

## О Т З Ы В

на автореферат диссертационной работы 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.

Диссертационная работа А.В. Люшнина посвящена аналитическому и численному изучению эволюции свободной поверхности в процессе испарения ультратонкой жидкой пленки на абсолютно смачиваемой твердой подложке при одновременном влиянии межмолекулярных и электрических сил, с учетом термокапиллярного течения, а также присутствия растворимого поверхностно-активного вещества (ПАВ) на межфазной поверхности. Актуальность темы исследования обусловлена достаточно большой распространенностью испаряющихся капель и пленок в различных практических приложениях и технологических процессах, например, таких, как охлаждение нагретых поверхностей электронных устройств, диагностика в медицине, формирование функциональных покрытий, структурирование поверхности, литографическая печать и многих других. Научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в выявлении на микро- и нано- уровне причин, механизмов, характеристик и особенностей движения и структурообразования очень тонких пленок при различном, достаточно сложном и комплексном внешнем воздействии. Теоретическая и практическая значимость проведенного диссертационного исследования состоит в принципиальных возможностях определения эффективных параметров для управления процессом массопереноса в высыхающей пленке жидкости и прогнозирования получения рельефного покрытия нужной формы и размера на твердой поверхности.

Вопрос о границах применимости приближения механики сплошных сред и правомерности его использования для ультратонких жидких пленок толщиной 1-10 нм является весьма дискуссионным, однако, такая модель, как, собственно, и любое другое теоретическое приближение, вполне имеет право на существование, если позволяет получить результаты, представляющие несомненный интерес, предсказывающие новые неожиданные эффекты и дающие стимул для их дальнейшей экспериментальной проверки. С этой точки зрения, предложенный автором оригинальный новаторский подход к изучению задачи и полученные им новые результаты, без сомнения, могут быть квалифицированы как крупное научное достижение, имеющее важное практическое значение для развития отрасли микро- и нано- флюидики.

По содержанию автореферата имеются следующие замечания:

1. В работе отсутствуют размерные оценки основных определяющих параметров, без которых не ясно, могут ли обнаруженные автором новые эффекты действительно реализоваться в реальных условиях, в частности:
  - а) каким перепадам и градиентам температуры соответствуют числа Марангони  $=25$  и возможно ли в принципе (и каким образом?) достижение этих значений на таком тонком слое?



- б) поскольку поверхностный слой жидкости на самом деле представляет собой некоторую протяженную переходную (по плотности) зону, не превышает ли его толщина высоту наблюдаемых "бугорков" и "гребней"?
- в) на каком горизонтальном размере происходит переход "ступеньки" из одного стационарного состояния толщины жидкого слоя в другое (Рис. 1)?
- г) каковы фактические времена испарения тонкой пленки и как они соотносятся с характерными временами развития неустойчивостей?
- д) какая должна быть по величине  $\text{min}$  шероховатость подложки, чтобы предсказанные режимы удалось наблюдать в физическом эксперименте?
- е) при применении "замороженного" метода к изучению устойчивости нестационарного состояния, является ли скорость изменения основного состояния существенно меньше, чем скорости роста возмущений?
- ж) проводилась ли в работе численная оценка величины возможных поляризационных зарядов на свободной поверхности, которыми автор пренебрегает по сравнению с Ван-дер-Ваальсовым взаимодействием?
2. В автореферате присутствует упоминание о хорошем согласии полученных результатов с экспериментом, но сами экспериментальные данные по необъяснимой причине отсутствуют, так что это невозможно проверить. Между тем, сравнение с экспериментом является важнейшим ключевым критерием для подтверждения обоснованности примененной автором модели и достоверности полученных численных результатов.
  3. В самом тексте диссертации и в публикациях автора [2-3] упомянутые эксперименты представлены и описаны. Однако, утверждение о "количественном" согласии представляется слишком необоснованным. Речь скорее может идти лишь о "качественном" соответствии, поскольку нет полного совпадения всех необходимых параметров задачи.
  4. Очевидно, что в рамках длинноволнового приближения невозможно объяснить существование капиллярного гребня, представленного на Рис. 1б и Рис. 4б, но в тексте автореферата не приводятся пояснений по поводу физического механизма образования таких поверхностных структур. Судя по тому, что эти результаты входят в перечень основных, на мой взгляд, следовало бы подробно объяснить существующий эффект.
  5. Физический смысл безразмерного коэффициента испарения, играющего важную роль в описании динамики процесса, также не пояснен и непонятен.
  6. При испарении жидкой пленки концентрация ПАВ в ее объеме существенно повышается, однако, это изменение в задаче не учитывается. В уравнении для концентрации отсутствует слагаемое, ответственное за приток ПАВ.
  7. В автореферате отсутствуют оценки погрешностей расчетов и адекватности численной реализации математических моделей.
  8. Количество основных положений, выносимых на защиту, в диссертации и автореферате отличается (соответственно 10 и 8). Также, в тексте автореферата и диссертации, к сожалению, присутствует достаточно большое количество неисправленных опечаток и неудачных выражений.



Сделанные замечания, тем не менее, не умаляют достоинств работы А.В. Люшнина. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу на актуальную тему, выполненную на высоком теоретическом уровне. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 13 статьях из рекомендованного списка ВАК, в том числе в достаточно высоко рейтинговых рецензируемых научных изданиях. По содержанию и оформлению рассматриваемая диссертационная работа «Динамика ультратонкого слоя жидкости» соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям Положением ВАК № 842 от 24.09.2013 (ред. от 01.10.2018) "О порядке присуждения ученых степеней", а ее автор Люшнин Андрей Витальевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05.

Я, Зуев Андрей Леонидович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Люшнина Андрея Витальевича, и их дальнейшую обработку.

Зуев Андрей Леонидович,  
доктор физико-математических наук (01.02.05),  
доцент, старший научный сотрудник  
лаборатории гидродинамической устойчивости  
Института механики сплошных сред – филиала  
ФГБУН "Пермский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук",

614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1.  
Тел. +7 (342) 237-83-14, E-mail: zal@icmm.ru

05.11.2019



/ А.Л. Зуев

Подпись Зуева А.Л. удостоверяю:  
Ученый секретарь ИМСС УрО РАН

/ Н.А. Юрлова