

Гузанов Владимир Владимирович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХМЕРНЫХ ВОЛН НА
ВЕРТИКАЛЬНО СТЕКАЮЩИХ ПЛЁНКАХ ЖИДКОСТИ**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), г. Новосибирск

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, академик РАН Алексеенко Сергей Владимирович.

Официальные оппоненты:

Ерманюк Евгений Валерьевич - доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, директор;

Бекежанова Виктория Бахытовна - доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Институт вычислительного моделирования» Сибирского отделения Российской академии наук, заведующая отделом дифференциальных уравнений механики, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

Защита состоится 23.11.2022 в 9.30 на заседании диссертационного совета 24.1.129.01, созданного на базе Федерального государственного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д.1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН: <http://www.itp.nsc.ru>

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.1.129.01 по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1 (email: dissovet@itp.nsc.ru)

Автореферат разослан «_____» _____ октября _____ 2022 г

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН

Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Интерес к изучению плёночных течений жидкости не угасает несколько десятилетий, что связано, в первую очередь, с их частым 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 дополнительной (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.

Целью настоящей работы является 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.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Реализовать систему, позволяющую проводить регистрацию толщины плёнки на плоскости с высоким пространственным разрешением при различных условиях течения.
2. Провести экспериментальное исследование эволюции волн, возбуждаемых точечным источником, для различных энергий возбуждения с использованием жидкостей с различными физическими свойствами.
3. Провести экспериментальное измерение характеристик стационарных уединённых подковообразных волн на участке безволновой плёнки для жидкостей с различными физическими свойствами.
4. Экспериментально изучить особенности взаимодействия искусственно возбуждаемых трёхмерных волн с возбужденными регулярными двумерными волнами.

5. Экспериментально изучить особенности формирования трёхмерных волн в результате распада возбужденных двумерных волн.

6. Экспериментально изучить особенности перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению на больших расстояниях от начала течения.

Научная новизна:

1. 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 δ 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.

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

3. 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. Впервые 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.

4. 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.

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 одиночных трёхмерных волн в режимах взаимодействия с регулярными двумерными волнами, характеризующихся стабильным повторением характеристик трёхмерного волнового движения, 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. 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.
2. Результаты экспериментального измерения характеристик стационарных уединённых трёхмерных волн на участке безволновой плёнки для жидкостей с различными физическими свойствами.
3. 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.
4. 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.

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.

Апробация работы.

Результаты работы 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 – 6th 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; 6th 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-th International Conference “Solitons, Collapses and Turbulence: Achievements, Developments and Perspectives”, 4 – 8 June 2012, Russia, Novosibirsk; 9th European Fluid

Mechanics Conference, Italy, Rome, September 9 – 13 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; 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; III Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" с элементами школы молодых ученых, Ялта, Республика Крым, 10-16 сентября 2018 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 42 работы, в том числе 17 статей в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих требованиям ВАК.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа представлена на 97 страницах, содержит 1 таблицу и 42 рисунка. Список литературы состоит из 104 наименований.

Личный вклад.

Серии экспериментов были проведены автором как самостоятельно, так и в составе научного коллектива. Автор 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 автором самостоятельно. Подготовка статей и докладов на конференциях проводилась автором самостоятельно или в составе научного коллектива.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определена цель и поставлены задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту, сформулированы новизна и

практическая значимость работы.

В **первой главе** диссертации, состоящей из двух разделов и заключения приведен обзор экспериментальных и численных работ по исследованию гравитационно стекающих плёнок жидкости как в изотермическом, так и в неизотермическом случаях, а также обзор методов исследования плёночных течений.

Анализ приведённых в литературе данных позволяет сделать вывод о том, что, несмотря на активное исследование плёночных течений на протяжении последних десятилетий, трёхмерное волновое движение на поверхности плёнки остается недостаточно изученным. Тогда как в широком диапазоне значений числа Рейнольдса Re развитый трёхмерный волновой режим является конечной стадией волновой эволюции при плёночном течении.

Результаты математического моделирования на основе представленных в литературе моделей хорошо согласуются с экспериментальными результатами для двумерных волновых режимов. Получаемые в результате моделирования трёхмерные волновые поля напоминают волновые поля, наблюдаемые в экспериментах, однако для оценки применимости моделей требуются дополнительные количественные сравнения с экспериментальными данными.

Основными трудностями для прямого сравнения результатов моделирования с экспериментами являются: нестационарность происходящих на поверхности плёнки процессов (включая частые межволновые взаимодействия), а также существенная зависимость волновой картины от начальных условий. Однако, как было показано ранее (для малых Re), в экспериментах удаётся зарегистрировать уединённые стационарные трёхмерные волны, характеристики которых хорошо согласуются с теоретическими результатами. Стоит отметить, что форма этих волн близка к форме волн, наблюдаемых в экспериментах в развитых трёхмерных волновых режимах. Таким образом, представленные в литературе экспериментальные данные по стационарным трёхмерным волнам представлены в небольшом количестве работ и носят отрывочный характер. Можно заключить, что в целом, в литературе не представлено данных о систематическом изучении стационарных трёхмерных волн: отсутствуют экспериментальные данные о характеристиках стационарных волн для различных жидкостей. Также в литературе отсутствуют данные о взаимодействии таких трёхмерных волн с регулярными двумерными волнами.

Также остаётся недостаточно изученными особенности плёночного течения при переходе от двумерного к трёхмерному волновому движению. Несмотря на ранее проведённые экспериментальные исследования этого перехода, представленные в литературе данные не содержат достаточной информации о толщине плёнки и, соответственно, о форме волн.

Очевидно, что для получения полной достоверной информации о трёхмерном волновом

движении необходимо применять полевые методы измерения толщины плёнки. При наличии свободного оптического доступа, одним из наиболее перспективных методов исследования является метод лазерно-индуцированной флуоресценции, который позволяет получать мгновенные поля толщины с высоким пространственным и временным разрешением.

Вторая глава посвящена описанию методик исследований и экспериментальных установок.

В разделе 2.1 приведены свойства рабочих жидкостей (вода и 4 водоглицериновых раствора). Значения числа Капицы $\gamma = (\sigma/\rho) v^{-4/3} g^{-1/3}$ для которых составляют: 3360 для воды, 1170 для водоглицеринового раствора 1 (ВГР1), 520 для ВГР2, 210 для ВГР3, 1730 для ВГР4 и 400 для водно-спиртового раствора (ВСП). Здесь ρ — плотность жидкости, σ — коэффициент поверхностного натяжения, v — кинематическая вязкость, g — ускорение свободного падения.

Далее приведено описание экспериментальных стендов, начиная с общей схемы экспериментальной установки (рисунок 1). Установка состоит из замкнутого гидродинамического контура (включающего рабочий участок 1), регистрирующей аппаратуры 10 и источника локальных возмущений 2. Рабочая жидкость из накопительного бака 6 насосом 7 перекачивается в бак постоянного уровня 5, далее через регулирующий кран 11 и ротаметр 4 подаётся через щелевой распределитель на рабочий участок 1 и далее обратно в накопительный бак 6. На расход рабочей жидкости могут быть наложены гармонические возмущения частотой F при помощи генератора возмущений расхода 3, который управляется низкочастотным генератором сигналов 8. При помощи генератора 3 на плёнке можно возбуждать периодические двумерные волны. Регистрация картины течения производилась при помощи регистрирующей аппаратуры 10, данные с которой поступали на компьютер 12.

Описанный выше рабочий участок 1 использовался при проведении экспериментального исследования уединённых трёхмерных волн при

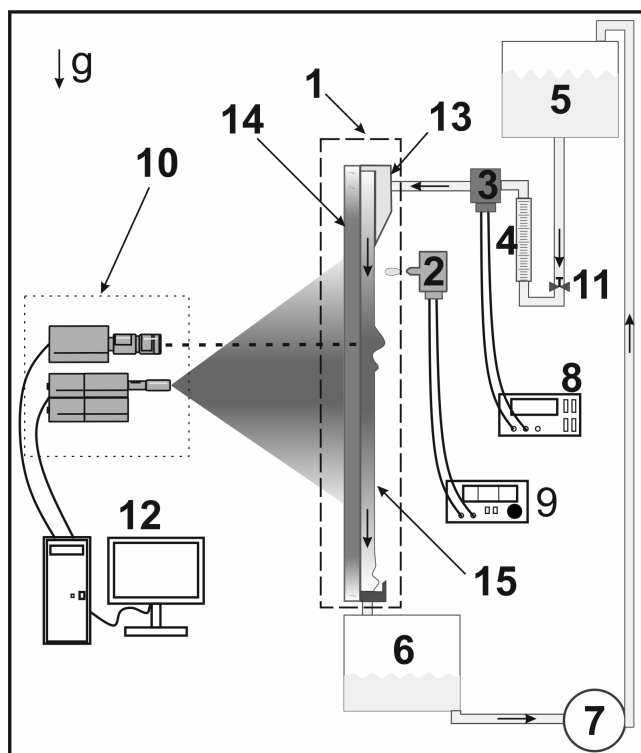


Рисунок 1 – Общая схема экспериментальной установки.

изотермическом течении плёнки, а также при исследовании взаимодействия уединённой волны с регулярными двумерными волнами. Далее в главе приведено описание модификации установки для изучения волновых полей на большом (до 140 см) расстоянии от начала течения.

Дополнительно приведена схема экспериментальной установки по изучению течения в горизонтальном микроканале, на которой проводилась апробация одной из высокоскоростных модификаций метода лазерно-индуцированной флуоресценции.

Далее в разделе 2.2 приведены основные принципы метода лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ). Метод основан на переизлучении растворённым в рабочей жидкости флуороформ света с отличным от возбуждающего излучения спектральным составом. Причем регистрируемая яркость в каждой точке пропорциональна локальной толщине плёнки. Описан общий алгоритм действий позволяющий восстанавливать мгновенные поля толщины из получаемых в экспериментах изображений. Приведено описание реализации метода с использованием адаптированной (для проведения измерений методом ЛИФ) PIV аппаратуры. Также в разделе приведена оценка погрешностей измерений методом ЛИФ, которые не превышают 4 — 5 % от измеряемой толщины плёнки.

В разделе 2.3 описано развитие метода ЛИФ для проведения высокоскоростных (с частотой 100 Гц и более) измерений толщины плёнки жидкости. Приведено описание реализации метода с использованием скоростной камеры с линейным датчиком (размером 1×2048 пикселя) совместно с непрерывным диодным лазером мощностью 50 мВт. Показана применимость данного метода для измерения толщины не только для свободно стекающих плёнок жидкости, но и для течения плёнки совместно с газовым потоком в горизонтальном микроканале. Далее описана реализация метода с использованием высокоскоростной камеры с матрицей размером 1280×1024 пикселя и непрерывного диодного лазера мощностью 2 Вт, позволяющие получать мгновенные поля скорости с высоким временным (до 500 кадров в секунду в режиме полного кадра) и пространственным (обычно в диапазоне от 0,1 до 0,2 мм на пиксель) разрешениями.

В разделе 2.4 показана применимость метода ЛИФ для измерений толщины плёнки воды в неизотермическом случае (при малом испарении) и возможность совместного применения высокоскоростного метода ЛИФ и ИК сканера для одновременного измерения полей скорости и температуры. Показана слабая зависимость (менее 1%) яркости свечения Родамина 6Ж от температуры при рабочих концентрациях флуорофора в воде (10 — 15 мг/л). Показано, что учет изменения коэффициента отражения в пространстве (например, на границе нагревателя) позволяет восстанавливать толщину плёнки без ошибок даже в области

резкого изменения коэффициента отражения.

Далее в разделе 2.5 приведено описание модифицированного метода теневой фотографии, который использовался в работе для получения волновой картины на всей поверхности большой пластины. Модификация метода, которая заключается в расположении экрана на удалении около 4 — 7 см от исследуемого плёночного течения, позволяет получать на одном изображении светотеневую картину, на которой видны элементы течения как с малой, так и с большой кривизной поверхности.

В **третьей главе** представлены результаты исследования эволюции возбужденных уединённых трёхмерных волн на поверхности вертикально стекающей плёнки жидкости, а также результаты экспериментального исследования взаимодействия такой трёхмерной волны с возбужденными регулярными двумерными волнами. Эксперименты проводились с использованием жидкостей с различными физическими свойствами в диапазоне $2 < Re = q_{sp}/\nu < 40$, где q_{sp} — удельный расход жидкости, ν — кинематическая вязкость. Что соответствует значениям модифицированного числа Рейнольдса $0,03 < \delta = 3^{-7/9} 5^{-1} \gamma^{-1/3} Re^{11/9} < 0,35$.

В **разделе 3.1** приведены результаты экспериментального исследования эволюции локального возмущения, производимого в экспериментах ударом капли рабочей жидкости, в области безволнового течения пленки для жидкостей с различными физическими свойствами. Зарегистрированы два сценария эволюции: формирование цуга волн и эволюция в виде уединённой волны. Расчеты с использованием модели Капицы-Шкадова хорошо согласуются с экспериментальными данными по эволюции таких волн.

Экспериментально зарегистрированы уединённые стационарные трёхмерные волны на участке безволновой плёнки. Волна считалась стационарной, если её амплитуда A (максимальная высота над невозмущённой плёнкой), скорость C , ширина на полувывоте вдоль Dx и поперек течения Dy (рисунок 2) оставались постоянными на протяжении не менее

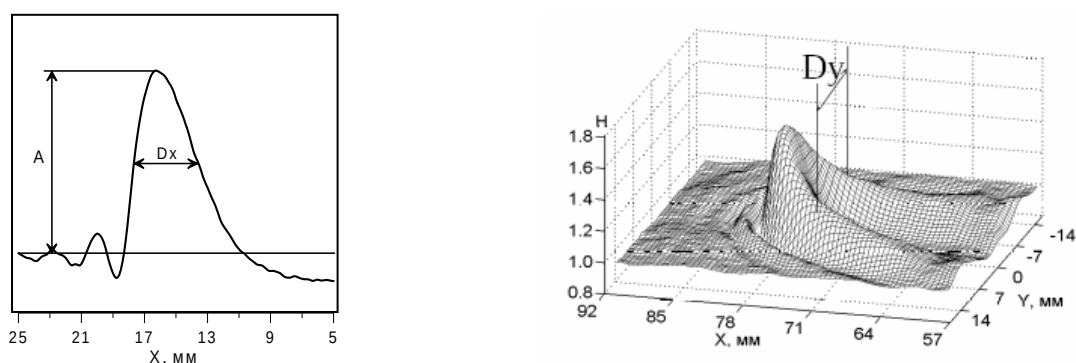


Рисунок 2 – Параметры, описывающие форму волны. Волна движется справа налево. Слева – сечение волны вдоль течения, проведённое через максимум основного гребня.

трёх продольных размеров волны в нижней части безволнового участка плёнки (рисунок 3).

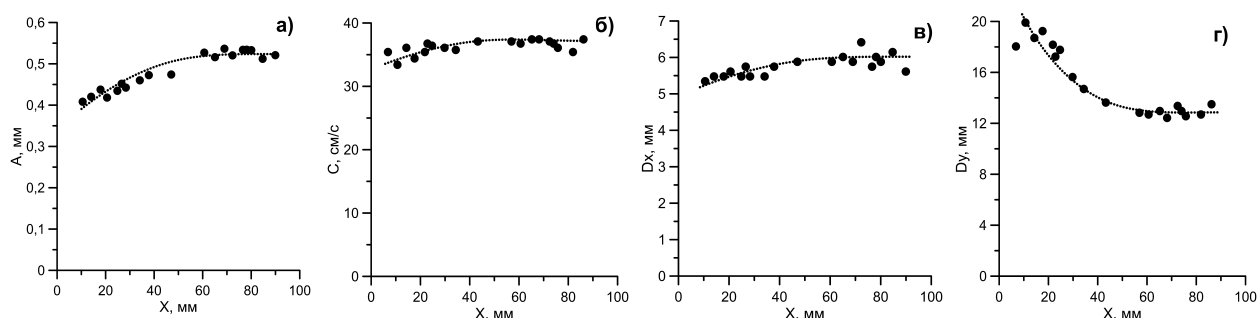


Рисунок 3 – Пример поведения параметров волны вышедшей на стационарный режим в пределах рабочей области. ВГР2 ($\gamma = 520$), $Re=7$.

Измеренные характеристики стационарных уединённых трёхмерных волн хорошо согласуются с результатами моделирования на основе уравнений Капицы-Шкадова вплоть до значений модифицированного числа Рейнольдса $\delta \approx 0,06$ (рисунок 4). С увеличением δ наблюдается расслоение характеристик волн в зависимости от свойств жидкости с отклонением от теоретических значений. Причём основные закономерности изменения характеристик (включая форму волн) согласуются с результатами моделирования. Таким образом, область применимости существующих теоретических моделей для описания стационарных трёхмерных волн, по-видимому, ограничена значениями $\delta < 0.1$.

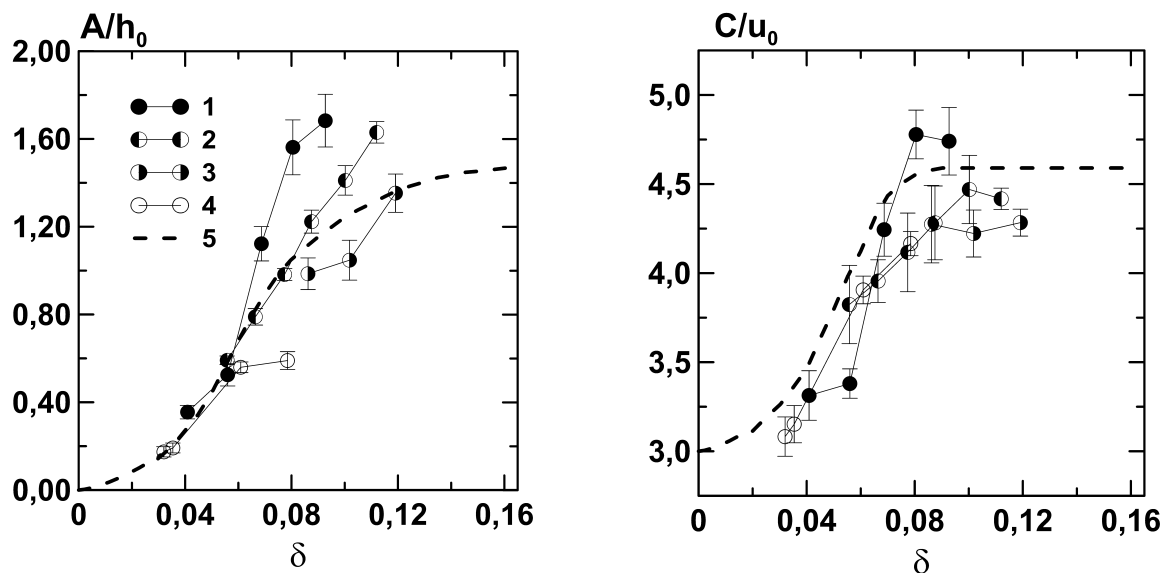


Рисунок 4 – Амплитуда A и скорость C стационарных трёхмерных волн (h_0 — толщина невозмущённой плёнки, u_0 — среднерасходная скорость течения). 1 — экспериментально зарегистрированные значения для ВГР3 ($\gamma = 210$), 2 — для ВГР2 ($\gamma = 520$), 3 — для ВГР1 ($\gamma = 1170$), 4 — для ВСР ($\gamma = 400$). Линия 5 — теоретические значения, полученные по модели Капицы-Шкадова.

В разделе 3.2 приведены результаты экспериментального исследования особенностей

взаимодействия возбуждённых точечным возмущением трёхмерных волн с возбужденными двумерными волнами. При взаимодействии трёхмерной волны с низкочастотными двумерными волнами наблюдается последовательное затухание трёхмерной волны. В случае взаимодействия с высокочастотными (близкими по форме к синусоидальным) двумерными волнами наблюдается устойчивое распространение трёхмерных волн с сохранением ими характерной подковообразной формы (рисунок 5 а). В этом случае, в зависимости от режимных параметров и условий возбуждения, помимо затухания или роста трёхмерной волны, были зарегистрированы стабильные режимы взаимодействия трёхмерных подковообразных волн с высокочастотными двумерными. Такие режимы характеризуются полным повторением характеристик трёхмерной волны в одинаковых фазах каждого последующего акта взаимодействия с двумерной волной. Характеристики трёхмерных волн в таких режимах хорошо обобщаются в безразмерных координатах, предложенных для описания характеристик стационарных трёхмерных волн на гладкой плёнке (рисунок 5 б)). При этом средние значения амплитуды трёхмерных волн в стабильных режимах взаимодействия оказываются существенно ниже значений амплитуды стационарных волн на гладкой плёнке.

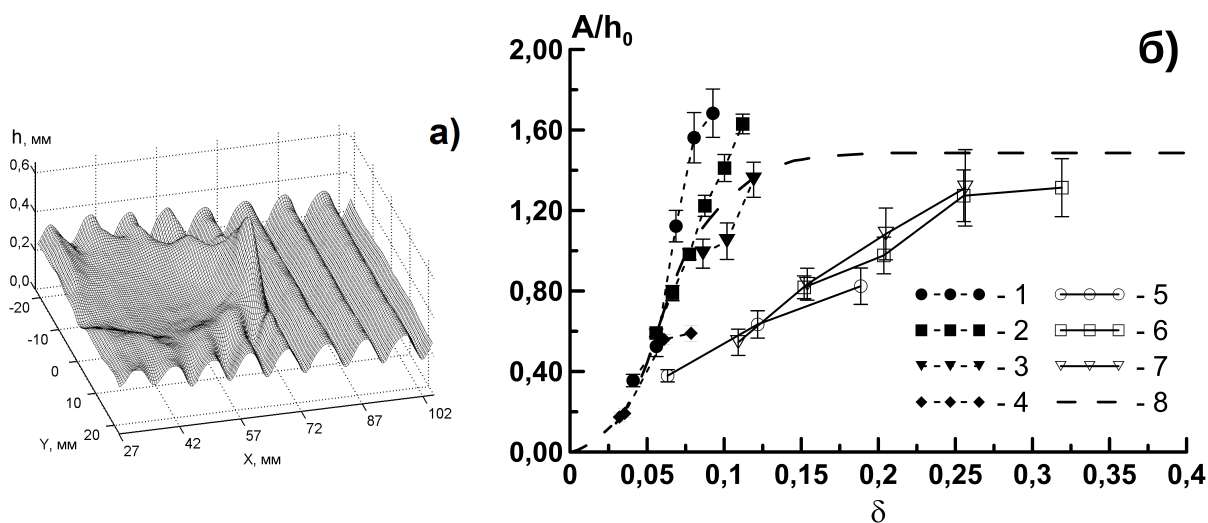


Рисунок 5 – а) форма волны при взаимодействии с высокочастотными двумерными волнами, ВГР1 ($\gamma = 1170$), $Re = 14$, $\delta = 0.2$, $F = 25$ Гц. б) Амплитуда стационарных уединённых волн (символы 1 — 4) и трёхмерных волн в стабильных режимах взаимодействия (символы 5 — 7). 1 и 5 — ВГР3 ($\gamma = 210$), 2 и 6 — ВГР2 ($\gamma = 520$), 3 и 7 — ВГР1 ($\gamma = 1170$), 4 — ВСР ($\gamma = 400$), 8 — теоретические значения амплитуды стационарных волн, полученные по модели Капицы-Шкадова.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования процессов перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению на поверхности вертикально стекающих плёнок жидкости как в начальной области течения, так и при больших

расстояниях (до 140 см) от распределителя.

В **разделе 4.1.** представлены результаты экспериментального исследования режимов перехода от регулярного двумерного к трёхмерному волновому режиму течения, как в случае естественной эволюции, так и в случае искусственного разрушения двумерных волн регулярной гребенкой из игл. Эксперименты проводились в начальной части течения (на расстояниях до 25 см от распределителя) в диапазоне $10 < Re < 70$ с использованием воды и ВГР2 в качестве рабочих жидкостей. Образующиеся в процессе перехода трёхмерные волны отличаются от подковообразных волн: они имеют вытянутую в направлении течения форму с заполненным задним склоном (рисунок 6). Обнаружено, что характерные размеры трёхмерных волн не зависят от размеров начальных возмущений и лежат в достаточно узком диапазоне значений. Впервые 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.

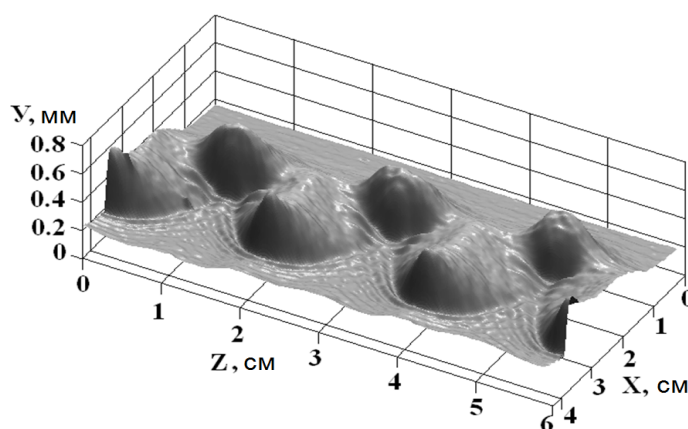


Рисунок 6 – Форма структур, формирующихся при разрушении двумерных волн регулярной гребенкой с шагом 2 см. Вода, $Re = 65$, $F = 16$ Гц.

В **разделе 4.2.** Исследование волновой картины на больших расстояниях (до 140 см) от распределителя позволило обобщить основные закономерности волновой эволюции при переходе от двумерного к трёхмерному волновому движению в диапазоне $5 < Re < 100$. Выделено три сценария эволюции. Первый сценарий, наблюдаемый при $Re < Re_1$, где $5 < Re_1 < 15$ для всех исследованных жидкостей, характеризуется отсутствием 2D-3D перехода. При превышении порогового значения Re_1 на поверхности плёнки наблюдается 2D-3D переход, при котором исходно двумерные волны (как естественные, так и возбужденные) распадаются на трёхмерные с характерными продольными и поперечными размерами 1 — 2 см (рисунок 7). В интервале $Re_1 < Re < Re_2$, где для всех исследованных жидкостей $40 < Re_2 < 60$, наблюдается второй сценарий эволюции с формированием хорошо различимых струй. Волновая картина течения для случаев эволюции естественных и возбужденных волн в данном сценарии имеет заметные различия. 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 практически не чувствительна к начальным условиям.

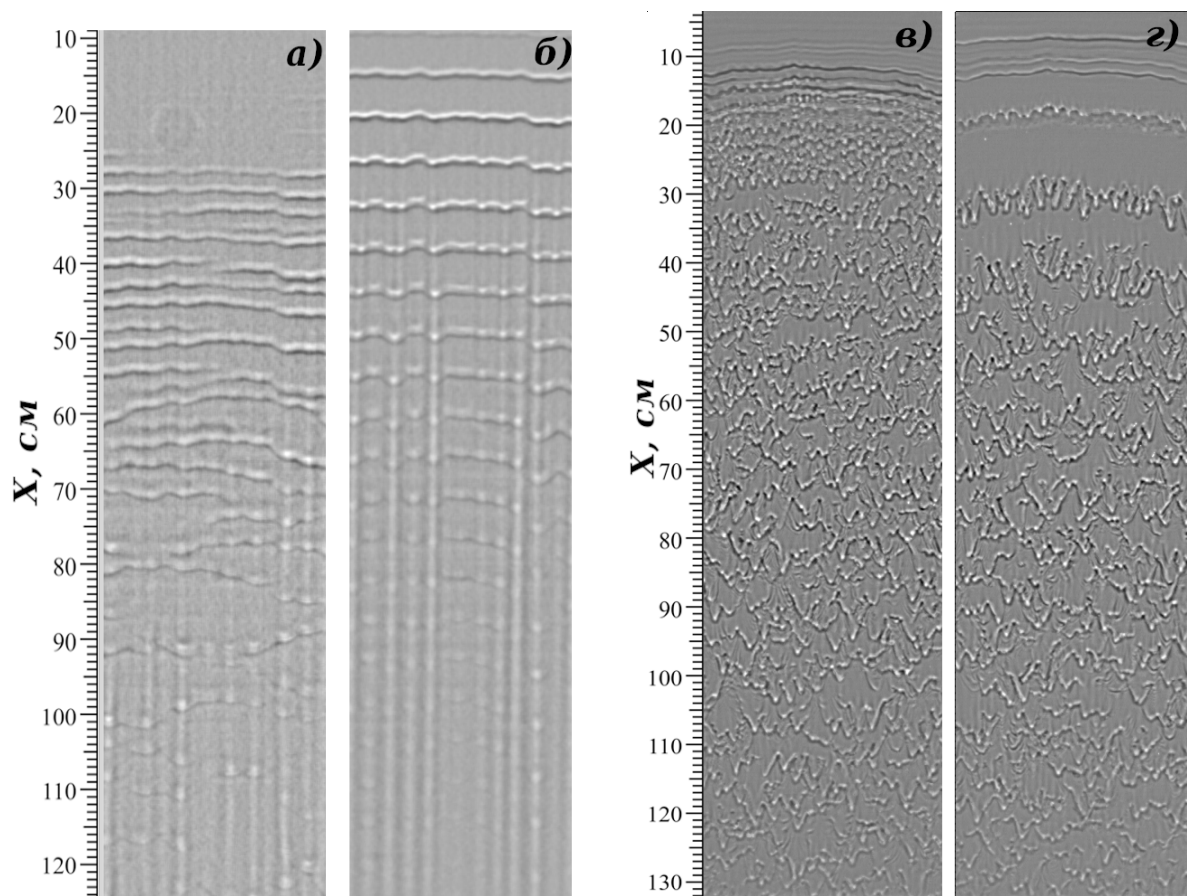


Рисунок 7 – Теневые изображения течения. а) ВГР4, $Re = 25$, без возбуждения; б) ВГР4 ($\gamma = 1730$), $Re = 25$, $F = 8$ Гц; в) вода, $Re = 91$, без возбуждения; г) вода, $Re = 91$, $F = 8$ Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено экспериментальное исследование особенностей эволюции уединённых (возбуждаемых точечным источником) трёхмерных волн на вертикально стекающей плёнке в диапазоне $2 < Re < 40$. Для жидкостей с различными физическими свойствами экспериментально и численно исследована эволюция начального возмущения в области безволнового течения пленки. Для всех жидкостей зарегистрированы два сценария эволюции: формирование цуга волн и эволюция в виде уединённой волны. Расчеты с использованием модели Капицы-Шкадова хорошо согласуются с экспериментальными данными по эволюции таких волн. Экспериментально зарегистрированы стационарные трёхмерные волны, характеристики которых хорошо согласуются с результатами расчетов по модели Капицы-Шкадова. Отклонение измеренных характеристик (с расслоением в зависимости от свойств жидкости) от теоретических наблюдается при значениях

модифицированного числа Рейнольдса $\delta > 0,06$. Причем основные закономерности изменения характеристик (включая форму волн) согласуются с результатами моделирования. Таким образом, область применимости существующих теоретических моделей для описания стационарных трёхмерных волн, по-видимому, ограничена значениями $\delta < 0,1$.

2. Проведенное экспериментальное исследование особенностей взаимодействия трёхмерных волн с регулярными двумерными показало наличие стабильных режимов взаимодействия трёхмерных подковообразных волн с высокочастотными двумерными. 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 стабильных режимах взаимодействия оказываются существенно ниже значений амплитуды стационарных волн на гладкой плёнке.

3. Экспериментально исследованы режимы перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению на вертикально стекающих плёнках жидкости в диапазоне $5 < Re < 100$. Образующиеся в процессе перехода трёхмерные волны отличаются от подковообразных волн: они имеют вытянутую в направлении течения форму с заполненным задним склоном, а их характерные размеры не зависят от размеров начальных возмущений и лежат в достаточно узком диапазоне значений. Впервые в процессе перехода от двумерного к трёхмерному волновому режиму течения обнаружено образование струй, что свидетельствует о перераспределении жидкости в поперечном направлении.

4. Исследование волновых полей на больших расстояниях (до 140 см) от распределителя позволило установить основные закономерности волновой эволюции при переходе от двумерного к трёхмерному волновому движению и выделить 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 практически не чувствительна к начальным условиям.

Основное содержание диссертации изложено в следующих рецензируемых работах (удовлетворяющих требованиям ВАК):

1. Гузанов В.В., Харламов С.М. Экспериментальное исследование эволюции трёхмерных волн на поверхности вертикально стекающих плёнок жидкости// Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2007. – Т. 2. – вып. 3. – С. 3-7.
2. Чиннов Е.А., Гузанов В.В., Кабов О.А. Неустойчивость двухфазного течения в прямоугольном микроканале// Письма в журнал технической физики. – 2009. – Т. 35. – №. 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. – Т. 21. – №. 1. – С. 199-205.
4. Алексеенко С.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М. Характеристики уединенных трехмерных волн на вертикально стекающих пленках жидкости// Письма в Журнал технической физики. – 2010. – Т. 36. – №. 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. – 2011. – Т. 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 Журнал технической физики. – 2012. – Т. 38. – №. 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 Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40. – №. 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 Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40. – №. 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. – Т. 52. – №. 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. – Т. 6. – №. 2015_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. – Т. 6. – №. 2015_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 Журнал технической физики. – 2016. – Т. 42. - № 5. - С. 24-31.

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.

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.

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// Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1128. – №. 1. – С. 012010.