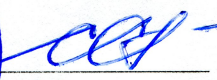




УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной работе
и инновациям ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный университет

 Е.В.Строганова

12 » октября 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию

Люшнина Андрея Витальевича

«Динамика ультратонкого слоя жидкости»,

представленной на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук по специальности

01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность темы диссертации Люшнина А.В., посвященной теоретическому исследованию гидродинамики ультратонкого слоя жидкости, не вызывает сомнения. Задача динамики движения и вопросы структурообразования поверхности тонкого слоя испаряющейся пленки жидкости на твердой горизонтальной подложке имеют большое практическое применение, а результаты используются во многих технологических процессах, как, например, при создании устойчивых наноструктур, в медицинской диагностике и при модификации структур ДНК. Макроскопические ультратонкие пленки, порядка 10–100 нанометров, играют важную роль в таких областях научного знания, как физика, биофизика, химия, а также находят свое применение в различных технологических приложениях.

Диссертационная работа 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** приведено обоснование актуальности данного исследования, определены цели и задачи диссертационной работы, указана научная и практическая значимость работы.

В **главе 1** диссертационной работы представлено исследование текущего состояния проблемы тонких и ультратонких жидких пленок. Рассмотрены как экспериментальные, так и теоретические работы отечественных и зарубежных авторов.

В **главе 2** диссертационной работы проведено численное моделирование динамики испарения ультратонкой пленки жидкости, лежащей на твердой подложке и ограниченной сверху свободной деформируемой границей «жидкость-газ». 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. На суммарной кривой энергии межмолекулярного взаимодействия, в некотором диапазоне, имеется потенциальный барьер. При испарении тонкого слоя воды экспериментально установлено, что при некотором значении толщины первоначально плоская поверхность спонтанно разделяется на участки с двумя разными устойчивыми толщинами. Впервые получены профили движения фронта распространения жидкости. Определена линейная связь между безразмерным параметром испарения и скоростью распространения фронта жидкости. Проведено исследование устойчивости фронта относительно поперечных возмущений. 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 для малых значений волнового числа. В пределе длинноволновых возмущений получено уравнение для декремента возмущений во втором порядке малости. Исследовано уравнение эволюции в трехмерном виде и для малых значений безразмерного числа испарения обнаружена пальцеобразный тип неустойчивости. В ходе сравнения

численного эксперимента с экспериментальными данными обнаруживается качественное сходство результатов.

В главе 3 в рамках длинноволнового приближения, исследовано влияние зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры на устойчивость движения тонкого слоя испаряющейся полярной пленки при подогреве со стороны твердой подложки. Обнаружено, что термокапиллярный эффект приводит к увеличению скорости движения фронта испаряющейся жидкости, по сравнению с задачей, рассмотренной выше. В диапазоне малых значений безразмерного параметра испарения, где имеет место неустойчивость относительно поперечных возмущений, эффект Марангони приводит к увеличению области неустойчивости. Показано, что при увеличении безразмерного числа Марангони происходит повышение устойчивости системы относительно длинноволновой моды.

Глава 4 диссертационной работы посвящена изучению влияния термокапиллярного эффекта на электрогидродинамическую систему. Для двухслойной системы «жидкий диэлектрик-воздух» автором было обнаружено, что при инжекционном процессе образования свободного заряда в жидкости на межфазной границе происходит скачек плотности объемного заряда. В рамках линейной теории устойчивости изучается двухслойная система «жидкий диэлектрик-воздух», заключенная между обкладками плоского конденсатора. Инжекция заряда происходит в жидкость через свободную деформируемую поверхность неизотермической жидкости, коэффициент поверхностного натяжения которой линейно зависит от температуры. Было найдено, что взаимодействие инжекционного и капиллярного механизмов приводит к дестабилизации относительно монотонных возмущений при подогреве со стороны твердой границы. При подогреве со стороны свободной поверхности наблюдается повышение устойчивости системы.

В главе 5 автором, впервые, была получена система эволюционных уравнений относительно толщины слоя и объемной концентрации

сурфактанта для описания динамики поведения ультратонкого слоя жидкости, расположенной на твердой подложке, в рамках длинноволнового приближения. На свободной границе раздела двух сред «жидкость-пар» в начальный момент времени располагается растворимый сурфактант. Исследована устойчивость движения фронта испаряющегося тонкого слоя полярной жидкости при наличии сурфактанта на свободной поверхности для особенного, «замороженного» стационарного состояния. Обнаружены две независимые моды возмущения. Одна из которых определяет поведение концентрационных возмущений, а вторая показывает эволюцию возмущений в процессе движения жидкости при испарении. С увеличением безразмерного параметра испарения устойчивость системы увеличивается, а рост концентрационного параметра Марангони приводит к неустойчивости. Найдены диапазоны потери устойчивости. Обнаружено, что, длинноволновая мода неустойчивости относительно испарения, всегда устойчива по отношению к возмущениям. Во второй части главы исследована устойчивость движения фронта испаряющегося ультратонкого слоя полярной жидкости при наличии сурфактанта на обеих межфазных поверхностях. Для стационарного состояния 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.

Выводы по диссертации приведены по главам, основные результаты сформулированы в общем **заключении** по диссертации.

Материал диссертационной работы изложен четко и ясно, подробно проиллюстрирован рисунками. Содержание работы позволяет сделать заключение, что ее автор провел целенаправленную работу по решению

различных задач для ультратонких слоев жидкости, определяющих динамику поведения и процессы структурообразования в ультратонких пленках.

В диссертации Люшнина А.В. указаны ссылки на использованные результаты работ других авторов. Приведено описание личного вклада автора.

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

Достоверность полученных результатов обеспечивается физически обоснованной постановкой задачи, правомерностью принятых допущений при разработке математических моделей, оценками применимости используемых методов численного решения систем уравнений модели для различных задач и степени адекватности результатов. Также достоверность результатов подтверждается соответствием результатов численных экспериментов с экспериментальными данными и результатами, полученными другими авторами.

Научная новизна представленных в диссертации положений заключается в следующем:

1. Данная работа является первым системным исследованием, посвященным поведению ультратонкого слоя жидкости при различных внешних воздействиях.
2. Численно решена задача эволюции поведения испаряющегося ультратонкого слоя жидкости. Представлена численная трехмерная модель данной задачи. Впервые обнаружено существование пальцеобразной неустойчивости для малых значений безразмерного параметра испарения. Представлено сравнение результатов численного исследования с экспериментальными данными.
3. Изучено эволюционное уравнение для задачи слоя испаряющейся тонкой пленки при наличии термокапиллярного эффекта. Приведены карты устойчивости движения фронта испаряющейся пленки от различных безразмерных параметров.
4. Произведено исследование взаимодействия термокапиллярного и инжекционного механизмов неустойчивости для двухслойной системы

«воздух-слабопроводящая жидкость». Установлено, что при положительных значениях числа Марангони (подогрев твердой границы) из-за термокапиллярного эффекта происходит дестабилизация механического равновесия. При отрицательных числах Марангони порог устойчивости повышается. При подогреве со стороны свободной границы (отрицательные числа Марангони) возможно появление колебательной моды неустойчивости.

5. С использованием теории длинноволновых возмущений получена и исследована устойчивость решений системы эволюционных уравнений, описывающей поведение испаряющейся ультратонкой пленки жидкости при наличии на ее свободной границе растворимого сурфактанта. Впервые обнаружены две различные моды неустойчивости для задачи в представленной постановке. Одна из мод определяет поведение концентрационных возмущений, а вторая показывает эволюцию возмущений в процессе движения жидкости при испарении. С увеличением безразмерного параметра испарения устойчивость системы увеличивается, а рост концентрационного параметра Марангони приводит систему в положение неустойчивости.
6. 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 концентрационного числа Марангони все возмущения для различных типов неустойчивости затухают. При отрицательном числе Марангони имеет место неустойчивость, связанная с механизмом испарения. Для

рассматриваемой автором «сэндвич» - структуры впервые обнаружен колебательный режим.

Публикации, отражающие основное содержание работы. По теме диссертации автором опубликовано 20 работ в рецензируемых периодических изданиях и трудах международных конференций. В журналах из списка, рекомендованных ВАК, по теме диссертации опубликовано 13 статей, все они индексируются в международных индексах цитирования. Количество публикаций удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям. Основные результаты апробированы на международных симпозиумах, всероссийских конференциях и семинарах.

Замечания по диссертации:

1. В диссертационной работе в главах 3 и 5 представлена так называемая «голдстоуновская мода», но в главе 2, при наличии испарения как механизма неустойчивости этот эффект не учтен.
2. В главах 2 и 3 (рис. 2.11, 2.25 и 3.3) приводятся результаты расчетов неустойчивости в виде пальцеобразования, но отсутствует анализ природы их образования и эволюции. Во второй главе об этом кратко упоминается, но поскольку этот результат является в диссертации одним из основных, необходим более детальный анализ причин возникновения такого эффекта.
3. В главе 4, автор указывает на существование двух механизмов проводимости в слабопроводящих жидкостях: омический и инжекционный, не учитывая смешанного режима, следующего из отсутствия их взаимоисключения.
4. При линейном анализе устойчивости волнового фронта тонкой пленки при наличии солитокапиллярного эффекта (глава 5) применяется наиболее простая методика – метод замороженного состояния, однако, применение такого метода требует обоснования, которое в диссертационной работе не приводятся.

Закключение

В научных исследованиях до сих пор не ослабевает интерес к гидродинамике тонких пленок жидкости и как следствие к поведению поверхности раздела двух сред с учетом разных видов межмолекулярных и поверхностных сил, а также эффектов тепломассообмена с учетом и без учета электрического поля. Особенно необходимо отметить интерес к результатам, связанным с развитием теории гидродинамической устойчивости, учитывающей эти дополнительные силы и граничные условия, которые позволяют расширить границы применения теории гидродинамической устойчивости и предоставить дополнительное объяснение возникновению нелинейных структур на поверхности пленки.

Подводя итоги, заключаем, что представленные автором диссертации результаты исследований динамики ультратонкого слоя жидкости, выявляющие причины возникновения и взаимодействия различных механизмов неустойчивости, дают комплексное описание гидродинамических явлений и взаимосвязи между эффектами, представляющими собой полное и углубленное представление о гидродинамике ультратонких слоев. Также можно заметить, что они являются не только значимыми для данного исследования, но и показывают потенциал для дальнейших исследований в области нелинейной динамики тонких пленок жидкости, и приложениях гидродинамической теории устойчивости. Представленное исследование является новым существенным вкладом в теорию гидродинамической устойчивости и моделирование поверхностных волновых структур.

Сделанные ранее замечания не снижают ценности работы.

Диссертационная работа Люшнина А.В. по совокупности полученных результатов и выводов может быть квалифицирована как новое крупное научное достижение в теории течений со свободной границей и в целом в области гидродинамики жидкости. Она представляет собой законченное научное исследование, посвященное теоретическому и экспериментальному изучению поверхностных волновых режимов и переходов между ними.

Исходя из актуальности, новизны и научной значимости данной работы, можно сделать заключение, что диссертация Люшнина Андрея Витальевича «Динамика ультратонкого слоя жидкости», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 - «Механика жидкости, газа и плазмы», выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет всем критериям п.9 «Положение о присуждении ученых степеней», предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор Люшнин Андрей Витальевич, заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук.

Данный отзыв обсужден на заседании кафедры прикладной математики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» 11 октября 2019 года (Протокол №4).

Отзыв составлен:

доктор физ.-мат. наук,
профессором кафедры
прикладной математики

Калайдин Евгений Николаевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет»

Почтовый адрес: 350040, Россия

г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.

Телефон +7 (861) 219-95-02

Эл. почта rector@kubsu.ru

Сайт <http://www.kubsu.ru>

