождающихся тепло- и массопереносом через эти границы. Хорошо оформленные 34 рисунка автора подтверждают выводы автора.

Учитывая актуальность тематики, новизну и практическое значение полученных результатов, считаю, что диссертация «Моделирование конвективных течений с учетом тепломассопереноса на границах раздела» соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию обсуждены на заседании кафедры математического моделирования и процессов управления 8 мая 2019 года, № протокола 9.

Заведующий базовой кафедры
математического моделирования
и процессов управления

д.ф.-м., профессор,
академик МАН ВШ



Виктор Константинович Андреев

10 мая 2019 года