

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Субботина С.В.
на диссертационную работу Квона Александра Зедоновича
**«СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ ТРЁХМЕРНЫХ ВОЛН НА
ПОВЕРХНОСТИ СТЕКАЮЩИХ ПЛЁНОК ЖИДКОСТИ»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости,
газа и плазмы».

Диссертация Квона А.З. посвящена экспериментальному изучению волн на поверхности стекающих тонких плёнок жидкостей. С одной стороны, задача представляет собой классический объект для исследования гидродинамической неустойчивости течений со свободной границей. С другой стороны, стекающие плёнки широко применяются в современной промышленности для оптимизации процессов массо- и теплопереноса. Несмотря на многолетнюю историю изучения, трёхмерные волновые режимы остаются наименее изученными. Особенно остро ощущается дефицит экспериментальных данных о структуре течения внутри трёхмерных волн и о закономерностях их эволюции на больших длинах пробега. Данная диссертация направлена на восполнение этого пробела, что определяет её высокую актуальность.

Содержание диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы, включающем 82 наименования. Общий объем диссертации – 100 страниц, включая 58 рисунков и 3 таблицы.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, перечислены положения, выносимые на защиту, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Приведены сведения об апробации результатов и публикациях, отмечен личный вклад автора.

Первая глава является обзорной. Рассмотрены теоретические модели стекания плёнок под действием силы тяжести: стекание гладкой плёнки, модель Капицы-Шкадова, WRIBL-модель (упрощённая и полная). Проанализированы экспериментальные работы по 2D и 3D волнам, показана недостаточная изученность трёхмерных режимов и отсутствие данных о структуре течения внутри волн. Описаны современные оптические методы измерения толщины и скорости в плёночных течениях. ЛИФ, PIV, PTV и т.д.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных установок и методам проведения измерений. На одной установке изучалась эволюция волн на большой длине пробега (до 140 см), другая использовалась для детального исследования структуры течения в трёхмерных волнах. Детально изложен метод ЛИФ для измерения толщины плёнки: принцип, калибровка, погрешности. Представлен оригинальный комбинированный метод LF LIF-

PTV, позволяющий одновременно измерять толщину (ЛИФ) и объёмные поля скорости (PTV). Приведены результаты тестов на гладкой плёнке и регулярных 2D волнах, подтверждающие корректность метода.

В третьей главе представлены результаты ЛИФ-измерений толщины стекающих плёнок жидкостей на больших длинах пробега. Измерения проводились для трёх жидкостей (дистиллированная вода, 22% и 38% водоглицериновые растворы) в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 5-100$. Регистрация велась на пяти участках, расположенных на разных расстояниях от распределителя. Определялись следующие статистические характеристики: средняя толщина, дисперсия, плотность вероятности, спектральная мощность. Дана классификация сценариев эволюции плёнки: а) переход к 3D волнам не происходит, волны остаются близкими к 2D на всём протяжении течения, струи не формируются ($Re < Re_1 = 5-15$); б) 2D волны быстро распадаются на 3D, формируются ярко выраженные продольные струи, 3D волны движутся преимущественно вдоль струй, образуя цепочки ($Re_1 < Re < Re_2 = 40-60$); в) динамика струй немонотонна, на начальном участке (40-50 см) наблюдается рост ($Re > Re_2$), а затем затухание вплоть до полного исчезновения в нижней части течения. Показано, что при $Re > Re_2$ все статистические характеристики (дисперсия, плотность вероятности, спектральная плотность) выходят на стационарные значения $(D/(h_N))^2 = 0.15$ и перестают зависеть от начальных условий, что соответствует полностью установившемуся трёхмерному волновому режиму.

Наконец, в четвертой главе методом LF LIF-PTV впервые получены объёмные поля скорости в регулярной трёхмерной волне с привязкой к форме поверхности. Обнаружены: возвратные течения перед основным гребнем, сложная структура поперечных потоков в капиллярной ряби, пространственно разделённые зоны притока и оттока под гребнем. Проведено сравнение с расчётами по упрощённой и полной WRIBL-моделям. Несмотря на различие в форме реальной и смоделированной волны, поля скорости демонстрируют общие черты.

В заключении представлены основные результаты исследований, соответствующие положениям, выносимым на защиту.

В целом диссертация написана грамотным научным языком, текст логически структурирован, иллюстрации информативны. Автор использует общепринятую терминологию, хотя иногда, по мнению оппонента, встречаются не самые удачные формулировки (например, «лобовая точка основного пика»), которые, впрочем, не затрудняют понимания. Основные результаты опубликованы в 12 различных работах в ведущих журналах (Physics of Fluids, International Journal of Multiphase Flow, Experimental Thermal and Fluid Science, Interfacial Phenomena and Heat Transfer, Письма в Журнал технической физики, Прикладная механика и техническая физика, Теплофизика и аэромеханика). Результаты докладывались на известных международных и Всероссийских конференциях, включая European Fluid Mechanics Conference (EFMC), International Congress of Theoretical and Applied

Mechanics (ICTAM), International Symposium on Particle Image Velocimetry (IS PIV), Сибирские теплофизические семинары, Теплофизика и физическая гидродинамика и др.

Можно выделить **наиболее важные результаты**, полученные в диссертации:

1. Разработан новый комбинированный метод LF LIF-PTV, позволяющий одновременно измерять толщину плёнки (ЛИФ) и объёмные поля скорости с использованием одной камеры светового поля.
2. Впервые экспериментально получены объёмные распределения скорости в трёхмерной волне с одновременной регистрацией формы свободной поверхности.
3. Выполнена классификация трёхмерных волновых режимов на основе статистического анализа полей толщины; выделены два подрежима: с устойчивыми и с затухающими струями.
4. Выполнено прямое количественное сравнение эксперимента с полной и упрощённой моделями WRIBL, что позволило установить ограничения упрощённой модели вблизи свободной поверхности.
5. По сути, работа создаёт новое экспериментальное окно, в трёхмерную динамику плёнок. Это самостоятельный инструментальный результат.

Теоретическая значимость. Полученные статистические характеристики для широкого диапазона чисел Рейнольдса создают базу данных для верификации теоретических моделей и численных расчётов. Обнаруженный полностью установившийся 3D-режим ($Re > Re_2$) позволяет проводить сравнение теории с экспериментом без жёсткого контроля за начальными условиями.

Практическая значимость. Разработанный метод LF LIF-PTV может быть использован для диагностики любых тонкослойных течений со свободной границей: стекающие плёнки, ручейковые течения, течения в микроканалах, а также в задачах, где требуются объёмные измерения скорости с высоким разрешением. Знание границ режимов течения плёнки будет полезно для проектирования промышленных аппаратов с плёночным течением, где можно добиться интенсивного поперечного перемешивания за счёт струй.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных, многократно апробированных методов (ЛИФ, PTV) с детальным описанием калибровки и оценкой погрешностей, тестовыми экспериментами на хорошо изученных типах течения, рассмотрением широкого диапазона параметров экспериментов, а также согласием результатов диссертации с результатами других авторов и прямым сравнением с расчётами по WRIBL-моделям.

По диссертационной работе имеется **ряд замечаний**, часть которых относится к оформлению работы, выполненному, надо признать, не очень аккуратно.

1. В качестве разделительного символа между целой и дробной частью значений параметров одновременно могут использоваться как “.”, так и “;” (например, подпись осей и легенда на рис. 2.13). Встречается как прямое, так и наклонное (курсивное) написание физических величин. В ряде случаев существует путаница в обозначениях, например, и фазовая скорость волны, и передаточный коэффициент флуоресценции обозначены как C ; на стр. 39 темновой уровень светочувствительного элемента обозначен как D , на стр. 59 это дисперсия толщины плёнки, а на стр. 81 это характеристика волны на плёнке; на рис. 2.1 за вертикальную координату отвечает переменная y , а на рис. 2.4 той же переменной обозначена горизонтальная координата. Кроме того, встречаются пунктуационные ошибки и несогласованные предложения, например на стр. 31: «Ключевыми проблемами является...». К сожалению, данный список не является исчерпывающим.

2. Что можно сказать о чистоте поверхности стекла, по которой стекала плёнка? Проводились ли какие-нибудь специальные процедуры по химической очистке, например, предварительная обработка раствором хромпика?

3. Для реализации ЛИФ метода в качестве источника освещения использовался лазер непрерывного действия мощностью 2 Вт, который может нагревать поверхность. Известно, что флуоресценция большинства органических красителей имеет температурную зависимость, о чём в диссертации не говорится. В продолжение замечания этот же вопрос можно адресовать и к поверхностному натяжению, методика измерения которого в работе также отсутствует.

4. На стр. 81 в разделе 4.2 указано, что расчёт по WRIBL-модели останавливался, когда расстояние между передним и задним пиками D волны достигало экспериментального значения. По всей видимости, именно эти кадры отбираются для сравнения с экспериментом. Может ли подгонка данного геометрического параметра повлиять на сопоставление полей скорости и на каких рисунках, полученных в рамках модели, можно найти эту величину?

5. Для построения полей скорости использовались данные, полученные в одной фазе движения волны (по 80–220 пар кадров, стр. 50–51). При этом предполагается, что форма волны и структура течения в ней одинаковы от одного события к другому. Как проверялась повторяемость формы трёхмерной волны? Не вносит ли дрейф положения струй в поперечном направлении (показанный на рис. 3.10) искажения в осреднённые поля скорости?


6. В разделе 3.2 указано, что большой диапазон критический значений чисел Рейнольдса для границ режимов течения пленки объясняется зависимостью от свойств исследуемых жидкостей. В контексте данного утверждения было бы интересно увидеть зависимость числа Рейнольдса от числа Капицы γ или аналогичного параметра. Также говорится, что границы режимов определяются грубо, поскольку волновая картина зависит от начальных условий. Автору следовало бы пояснить, какой именно фактор

начальных условий вносит основной вклад в размытие границ режимов: неконтролируемые возмущения на входе в канал после распределителя или влияние осцилляционного воздействия?


Заключение

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации. Работа Квона А.З. выполнена на высоком научном уровне, основные результаты докладывались на конференциях всероссийского и международного уровней. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации. Считаю, что диссертация представляет собой законченное научное исследование, удовлетворяющее критериям пп. 9–11, 13 и 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Квон Александр Зедонович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9–механика жидкости, газа и плазмы.

Кандидат физ.-мат. наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),
ведущий научный сотрудник лаборатории
вибрационной гидромеханики,
доцент кафедры физики и технологии
ФГБОУ ВО «Пермский государственный
гуманитарно-педагогический университет» (ПГГПУ)


Субботин Станислав
Валерьевич
21.05.2026

Подпись Субботина С.В. заверяю
Ученый секретарь ФГБОУ ВО «ПГГПУ»
Гранкина Е.Н.


Гранкина Елена
Николаевна

Адрес: 614990, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 24,
ПГГПУ, <http://pspu.ru>
Телефон +7 (342) 215-19-47
E-mail: subbotin_sv@pspu.ru



Я, Субботин Станислав Валерьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Квона Александра Зедоновича, и их дальнейшую обработку