

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Демина Виталия Анатольевича на диссертацию **Люшнина 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 **Люшнина Андрея Витальевича** посвящена теоретическому исследованию динамики ультратонких слоев жидкости и сопутствующих явлений, которые определяют поведение гидродинамических систем со свободной поверхностью. Еще недавно нанофизика и нанотехнологии казались чем-то искусственным и надуманным в науке, и они рассматривались исключительно в контексте той или иной классической дисциплины, типа физики твердого тела или теории магнетизма, как некая часть уже сложившейся области знания, немного выходящая за рамки общепринятых канонов и с неопределенными перспективами развития. Однако, необходимо признать, что за последнюю пару десятилетий нанотехнологии выросли в целую отрасль знания со своими методами экспериментальных исследований, законами и теоретическими подходами. По совокупности все это приводит к более глубокому пониманию и возможности прямого управления поведением разнообразных наноразмерных систем, что позволяет в настоящее время создавать новые материалы с уникальными свойствами, без которых невозможно развитие таких отраслей как биотехнологии, приборостроение и микросистемная техника, химическое производство и энергетика. Можно констатировать, что сегодня нанофизика развивается в соответствии с методологией трех изначально разных наук физики, химии и технического материаловедения, которые, двигаясь навстречу друг другу, и породили такое направление как нанотехнологии.

В этом смысле диссертационная работа **Люшнина Андрея Витальевича** «Динамика ультратонкого слоя жидкости» представляет собой исследование родственных физических процессов и объектов с характерным масштабом от 10 до 100 нм с использованием методов межфазной гидродинамики, теории гидродинамической устойчивости и механики сплошных сред. Перечисленные науки базируются на законах классической механики и поэтому должны применяться к описанию микроскопических объектов с чрезвычайной осторожностью. Конечно, до полноценного применения квантовой механики характерные масштабы, рассматриваемые в диссертации, еще не дотягивают, но с серьезными ограничениями на применение закономерностей механики сплошных сред можно легко столкнуться при описании подобных систем. В частности, на данных масштабах существенную

роль начинают играть законы молекулярной физики и электродинамики, несмотря на то, что в целом система остается макроскопической и электронейтральной. В дополнение при описании подобных систем нельзя игнорировать поверхностные явления. Процессы, протекающие в объеме микроскопических объектов, перестают давать решающий вклад в общее поведение системы, так что он становится сопоставимым с вкладом поверхностных явлений.

Таким образом, можно утверждать, что диссертационное исследование А.В. Люшнина носит в определенном смысле пограничный характер и выходит за рамки уже сложившихся наук, что делает его в какой-то мере дискуссионным. Однако представляется, что докторские диссертации как раз и должны быть таковыми, т.е. они призваны значительно расширять границы нашего знания. Поэтому работа А.В. Люшнина заслуживает внимательного изучения, детального разбора, публичной защиты основных положений и обсуждения.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, четырех глав с результатами исследований, заключения и списка литературы. Ее общий объем – 296 страниц; материал включает 70 различных иллюстраций и графиков. Список литературы содержит 374 наименования.

Во введении обосновывается **актуальность** рассматриваемой тематики, формулируется **цель** работы и дается краткая характеристика диссертации. В том числе перечисляются основные положения, выносимые на защиту, обосновывается **достоверность** изложенных в диссертационном исследовании результатов и указан личный вклад автора в ходе их получения, т.к. подавляющее большинство публикаций диссертанта выполнено совместно с разными (в том числе зарубежными) соавторами.

В первой главе, которая представляет собой обзор литературы по рассматриваемой тематике, проанализировано современное состояние исследований в РФ и за рубежом. Проводится обстоятельный обзор экспериментальных данных, и обсуждаются теоретические подходы при решении задач, связанных с гидродинамическим поведением тонких пленок. С достаточной степенью подробности выведены основные уравнения, позволяющие описать динамику ультратонкого слоя жидкости с учетом электрохимического взаимодействия, а также термокапиллярных и концентрационно-капиллярных эффектов на границе раздела жидкость-газ.

Вторая глава является логическим следствием предыдущей. После прочтения первой главы вполне обоснованно вырисовывается более узкая формулировка задачи, которую автор ставит перед собой для последующего рассмотрения. А именно, во второй главе проведено исследование динамики испарения ультратонкой пленки полярной жидко-

сти, которая лежит на твердой подложке и ограничена сверху деформируемой свободной границей. Расчеты согласуются с экспериментальными данными в том смысле, что при некоторой начальной толщине слоя первоначально плоская свободная поверхность жидкости спонтанно разделяется на участки с двумя разными устойчивыми значениями толщины. Причиной подобного поведения является конкуренция молекулярных (дальнодействующих) ван-дер-ваальсовых сил и электрических (короткодействующих) сил, возникающих в подобной системе благодаря взаимодействию двойных электрических слоев. Для некоторых фиксированных значений безразмерного параметра испарения построены графики зависимости толщины пленки от продольной координаты в разные моменты времени, которые показывают наличие ярко выраженного волнового фронта, движение которого происходит в направлении, отвечающем уменьшению области занимаемой более толстой пленкой. Исследована устойчивость волнового фронта относительно малых поперечных возмущений и проведено прямое 3D численное моделирование движения волнового фронта в надкритической области параметров. Показано, что периодичность волнового рельефа неплохо согласуется с длиной волны наиболее опасных возмущений в линейной теории. Проведено сравнение экспериментальных данных по испарению капель полярной жидкости (согласно которым на внешних границах капель действительно образуется пальцеобразная неустойчивость) с результатами соответствующих расчетов.

В третьей главе продолжает рассматриваться ультратонкая испаряющаяся пленка, лежащая на твердой подложке и имеющая свободную деформируемую поверхность. Однако теперь подложка и пар имеют разные температуры, т.е. в дополнение к первичной динамической задаче появляется серьезный осложняющий фактор в виде термокапиллярных сил на свободной поверхности.

Четвертая глава стоит несколько особняком в диссертации, т.к. в ней изучается влияние термокапиллярного эффекта на устойчивость слоя слабопроводящей жидкости конечной толщины. Электрогидродинамическая система по-прежнему характеризуется наличием верхней свободной деформируемой границы, на которой имеется инъекция свободных зарядов. Исследуется линейная устойчивость этой системы относительно плоских монотонных и колебательных возмущений. Расчеты показали, что в диапазоне рассмотренных значений числа Марангони при подогреве со стороны свободной границы, несмотря на то, что колебательная мода присутствует на нейтральных кривых, тем не менее, наиболее опасными являются монотонные возмущения.

В главе 5 автор возвращается к изучению ультратонких пленок полярных жидкостей. Эта глава логически замыкает диссертационное исследование, создавая ощущение полноты, т.к. в ней рассматривается влияние еще одной мощной силы, которую, как пра-

вило, нельзя игнорировать в задачах со свободной поверхностью. Здесь имеется в виду концентрационно-капиллярный эффект. Таким образом, рассматривается динамика ультратонкой пленки жидкости с деформируемой границей раздела при наличии растворимого сурфактанта на свободной поверхности и с учетом испарения молекул несущей жидкости. Нелинейный расчет показывает, что при наличии сурфактанта понятие скорости движения волнового фронта между двумя устойчивыми значениями толщины утрачивает смысл, т.к. слой с большей толщиной оказывается неустойчивым по отношению к коротковолновым возмущениям.

В том же приближении решена задача об устойчивости испаряющейся ультратонкой пленки, находящейся на твердой подложке и имеющей деформируемую верхнюю границу, но при наличии сурфактанта на обеих границах раздела. На устойчивость относительно малых возмущений исследовалось состояние, которое само является эволюционным процессом, связанным с испарением и изменением концентрации сурфактанта в объеме и на обеих межфазных границах. Анализ устойчивости основывался на предположении о замороженности основного состояния по отношению к быстро меняющимся малым возмущениям. Найдены значения параметров, при которых движение фронта испарения устойчиво относительно как колебательных, так и монотонных плоских возмущений. Неустойчивость в данной системе обнаружена для случая отрицательных значений концентрационного числа Марангони, для которых поверхностное натяжение жидкостеносителя меньше, чем у сурфактанта. Такие вещества называют поверхностно-инактивными.

По причине того, что диссертация имеет в определенном смысле пограничный характер, у рецензента возникло достаточно много вопросов и замечаний. И главной здесь все же является объективная проблема, указанная рецензентом еще в самом начале отзыва. Это проблема применимости законов механики сплошных сред к гидродинамическим системам, у которых хотя бы один масштаб имеет наноразмерный характер. В частности рис. 2.2 на стр. 81 демонстрирует наличие гребня у волнового фронта, характерная высота которого для двух значений безразмерного параметра испарения Ω составляет 0.001 ($\Omega = 0.78$) и 0.1 ($\Omega = 0.078$). Ранее на стр. 76 приводятся единицы измерения разных величин, в том числе для толщины слоя. Как следует из текста диссертации, в качестве пространственной единицы выбирается так называемая корреляционная длина l_0 , характерное значение которой составляет порядка 0.6 нм. Но если перевести данные величины в размерные единицы, то получится что высота этого гребня в обоих случаях значительно меньше одного ангстрема, а это заведомо выходит за рамки применимости механики сплошных сред, т.к. она меньше атомарного размера. Причем сама высота волнового фронта имеет

толщину порядка четырех безразмерных единиц, что более или менее соответствует применяемому подходу. Но структурная детализация волнового фронта, пространственные неоднородности которого не превышают размеров одного атома, с точки зрения рецензента не имеет физического смысла. Единственное, что оправдывает сложившуюся ситуацию, это то, что пока никаких других более эффективных методов описания объектов с переходными размерами от нескольких ангстрем до нанометровых масштабов нет. Поэтому в пограничных областях науки по методу проб и ошибок приходится искать эффективные способы адекватного описания физической реальности.

К сожалению, в диссертации встречается много опечаток в пунктах, требующих особой тщательности при написании. В частности, во Введении на стр. 13 в пункте “Достоверность результатов работы” утверждается, что

“Колебательная мода и механизм её неустойчивости, описанный в главе шесть, позволяет объяснить появление пальцеобразных форм в эксперименте”.

Но в диссертации нет шестой главы. Поэтому остается только догадываться, что имел в виду автор, формулируя это предложение.

Необходимо констатировать, что настоящее сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, упоминаемое в разных местах диссертации и автореферата, к большому сожалению отсутствует. Иными словами осталась не проделанной достаточно рутинная и крайне востребованная работа по сравнению количественных данных, полученных по результатам расчетов, с какими-то экспериментальными значениями. Подавляющее большинство результатов в диссертации так и осталось в безразмерной завуалированной форме. В частности во второй главе приведен график зависимости скорости волнового фронта U от безразмерного параметра испарения Ω . На этом графике для $\Omega = 3.5$ безразмерная скорость равна $U \approx 0.09$. Если перевести это в размерные единицы, то как эта цифра будет соотноситься с экспериментом? Ведь наверняка скорость движения волнового фронта является пусть грубо, но измеримой в опытах величиной.

Также с точки зрения рецензента весьма дискуссионный характер имеет терминология, применяемая автором в отношении структурообразования на поверхности рассматриваемых ультратонких пленок. Эта неустойчивость называется автором пальцеобразной неустойчивостью, что рецензент считает пока большой натяжкой. В понимании рецензента пальцеобразная неустойчивость на нелинейных стадиях должна выливаться в образование структур, характерный продольный размер которых должен значительно превышать их толщину в поперечном сечении. Но картина структурообразования, представленная в диссертации по результатам нелинейных расчетов автора всегда демонстрирует сопоставимость поперечных и продольных размеров волновых рельефов (рис. 2.11, 2.25, 3.3). В то

же время в обзоре литературы демонстрируемые структуры, которые автор называет пальчиковыми, таковыми действительно являются. Почему автор называет свои структуры, получаемые путем прямого трехмерного численного моделирования, пальцеобразными для рецензента по-прежнему остается загадкой. Насколько оправданным является повсеместное употребление в тексте этого термина в отношении своих результатов? Или вопрос можно сформулировать иначе: “Что нужно сделать с исходной моделью или расчетной схемой, чтобы она позволяла в явном виде получить действительно полноразмерные пальцеобразные структуры?”

Для полноты картины крайне не хватает нелинейных расчетов по 4 главе, в которой изучается взаимодействие термокапиллярного и инжекционного механизмов неустойчивости для двухслойной системы жидкость-воздух, находящейся в электрическом поле.

На стр. 19 автор противоречит сам себе:

“К дипольным молекулам относят молекулы воды, бензола, молекулы гексановой и бензольной групп. Неполярными молекулами являются алканы, бензол, углеводороды”.

Иными словами, как понимать, бензол – это все же полярный или неполярный диэлектрик?

На стр. 21 пропущено слово в предложении:

“Затем, за некоторое характерное поверхностная энергия, а следовательно, и величина коэффициента поверхностного натяжения будут стремиться к равновесному значению по мере того, как будет восстанавливаться двойной электрический слой”.

На стр. 22. в предпоследнем абзаце целая серия орфографических ошибок “модет”, “отсается”.

Иногда в тексте встречается небрежность формулировок (стр. 57, предпоследний абзац):

“Константа диэлектрической проницаемости и подвижность зарядов зависели от температуры по линейному закону”.

С точки зрения рецензента, если диэлектрическая проницаемость зависит от температуры, то этот параметр никак нельзя называть константой.

В третьей главе на стр. 132 небрежно написано базовое уравнение для свободной поверхности (3.2). Имеется в виду путаница в обозначениях частных и полных производных.

На стр. 205 стандартная физико-математическая конструкция из строгих терминов используется жаргонно не так, как это принято в литературе:

“Граничные условия возьмем из главы 3: непроталывающая и непроницаемая твердая гладкая граница снизу, свободная деформируемая граница между жидкостью и паром сверху...”

А именно, режет глаз в тексте термин “непроталывающая граница”. В литературе это всегда называется условием прилипания или условием непроталывания.

В списке литературы дважды приводится один и тот же источник под разными номерами, причем они идут один за другим (ссылки 304 и 305). В результате это влечет за собой сомнение в правильности ссылки на стр. 305, когда автор, описывая концентрационно-капиллярный механизм переноса, ссылается на работу [305], а она посвящена электрогидродинамической задаче. В то время как соседняя ссылка [306] является более близкой по тематике и посвящена явлению смачивания (кстати, там, похоже, имеется опечатка в слове reconciliation).

В главе 5 диссертации уравнение (5.6) противоречит уравнению (19) в автореферате, когда описывается линейная кинетика обмена ПАВом между объемом и поверхностью.

Последнее замечание по пятой главе касается нетривиального и парадоксального с точки зрения рецензента физического результата, который был получен численно, но не получил внятного объяснения. Почему при появлении поверхностно-активного вещества “двухслойное состояние” у ультратонких пленок практически сразу пропадает? Ведь эффект конкуренции ван-дер-ваальсовых (молекулярных) и электрических сил за счет взаимодействия двойных электрических слоев по-прежнему учитывается в модели. Почему наибольшие значения имеют инкременты со сколь угодно малой длиной волны? Как физически это объяснить? Ведь в результате длина волны наиболее быстро нарастающего возмущения оказывается сколь угодно малой, т.е. всегда найдутся возмущения более мелкомасштабные по сравнению с атомарными размерами. Какова асимптотика у нейтральных кривых при $k \rightarrow \infty$ на рис. 5.8 в диссертации? Иными словами, похоже, что опять имеет место выход за рамки применимости исходной модели.

Тем не менее, высказанные критические замечания совершенно не умаляют содержательной части диссертационной работы А.В. Люшнина и тех достижений, которыми заслуженно может гордиться автор. В первую очередь **актуальным** и важным является сам факт применения методов теории гидродинамической устойчивости и теории возмущений к активно изучаемым в настоящее время микрофлюидическим системам с учетом подходов, применяемых в физической химии и физике конденсированного состояния вещества. В частности, заслуженный интерес представляют результаты исследования устойчивости и данные прямого численного моделирования динамики испаряющихся ультратонких пленок с учетом дальнедействующих (ван-дер-ваальсовых) и близодействующих

(электрических) сил, которые дают существенный вклад в выражение для давления в объеме рассматриваемого тонкого слоя. Показано, что учет расклинивающего давления, крайне важен для объяснения многих микрофлюидических явлений, касающихся поведения ультратонких пленок. Таким образом, диссертационное исследование А.В. Люшнина обладает **теоретической и практической ценностью** в первую очередь по причине того, что сама методология, подходы и приближения, использованные автором, обязательно будут востребованы в ближайшем будущем при создании новых физико-математических моделей для описания наноразмерных гидродинамических систем.

В дополнение хотелось бы отметить список благодарностей в диссертационной работе. С одной стороны это, как правило, достаточно личный пункт, но в контексте представленных автором результатов мне кажется важным отметить, что большинство упомянутых людей принадлежат к Пермской гидродинамической школе, которую долгое время возглавлял проф. Г.З. Гершуни. Отмечу, что его фамилия стоит первой в этом списке. Все достижения Пермской гидродинамической школы, так или иначе, напрямую связаны с теорией гидродинамической устойчивости. Освоив идеи теории устойчивости, азы этой мощной методологии многие исследователи, учившиеся у Г.З. Гершуни, впоследствии получили огромное количество передовых научных результатов в самых разных областях современной науки, начиная с классической гидродинамики и заканчивая физикой конденсированного состояния вещества и материаловедением. Одним из представителей Пермской гидродинамической школы является А.В. Люшнин, диссертация которого является ярким примером успешного применения теории устойчивости в задачах о поведении жидких ультратонких пленок.

Можно утверждать, что цели, поставленные автором в диссертации, достигнуты, а полученные им научные результаты обладают необходимой новизной. Диссертационная работа А.В. Люшнина **“Динамика ультратонкого слоя жидкости”**, представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, удовлетворяет всем квалификационным требованиям ВАК, включая п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842. **Обоснованность и достоверность полученных результатов** обусловлена применением хорошо зарекомендовавших себя аналитических и численных подходов к решению задач межфазной гидродинамики (это различные модификации методов теории возмущений, техника численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений и разные варианты метода конечных разностей). Полученные автором диссертации результаты характеризуются внутренней непротиворечивостью и качественно согласуются с

экспериментальными и теоретическими данными других авторов. В некоторых случаях можно отметить хорошее количественное согласие теории и эксперимента.

Материалы диссертационной работы опубликованы в 20 печатных работах. В том числе, в ведущих рецензируемых зарубежных изданиях и отечественных журналах из списка ВАК опубликовано 13 статей. В указанных работах достаточно полно отражены основные результаты диссертации. Помимо всего прочего результаты исследований докладывались на многочисленных профильных международных и всероссийских конференциях.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Можно утверждать, что по совокупности представленных результатов, кругу рассмотренных вопросов и глубине проработки диссертация А.В. Люшнина **“Динамика ультратонкого слоя жидкости”** является **крупным научным достижением в физике поверхностных явлений и динамике тонких пленок**. Работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, **Люшнин Андрей Витальевич**, заслуживает присуждения ученой степени **доктора физико-математических наук** по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

заведующий кафедрой теоретической физики
Пермского государственного национального
исследовательского университета,
доктор физико-математических наук, доцент



Демин Виталий Анатольевич

5 ноября 2019 г.

demin@psu.ru , рабочий тел.: 8 (342) 2396227, 8 (342) 2396208
адрес места работы: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15,
Пермский государственный национальный исследовательский
университет, кафедра теоретической физики

Я, Демин Виталий Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации **Люшнина Андрея Витальевича «Динамика ультратонкого слоя жидкости»**, и их дальнейшую обработку.



В.А. Демин
Секретарь совета
Е.В. Андреев