

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Люппина Андрея Витальевича «Динамика ультратонкого слоя жидкости», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертация посвящена теоретическому исследованию поверхностных явлений в ультратонких слоях жидкости. Здесь рассматриваются вопросы динамики движения и процессы структурообразования на поверхности ультратонкой пленки жидкости при воздействии различных поверхностных эффектов и внешних сил. Особенность ультратонких слоев жидкости заключается в том, что в таких слоях межмолекулярное взаимодействие становится определяющим фактором, который и определяет характер и поведение слоя жидкости. С развитием нанотехнологий появилась практическая потребность изучения таких слоев.

Задачи, решаемые Люппиным А.В. являются комплексными и описывают мультифизические явления, происходящие в ультратонких пленках. Основные исследования выполнялись методом численного моделирования, а отдельные вопросы изучались аналитически. Несомненным достоинством представленной работы является комплексный подход к исследованиям, который совмещает достаточно сложные математические модели, с эффективными численными методами.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что для ультратонких пленок, которые используются в нанотехнологиях, определены параметры, влияющие на поведение свободной межфазной границы. Также стоит отметить, причастность диссертанта к созданию патента по определению и контролю толщины тонких водных пленок.

Диссертация Люппина А.В. состоит из введения, обзора литературы, четырех глав с изложением результатов, заключения и списка цитированной литературы, включающего 374 наименования. Общий объем работы – 296 страниц, включая 70 рисунков.

Во Введении обозначены цели и задачи исследования, обоснована актуальность решаемых проблем и научная новизна полученных результатов. Показана практическая значимость работы и определен личный вклад автора. Описаны методы диссертационного исследования, обосновано подтверждение достоверности полученных результатов работы, которые выносятся на защиту.

В Главе I «Анализ состояния проблемы» приведен достаточно обширный обзор литературы по теме диссертации, который показывает кругозор автора по данным проблемам. Описаны полученные ранее результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния ван-дер-ваальсового взаимодействия, испарения, термокапиллярного и солитокапиллярного эффектов и влияние внешнего электрического поля на поведение капель и пленок жидкости. Сформулированы нерешенные ранее проблемы, определены цели и задачи исследования диссертационной работы.

Глава II посвящена решению задачи численного моделирования динамики испарения ультратонкой пленки жидкости, расположенной на твердой подложке и ограниченной сверху свободной деформируемой границей «жидкость-пар». Под «ультратонкой пленкой» понимается слой жидкости толщиной порядка $10\text{-}1000\text{\AA}$. Особенность ультратонкого слоя жидкости состоит в том, что энергия межмолекулярного взаимодействия слоя жидкости является немонотонной функцией от его толщины. Она складывается из суммы ван-дер-ваальсовой (дисперсионной) энергии притяжения и электрической энергии отталкивания. Полученное Люппином аналитически (Lipson 1998), численно решалось эволюционное уравнение для толщины пленки с учетом вязкости жидкости и испарения. Температура и поверхностное натяжение свободной границы считаются постоянными

величинами. Проводился линейный и слабонелинейный анализ устойчивости движения испаряющегося фронта жидкости. Показаны характеристики, которые являются индикаторами появления пальцеобразной неустойчивости. Наибольший интерес представляет трехмерное численное моделирование распространения фронта испаряющейся жидкости и возникновение пальцеобразной неустойчивости.

В Главе III исследуется влияние термокапиллярного эффекта на динамику движения ультратонкого испаряющегося слоя жидкости, расположенного на твердой подложке. Приводятся результаты численного моделирования движения фронта слоя жидкости. Подогрев осуществляется со стороны твердой подложки. Для получения эволюционного уравнения используется метод длинноволнового приближения. Показано, что термокапиллярный эффект приводит к увеличению скорости фронта испаряющейся жидкости. С увеличением числа Марангони появляется неустойчивость фронта относительно поперечных возмущений. Впервые было показано, что для ультратонкого слоя жидкости с ростом безразмерного параметра испарения наличие термокапиллярного эффекта приводит к образованию пальцеобразных поверхностных структур.

Глава IV посвящена численному исследованию конвекции Бенара - Марангони для слабопроводящей жидкости в присутствии внешнего электрического поля. Рассматривается инжекционный механизм образования свободного заряда в слое жидкости. Проводится исследование двухслойной системы «жидкость-воздух». Свободная межфазная граница «жидкость-воздух» предполагается деформируемой. Показано, что при положительных значениях числа Марангони (подогрев со стороны твердой границы) из-за термокапиллярного эффекта происходит дестабилизация механического равновесия; при отрицательных числах Марангони порог устойчивости повышается; с уменьшением тока через слой пороговое значение электрического числа Рэлея повышается; при подогреве со стороны

свободной границы (отрицательные числа Марангони) возможно появление колебательной моды неустойчивости.

В Главе V рассматриваются две задачи по численному моделированию эволюции ультратонкой пленки жидкости с добавлением некоторого количества поверхностно-активного вещества (ПАВ). Главным отличием этой главы от третьей и четвертой заключается в том, что здесь поверхностное натяжение свободной межфазной границы зависит не от температуры, а от поверхностной концентрации ПАВ. Жидкость считается изотермической, а для учета динамики концентрации ПАВ используется уравнения диффузии и адсорбции-десорбции для объемной и поверхностных концентраций соответственно. С использованием длинноволнового метода были получены уравнения эволюции профиля испаряющейся пленки и поверхностной концентрации ПАВ. В результате численного моделирования были получены профили испаряющейся ультратонкой пленки в присутствии сурфактанта. Для стационарного состояния обнаружены две независимые моды возмущения, одна из которых описывает эволюцию поведения концентрационных возмущений на свободной межфазной границе раздела, а вторая показывает эволюцию возмущений в процессе движения жидкости при испарении. Показано, что при достаточно высоких числах Марангони и Пекле свободная граница слоя разрушается и образуется пикообразная структура поверхности. Во второй части главы исследована устойчивость движения фронта испаряющегося ультратонкого слоя жидкости при наличии сурфактанта на обеих межфазных поверхностях. Для стационарного состояния обнаружены три независимые моды возмущения. Две из них определяют поведение концентрационных возмущений на границах раздела, а третья представляет эволюцию возмущений при испарении. С увеличением безразмерного параметра испарения устойчивость системы увеличивается. Для всех положительных значений безразмерного числа Марангони все возмущения для различных типов неустойчивости затухают. При

отрицательном числе Марагони имеет место неустойчивость, связанная с механизмом испарения.

В Заключении приведены основные результаты и выводы работы.

Научная новизна представленной работы заключается в подробном теоретическом исследовании динамики ультратонкого слоя жидкости. В рамках длинноволнового приближения получено эволюционное уравнение и профили движения фронта при различных значениях безразмерного параметра испарения. Впервые найдено, что при больших значениях безразмерного параметра испарения фронт движения испаряющейся жидкости устойчив к возмущениям, тогда как при малых значениях безразмерного параметра испарения имеет место область неустойчивости при малых волновых числах. Впервые численно исследовано эволюционное уравнение в трехмерном виде, а в диапазоне малых значений испарения обнаружена пальцеобразная неустойчивость. Также в рамках данной задачи исследована зависимость устойчивости движения фронта испаряющейся жидкости от шероховатости межфазной границы «подложка-жидкость». Изменение шероховатости межфазной границы моделировалось изменением константы Гамакера вдоль поверхности. Было впервые установлено, что устойчивость движения фронта испаряющейся пленки понижается с увеличением шероховатости поверхности раздела «подложка-жидкость».

Впервые получено эволюционное уравнение, описывающее поведение ультратонкого слоя испаряющейся жидкости при наличии термокапиллярного эффекта на свободной межфазной границе «жидкость-пар». Приведены профили движения фронта испаряющейся пленки для различных значений безразмерного числа Марагони.

В рамках линейной теории устойчивости изучена двухслойная система «воздух – слабопроводящая жидкость», заключенная между обкладками плоского конденсатора. Инжекция заряда производится через свободную деформируемую поверхность неизоотермической жидкости, коэффициент поверхностного натяжения которой линейно зависит от температуры. В

результате численно проведенных расчетов (методом Рунге-Кутты - Мерсона) впервые было показано, что взаимодействие инжекционного и термокапиллярного механизмов приводит к дестабилизации относительно монотонных возмущений при подогреве со стороны твердой границы. Для инжекционного механизма электроконвекции найдены две нижние моды неустойчивости. При превышении некоторого критического значения числа Марангони происходит их слияние и образуется колебательная мода неустойчивости. Найдена зависимость частоты колебаний от волнового числа.

Произведено исследование в рамках длинноволнового приближения системы уравнений для изучения влияния растворимого сурфактанта на динамику и устойчивость движения фронта испарения тонкой жидкостной пленки. Рассматривается режим быстрой кинетики сурфактанта со свободной границы в объеме жидкости. Получены эволюционные уравнения для толщины слоя и объемной концентрации сурфактанта. Впервые было показано, что присутствие на поверхности растворимого сурфактанта приводит к существенному изменению пространственных структур на поверхности испаряющегося ультратонкого слоя жидкости. Исследована устойчивость движения фронта испаряющегося ультратонкого слоя жидкости при наличии сурфактанта на обеих межфазных поверхностях. Для стационарного состояния впервые были обнаружены три независимые моды возмущения. Две из мод определяют поведение концентрационных возмущений на границах раздела, а третья показывает эволюцию возмущений в процессе движения жидкости при испарении. С увеличением безразмерного параметра испарения устойчивость системы увеличивается. Для всех положительных значений безразмерного числа Марангони все возмущения для различных типов неустойчивости затухают. При отрицательном числе Марангони имеет место неустойчивость, связанная с механизмом испарения. В рассматриваемой задаче впервые обнаружен колебательный режим.

Исследования, представленные в диссертационной работе выполнялись при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований, Министерства образования и науки РФ и других российских и зарубежных научных фондов.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Институте гидродинамики им. М.А. Лавренчука СО РАН, в Институте вычислительного моделирования СО РАН, в Московском государственном физико-технологическом институте, в Московском государственном университете им. Н.Э. Баумана, в Московском энергетическом институте и ряде других организаций, где проводятся исследования по поведению тонких пленок и капель.

В качестве замечаний диссертации следует отметить:

1. В Главе 1 приведен достаточно обширный обзор литературы по теме диссертации. Упомянуты работы классиков и большинства ученых, работающих в настоящее время. Однако нет ни одной ссылки на работы Питера Вейнера (СИА) и его группы, ставшие классическими, по исследованию процессов переноса в области линии контакта газ-жидкость – твердое тело. Данные работы начались в середине 70-х годов и включают как теоретическое, так и экспериментальное рассмотрение состояния тонких слоев жидкости порядка 10 нанометров.
2. На Рис. 2.23 (стр.125, глава 2) приводится экспериментальный результат развития пальцеобразной неустойчивости и говорится, что причину появления этого эффекта следует искать в межфазном взаимодействии границы раздела «подложка-жидкость». Но в тексте диссертации не обсуждаются физические причины возникновения данного эффекта.

3. Одним из основных результатов является тот факт, что результаты эксперимента, представленные на Рис. 2.23, и данные численного трехмерного моделирования, представленные на Рис. 2.25, качественно согласуются. На мой взгляд, следовало бы более детально изучить длину волны для численного счета, провести оценки скорости роста «пальцев» в эксперименте, провести как качественное, так и количественное сравнение развития структур в динамике.
4. В Главах 2, 3, 5 подробно рассматривается динамика движения фронта испаряющегося слоя жидкости. Характерной особенностью такого вида движения является наличие капиллярного гребня. В зависимости от различных факторов он может появляться и исчезать. Во всех случаях следовало бы отметить физические причины существования данного гребня. К сожалению, ни в одной главе об этом не упоминается.
5. В работе моделируются процессы переноса в ультратонких пленках 10 – 1000 ангстрем. Известно, что размер молекулы воды составляет порядка 3,4 Å. К сожалению, в диссертации нет обоснования применимости уравнений сплошной среды к столь тонким пленкам жидкости, состоящим всего из нескольких слоев молекул. Нет ни обоснования, ни дискуссии о возможности использования для таких расчетов теплофизических свойств жидкости, полученных для значительных объемов.
6. Необходимо отметить в целом высокий уровень публикаций соискателя. Часть исследований опубликована в высокорейтинговых журналах с импакт-фактором 4,3, 3,7, 2,4, что является дополнительным подтверждением достоверности полученных результатов. Тем не менее, из 20 публикаций соискатель является первым автором только в 3х работах. По международным стандартам именно первый автор является соавтором, внесшим основной либо

принципиальный вклад в работу. Хотелось бы, чтобы соискатель пояснил такую ситуацию.

Изложенные замечания не снижают ценность диссертационной работы Люшнина А.В., выполненной на высоком профессиональном уровне. Диссертация является научно-квалификационной работой, где получены теоретические научные результаты, которые по совокупности можно квалифицировать как законченное научное достижение. Выполненные в диссертации исследования являются научным достижением в развитии нового перспективного направления механики жидкости – «гидродинамика ультратонкого слоя».

Достоверность представленных результатов и сделанные выводы основываются на использовании адекватных моделей и численных методов для решаемых задач, что подтверждается хорошим соответствием результатов численного моделирования с численными и экспериментальными данными других авторов, которые доступны в открытой печати.

Диссертационная работа Люшнина А.В. прошла всестороннюю апробацию на многочисленных российских и международных конференциях и симпозиумах. Результаты работы докладывались и обсуждались на различных семинарах в ведущих научных организациях. Ее содержание отражено в 20 публикациях, в числе которых 10 статей опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах. Некоторые из них (Nature, Langmuir, Physical Review E) имеют высокий научный рейтинг.

Автореферат содержит в кратком виде всю необходимую информацию, характеризующую полученные в процессе исследования результаты. Основные положения и выводы диссертации полностью соответствуют содержанию диссертации.

Считаю, что диссертационная работа «Динамика ультратонкого слоя жидкости» выполнена на высоком научном уровне и соответствует специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы. Диссертационная работа отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученой степени», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор - Люшнин Андрей Витальевич - заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,

Заведующий лабораторией интенсификации процессов теплообмена

ФГБУН Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения

Российской академии наук

доктор физико-математических наук, профессор

Кабов Олег Александрович

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1,

Телефон: +7(383)3-165-137,

E-mail: kabov@itp.nsc.ru

(Кабов О.А.)

Заранее благодарен

*Генеральный секретарь
К.Ф. - М.И.*



Мамаров М.С.