

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН

Академик РАН Д.М. Маркович



11 » июля 2022 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 «Экспериментальное исследование трёхмерных волн на вертикально стекающих плёнках жидкости» выполнена Гузановым В.В. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

В 2007 году Гузанову В.В. присуждена степень магистра, диплом магистра ВМА 0054244. В настоящее время Гузанов В.В. работает младшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения принято следующее **заключение**.

**Актуальность темы.** Интерес к изучению плёночных течений жидкости не угасает несколько десятилетий, что связано, в первую очередь, с их применением в различных технологических процессах в промышленных установках. Также исследование динамики волнового течения плёнки жидкости представляет исключительно научный интерес, поскольку плёнки представляют собой открытую систему, в которой проявляются различные неустойчивости, процессы диссипации и накачки энергии. При этом даже в случае свободного изотермического течения плёнки под действием гравитации некоторые особенности течения остаются не до конца изученными. Связано это в первую очередь с присутствием свободной деформируемой поверхности жидкость-воздух, на которой вследствие неустойчивости формируются волны.

Как известно, интенсивность процессов тепло- и массопереноса находится в прямой связи с волновой картиной на поверхности плёнки. Поэтому, очевидно, что для

понимания механизмов процессов переноса необходимо исследовать волновую структуру течений. При этом ввиду сложности и разнообразия процессов, происходящих в плёнке, изучение волн в плёночных течениях является отдельной важной задачей.

Двумерное волновое движение на поверхности плёнки к настоящему времени достаточно хорошо изучено, а результаты многолетних исследований обобщены в ряде монографий. Современный уровень развития вычислительных технологий позволяет за приемлемое время производить численное моделирование плёночных течений с использованием полной системы уравнений Навье-Стокса в двумерной постановке. Как показывает прямое сравнение результатов моделирования полной системы уравнений с результатами, полученными с использованием модельных уравнений, упрощённые модели с достаточной точностью описывают процессы в таких течениях.

Однако, в большинстве случаев, в реальных течениях невозможно использовать двумерный подход из-за трёхмерности возникающих на поверхности плёнки структур. Необходимость учёта трёхмерных эффектов усложняет как моделирование, так и экспериментальное исследование. Использование локальных измерений в экспериментах усложняет интерпретацию полученных данных. Системы из локальных датчиков для одновременных измерений во многих близкорасположенных точках имеют достаточно низкое пространственное разрешение, а их изготовление – очень трудоёмкий процесс. Поэтому наиболее перспективными методами исследования плёночных течений считаются оптические методы.

Моделирование трёхмерных режимов плёночного течения с использованием полной системы уравнений Навье-Стокса остаётся крайне трудоёмкой задачей, поэтому в основном для моделирования используется ряд упрощённых моделей. Получаемые моделированием волновые картины качественно схожи с наблюдаемыми в экспериментах. Однако данные, полученные в результате моделирования, нуждаются в количественной проверке, в первую очередь, экспериментально. Прямое сравнение результатов моделирования с экспериментом во многих случаях затруднено из-за зависимости течения от начальных условий и хаотичности процессов эволюции волн.

Ряд авторов полагает, что наблюдаемые в развитых трёхмерных волновых режимах трёхмерные волны являются структурными элементами течения с определёнными характеристиками, с помощью суперпозиции которых можно описать данные режимы. Существенный прогресс в исследовании уединённых трёхмерных волн связан с регистрацией в экспериментах при малых числах Рейнольдса стационарных подковообразных волн, характеристики которых хорошо согласуются с теоретическими данными. Форма этих волн близка к форме волн, наблюдаемых в развитых трёхмерных

режимах. Однако, существующие экспериментальные данные по характеристикам уединённых стационарных подковообразных волн носят отрывочный характер.

**Цель работы:** провести экспериментальное исследование особенностей формирования и эволюции трёхмерных волн на вертикально стекающих плёнках жидкости в диапазоне малых и умеренных чисел Рейнольдса плёночного течения ( $2 < Re < 100$ ) для жидкостей с различными физическими свойствами.

**Поставлены и решены следующие задачи:**

- Реализована система, позволяющая проводить регистрацию толщины плёнки на плоскости с высоким пространственным разрешением при различных условиях течения.
- Проведено экспериментальное исследование эволюции волн, возбуждаемых точечным источником для различных энергий возбуждения с использованием жидкостей с различными физическими свойствами.
- Проведено экспериментальное измерение характеристик стационарных уединённых подковообразных волн на участке безволновой плёнки для жидкостей с различными физическими свойствами.
- Экспериментально изучены особенности взаимодействия искусственно возбуждаемых трёхмерных волн с регулярными двумерными волнами.
- Экспериментально изучены особенности формирования трёхмерных волн в результате распада возбужденных двумерных волн.
- Экспериментально изучены особенности перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению на больших расстояниях от начала течения.

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

Для жидкостей с различными физическими свойствами экспериментально зарегистрированы стационарные трёхмерные волны, характеристики которых хорошо согласуются с результатами расчетов по модели Капицы-Шкадова вплоть до значений модифицированного числа Рейнольдса  $\delta \approx 0,06$ . При больших  $\delta$  наблюдается отклонение измеренных характеристик (с расслоением в зависимости от свойств жидкости) от теоретических. Причем основные тенденции в изменении характеристик (включая форму волн) качественно согласуются с результатами моделирования.

Обнаружены режимы взаимодействия трёхмерных подковообразных волн с высокочастотными двумерными волнами, характеризующиеся повторением характеристик трёхмерной волны в одинаковых фазах каждого последующего акта взаимодействия с двумерными волнами. Характеристики трёхмерных волн в таких

режимах хорошо обобщаются в безразмерных координатах, предложенных для описания характеристик стационарных трёхмерных волн на гладкой плёнке. При этом средние значения амплитуды трёхмерных волн в стационарных режимах взаимодействия оказываются существенно ниже значений амплитуды стационарных волн на гладкой плёнке.

Экспериментально в диапазоне  $10 < Re < 70$  обнаружено, что образующиеся в процессе перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению трёхмерные волны отличаются от подковообразных волн: они имеют вытянутую в направлении течения форму с заполненным задним склоном. Характерные поперечные размеры трёхмерных волн слабо зависят от расхода жидкости и лежат в достаточно узком диапазоне значений. В процессе перехода от двумерного к трёхмерному волновому режиму течения обнаружено образование струй, что свидетельствует о перераспределении жидкости в поперечном направлении. Эволюция таких струй в зависимости от начальных условий может иметь как монотонный (затухание, рост), так и немонотонный характер.

В диапазоне  $5 < Re < 100$  на основе экспериментально зарегистрированных волновых полей на больших расстояниях (до 140 см) от начала течения обобщены основные закономерности волновой эволюции при переходе от двумерного к трёхмерному волновому движению и выделены три сценария эволюции. Первый сценарий, наблюдаемый при  $Re < Re_1$ , характеризуется отсутствием 2D-3D перехода. В интервале  $Re_1 < Re < Re_2$ , где для всех исследованных жидкостей  $5 < Re_1 < 15$  и  $40 < Re_2 < 60$ , наблюдается второй сценарий эволюции с формированием хорошо различимых струй. Волновая картина течения в этом случае зависит от начальных условий. При превышении порогового значения  $Re > Re_2$  наблюдается третий сценарий эволюции, характеризующийся быстрым формированием трёхмерных волн после непродолжительной эволюции в верхней части течения. В этом случае струи становятся менее выраженными, а волновая картина в нижней части течения слабо чувствительна к начальным условиям.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

Получены новые фундаментальные знания об эволюции подковообразных волн и их взаимодействии с регулярными двумерными волнами при различных условиях течения. В том числе, получены систематические экспериментальные данные о характеристиках стационарных подковообразных волн и о характеристиках трёхмерных волн в стационарных режимах взаимодействия одиночной подковообразной волны с регулярными двумерными волнами для жидкостей с различными физическими свойствами. Также получены новые экспериментальные данные об особенностях

формирования трёхмерных волн, возникающих из-за поперечной неустойчивости двумерных волн. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать выводы об области применимости различных теоретических моделей, которые могут быть использованы в практических приложениях.

#### **Степень достоверности результатов:**

Достоверность результатов обеспечивается использованием современных оптических методов измерений и их адаптацией под определённые экспериментальные условия, анализом погрешностей измерений, проведением калибровочных и тестовых измерений, а также сравнением результатов с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

#### **На защиту выносятся:**

- Результаты экспериментального исследования особенностей эволюции возбуждаемых уединённых трёхмерных волн на безволновом участке течения плёнки, а также особенности взаимодействия таких волн с регулярными двумерными волнами для жидкостей с различными физическими свойствами.
- Результаты экспериментального измерения характеристик стационарных уединённых трёхмерных волн на участке безволновой плёнки для жидкостей с различными физическими свойствами.
- Результаты экспериментального измерения характеристик одиночных трёхмерных волн в режимах взаимодействия с регулярными двумерными волнами в условиях стабильного повторения характеристик трёхмерного волнового движения для жидкостей с различными физическими свойствами.
- Результаты экспериментального исследования особенностей формирования трёхмерных волн в процессе перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению как на начальном участке течения, так и на больших расстояниях от начала течения.

#### **Личный вклад автора:**

Серии экспериментов были проведены диссертантом как самостоятельно, так и в составе научного коллектива. Диссертант принимал участие в разработке, изготовлении и сборке экспериментальных стендов. Самостоятельно автором проводилась настройка и подготовка экспериментальных стендов к проведению измерений, проведение большей части тестовых экспериментов, а также дальнейшая обработка экспериментальных данных, анализ погрешностей и интерпретация результатов. Научные результаты и выводы, послужившие основой диссертации, получены диссертантом самостоятельно. Подготовка статей и докладов на конференциях проводилась диссертантом

самостоятельно или в составе научного коллектива.

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

1. Гузанов В.В., Харламов С.М. Экспериментальное исследование эволюции трёхмерных волн на поверхности вертикально стекающих плёнок жидкости// Вестник НГУ. Серия: Физика. 2007. Том 2, выпуск 3. с. 3–7.
2. Чиннов Е.А., Гузанов В.В., Кабов О.А.. Неустойчивость двухфазного течения в прямоугольном микроканале// Письма в ЖТФ, 2009, том 35, вып. 14, с. 32 – 39.
3. Chinnov E.A., Guzanov V.V., Cheverda V., Markovich D.M., Kabov O.A.. Regimes of Two-Phase Flow in Short Rectangular Channel// Microgravity Science and Technology, 2009, Volume 21, Supplementary Issue 1, pp. S199 – S205.
4. Алексеенко С.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М. Характеристики уединённых трёхмерных волн на вертикально стекающих плёнках жидкости// Письма в ЖТФ, 2010, том 36, вып. 22, с. 1 – 8.
5. Алексеенко С.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М. О взаимодействии трехмерных и двумерных волн на вертикально стекающих пленках жидкости// Доклады Академии Наук, Механика, 2011, том 441, № 5, с. 616–620.
6. Алексеенко С.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М. Особенности перехода от регулярного двумерного к трехмерному волновому движению на вертикально стекающих пленках жидкости// Письма в ЖТФ, 2012, том 38, вып. 16, с. 16 – 24.
7. Алексеенко С.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М. Экспериментальное исследование особенностей эволюции уединенных трехмерных волн на поверхности нагреваемой пленки жидкости// Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 6, с. 19 – 27.
8. Алексеенко С.В., Бобылев А.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М. О формировании струй при изотермическом пленочном течении жидкости в процессе перехода к трехмерному волновому движению// Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 22. с. 97 – 104.
9. Чиннов Е.А., Роньшин Ф.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Кабов О.А.. Двухфазное течение в горизонтальном прямоугольном микроканале// Теплофизика высоких температур, 2014, том 52, вып. 5, с. 710 – 717.
10. Бобылев А.В., Гузанов В.В., Квон А.З., Маркович Д.М., Харламов С.М. Формирование струй при волновом течении изотермических пленок жидкости// Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2015. Вып. 1(16). С. 139-142

11. Бобылев А.В., Гузанов В.В., Квон А.З., Маркович Д.М., Харламов С.М. Статистические характеристики волн на поверхности стекающей пленки жидкости// Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2015. Вып. 1(16). С. 232-235
12. Kharlamov S.M., Guzanov V.V., Bobylev A.V., Alekseenko S.V., Markovich D.M. The transition from two-dimensional to three-dimensional waves in falling liquid films: Wave patterns and transverse redistribution of local flow rates// *Physics of Fluids* (1994-present). – 2015. – Т. 27. – №. 11. – С. 114106.
13. 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. DOI: 10.1134/S1063785016030068.
14. Bobylev A., Guzanov V., Kvon A., Kharlamov S. Characteristics of film flow during transition to three-dimensional wave regimes// *Journal of Physics: Conference Series*. - 2016. - Vol. 754, - N. 3. - P. 032003. DOI:10.1088/1742-6596/754/3/032003.
15. Alekseenko S.V., Aktershev S.P., Bobylev A.V., Guzanov V., Kharlamov S., Markovich D. 3D instability of liquid films and rivulets// *MATEC Web of Conferences*. - 2016. - Vol. 84, - N. 00002. DOI:10.1051/matecconf/20168400002.
16. 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// *International Journal of Multiphase Flow*. – 2018. – Т. 99. – С. 474-484.
17. Heinz O.M., Arkhipov D.G., Vozhakov I.S., Guzanov V.V.. Evolution of three-dimensional waves on vertically falling liquid films. Comparison between calculations and experiment// *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1128 (2018) 012010.

**Апробация работы:** основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на 19 международных и Российских конференциях: XLIII международная Научная Студенческая Конференция «Студент и научно-технический прогресс», Россия, Новосибирск, 12–14 апреля 2005; EFMC6 6<sup>th</sup> EUROMECH Fluid Mechanics Conference, Stockholm, Sweden, 26–30 June 2006; International Topical Team Workshop Two-phase Systems for Ground and Space Applications, Brussels, Belgium, 19–21 September 2006; IX Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Россия, Новосибирск, 17–20 октября 2006; XLV Международная Научная Студенческая Конференция «Студент и научно-технический прогресс», Россия, Новосибирск, 10–12 апреля 2007; Школа-семинар молодых учёных «Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии», Россия, Новосибирск,

8–12 октября 2007; 6<sup>th</sup> International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2007, Leipzig, Germany, July 9–13, 2007; X Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Россия, Новосибирск, 18–21 ноября, 2008; VI Минский международный форум по тепло- и массообмену, Беларусь, Минск, 19–23 мая 2008; XXII International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, ICTAM-2008, Adelaide, Australia, 25–29 August 2008; EFMC7 EUROMECH Fluid Mechanics Conference 7, Manchester, United Kingdom, 14–18 September 2008; International Berlin Workshop (IBW5) on transport Phenomena with Moving Boundaries, Berlin, Germany, 8–9 October 2009; XLVIII Международная Научная Студенческая Конференция «Студент и научно-технический прогресс», Россия, Новосибирск, 10–14 апреля 2010; Всероссийской молодёжной конференции «Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей», Россия, Новосибирск, 21–23 апреля 2010; 14th Workshop on Transport Phenomena in Two-Phase Flow, Bansko, Bulgaria, July 21–26, 2010; Fourth International Symposium “Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics”, BIFD 2011, 18–21 July 2011, Barcelona, Spain; IV Всероссийской конференции «Фундаментальные основы МЭМС- и нанотехнологий», Новосибирск, Россия, 6 – 8 июня 2012; VI International Conference “Solitons, Collapses and Turbulence: Achievements, Developments and Perspectives”, 4–8 June 2012, Russia, Novosibirsk; 9<sup>th</sup> European Fluid Mechanics Conference, Italy, Rome, September 9– 3 2012; 13-ая международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков», 29 июня–3 июля 2015, Москва, 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; International Symposium and School of Young Scientists Interfacial Phenomena and Heat Transfer, Novosibirsk, Russia, March 2–4 2016; Всероссийская научная конференция с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика», Ялта, Крым, 19–25 сентября, 2016; 11<sup>th</sup> European Fluid Mechanics Conference, EFMC11, Seville, Spain, September 12–16 2016; 24<sup>nd</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Montreal, Canada, August 21–26, 2016; 9<sup>th</sup> World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Iguazu Falls, Brazil, 12–15 June 2017; III Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" с элементами школы молодых ученых, Ялта, Республика Крым, 10–16 сентября 2018 г.

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

Диссертация Гузанова В.В., посвященная экспериментальному исследованию трёхмерных волн на вертикально стекающих плёнках жидкости, соответствует паспорту специальности 1.1.9 – *“Механика жидкости, газа и плазмы”* для физико-математических наук.

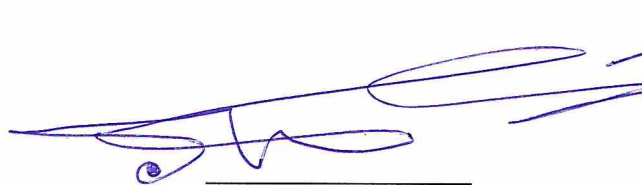
**Решение о рекомендации к защите.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Экспериментальное исследование трёхмерных волн на вертикально стекающих плёнках жидкости» Гузанова Владимира Владимировича является законченной научной работой, в которой получены результаты, имеющие важное значение для области гидродинамики волновых плёночных течений.

Диссертация «Экспериментальное исследование трёхмерных волн на вертикально стекающих плёнках жидкости» Гузанова Владимира Владимировича 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 члена-корреспондента РАН А.Н. Павленко. В качестве замечаний высказано пожелание сократить доклад, исключив малозначительные результаты, заменить обозначения на части графиков и конкретизировать терминологию.

Присутствовало на заседании 18 человек, в том числе 2 члена-корреспондента РАН, 14 докторов наук, 2 кандидата наук. Результаты голосования: «за» – 18 человек, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек. Протокол № 3 от 23 июня 2022 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