

Утверждаю

Ректор ФГБОУ ВО «Пермского  
государственного гуманитарно-  
педагогического университета»,  
кандидат ф.-м.н., профессор

  
А.К. Колесников  
  
« 0 » сентября 2017 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального Государственного Бюджетного Образовательного Учреждения  
Высшего Образования «Пермский государственный гуманитарно-педагогический  
университет»

**Председатель семинара** - зав. кафедрой, д.ф.-м.н. (01.02.05) Козлов В.Г.

**Секретарь семинара**- к.ф.-м.н. (01.02.05) Субботин С.В.

#### ПРИСУТСТВОВАЛИ:

1. Козлов В.Г., д.ф.-м.н. (01.02.05), заведующий кафедрой ПГГПУ;
2. Браун Д. А., д.ф.-м.н. (01.02.05), профессор ПГГПУ;
3. Мызников В.М. к.ф.-м.н. (01.02.05), доцент ПГГПУ;
4. Шаров М.Т. к.ф.-м.н.(01.02.05), доцент ПГГПУ;
5. Полежаев Д.А. к.ф.-м.н. (01.02.05), доцент ПГГПУ;
6. Вяткин А.А..к.ф.-м.н. (01.02.05), заведующий кафедрой ПГГПУ;
7. Щипицин В.Д. к.ф.-м.н. (01.02.05), доцент ПГГПУ;
8. Субботин С.В к.ф.-м.н. (01.02.05), доцент ПГГПУ;
9. Кузаев А.Ф. к.ф.-м.н. (01.02.05), доцент ПГГПУ;

Диссертация «Динамика ультратонкого слоя жидкости» выполнена на кафедре теоретической физики и компьютерного моделирования «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 1992г. окончил Пермский государственный университет по специальности «Физика». 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:

- 1. Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации,** заключается в постановке задачи, создании математических моделей, создании программных средств для решения задач, проведении вычислений, анализе результатов. В работах [1-2] автору принадлежит постановка задачи, численный расчет и анализ полученного решения. В работе [3] автору принадлежит вывод системы ЭГД уравнений в данной постановке, вычисления и анализ полученных результатов. В работе [4] автору принадлежит 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 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 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 принадлежит постановка задачи и анализ полученных результатов.
- 2. Степень достоверности результатов, проведенных соискателем ученой степени исследований.** Достоверность научных результатов, полученных А.В. Люшным при выполнении диссертационной работы, не вызывает сомнений. Надежность результатов обеспечивается хорошо продуманной методикой расчетов, серией тестовых опытов с различным шагом сетки и различными начальными условиями, хорошей согласованностью результатов с известными данными других авторов, полученными ранее для некоторых предельных ситуаций.
- 3. Новизна результатов проведенных соискателем ученой степени исследований** заключается в том, что: в диссертации проведено теоретическое исследование динамики движения ультратонкого слоя полярной жидкости. Особенность полярной жидкости заключается в том, что энергия межмолекулярного взаимодействия жидкости является не монотонной функцией толщины слоя. Она складывается из суммы ван-дер-ваальсового взаимодействия частиц и взаимодействия, обусловленного перекрытием двойных электрических слоёв для межфазных поверхностей «твердое тело-жидкость» и «жидкость-пар». В этом случае, для фиксированного значения химического потенциала жидкости имеет место наличие двух устойчивых значений толщины слоя. В рамках длинноволнового приближения

получено эволюционное уравнение, описывающее динамику изменения толщины слоя со временем. 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 значениях волнового числа. В пределе длинноволновых возмущений получено уравнение для декремента возмущений во втором порядке малости. Впервые численно исследовано уравнение эволюции в трехмерном виде, и для малых значений безразмерного числа испарения обнаружен пальцеобразный тип неустойчивости. Также для данной задачи исследована зависимость устойчивости движения фронта испаряющейся жидкости от шероховатости границы раздела «твердое тело-жидкость». 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 области малых значений безразмерного параметра испарения, где имеет место неустойчивость относительно поперечных возмущений, эффект Марангони приводит к увеличению области неустойчивости. Также стоит отметить, что впервые было 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 впервые была математически выведена система эволюционных уравнений относительно толщины слоя и объемной концентрации сурфактанта для описания динамики поведения тонкого слоя полярной жидкости, расположенной на твердой подложке, в рамках длинноволнового приближения. На свободной границе раздела двух сред «жидкость-пар» в начальный момент времени располагается растворимый сурфактант. Дается значение и характер растворения расположенного на поверхности сурфактанта в объем жидкости. 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 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 систему в положение неустойчивости. Найдены диапазоны параметров, при которых первоначально устойчивое состояния 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. Новизна полученного результата заключается в том, что тип структурообразования на поверхности испаряющейся пленки при наличии сурфактанта имеет существенные отличия от испаряющейся пленки в отсутствие сурфактанта. 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. Рост концентрации на свободной границе приводит к потере устойчивости системы, тогда как рост концентрации на границе «твердое тело-жидкость» приводит к стабилизации системы. Для рассматриваемой нами «сэндвич»-структуры обнаружен колебательный режим, что также имеет место и в эксперименте.

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. 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. Для инжекционного механизма электроконвективной неустойчивости найдены две нижние моды. Обнаружены параметры системы, при которых имеется колебательная мода неустойчивости, найдена зависимость частоты колебаний от волнового числа.

4. **Практическая значимость результатов, проведенных соискателем ученой степени исследований,** заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы в области нанотехнологий, биохимических структур и полимерных пленок. Следует отметить, что часть задач, представленных в диссертации, были предложены создателями физических и химических — экспериментов по исследованию структурообразования на поверхности водной тонкой пленки. На основе сравнения численных и экспериментальных результатов была разработана методика измерения толщины и профиля испаряющихся тонких водных пленок.
5. **Научная специальность, которой соответствует диссертация** — «Механика жидкости, газа и плазмы» 01.02.05.

**6. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени.**

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), 6<sup>th</sup> Conference of the International Marangoni Assosiation (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.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 15 работах.

**7. 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 Марангони 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.

#### **В других изданиях:**

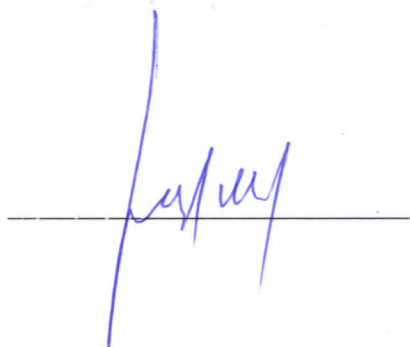
1. Гордеева В.Ю., Люшнин А.В. Влияние термокапиллярного эффекта на скорость распространения фронта тонкого слоя испаряющейся полярной жидкости // Конвективные течения: сборник научных статей / Под общ. ред. В.Г. Козлова. — Пермь: ШТПУ. - 2011 - С. 53-59.
2. Люшнин А.В., Гордеева В.Ю. Исследование устойчивости движения фронта испаряющейся тонкой водяной пленки при наличии растворимого сурфактанта // Конвективные течения: сборник научных статей / Под общ. ред. В.Г. Козлова. — Пермь: ПГГПУ, 2013. - Вып. 6. — С. 9-17.
3. Гордеева В.Ю., Люшнин А.В. Исследование влияния поверхностно- активного вещества на движение тонкого слоя жидкости в длинноволновом приближении // XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь, 18 — 19 февраля 2013 г. Тезисы докладов. — Пермь, 2013.- С. 105.
4. Gordeeva V.Yu., Lyushnin A.. The motion of spreading surfactant on thin film of polar liquid // Proceeding of International Conference “Fluxe and structures in fluids”, June 25-28, 2013 , Saint-Petersburg. —М.: MAKS Press, 2013.- P.122-125.
5. Gordeeva V.Y., Lyushnin A.V. Study of the effect of spreading surfactant on thin films of polar liquids // Book of abstract of 8<sup>th</sup> International Topical Team Workshop on Two-Phase System for Ground and Space Applications. September 16-19, 2013, Bremen.- Universitat Bremen Press, 2013.- P.82-83.

Публикации полностью соответствуют теме диссертационного исследования и раскрывают её основные положения.

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 совместном заседании кафедры общей и экспериментальной физики и кафедры теоретической физики и компьютерного моделирования ФГБОУ ВО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет»

Присутствовало на заседании 9 чел. Результаты голосования: "за" —9 чел., "против" —0 чел., "воздержалось" —0 чел., протокол № 3 от "б" сентября 2017 г. |



Козлов Виктор Геннадьевич

д. ф.-м. н., профессор, кафедра общей и экспериментальной физики, заведующий кафедрой

