

ОТЗЫВ
официального оппонента В.В. Калинина на диссертацию
Андрея Витальевича Люшнина
«Динамика ультратонкого слоя жидкости»,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по
специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Исследование тонких слоев жидкости в последние несколько десятилетий привлекает пристальное внимание ученых, работающих в различных областях науки: в гидромеханике, коллоидной химии, физике, математике. Объясняется это актуальностью предмета исследования в современных приложениях, широким спектром эффектов, характерных именно для тонких слоев жидкости и не описываемых в рамках классических гидродинамических подходов, а также относительно широкими возможностями для проведения аналитического и вычислительного анализа. Диссертационная работа А.В. Люшнина посвящена теоретическому исследованию динамики движения и структурообразования поверхности тонкой пленки полярной жидкости при воздействии целого спектра поверхностных эффектов и внешних сил. Характерно, что автор в большинстве рассмотренных в работе задач не ограничивается чисто аналитическими изысканиями, а верифицирует их с помощью вычислительных процедур.

Диссертация 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** приводится обоснование актуальности данного исследования, определяются цели и задачи диссертационной работы, указана научная и практическая значимость работы.

Первая глава диссертации посвящена истории и анализу современного состояния проблемы исследования тонких слоев жидкости. Здесь следует уточнить датировку первой по времени постановки проблемы. Автор

справедливо ссылается на пионерские работы Б.В. Дерягина, однако датирует их десятилетием позже. На самом деле основополагающие исследования Б.В. Дерягина состоялись не в 1948 году, а в 1935-36 годах (Дерягин Б.В. // Журн. физ. хим. – 1935. – Т. 6, №10. – С. 1306 – 1319. Дерягин Б.В., Кусаков М.М. Свойства тонких слоев жидкостей // Изв. АН СССР, Сер. хим. – 1936. – №5. – С. 741 – 753.). Автор отмечает, что, хотя разными авторами и экспериментально, и теоретически были исследованы различные процессы в тонких жидких пленках, но практически не исследовались электрохимические взаимодействия в полярных жидкостях, в том числе с учетом термокапиллярного и концентрационно-капиллярного влияния поверхности раздела «жидкость-газ». Также значительно меньшее количество исследований посвящено анализу испарения жидкостей в тонких слоях.

Во **второй главе** диссертационной работы проводится численное моделирование динамики испарения ультратонкой пленки жидкости, лежащей на твердой подложке и ограниченной сверху свободной деформируемой границей «жидкость-газ». Эта задача технически весьма сложна из-за необходимости решать существенно нелинейное уравнение в частных производных 4-го порядка, и до сих пор аккуратно не исследовалась. Под «ультратонкой пленкой» автор понимает слой жидкости толщиной порядка $10\text{--}1000\text{\AA}$, в котором необходимо учитывать межфазные взаимодействия границ. Отметим, что общепринятое название для таких пленок – просто «тонкие пленки». В таких слоях становятся существенными силы межмолекулярного взаимодействия (в частности, силы Ван-дер-Ваальса). Кроме того, в тонких слоях жидкости, наряду с длиннодействующими молекулярными взаимодействиями, присутствует и короткодействующие электрические взаимодействия, которые возникают благодаря наличию двойного электрического слоя на межфазных границах. Впервые в работе получены профили движения фронта распространения жидкости. При больших значениях безразмерного параметра испарения фронт движения испаряющейся жидкости оказался устойчивым к возмущениям, тогда как при

малых значениях безразмерного параметра и волнового числа испарения возникает область неустойчивости. В пределе длинноволновых возмущений получено уравнение для декремента возмущений. Впервые численно исследовано уравнение эволюции в трехмерном виде и подтверждена экспериментально обнаруженная в известных работах, так называемая, «fingering instability» (пальцеобразная неустойчивость).

В **третьей главе** в длинноволновом приближении исследовано влияние зависимости поверхностного натяжения (автор использует термин – «коэффициент поверхностного натяжения») от температуры на устойчивость движения тонкого слоя испаряющейся пленки при нагревании твердой подложки. В диапазоне малых значений безразмерного параметра испарения, где имеет место неустойчивость относительно поперечных возмущений, эффект Марангони приводит к увеличению области неустойчивости. Показано, что увеличение числа Марангони приводит к повышению устойчивости системы относительно длинноволновой моды.

Четвертая глава диссертации посвящена изучению влияния термокапиллярного эффекта на электрогидродинамическую систему. Для двухслойной системы «жидкий диэлектрик-воздух» автором обнаружено, что при инжекционном процессе образования свободного заряда в жидкости на межфазной границе происходит скачок плотности объемного заряда. Взаимодействие инжекционного и капиллярного механизмов приводит к дестабилизации относительно монотонных возмущений со стороны нагретой твердой границы. При нагреве со стороны свободной поверхности наблюдается повышение устойчивости системы. Обнаружены параметры системы при которой имеется колебательная мода неустойчивости, найдена зависимость частоты колебаний от волнового числа.

В **пятой главе** автором в рамках длинноволнового приближения выведена система эволюционных уравнений динамики тонкого слоя жидкости относительно толщины слоя и объемной концентрации поверхностно-активного вещества (ПАВ), нанесенного на твердую подложку. Исследована

устойчивость движения фронта испаряющегося тонкого слоя жидкости при наличии ПАВ 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 жидкости в процессе испарения. 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. Во второй части главы исследована устойчивость движения фронта испаряющегося тонкого слоя жидкости при наличии ПАВ 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.

В диссертации А.В. Люшнина «Динамика движения и процессы структурообразования на поверхности тонкого слоя полярной жидкости» содержится обширный материал теоретического исследования широкого спектра гидродинамических задач. Результаты исследований полностью опубликованы в печати, в том числе, и реферируемых журналах высокого международного рейтинга. Автореферат соответствует содержанию работы. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений.

В целом работа представляет собой завершённое научное исследование. Задачи, поставленные во введении, выполнены, все выводы диссертации аргументированы.

Автореферат диссертации создает целостную картину о представленной работе. Его содержание полностью соответствует основным целям и выводам представленной работы.

Таким образом, диссертационная работа А.В. Люшнина является научно-квалификационной работой, в которой автором получены принципиально новые результаты. Совокупность выполненных автором исследований можно квалифицировать как важное научное достижение, состоящее в развитии достаточно нового научного направления – физики тонких пленок.

В качестве замечаний по работе отмечу следующее:

1. Автор не приводит оценок аппроксимации и устойчивости полученной разностной схемы, а также не проводит анализ устойчивости используемых алгоритмов прогонки.
2. В главах 2, 3 и 5 не указано, как анализировались результаты по сходимости конечно-разностной схемы для выбора шага.
3. В главе 4 только упоминается методика численного решения. Нет никаких упоминаний о точности и погрешности результатов.
4. Одним из основных результатов работы является изучение пальцеобразной неустойчивости при течении пленок. Следовало бы упомянуть о физических принципах образования неустойчивости данного типа.
5. В автореферате не указаны выбранные при приведении уравнений к безразмерной форме характерные значения размерных величин, что затрудняет представление об исследуемых процессах (в тексте диссертации это сделано).

Сделанные замечания не снижают высокой оценки диссертационной работы. Считаю, что диссертация А.В. Люшнина «Динамика ультратонкого слоя жидкости» выполнена на высоком научном уровне. По совокупности представленных в диссертационной работе результатов она вносит крупный вклад в решение проблем гидродинамики тонких слоев жидкости и соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Автор

диссертации, Андрей Витальевич Люшнин, заслуживает присуждения
искомой степени.

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой высшей математики

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,
доктор физ.-мат. наук

Василий Валерьянович Калинин



Подпись В.В. Калинина заверяю

ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»
119991, Россия, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 2.
Тел. +7 (499) 507-86-73, e-mail. vm@gubkin.ru