



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТ СО РАН
член-корр. РАН Д.М. Маркович

2018 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация на соискание степени доктора физико-математических наук «Динамика ультратонкого слоя жидкости» выполнена на кафедре теоретической физики и компьютерного моделирования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета».

В период подготовки диссертации соискатель – Люшнин Андрей Витальевич работал в Федеральном Государственном Бюджетном Образовательном Учреждении Высшего Образования «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет» на кафедре теоретической физики и компьютерного моделирования в должности доцента. В 1992 г. окончил Пермский государственный университет по специальности «Физика». В период с 1992 по 1995 года проходил обучение в очной аспирантуре физического факультета Пермского государственного педагогического университета. В 1998 защитил кандидатскую диссертацию «Влияние термокапиллярного эффекта на электроконвективную неустойчивость при инъекции заряда через свободную поверхность» в Пермской государственном университете. Диплом кандидата наук КТ № 059806.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность работы. Диссертация посвящена исследованию поверхностных явлений в тонких пленках полярной жидкости. В последние двадцать лет, с развитием нанотехнологий, особый интерес стали представлять исследования явлений на границе раздела двух сред и влияние на них межмолекулярных и поверхностных сил. Свободная энергия слоя жидкости складывается из суммы его объемной и поверхностной энергий, при этом в случае уменьшения толщины слоя объемная энергия снижается и поверхностные межмолекулярные взаимодействия становятся фактором, определяющим движения слоя жидкости. Макроскопические ультратонкие пленки, с толщиной до 1000 ангстрем, играют важную роль в эффектах, находящихся на стыке интересов таких наук, как физика, биофизика и химия, а также в многочисленных технологических приложениях. Особый характер динамики движения и структурообразования поверхности ультратонкого слоя испаряющейся пленки полярной жидкости на твердой горизонтальной подложке используется во многих технологических процессах, как, например, создание устойчивых наноструктур, медицинская диагностика или модификация структур ДНК. Одной из особенностей ультратонких слоёв жидкостей является то, что при толщине порядка сотен ангстрем свободная энергия Гиббса немонотонно зависит от высоты слоя пленки, благодаря чему она имеет два устойчивых значения. На сегодняшний день существует немногочисленные работы по описанию одновременного влияния

межмолекулярных и электрических сил на движение ультратонкого слоя жидкости. Таким образом, выбранная тематика диссертационного исследования является актуальной и практически значимой.

Цели и задачи исследования. Диссертация посвящена теоретическому исследованию динамики движения и структурообразования поверхности тонкой пленки полярной жидкости при воздействии различных поверхностных эффектов и внешних сил. Для достижения цели были поставлены следующие основные задачи:

1. Изучение поведения тонкого слоя полярной жидкости, расположенного на твердой подложке и имеющего свободную границу «жидкость – пар» при наличии испарения. Сравнение полученных теоретических и численных результатов с экспериментальными данными.
2. Проведение исследования эволюционного уравнения, описывающего влияние эффекта Марангони на динамику движения свободной поверхности «жидкость – пар» тонкого слоя испаряющейся полярной жидкости.
3. Исследование устойчивости тонкого слоя полярной жидкости, при наличии термокапиллярного эффекта, относительно возмущений на межфазной границе «жидкость – пар». Определение диапазонов параметров, для которых имеет место пальцеобразная неустойчивость.
4. Рассмотрение задачи о взаимодействии термокапиллярного и инжекционного механизмов неустойчивости для двухслойной системы «жидкость – воздух», находящейся в электрическом поле.
5. Исследование системы эволюционных уравнений в рамках длинноволнового приближения для толщины слоя и объемной концентрации для испаряющегося тонкого слоя полярной жидкости при наличии растворимого сурфактанта. Изучение различных типов неустойчивости данной системы.
6. Анализ устойчивости тонкого слоя испаряющейся жидкости в присутствии сурфактанта на обеих межфазных границах. Изучение механизмов взаимодействия различных видов неустойчивости.

Научная новизна основных положений, результатов и выводов, полученных в диссертации заключается в том, что в работе проведено теоретическое исследование динамики движения тонкого слоя полярной жидкости. Особенность полярной жидкости состоит в том, что энергия межмолекулярного взаимодействия слоя жидкости является немонотонной функцией от его толщины. Она складывается из суммы ван-дер-ваальсовский (дисперсионной) силы притяжения и электрических сил отталкивания. Силы электрического отталкивания двух одинаковых частиц изменяются по экспоненциальному закону, а дисперсионные силы – по степенному. Таким образом, на суммарной кривой энергии межмолекулярного взаимодействия, в некотором диапазоне, имеется потенциальный барьер.

В рамках длинноволнового приближения получено эволюционное уравнение, описывающее динамику изменения толщины слоя со временем. Впервые получены профили движения фронта испаряющейся 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. Впервые проведено численное исследование уравнения эволюции в трехмерном виде и для малых значений безразмерного числа испарения обнаружен «пальцеобразный» тип неустойчивости. В ходе сравнения численного эксперимента с экспериментальными данными обнаруживается качественное сходство результатов.

В длинноволновом приближении исследовано влияние зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры на устойчивость движения ультратонкого 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. Впервые показано, что при увеличении безразмерного числа Марангони происходит повышение устойчивости системы относительно длинноволновой (голдстоуновской) моды. При дальнейшем росте безразмерного числа испарения, когда движение фронта жидкости устойчиво по отношению к любым модам возмущений, наличие эффекта Марангони влечет за собой уменьшение устойчивости.

Автором была исследована система эволюционных уравнений толщины слоя и объемной концентрации сурфактанта для описания динамики поведения тонкого слоя полярной жидкости, расположенного на твердой подложке. На свободной границе раздела двух сред «жидкость – пар» в начальный момент времени располагается растворимый сурфактант. Задается величина и характер растворения на поверхности ПАВ в объем жидкости. В рамках длинноволнового приближения исследована устойчивость движения фронта испаряющегося тонкого слоя полярной жидкости при наличии сурфактанта на свободной поверхности для особенного, «замороженного» стационарного состояния. Для такого состояния обнаружены две независимые моды. Одна из них 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 числа Марангони приводит систему в положение неустойчивости. Найдены диапазоны параметров, при которых первоначально устойчивое состояние тонкого слоя жидкости переходит в неустойчивое. Обнаружено, что голдстоуновская мода неустойчивости относительно испарения всегда устойчива по отношению к возмущениям. Численные расчеты качественно подтверждают результаты линейной теории. Тип структурообразования на поверхности испаряющейся пленки при наличии сурфактанта имеет существенные отличия от эффектов при испарении пленки в отсутствие сурфактанта.

Проведено исследование устойчивости движения фронта испаряющегося ультратонкого слоя полярной 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 показывает эволюцию возмущений в процессе движения жидкости при испарении. С увеличением безразмерного параметра испарения устойчивость системы увеличивается. Для всех положительных значений безразмерного числа Марангони возмущения для различных типов неустойчивости затухают. При отрицательном числе Марангони имеет место неустойчивость, связанная с механизмом испарения. Для рассматриваемой нами «сэндвич»-структуры обнаружен колебательный режим, что также имеет место и в эксперименте. Найдены качественные совпадения результатов теоретического исследования с полученными в эксперименте данными.

В рамках линейной теории устойчивости изучается двухслойная система «жидкий полярный 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. Показано, 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. Для инжекционного

механизма электроконвективной неустойчивости найдены две нижние моды. Обнаружена область параметров системы, в которой существует колебательная мода неустойчивости, найдена зависимость частоты колебаний от волнового числа.

Теоретическая и практическая ценность работы. Полученные результаты могут быть использованы в областях нанотехнологий, создания биохимических структур и полимерных пленок. Следует отметить, что часть задач, представленных в диссертации, была предложена создателями физических и химических экспериментов по исследованию структурообразования на поверхности ультратонкой водяной пленки. На основе сравнения численных и экспериментальных результатов была разработана методика измерения толщины и определения профиля испарения ультратонкого слоя жидкости.

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием апробированных методик расчетов и подтверждается хорошим их согласием как с данными серии тестовых опытов с различными начальными условиями, так и с экспериментальными работами, доступными в открытой печати.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты расчетов по профилю фронта движения испаряющейся тонкой пленки при различных значениях безразмерного параметра испарения.
2. Проведение анализа устойчивости уравнения эволюции для возмущений, направленных перпендикулярно по отношению движения фронта пленки полярной жидкости.
3. Результаты расчетов трехмерной задачи по изучению проведения движения тонкой пленки испаряющейся полярной жидкости.
4. Результаты расчетов эволюции движения фронта пленки полярной жидкости при наличии эффекта Марангони на свободной межфазной границе «жидкость – пар» и анализ устойчивости движения испаряющегося слоя тонкой полярной пленки в присутствии термокапиллярного эффекта.
5. Результаты задачи конвективной неустойчивости слабопроводящей полярной неизолированной жидкости при инъекции свободного заряда в жидкость через межфазную границу «жидкость – воздух» и наличии на этой границе термокапиллярного эффекта.
6. Вывод эволюционного уравнения толщины слоя испаряющейся жидкости при наличии на поверхности растворимого сурфактанта. Обсуждается различие процессов структурообразования на свободной поверхности при наличии и отсутствии сурфактанта.
7. Результаты расчетов по профилю фронта движения испаряющейся тонкой пленки при различных значениях безразмерного параметра концентрационного числа Марангони.
8. Результаты задачи устойчивости тонкой испаряющейся пленки при наличии на обеих границах сурфактанта.

Личный вклад автора. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в постановке задачи, создании математических моделей, создании программных средств для решения задач, проведении вычислений, анализе полученных данных. В работе [1] автору принадлежит постановка задачи, численный расчет и анализ полученного решения. В работе [3] автору принадлежит вывод системы ЭГД-уравнений в данной постановке, им выполнены вычисления и анализ полученных результатов. В работе [4] автору принадлежат вывод эволюционного уравнения в безразмерном виде, все расчеты, вывод уравнения для поперечных возмущений относительно движения фронта тонкого слоя полярной жидкости, вывод уравнения и анализ эволюции для второй поправки малости для декремента поперечных возмущений. Также автору принадлежат все трехмерные вычисления. В серии работ [5–7] вклад автора состоит в численном моделировании и анализе полученных результатов, а также в их сравнении с экспериментальными данными. Вкладом автора в работы [8–10,12] является постановка задачи, анализ полученных результатов, а также трехмерные вычисления.

Наконец, в работах[11,13-15] автору принадлежат постановка задачи и анализ полученных результатов.

Работы, опубликованные автором в перечне ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК:

1. Birikh R.V., Lyushnin A.V. Convective instability of dielectric liquid subjected to unipolar injection of charge trough free surface // IEEE International Conference on Conduction & Breakdown in Dielectric Liquids, 1996, P. 77 – 80.
2. Lyushnin A.V. Charge distribution in the two-liquid layers condensator under the injection mechanism of conductivity // IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, 1999 P. 90 - 93.
3. Бирих Р.В., Люшнин А.В. Влияние конвекции Мараногони на инжекционный механизм неустойчивости // Журнал технической физики, 2000. – Т.70, № 70, Вып.1. – С. 19-24;
4. Lyushnin A.V., Golovin A.A., Pismen, L.M. Fingering instability of thin evaporating liquid films // Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics. 2002. – Vol.65. – P. 021602/1 - 021602/7.
5. Leizeron, I., Lipson, S.G., Lyushnin, A.V. When larger drops evaporate faster // Nature. 2002. – Vol. 422. – P. 395 – 396.
6. Leizeron, I., Lipson, S.G., Lyushnin, A.V. Symbiosis of different-sized drops // Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics. 2003. – Vol.68. – P. 051601/1-051601-5.
7. Leizeron, I., Lipson, S.G., Lyushnin, A.V. Finger instability in wetting-dewetting phenomena // Langmuir. 2004. – Vol.20, № 2. P. 291 — 294.
8. Gordeeva V.Yu., Lyushnin A.V. Influence of Marangoni instability on evaporation of the polar liquid film // European Physical Journal, Special Topics. 2013. – Vol. 219. – P.45-49.
9. Гордеева В.Ю., Люшнин А.В. Влияние термокапиллярного эффекта на динамику и устойчивость движения испаряющейся тонкой пленки // Журнал технической физики, 2013. – Т. 83, Вып. 3. – С. 41-47;
10. Гордеева В.Ю., Люшнин А.В. Особенности испарения тонкого слоя воды в присутствии растворимого сурфактанта // Журнал технической физики. 2014. – Т. 84, Вып. 5. – С. 28-34.;
11. Люшнин А.В., Pismen L. Исследование устойчивости тонкой водяной испаряющейся пленки при наличии на свободной поверхности растворимого сурфактанта // Журнал технической физики. 2015. – Т. 85, Вып. 5. – С. 152-154.;
12. Gordeeva V.Yu., Lyushnin A.V. Evaporation of thin film of polar liquid in presence of soluble surfactant // Advanced Material Research. 2015. – Vol.1105. P. 105 — 109.
13. Gordeeva V.Yu., Lyushnin A.V. Numerical simulation and stability analysis of solutocapillary effect in ultrathin films // European Physical Journal, Special Topics. 2017. – Vol. 226. – P.1219–1228.
14. Gordeeva V.Yu., Lyushnin A.V. Dynamics of an evaporating thin film of polar liquid with solutocapillary Marangoni effect and capillary osmosis // Surface & Coatings Technology. 2017. – Vol. 320. – P.531–535.
15. Gordeeva V.Y., Lyushnin A.V. Numerical investigation of thin film of polar liquid with added surfactant // Journal of Physics: Conference Series. –2017. –V.925. – P.012021-012027.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на Международной Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь, 1998-2016), III Международной конференции "Современные проблемы электрогидродинамики и электрофизики жидких диэлектриков", (С.-Петербург, 1994), International workshop "Non-gravitational mechanism of convection and heat/mass transfer" (Zvenigorod, 1994), XII International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquid (Roma, 1996), XIII International Conference of Dielectric Liquid, Japan, Nara, 1999, 3-ей Всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2007 (С. -Петербург, 2007), 6th Conference of the International Marangoni Association (Haifa, 2012), International Conference "Fluxes and structures in fluids", (S.-Peterburg, 2013), 8th International Topical Team Workshop on Two-Phase Systems for Ground and Space Applications (Bremen, 2013), 8th Conference of the International Marangoni Association (Bonn, 2016), 8th International Conference on Technological Advances on Thin Film and Coating Technologies (Singapore 2016), 6-ая Всероссийская конференция с международным участием «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения» (Барнаул, 2017). Кроме этого, результаты работ по теме диссертации докладывались и обсуждались на Пермском гидродинамическом семинаре им. Г.З. Гершуни и Е.М.Жуховицкого.

Решение о рекомендации работы к защите

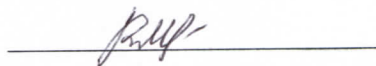
Диссертация «Динамика ультратонкого слоя жидкости» Люшнина Андрея Витальевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Заключение принято на заседании семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки под руководством член-корреспондента РАН Д.М. Марковича

Присутствовало на заседании 22 чел., в том числе 1 академик РАН, 2 члена-корреспондента РАН, 10 докторов и 7 кандидатов наук. Результаты голосования: "за" – 22 чел., "против" – 0 чел., "воздержалось" – 0 чел., протокол № 9-2018 от "17" декабря 2018.



Председатель семинара
Маркович Д.М., д.ф.-м.н., член-корр. РАН



Секретарь семинара
Муляджанов Р.И., к.ф.-м.н., с.н.с.
лаборатории физических основ
энергетических технологий ИТ СО РАН

