



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТ СО РАН
Академик РАН Маркович Д.М.


«26 » февраля 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)**

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Структура и эволюция трёхмерных волн на поверхности стекающих пленок жидкости» выполнена Квоном А.З. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук» (ИТ СО РАН).

В 2013 году Квону А.З. присуждена степень магистра в «Национальном университете Кёнбук», Республика Корея. Свидетельство номер 213121943614. В 2018 году Квон А.З. окончил аспирантуру в ИТ СОРАН по специальности 1.1.9. В настоящее время Квон А.З. работает младшим научным сотрудником в ИТ СО РАН, лаборатории 6.5 Процессов переноса.

По итогам обсуждения принято следующее **заключение**.

Актуальность темы.

Помимо фундаментального интереса к исследованию волновых явлений, процессов формирования и взаимодействия волн при пленочном течении, активное изучение стекающих пленок жидкости обусловлено их широким применением в промышленных приложениях, связанных с процессами тепломассопереноса.

В настоящее время существует большое количество теоретических и экспериментальных работ, посвященных изучению двумерных и трехмерных волновых режимов на поверхности стекающих пленок жидкости. Более простая форма межфазной поверхности, использование наложенных внешних возмущений с известными характеристиками при изучении двумерных волновых режимов течения вязких пленок

жидкости, и, как следствие, обилие экспериментальных данных для двумерных волн позволили достаточно полно разработать адекватные теоретические модели. Несмотря на то, что трехмерные волновые режимы являются конечной стадией волновой эволюции при гравитационном пленочном течении при умеренных числах Рейнольдса, они изучены не так подробно, как двумерные режимы. Наблюдается недостаток экспериментальных данных, необходимых для верификации имеющихся и разрабатываемых теоретических моделей. В частности, отсутствуют экспериментальные данные по трехмерным полям скорости жидкости в пленке и волнах при трехмерных волновых режимах. Кроме того, на данный момент отсутствуют детальные трехмерные измерения пленочного течения на протяженных участках (больших длинах пробега), вследствие чего остаются до конца не определены закономерности развития полностью развитого трехмерного волнового режима, а также границы области режимных параметров, при которых такие режимы реализуются. Данные обстоятельства затрудняют корректное сравнение теории и эксперимента, которое желательно проводить в области установившегося трехмерного волнового режима. Классификация волновых режимов и описание структуры течения в отдельной трехмерной волне являются актуальными задачами при исследовании процессов эволюции трехмерных волн.

Цель работы:

Целью настоящей диссертации является установление закономерностей эволюции волнового движения и определение структуры течения в волнах на вертикально стекающих пленках вязкой жидкости при умеренных числах Рейнольдса.

В рамках поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- Экспериментальное исследование эволюции формы свободной поверхности пленочного течения на больших длинах пробега с высоким пространственным и временным разрешением для жидкостей с различными физическими свойствами.
- Разработка алгоритмов для статистического анализа больших массивов данных о форме поверхности волновой пленки.
- Обобщение и классификация волновых режимов течения на основе анализа закономерностей эволюции полученных статистических характеристик поверхности.

- Разработка, апробация и применение измерительной системы для одновременного определения формы свободной поверхности и объемного измерения скорости жидкости при течении волновых пленок жидкости.
- Анализ структуры течения в формирующихся регулярных трехмерных волнах.
- Проведение прямого сравнения экспериментальных результатов по регулярной трехмерной волне с результатами расчета интегральной моделью пограничного слоя методом взвешенных невязок «weighted residual integral boundary layer» (WRIBL).

Научная новизна основных положений, результатов и выводов, полученных в диссертации:

Впервые осуществлены измерения полей толщины волновой пленки на больших длинах пробега $L/L_{in} \sim 88$ (где L_{in} – максимальная длина зоны стабилизации, рассчитанная для $Re = 100$) от начала течения для жидкостей с различными физическими свойствами, что позволило проследить полную эволюцию вплоть до установившегося трехмерного волнового режима. На основе статистического анализа пространственно-временных данных по толщине пленки существенно уточнено имеющееся на данный момент описание закономерностей волновой эволюции при переходе от двумерного к трехмерному волновому движению в диапазоне чисел Рейнольдса ($5 < Re < 100$) и определены границы волновых режимов пленочного течения. Впервые экспериментально обнаружен и охарактеризован полностью установившийся трехмерный волновой режим пленочного течения. Разработан и реализован принципиально новый комбинированный метод диагностики пленочных течений, впервые обеспечивающий одновременное измерение формы волновой свободной поверхности и объемных полей скорости в волновых пленках жидкости. Впервые экспериментально показана структура течения в трехмерной волне, и выявлены её ключевые элементы: области возвратного течения, поперечных потоков, а также структура потоков в капиллярной яри. Впервые проведено прямое количественное сравнение экспериментально измеренных полей скорости и толщины в трехмерной волне с результатами расчетов по полной и упрощенной WRIBL моделям, что позволило оценить границы применимости и выявить ограничения моделей.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Статистические характеристики, полученные в результате экспериментов по исследованию эволюции волнового движения на поверхности пленок, позволяют детализировать классификацию волновых режимов и дополнить результаты качественных

наблюдений. Обнаруженные установившиеся режимы течения могут быть использованы для валидации теоретических моделей.

Представленный в рамках данной работы метод может быть применен для широкого класса задач не только для исследования структуры течений при пленочных течениях, но и в случаях, когда требуются мгновенные объемные измерения скорости.

Результаты проведенных в работе исследований с использованием описанной выше методики существенно дополнили понимание о процессе эволюции трехмерных волн на поверхности пленки, а результаты прямого сравнения данных, полученных с помощью упрощенной и полной моделей с экспериментами позволяют определить область применимости теоретических моделей.

Степень достоверности результатов:

Достоверность результатов подтверждается использованием современных методов измерений, отработанных на близких к исследуемым типам течений; оценкой погрешностей измерений; проведением специальных тестовых и калибровочных экспериментов; апробацией новой методики на хорошо изученных типах течений; соответствием полей скорости геометрии волновых структур, сопоставлением полученных результатов с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов.

На защиту выносятся:

Результаты экспериментального определения закономерностей эволюции волнового движения на поверхности свободно стекающих пленок жидкости на больших длинах пробега $L/L_{in} \sim 88$, основанные на измерениях формы поверхности с высоким пространственным и временным разрешением с использованием жидкостей с различными физическими свойствами.

Результаты анализа статистических характеристик волнового движения, построенных на основе серии мгновенных полей толщин для различных режимов течения и свойств жидкости на больших длинах пробега.

Принципы экспериментального исследования пленочных течений с использованием камеры светового поля для одновременного получения полей толщин и объемных полей скорости.

Результаты экспериментального исследования структуры течения в трехмерных волнах на поверхности вертикально стекающей пленки жидкости.

Результаты сравнения экспериментальных данных с расчетами по упрощенной и полной WRIBL моделям.

Личный вклад автора:

Создание экспериментальных установок и проведение экспериментов осуществлялось автором самостоятельно и в составе научного коллектива. Личный вклад соискателя включает: разработку метода одновременного измерения скорости и толщины, проведение тестовых экспериментов, организацию и проведение всех представленных в работе исследований, обработку, анализ полученных данных и интерпретацию результатов. Теоретические расчеты по WRIBL модели в программном пакете WaveMaker осуществлялись к.ф.-м.н Бобылевым А.В. Подготовка научных публикаций и докладов на конференциях осуществлялась автором самостоятельно или в составе научного коллектива. Научные результаты и выводы, которые легли в основу данной диссертации, были получены автором самостоятельно.

Список работ автора по тематике диссертации, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Гузанов, В.В., Бобылев А.В., Квон А.З., Маркович Д.М., Харламов С.М. Особенности установления трехмерных волновых режимов в вертикально стекающей пленке жидкости // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, № 5. С 24-31.
2. Kvon A.Z., Bobylev A.V., Guzanov V.V., Markovich D.M., Kharlamov S.M. Simultaneous film thickness and 3d-2c velocity measurements using lif and light-field ptv methods in a 3d wave on a falling liquid film. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. – 2016, – 4(4).
3. Бобылев А.В., Гузанов В.В., Харламов С.М., Квон А.З., Маркович Д.М. Динамика струй при изотермическом пленочном течении // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, № 15. С. 19-27.
4. Квон А.З., Бобылев А.В., Гузанов В.В., Харламов С.М., Маркович Д.М. Структура течения в трехмерных волнах на вертикально стекающей пленке жидкости // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, № 18. С. 3-10.
5. Guzanov V.V., Bobylev A.V., Heinz O.M., Kharlamov S.M., Kvon A.Z., Markovich D.M. Characterization of 3-D wave flow regimes on falling liquid films // *Int. J. Multiphase Flow*. 2018. V. 99. P. 474-484.
6. Бобылев А. В., Харламов С.М., Гузанов В. В., Квон А.З., Маркович Д.М. Волновая структура пленок жидкости при переходе к турбулентному режиму течения // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45, № 15. С. 10-13.
7. Бобылев А.В., Гузанов В.В., Квон А.З., Харламов С.М., Маркович Д.М. Экспериментальное исследование процесса образования трехмерных волн из

- уединенной двумерной волны на вертикально стекающих пленках жидкости // ПМТФ. 2020. Т. 61, № 3. С. 5-10.
8. Kvon A.Z., Kharlamov S.M., Bobylev A.V., Guzanov V.V. Investigation of the flow structure in three-dimensional waves on falling liquid films using light field camera // *Exp. Thermal Fluid Science*. 2022. V. 132. Paper 110553.
 9. Naumov I.V., Skripkin S.G., Kvon A.Z., Shtern V.N. Changing interface conditions in a two-fluid rotating flow // *Phys. Fluids*. 2023. V. 35, N. 3.
 10. Cherdantsev A.V., Bobylev A.V., Guzanov V.V., Kvon A.Z., Kharlamov S.M. Measuring liquid film thickness based on the brightness level of the fluorescence: Methodical overview // *Int. J. Multiphase Flow*. 2023. V. 168. Paper 104570.
 11. Guzanov V.V., Aktershev S.P., Bobylev A.V., Kvon A.Z., Cherdantsev A.V. Experimental and theoretical study of stationary nonlinear three-dimensional wave regimes on a straight rivulet flowing down an inclined plane // *Int. J. Multiphase Flow*. 2024. V. 181. Paper 104990.
 12. Актершев С.П., Гузанов В.В., Квон А.З., Бобылев А.В., Черданцев А.В. Сравнение двумерной и трехмерной моделей волнового ручейкового течения по наклонной плоскости // *Теплофизика и аэромеханика*. 2025. Т. 32, № 2. С. 335-346.

Апробация работы:

Результаты, представленные в диссертации, обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях:

13-ая международная научно-техническая конференция "Оптические методы исследования потоков", 29 июня–3 июля 2015, Москва, Россия; 13-я научная международная конференция "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики", 21–27 сентября 2015, Алушта, Россия; Всероссийская конференция "XXXII Сибирский теплофизический семинар", 19–20 ноября 2015, Новосибирск, Россия; Eight International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 15–18 September, 2015; Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика», 19–25 сентября, 2016, Ялта, Россия; 11th European Fluid Mechanics Conference EFMC11, Seville, Spain, September 12–16 2016; 24nd International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Montreal, Canada, August 21–26, 2016; 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Iguazu Falls, Brazil, 12–15 June 2017; 12th International Symposium on Particle Image Velocimetry, June 19–21, 2017, Busan, Korea; II Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" с элементами школы молодых ученых, Ялта, Республика Крым, 11–18 сентября 2017 г; III Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" с элементами школы

молодых ученых, Ялта, Республика Крым, 10–16 сентября 2018 г; 13th International Symposium on Particle Image Velocimetry July 22–24, 2019, Munich, Germany; Всероссийская конференция "XXXV Сибирский теплофизический семинар", 27–29 августа 2019, Новосибирск, Россия; Всероссийская конференция "XXXVI Сибирский теплофизический семинар", 5–7 октября 2020, Новосибирск, Россия; XVI Всероссийской школе-конференции молодых ученых с международным участием "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики", 24–27 ноября 2020, Новосибирск, Россия; Всероссийская конференция "XXXVII Сибирский теплофизический семинар", 14–16 сентября 2021, Новосибирск, Россия; Всероссийская конференция "XXXVIII Сибирский теплофизический семинар", 29–31 августа 2022, Новосибирск, Россия;

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите:

Диссертация Квона А.З., посвященная экспериментальному исследованию эволюции волнового движения и структуры течения в трехмерных волнах на поверхности стекающих плёнок жидкости, соответствует паспорту специальности 1.1.9 –“Механика жидкости, газа и плазмы” для физико-математических наук.

Решение о рекомендации к защите.

Диссертация «Структура и эволюция трёхмерных волн на поверхности стекающих пленок жидкости» Квона Александра Зедоновича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 –“Механика жидкости, газа и плазмы”.

Заключение принято на заседании секции №1 “Теплофизика и гидрогазодинамика многофазных и многокомпонентных систем (включая фазовые переходы, волновые явления и акустику)” Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) под руководством член-корреспондента РАН А.Н. Павленко. В замечаниях рекомендуется уделить внимание амплитудным характеристикам пленочного течения в контексте их влияния на теплообмен. Конкретизировать научную новизну и выводы исследования.


Присутствовало на заседании 29 человек (в том числе, 16 членов секции №1), 2 член-корреспондента РАН, 15 докторов наук, 9 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» – 16 человек, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек. Протокол № 1 от 10 февраля 2026 года.



Председатель семинара

Павленко Александр Николаевич, чл. -корр. РАН,
д.ф.-м.н., заведующий лабораторией
низкотемпературной теплофизики ИТ СО РАН

Секретарь семинара



Пахомов Максим Александрович, д.ф.-м.н., проф.
РАН, главный научный сотрудник ИТ СО РАН