

На правах рукописи



**Харламов Сергей Михайлович**

**Экспериментальное исследование эволюции волн на поверхности  
стекающих пленок жидкости.**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук ФАНО России.

Научный руководитель:

Алексеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, академик РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, зав. отделом физической гидродинамики.

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, зам. директора по науке.

Калайдин Евгений Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Кубанский государственный университет, профессор кафедры прикладной математики.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь.

Защита состоится 27 июня 2018 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 003.053.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, <http://www.itp.nsc.ru/>

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 003.053.01 по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1 (факс: (383) 330-84-80, e-mail: [dissovet@itp.nsc.ru](mailto:dissovet@itp.nsc.ru))

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» мая 2018 г.

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



Кузнецов Владимир Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Интерес к пленочным течениям жидкости обусловлен как прикладной, так и фундаментальной значимостью этого класса течений. С практической точки зрения такие течения реализуются при различных технологических процессах и присутствуют в технологических установках различного назначения. При этом волновая структура пленочного течения оказывает существенное или определяющее воздействие на режимные особенности работы установок. Например, за счет влияния волн на поверхности жидких пленок, стекающих под действием гравитации, происходит значительная интенсификация тепломассопереноса через свободную поверхность жидкости, а в присутствии высокоскоростного газового потока межфазный коэффициент трения за счет волн на поверхности пленки может возрасти в несколько раз. Волны, образующиеся при течении жидких пленок, являются классическим объектом для изучения нелинейных эффектов, дисперсии, накачки и диссипации энергии, что делает этот вид течений привлекательным для теоретических исследований, результаты которых могут применяться для развития теории нелинейных волновых явлений в других физических системах.

В связи с высоким интересом к волновым процессам при пленочных течениях жидкости, такие режимы интенсивно исследуются на протяжении нескольких последних десятилетий. Поскольку моделирование пленочных течений в полной постановке уравнений Навье-Стокса с заданием граничных условий на свободной поверхности волновых пленок является чрезвычайно сложной задачей, требующей больших вычислительных ресурсов, для теоретического исследования волновых режимов течения в основном используются модельные системы уравнений пониженной размерности или эмпирические модели, основанные на статистическом анализе экспериментальных данных. При этом предлагаемые различными авторами эмпирические зависимости сильно различаются между собой, что оставляет открытым вопрос о правомерности использования предлагаемых корреляций для описания режимов течения с параметрами, отличными от условий проведения экспериментов. Наиболее плодотворным подходом оказалось сочетание анализа моделей пониженной размерности с экспериментальными исследованиями волновых режимов, выполненными в постановке, позволяющей проводить прямое сравнение результатов моделирования и эксперимента.

В настоящее время теория двумерных волновых режимов пленочного течения жидкости под действием силы тяжести разработана достаточно полно. В то же время, трехмерные волновые режимы гравитационного пленочного течения, как и волновые режимы течения пленок, обдуваемых

газовым потоком, исследованы в гораздо меньшей степени, что отчасти связано с отсутствием в литературе достаточного количества экспериментальных данных, необходимых для проверки развиваемых применительно к таким режимам теоретических моделей. Получение таких данных является актуальной задачей при исследовании указанных режимов пленочного течения.

**Целью работы** является экспериментальное исследование волновых режимов, реализующихся при пленочном течении жидкости, и получение волновых характеристик, позволяющих проводить прямое сравнение результатов эксперимента и теоретического анализа.

#### **Научные задачи:**

- Исследование частотной восприимчивости и получение дисперсионных зависимостей фазовой скорости и инкремента амплитуды двумерных волн на поверхности пленки на начальном участке кольцевого газо-жидкостного течения в вертикальном канале для случаев восходящего и опускного течения газа.
- Изучение закономерностей эволюции локализованных трехмерных возмущений на поверхности вертикально стекающих пленок жидкости.
- Разработка системы диагностики пленочных течений методом лазерно-индуцированной флюоресценции (метод ЛИФ) для проведения полевых измерений толщины пленки жидкости, стекающей по пластине.
- Получение количественной информации о форме уединенных трехмерных волн на пленках жидкости, свободно стекающей по вертикальной пластине.

#### **Научная новизна:**

- Впервые экспериментально определены дисперсионные зависимости фазовой скорости и инкремента амплитуды для развивающихся регулярных двумерных волн малой амплитуды на вертикальной пленке жидкости в присутствии турбулентного газового потока.
- Разработана система диагностики пленочных течений методом ЛИФ, позволяющая определять скорость и мгновенную форму трехмерных волн на поверхности стекающих по пластине пленок жидкости.
- Впервые экспериментально исследованы закономерности эволюции локализованных трехмерных возмущений на поверхности вертикально стекающих пленок жидкости. Впервые экспериментально показано существование уединенных стационарных трехмерных волн и измерены их характеристики.

**Теоретическая и практическая значимость.** Методы измерений, разработанные и адаптированные автором для исследования пленочных течений жидкости, позволяют исследовать волновую структуру на

поверхности пленок жидкости в различных условиях, в том числе в дисперсно-кольцевых газожидкостных потоках, при неизотермическом пленочном течении, при ручейковом течении жидкости по плоским поверхностям.

Результаты экспериментов по исследованию волновых характеристик на поверхности пленок, обдуваемых газом или свободно стекающих по вертикальной поверхности, получены в детерминистской постановке и позволяют проводить прямое сравнение результатов эксперимента и теоретического анализа.

#### **На защиту выносятся:**

- Результаты экспериментального определения дисперсионных зависимостей фазовой скорости и инкремента амплитуды для развивающихся регулярных двумерных волн малой амплитуды на вертикально стекающей пленке жидкости в присутствии турбулентного газового потока.

- Принципы построения системы диагностики пленочных течений методом ЛИФ для измерения характеристик двумерных и трехмерных волн на поверхности жидких пленок.

- Результаты экспериментального исследования закономерностей эволюции трехмерных волн, возбуждаемых локальным источником на поверхности пленок жидкости, свободно стекающих по вертикальной поверхности.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается: проведением специальных тестовых и калибровочных экспериментов; использованием методов измерений, отработанных на близких к исследуемым объектах изучения; оценкой погрешностей измерений; воспроизводимостью результатов опытов; сопоставлением в возможных случаях полученных результатов с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов.

**Личный вклад автора.** Лично автором разработаны и отлажены системы диагностики пленочного течения с использованием локальных датчиков измерения толщины пленки, проанализирована и изготовлена оптическая система диагностики на основе метода ЛИФ, написаны и протестированы программы обработки полученного экспериментального материала. Изготовление экспериментальных участков, проведение экспериментов, обработка и анализ экспериментальных данных, подготовка публикаций осуществлялись лично автором, либо при его непосредственном участии.

**Представление работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 9 международных и Российских конференциях: 5<sup>th</sup> International Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (Thessaloniki, Greece, 2001); 3<sup>rd</sup> International Conference on

Transport Phenomena in Multiphase Systems (Kielce, Poland, 2002); 2<sup>nd</sup> International Berlin Workshop On Transport Phenomena With Moving Boundaries (Berlin, Germany, 2003); 16<sup>th</sup> International Congress on Chemical and Process Engineering (Prague, Czech Republic, 2004); 3<sup>rd</sup> International Congress on Two-Phase flow Modelling and Experimentation (Pisa, Italy, 2004); 5th International Conference on Multiphase Flow (Yokohama, Japan, 2004); Всероссийской конференции «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент, приложения» (Бийск, Россия, 2005); International Topical Team Workshop Two-phase Systems for Ground and Space Applications (Brussels, Belgium, 2006); 6<sup>th</sup> International Conference on Multiphase Flow (Leipzig, Germany 2007).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 5 рецензируемых журнальных статей, удовлетворяющих требованиям ВАК. Список основных работ приведен в конце автореферата.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 119 страницах, содержит 68 иллюстраций и 1 таблицу. Библиографический список включает 181 наименование.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** показана актуальность темы исследования, сформулирована цель и поставлены задачи работы, определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов и описан личный вклад автора работы.

**В главе 1** проведен обзор литературы и рассмотрено современное состояние исследований, посвященных волновым режимам пленочного течения жидкости.

**В разделе 1.1** рассмотрены основные результаты, полученные к настоящему времени при экспериментальном и теоретическом исследовании волн на поверхности пленок жидкости, свободно стекающих под действием силы тяжести.

**В разделе 1.2** представлен обзор литературы по исследованию волн на поверхности жидкой пленке при дисперсно-кольцевом режиме газожидкостного течения.

**В разделе 1.3** рассмотрены экспериментальные методы исследования пленочных течений. Поскольку в литературе имеются достаточно подробные обзоры традиционных методов диагностики пленочных течений, основное внимание уделяется методам измерения, появившимся в последнее время.

На основании проведенного анализа литературы сформулированы цель и задачи исследования.

**В главе 2** приведено описание экспериментальных установок и измерительных методик, использованных в работе.

В разделе 2.1 дано описание общих элементов конструкции экспериментальных установок. Во всех случаях пленочное течение организовывалось на вертикальной поверхности рабочих участков. Общим в конструкции установок является устройство гидродинамического контура и способ возбуждения регулярных волн на пленке при помощи модуляции расхода жидкости, подаваемой на рабочий участок.

Возбуждение регулярных волн используется для контроля равномерности орошения всех рабочих участков. При равномерном орошении возбужденные на вертикально стекающей пленке жидкости волны являются двумерными. В экспериментах по исследованию частотной восприимчивости пленки жидкости, обдуваемой газовым потоком, исследуются начальная эволюция возбужденных волн в зависимости от их частоты и амплитуды.

В разделе 2.2 приводится описание установки для исследования начальной эволюции волн на поверхности пленки жидкости при кольцевом режиме газожидкостного течения. Рабочий участок представляет собой оргстеклянную трубу с внутренним диаметром 15 мм и длиной 120 см. Устройство участка допускает организацию опускного и восходящего течения газа. Измерение волновых характеристик производится на начальном участке пленочного течения датчиками проводимости с электродами, вделанными заподлицо с внутренней стенкой рабочего участка.

В разделе 2.3 приводится описание установок по исследованию эволюции локализованных трехмерных возмущений на вертикально стекающих пленках жидкости. Возбуждение локализованных трехмерных возмущений осуществляется ударом короткой струйки рабочей жидкости о пленку. Струйка выбрасывается из сопла источника с импульсным электродинамическим приводом. Одновременно с подачей электрического импульса на мембрану подается синхроимпульс, запускающий систему регистрации. Энергия возбуждения локализованного возмущения (масса и скорость выбрасываемой в струйке жидкости) варьируется в широких пределах в зависимости от выходного диаметра сопла и величины напряжения, подаваемого на источник. Расстояние от среза сопла источника до поверхности пленки составляет 1 - 2 мм. При таких расстояниях регистрируемая на разных расстояниях вниз по потоку от точки возбуждения волновая картина отличается высокой повторяемостью: при фиксированной энергии возбуждения разброс по амплитуде для последовательно возбуждаемых волн не превышает 1 – 2%, разброс по времени вступления во всей области измерений не превышает 2,5% от характерного периода возбужденных волн.

Эксперименты по исследованию эволюции локализованных трехмерных возмущений проводились на двух различных установках. Эксперименты с

использованием локальных методов измерения толщины пленки проводились на рабочем участке, представлявшим собой вертикально установленный оргстеклянный цилиндр диаметром 6 см и длиной 100 см.

Эксперименты с использованием полевого измерителя толщины пленки методом лазер индуцированной флуоресценции (метод ЛИФ) проводились на рабочем участке, представлявшем собой вертикальную пластину из оптически однородного стекла шириной 20 и длиной 30 см.

В разделе 2.4 приводится описание локальных методов измерений, использовавшихся в экспериментах. Для исследования эволюции локализованных трехмерных возмущений на поверхности вертикально стекающих пленок использовались *модифицированный теневой метод* и *датчики проводимости с вынесенными в поток электродами*. В силу недостаточной механической прочности датчиков с вынесенными в поток электродами, для исследования начальной эволюции двумерных волн при кольцевом газожидкостном течении использовались *датчики проводимости с вделанными заподлицо со стенкой электродами*.

*Модифицированный теневой метод* подробно описан в [Алексеевко С.В., и др., 1992]. Принцип действия метода основан на регистрации яркости света, проходящего через узкий зазор между неподвижным экраном и поверхностью пленки. В экспериментах использовалась двухканальная система измерений теневым методом с локальностью измерений 50 мкм. Погрешность измерений толщины пленки в условиях эксперимента не превышала 2,5%.

Поскольку при регистрации трехмерных волн возможны ситуации, при которых происходит затенение области измерения проходящим сбоку от измерительного объема гребнем волны, часть измерений проводилась с использованием *датчиков проводимости с вынесенными в поток электродами*. Для уменьшения возмущающего воздействия на течение жидкости в качестве электродов для датчиков этого типа использовалась платиновая проволока диаметром 50 мкм, локальность измерения составляла 0,5 – 0,6 мм. Погрешность измерений толщины пленки датчиками проводимости с вынесенными в поток электродами составляла в условиях эксперимента от 1% при максимальных расходах жидкости до 2,5% при минимальных расходах.

*Датчики с вделанными заподлицо со стенкой электродами* имели конструкцию с коаксиальным расположением электродов. Такая конструкция минимизирует взаимное влияние каналов при параллельном включении нескольких датчиков. Локальность измерений датчиками этого типа составляла 3 мм. Погрешность измерений датчиками проводимости с вделанными в стенку электродами возрастает с увеличением расхода жидкости. Для экспериментально исследованных режимов максимальная

погрешность измерений датчиками этого типа не превышала 3%.

В разделе 2.5 приводится описание метода лазер индуцированной флуоресценции для проведения полевых измерений локальной толщины пленок жидкости.

Принцип измерения основан на восстановлении толщины пленки по интенсивности излучения, испускаемого флуоресцентным красителем, растворенным в небольшой концентрации в рабочей жидкости. Для восстановления мгновенного распределения толщины пленки по поверхности рабочего участка, ее освещают внешним источником света, возбуждающим флуоресценцию и фотографируют исследуемую область пленочного течения цифровой камерой. Локальность метода определяется разрешением камеры. Впервые в такой постановке метод был использован в работе [Liu J., et al., 1993] и назван авторами методом флуоресцентной визуализации. Как правило, в методе флуоресцентной визуализации для возбуждения флуоресценции используется ультрафиолетовое излучение от протяженных источников (газоразрядных ламп). Отличительной особенностью метода ЛИФ, использованного в данной работе, является то, что флуоресценция возбуждается лазерным излучением, что позволяет упростить процедуру калибровки измерительной системы и анализ ошибок, связанных с оптическими искажениями.

Аппаратный комплекс применявшейся измерительной системы основан на базе стандартного PIV измерителя скорости фирмы “Dantec”. Для возбуждения флуорофора используется двоянный импульсный Nd:YAG лазер с энергией импульса 50 мДж при длине волны излучения 532 нм. Переизлучённый флуорофором свет регистрируется работающей в режиме двойного кадра специализированной цифровой камерой с матрицей размерами 1008 × 1018 пикселей и глубиной градации яркости изображения 8 бит. Рабочий цикл системы состоит из регистрации двух изображений через заданный интервал времени. Время экспозиции каждого кадра определяется длительностью лазерного импульса (10 нс). Компоновка и схема измерительной системы показана на рис. 1. Для подавления спекловой структуры, лазерный луч пропускается через рассеивающую пластинку из пористого фторопласта. Для компоновки, показанной на рис. 1, связь локальной яркости  $J(x, y)$  изображения с локальной толщиной слоя  $h(x, y)$ , в широком диапазоне толщин описывается зависимостью:

$$J(x, y) = C(x, y) \cdot (1 - \exp(-\gamma h(x, y))) \times (1 + K(x, y) \cdot \exp(-\gamma h(x, y))) \times (1 + K(x, y)) + D(x, y) \quad (1)$$

Здесь  $\gamma$  – коэффициент поглощения возбуждающего излучения,  $K(x, y)$  – коэффициент отражения от дальней границы слоя,  $D(x, y)$  – темновой уровень матрицы камеры,  $C(x, y)$  – передаточная функция, зависящая от местоположения камеры и лазера.

Темновой уровень  $D(x, y)$  и коэффициент поглощения измеряются до и после проведения экспериментов. Калибровка системы для определения  $C(x, y)$  проводится в условиях эксперимента при малых числах Рейнольдса течения. Поскольку восстановление локальной толщины пленки производится по локальной яркости свечения слоя жидкости в предположении, что пленка является локально плоской, возникают погрешности, связанные с перераспределением интенсивности света под волнистой поверхностью пленки.

При компоновке системы, использованной в эксперименте, перераспределение интенсивности (по сравнению с плоскопараллельным слоем) происходит только для световых потоков отраженного света и связано с зависимостью коэффициента отражения от угла падения светового луча на свободную поверхность пленки и с возникновением фокусировок для лучей отраженного света под криволинейными участками поверхности. Расчет уровня оптических искажений применительно к результатам, представленным в данной работе, показал, что максимальная ошибка измерений, связанная с оптическими искажениями не превышает 0,2%. Анализ прочих источников погрешности измерений методом ЛИФ показал, что суммарная ошибка в восстановлении толщины пленки в условиях эксперимента не превышала 5%.

В разделе 2.6 приведены основные сведения о точности управления входными параметрами и погрешностях измерений различными методами в условиях эксперимента.

В главе 3 представлены результаты экспериментального исследования начальной эволюции волн на поверхности пленки жидкости при кольцевом режиме газожидкостного течения. Основной целью экспериментов являлось получение дисперсионных характеристик для волн, развитие которых происходит по линейному сценарию развития.

В разделе 3.1 описаны режимные параметры и методика проведения экспериментов. Измерения проводились на начальном участке пленочного течения с использованием датчиков проводимости с вделанными заподлицо

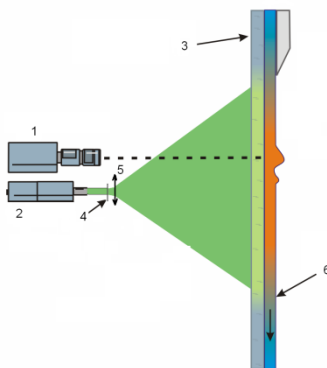


Рисунок 1. Схема измерительной системы ЛИФ. 1 – CCD камера; 2 - сдвоенный импульсный Nd:YAG лазер; 3 – вертикальная стеклянная пластина; 4 – рассеиватель; 5 – объектив; 6 – пленка жидкости.

со стенкой рабочего канала электродами. Устройство рабочего участка описано в разделе 2.1. Устройство и принцип работы датчиков проводимости описаны в разделе 2.4.2. В качестве рабочих жидкостей использовались вода и водоглицериновые растворы ВГР1 (с плотностью  $\rho = 1070 \text{ кг/м}^3$ , кинематической вязкостью  $\nu = 2,1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , отнесенным к плотности поверхностным натяжением  $\sigma/\rho = 65 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}^2$ ) и ВГР2 ( $\rho = 1100 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu = 3,45 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\sigma/\rho = 61 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}^2$ ). Исследовалось как спутное, так и противоточное течение. Максимальная скорость газ при противоточном течении ограничивалось началом перехода к захлебыванию и, в зависимости от расхода жидкости, составляла 7,3 или 5,1 м/с. Исследовалась эволюция вниз по течению возбужденных гармонических волн. Запись толщины пленки производилась одновременно 4 датчиками, расположенными на одной линии вниз по течению с шагом 1,5 см. Положение первого датчика выбиралось в соответствии с описанным ниже критерием попадания в область стабилизированного течения. Частота возбуждения менялась дискретно в диапазоне 6 – 120 Гц с шагом по частоте от 2 Гц в низкочастотной части диапазона до 8 Гц на высоких частотах. Для каждой частоты возбуждения осуществлялась двухсекундная запись сигналов при 5 – 6 уровнях возбуждения. Как правило, максимальный уровень возбуждения превышал минимальный в 10 раз. На рис. 2 приведен пример двухканальной записи сигнала при фиксированном расходе жидкости и различных скоростях газового потока. Как видно из рисунка, для фиксированного положения датчиков проявление нелинейных эффектов зависит от скорости и направления газового потока.

Обработка сигналов проводилась в спектральной области следующим образом: Для каждого из каналов вычислялись амплитуда и фаза основной гармоники, после чего определялись безразмерная фазовая скорость  $s$  и безразмерный пространственный инкремент амплитуды  $\alpha$ :

$$s = 2\pi f x / u_N (\varphi_2 - \varphi_1); \quad \alpha = (h_N/x) \ln(A_2/A_1). \quad (2)$$

Где,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и  $A_1$ ,  $A_2$  - соответственно фазы и амплитуды основной гармоники для двух соседних датчиков,  $x$  - расстояние между ними,  $f$  - частота основной гармоники,  $h_N$  и  $u_N$  - толщина и среднерасходная скорость для гладкой пленки по Нуссельту. Проведение экспериментов по определению характеристик волн, развивающихся по линейному сценарию, осложняется небольшими пространственными размерами области, в которой имеется возможность проводить такие измерения: эта область должна начинаться ниже зоны гидродинамической стабилизации пленочного течения и оканчиваться там, где развитие волн становится явно нелинейным (рис. 3).

Влияние отклонения толщины пленки от равновесного значения в области гидродинамической стабилизации на характеристики линейных волн проанализировано в разделе 3.4 на основе известного аналитического

решения. Показано, что в области гидродинамической стабилизации фазовые скорости и инкременты амплитуды линейных волн имеют тем меньшие значения по сравнению со случаем установившегося течения, чем выше отклонение толщины пленки от равновесного значения.

Таким образом, за критерий попадания датчиков в область установившегося пленочного течения был выбран критерий независимости фазовой скорости от расстояния до пленкоформирователя. При этом волна считалась развивающейся по сценарию линейных волн, если ее пространственный инкремент и фазовая скорость не зависели от ее амплитуды при условии положительности пространственного инкремента. По результатам экспериментов это условие выполнялась для волн малой амплитуды  $A$ , для которых отношение  $A/h_n$ , как правило, не превышало 0,15.

В разделе 3.2 представлены результаты измерений волновых характеристик для волн, удовлетворяющих критериям отбора, описанным в разделе 3.1. Все результаты представлены в виде графиков зависимостей  $s(k)$  и  $\alpha(k)$ , где  $k$  - безразмерное волновое число, построенное по равновесной толщине гладкой пленки при отсутствии течения газа:  $k = 2\pi h_n/\lambda$ ;  $\lambda$  - длина волны. Для всех представленных в эксперименте режимов четко прослеживаются следующие закономерности: при любом направлении газового потока имеется область частот, в которой инкремент амплитуды больше, чем для случая свободно стекающей пленки, при этом в области волн максимального роста противоточное течение газа влияет на волновые характеристики сильнее, чем спутное течение.

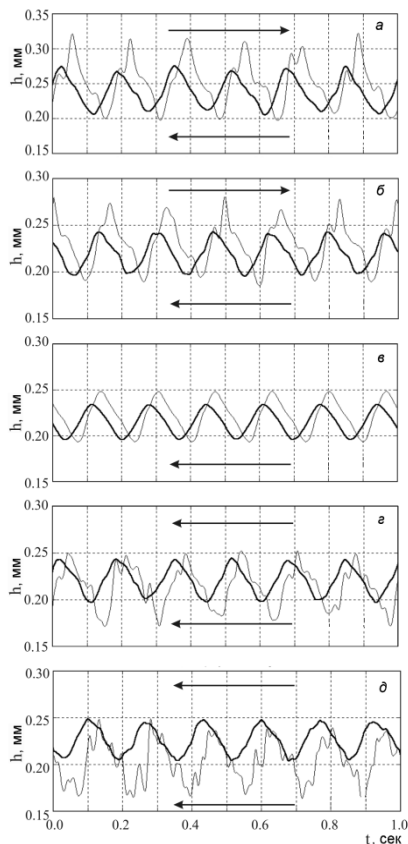


Рисунок 2. Пример двухканальной записи толщины пленки воды при различных скоростях газового потока. Скорость газа: а)  $-7.3$  м/с б)  $-5.1$  м/с; в)  $0$  м/с; г)  $5.1$  м/с; д)  $8$  м/с. Стрелками показано направление потоков газа и жидкости,  $Re=40$ ,  $f = 6$  Гц.

Характер зависимостей  $\alpha(k)$  показывает, что в условиях противоточного течения увеличение инкрементов сопровождается сужением области длин волн, для которых течение является неустойчивым, при этом значение  $k$  для волн максимального роста оказывается достаточно консервативной величиной и близко к значениям для свободно стекающей пленки. Наличие спутного потока одновременно с увеличением инкрементов приводит к расширению области неустойчивости, при этом значение  $k$  для волн максимального роста возрастает с увеличением скорости обдува. Фазовая скорость волн, особенно в области волн максимального роста, весьма чувствительна к скорости противоточного течения газа и быстро уменьшается с увеличением скорости газа. Влияние спутного течения газа на фазовую скорость волн выражено слабо и приводит к тому, что в области волн максимального роста фазовая скорость слабо возрастает при увеличении скорости газа. В заключение раздела приводится пример сравнения экспериментально полученных зависимостей с расчетом, выполненным для условий эксперимента С. П. Актершевым на основе уравнения Орра-Зоммерфельда с использованием квазиламинарной модели турбулентного течения газа [Alekseenko S.V., et al., 2009], рис. 4. Как видно из рисунка, экспериментальные зависимости неплохо совпадают с расчетом для всех представленных скоростей газа. Значительное отличие наблюдается только при больших значениях волнового числа  $k > 0.15$ , где расчетные значения пространственного инкремента существенно превышают экспериментально измеренные. В следующем разделе полученные в [Alekseenko S.V., et al., 2009] дисперсионные зависимости используются для объяснения возможной причины расхождения между расчетом и экспериментом на высоких частотах.

В разделе 3.3 рассматриваются особенности проведения экспериментов, которые могут приводить к отклонению экспериментально измеренных волновых характеристик от дисперсионных зависимостей для случая плоскопараллельного течения пленки жидкости по пластине.

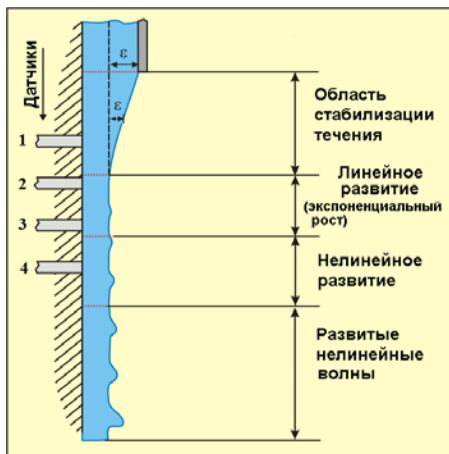


Рисунок 3. Структура пленочного течения в области проведения измерений.  $\varepsilon$  – отклонение толщины пленки от равновесного значения.

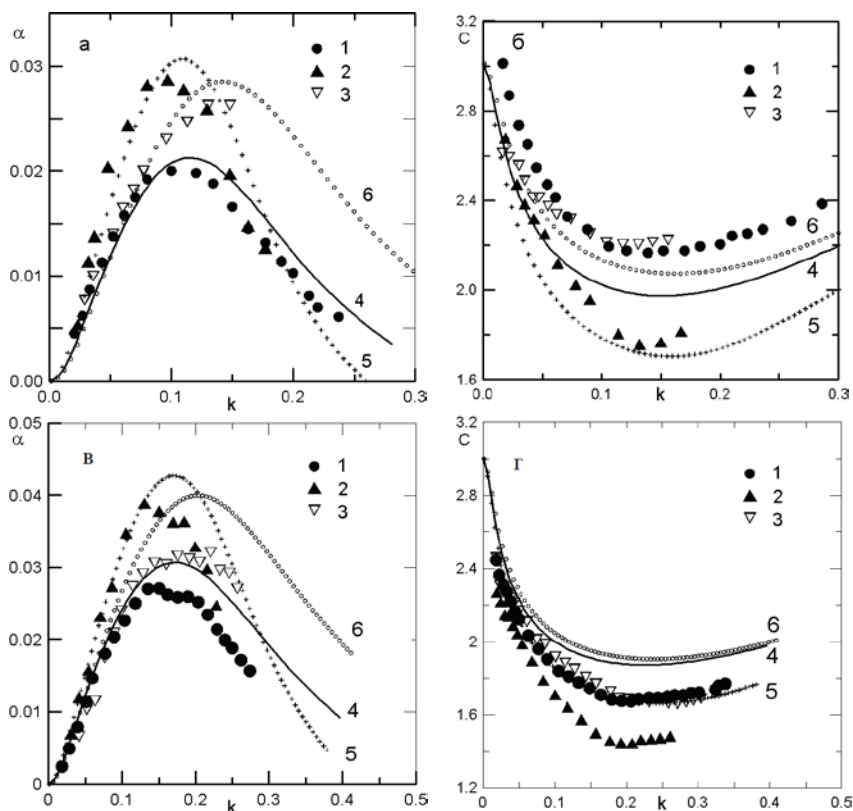


Рисунок 4. Зависимость инкремента и фазовой скорости от волнового числа.

$Re = 24$ . а, б - вода; в, г – ВГР1.

Эксперимент: 1 - без обдува; 2 – противоток ( $V_g = -7,3$  м/с); 3 – спутный поток ( $V_g = 8,1$  м/с); Расчет [Aleksenko S.V., et al., 2009]: 4 – без обдува; 5 - противоток; 6 – спутный поток.

В разделе 3.3.1 проведен анализ влияния радиуса кривизны канала на дисперсионные зависимости. С использованием слабо нелинейного приближения и в предположении малости отношения толщины пленки к диаметру трубы, получена система уравнений для расчета дисперсионных зависимостей фазовой скорости и пространственного инкремента амплитуды от волнового числа при течении в трубе. Результаты расчета показывают, что при течении пленки по внутренней поверхности трубы происходит повышение фазовой скорости и понижение инкремента по сравнению со случаем плоской стенки, однако для экспериментально исследованных режимов эти изменения меньше ошибки измерений.

В разделе 3.3.2 получены дисперсионные соотношения для фазовой скорости и инкремента амплитуды в нижней части зоны гидродинамической стабилизации пленочного течения. После выхода пленки жидкости из щелевого распределителя, профиль скорости течения перестраивается от профиля течения в щели к равновесному профилю течения по вертикальной стенке. При этом происходит изменение толщины пленки вниз по течению до значения толщины по Нуссельту. Область течения, где происходит такая перестройка, называется зоной гидродинамической стабилизации. Вывод дисперсионных соотношений производится в рамках интегрального подхода в предположении параболического профиля течения и с использованием известного аналитического решения для толщины пленки в зоне гидродинамической стабилизации. Для нижней части зоны стабилизации, когда отклонение толщины пленки  $\delta$  от  $h_N$  является малым, т. е.  $\varepsilon = \delta/h_N \ll 1$ , линеаризованное волновое уравнение в безразмерной форме принимает вид:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} + 2.4(1 - \varepsilon) \frac{\partial^2 H}{\partial t \partial x} + 1.2(1 - 2\varepsilon) \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{3}{\text{Re}}(1 + 4\varepsilon) \left( \frac{\partial H}{\partial t} + 3(1 - 4\varepsilon) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + We(1 + \varepsilon) \frac{\partial^4 H}{\partial x^4} = 0 \quad (3)$$

Здесь  $H$  – возмущения толщины пленки малой амплитуды,  $We = \sigma/(\rho h_N u_N^2)$ , а переход к безразмерной форме произведен с использованием масштабов  $h_N$  по координатам и  $h_N/u_N$  – по времени. При  $\varepsilon \rightarrow 0$  это уравнение переходит в линеаризованное двухволновое уравнение для пленочного течения по вертикальной поверхности [Алексеев С.В., и др., 1992]. Дисперсионные зависимости, полученные на основании (3) показывают, что для условий эксперимента, когда ширина щели пленкоформирователя была всегда больше равновесной толщины пленки на пластине, в нижней части зоны гидродинамической стабилизации инкремент амплитуды и фазовая скорость волн на всех частотах имеют меньшие значения, чем при установившемся пленочном течении. На рис.5 приведены результаты расчета фазовой скорости  $U$  (f) для воды при  $\text{Re} = 124$  и разных отклонениях толщины пленки от равновесного значения. Несмотря на приближенный характер расчета и сравнимую с длиной зоны стабилизации базу измерений, результаты расчета отражают наблюдавшуюся в экспериментах тенденцию повышения фазовой скорости волн на всех частотах при удалении от распределителя, что и было положено в основу методики определения попадания датчиков в область установившегося течения.

В разделе 3.3.3 Рассмотрено возможное влияние флуктуаций средней толщины пленки на измеренные характеристики возбужденных волн. В реальном экспериментальном сигнале неизбежно присутствует шумовая составляющая, обусловленная как внешними источниками вибрации, так и

турбулентными пульсациями потока газа. Поэтому в реальных условиях свободная поверхность пленки всегда является возмущенной, что может приводить к существенным изменениям в сценарии развития гармонических волн малой амплитуды.

Точный учет влияния флуктуаций толщины пленки на характеристики развивающихся двумерных волн представляется чрезвычайно сложной задачей, однако, качественную оценку этого влияния несложно получить в квазистационарном приближении, полагая флуктуации низкочастотными и считая, что текущие значения фазовой скорости и инкремента возбужденной волны являются такими же, как и для гладкой пленки с толщиной  $h = h_0 + \delta$ , где  $h_0$  – средняя толщина пленки, а  $\delta$  – текущее отклонение толщины от среднего значения. При такой постановке гармоническая волна, распространяющаяся вниз по течению, будет иметь амплитудную и фазовую модуляцию. Для свободного течения пленки расчет влияния модуляции на дисперсионные зависимости можно провести, задавая амплитуду флуктуаций и используя дисперсионные соотношения, полученные на основе линеаризованных интегральных уравнений. Результат такого расчета с использованием взятого из эксперимента уровня флуктуаций показывает, что наличие флуктуаций приводит к небольшому занижению инкремента по сравнению со случаем невозмущенной пленки, и это занижение возрастает с ростом волнового числа. Для пленки, обдуваемой газом, проведение аналогичного расчета требует неоправданно больших объемов вычислений, однако, для спутного течения газа, оценку влияния флуктуаций толщины пленки на дисперсионные зависимости инкремента можно выполнить в упрощенной постановке, рассматривая только фазовую модуляцию волн и учитывая тот факт, что при спутном течении газа фазовая скорость волн мало отличается от скорости волн на поверхности свободно стекающей пленки. Результат такой оценки с использованием взятого из эксперимента уровня флуктуации для спутного течения показывает, что высокий уровень неконтролируемых флуктуаций качественно объясняет сильное занижение измеренных значений инкремента по сравнению с расчетом в области коротких волн.

В разделе 3.4 сформулированы основные выводы по третьей главе.

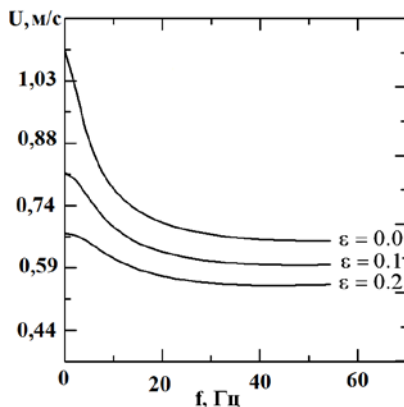


Рисунок 5. Зависимости  $U(f)$  в области стабилизации. Вода,  $Re = 124$ .

**В главе 4** представлены результаты по экспериментальному исследованию эволюции локализованных трехмерных возмущений на вертикально стекающих пленках жидкости. Одним из способов генерации уединенных трехмерных волн состоит в возбуждении таких волн локализованным источником на начальном участке пленочного течения, где уровень естественных возмущений мал, и пленку можно считать гладкой. Результаты, представленные в данной главе, получены именно в такой постановке. В процессе экспериментов особое внимание уделялось поиску стационарных волн, т.е. волн, характеристики которых не меняются в процессе распространения. Повышенный интерес к стационарным волнам связан с тем, что, в случае их существования, упрощается сопоставление теории и эксперимента. Для случая стационарных волн отсутствует необходимость в точном соответствии начальных условий для теоретической и экспериментальной задач. Достаточно, чтобы эволюция начального трехмерного возмущения приводила к образованию стационарной волны. Кроме того, по современным представлениям [Demekhin E.A., et al., 2010], именно стационарные волны являются главными кандидатами на роль локализованных трехмерных структур, определяющих характеристики трехмерных волновых полей при пленочном течении жидкости.

**В разделе 4.1** представлены результаты по исследованию эволюции локализованных трехмерных возмущений при умеренных числах Рейнольдса пленочного течения. Для измерения локальной толщины пленки использовалась двухканальная система с датчиками проводимости с вынесенными в поток электродами и двухканальная система измерений модифицированным теневым методом. Эти системы описаны во второй главе диссертации.

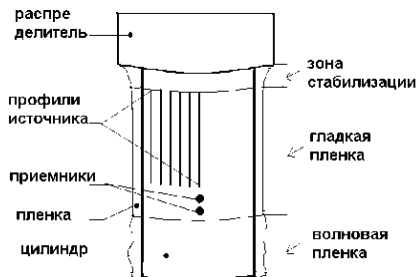


Рисунок 6. Схема проведения эксперимента.

Эксперименты проводились при числах Рейнольдса  $10 \leq Re \leq 110$  пленочного течения по внешней поверхности рабочего участка, представлявшего собой вертикально установленный оргстеклянный цилиндр. В качестве рабочих жидкостей использовались вода и водоглицериновые растворы. Для получения формы трехмерных волн, регистрация волновой картины осуществлялась с перестановкой источника по площадке. Схема проведения эксперимента показана на рис. 6.

Измерение осуществлялось локальными датчиками (приемниками) в

фиксированных точках рабочего участка, находящихся на одной вертикальной линии в нижней части безволновой зоны пленочного течения. Источник возбуждения локализованных трехмерных возмущений последовательно перемещался по вертикальным профилям с шагом, позволяющим производить пересчет сигнала в пространственную область. Начальные точки профилей лежали ниже зоны гидродинамической стабилизации течения. Центральный профиль проходил по линии размещения приемников, а расстояние между соседними боковыми профилями составляло 2,5 мм. Высокая повторяемость характеристик возбуждаемого источником начального возмущения позволила интерпретировать полученные данные как результат одновременной регистрации возбуждаемой точечным источником волны полевой системой наблюдения, состоящей из  $M \times N$  приемников, где  $M$  – количество точек размещения источника на профиле, а  $N$  – количество профилей. Для сокращения объема измерений съемка по боковым профилям проводилась в одном направлении от центрального профиля, а проверка на симметричность производилась по результатам съемки в нескольких точках с другой стороны от центрального профиля.

В зависимости от энергии возбуждения, развитие начального возмущения происходило по одному из двух сценариев. При малых энергиях возбуждения наблюдалось образование волнового пакета. При больших энергиях возбуждения происходило формирование уединенной трехмерной волны. Пример образования волнового пакета приведен на рис. 7.

При формировании волнового пакета отмечены следующие общие закономерности, наблюдавшиеся, как для воды, так и для ВГР, в широком диапазоне расходов жидкости: Расширение области, захваченной волновым движением, происходит как вперед, так и назад по времени относительно основной фазы начального возмущения, а амплитуда начального возмущения после непродолжительной стадии линейного роста выходит на насыщение при относительно небольших величинах  $A/h_N \approx 0,5$ , где  $A$  – амплитуда волны, определенная как  $(A_{\max} - A_{\min})/2$ ,  $A_{\max}$  и  $A_{\min}$  – значения максимальной и минимальной толщины пленки; фазовая скорость развивающегося пакета во всех случаях остается меньше скорости кинематической волны  $C_0 = 3u_N$ .

При построении трехмерной формы волны пересчет в пространственную область проводился для нескольких значений времени, как показано на рис. 7, для центрального и всех боковых профилей наблюдения. Пример полученной таким пересчетом формы волны приведен на рис. 8. На небольших расстояниях от точки возбуждения главный гребень волны развивающегося пакета имеет подковообразную форму с характерными продольными и поперечными размерами 1 – 2 см.

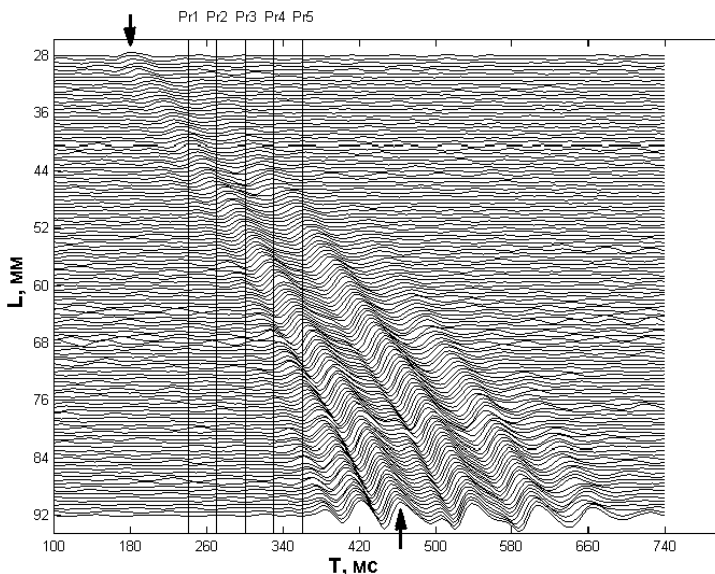


Рисунок 7. Развитие волнового пакета при течении ВГР.  $Re = 16$ . Регистрация вдоль центрального профиля. Стрелками указана основная фаза. Pr1 – Pr5 времена пересчета в пространственную область.

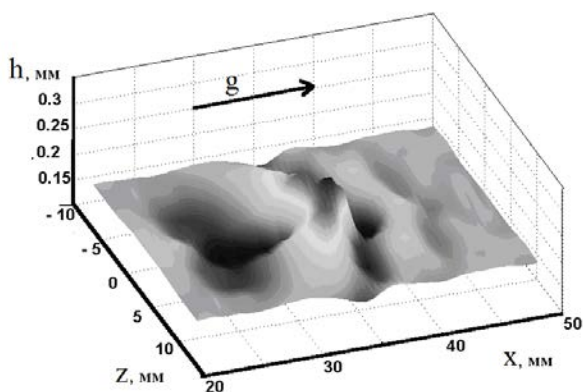


Рисунок 8. Трехмерная форма волны на начальном этапе генерации волнового пакета, вода,  $Re = 16$ ,  $T = 200$  мс.

При больших энергиях возбуждения наблюдалось формирование уединенной одногорбой волны. Отличительными особенностями волновой эволюции при высоких энергиях возбуждения являются наличие у

трехмерной волны одного гребня большой амплитуды с развитым капиллярным предвестником и остающаяся после прохождения гребня протяженная впадина с пониженной по сравнению с невозмущенной толщиной пленки. Эти особенности сохраняются для всех исследованных режимов, но при этом, характер эволюции основного гребня зависит от энергии возбуждения: при очень высоких энергиях амплитуда гребня с удалением от источника быстро уменьшается, а его ширина увеличивается. При меньших энергиях возбуждения амплитуда гребня слабо зависит от расстояния, а при еще более низких энергиях амплитуда гребня увеличивается с расстоянием во всей области проведения измерений. Пример волновой эволюции уединенной волны при нескольких уровнях энергии возбуждения ( $E1 > E2 > \dots > E4$ ) приведен на рис. 9.

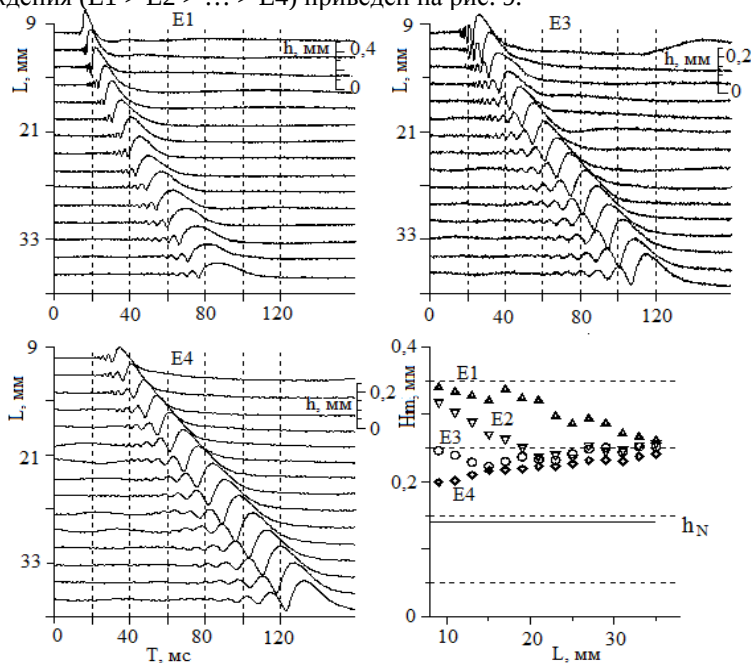


Рисунок 9. Развитие уединенной волны и зависимость ее амплитуды от расстояния до точки возбуждения при разных энергиях возбуждения, вода,  $Re = 10$ .

Как видно из рисунка 9, на котором  $H_m$  - максимальная толщина пленки в волне, для представленного случая амплитуда волны в процессе эволюции с разных сторон стремиться к одному и тому же значению. Недостаточная длина профилей наблюдения, ограниченных вниз по течению положением

линии волнообразования, не позволяет сделать вывод о том, является ли амплитуда в нижней части области наблюдения установившейся, несмотря на то, что кривые зависимости амплитуды от расстояния стремятся к ней с разных сторон.

Развитие уединенной волны, как с понижением, так и с нарастанием ее амплитуды в процессе распространения, наблюдались при всех исследованных режимах течения в интервале  $10 \leq Re \leq 85$ . Однако, в отличие от случая, представленного на рис. 9, в остальных случаях не наблюдалось стремления амплитуды уединенной волны к какому либо одному выделенному значению. Для всех исследованных режимов скорость распространения волны в процессе эволюции оставалась выше скорости кинематических волн. Для ряда случаев, при которых амплитуда и форма волны вдоль центрального профиля слабо менялись с расстоянием, была выполнена полевая съемка и реконструирована трехмерная форма волн, однако волны, близкие к стационарным, зарегистрировать не удалось.

В разделе 4.2 представлены результаты исследования эволюции локализованных возмущений при малых числах Рейнольдса пленочного течения, когда длина гладкой пленки на начальном участке течения больше, чем при умеренных расходах жидкости, что позволяет проследивать эволюцию начального возмущения на больших длинах пробега.

Эксперименты проводились на стеклянной пластине из оптически однородного стекла. Измерение мгновенной толщины пленки осуществлялось методом ЛИФ. Описание гидродинамического контура, устройства рабочего участка и метода ЛИФ приведено во второй главе. При регистрации методом ЛИФ фотографировалось поле размерами  $10 \times 10$  см<sup>2</sup>, что обеспечивало пространственное разрешение 0,1 мм вдоль поверхности пластины. В качестве рабочей жидкости использовалась водно-спиртовая смесь с содержанием 45% процентов спирта по весу. Эксперименты проводились в диапазоне чисел Рейнольдса пленочного течения  $1,5 < Re < 5$ . Прямые измерения температуры при помощи проточного пробоотборника, показали, что в области проведения измерений температура пленки оставалась постоянной с точностью до 0,1<sup>0</sup>С.

Возбуждение локализованного возмущения осуществлялось таким же способом, как и в экспериментах при умеренных числах Рейнольдса. Для каждого фиксированного расхода жидкости энергия возбуждения менялась в широких пределах. Для исследованных энергий возбуждения наблюдалась смена характера эволюции волн, происходящая при  $Re \approx 2,5$ . При  $Re > 2,5$  эволюция происходит по одному из двух сценариев, наблюдавшихся при умеренных числах Рейнольдса: при малых энергиях возбуждения происходит быстрый рост амплитуды начального импульса с одновременной генерацией

волнового пакета, а при больших энергиях возбуждения волна развивается в виде уединенной подковообразной волны. При  $Re \leq 2,5$  при малых энергиях возбуждения начальный импульс медленно эволюционирует в виде уединенной подковообразной волны, а при больших энергиях возбуждения происходит быстрый развал начального возмущения на группу сложно взаимодействующих волн.

При проведении экспериментов особое внимание уделялось поиску стационарных волн. Предполагалось, что, подобрав определенные условия возбуждения, можно существенно сократить время трансформации начального возмущения в стационарную волну. Направление эволюции уединенной волны определялось по изменению следующих параметров: амплитуда, скорость распространения, полуширина гребня в продольном и поперечном направлениях. Волна считалась стационарной, если все указанные характеристики оставались для нее постоянными в нижней части безволновой зоны пленочного течения на протяжении не менее трех характерных продольных размеров. Для ряда исследованных режимов течения удалось подобрать условия возбуждения, при которых начальное возмущение после непродолжительной эволюции трансформировалось в стационарную уединенную волну. Пример зарегистрированных трехмерных волн приведен на рис. 10. При  $2 < Re < 3$  форма стационарной волны близка к полученной в [Петвиашвили В.И., Цвелодуб О.Ю., 1978] для случая  $Re \sim 1$ , однако при  $Re > 3$  наблюдаются существенные отличия: изгиб гребня волны возрастает, его боковые стенки сильно удлиняются в продольном направлении, а между ними возникает узкая желобообразная впадина с пониженной, по сравнению с невозмущенной, толщиной пленки. Несмотря на эти отличия амплитуды и скорости всех зарегистрированных стационарных волн близки к теоретическим значениям [Петвиашвили В.И., Цвелодуб О.Ю., 1978]. Варьируя условия возбуждения, оказалось возможным сформировать двугорбые стационарные волны, подобные теоретически полученным в [Chang H.C., Demekhin E.A., 2002], рис.11. В отличие от одногорбых, для волн этого типа медленная эволюция наблюдалась на расстояниях, в несколько раз превышающих расстояния выхода на стационарный режим одногорбых волн. Кроме того, наблюдаемые двугорбые волны были менее устойчивыми, чем одногорбые: при фиксированных условиях возбуждения длительная и плавная эволюция таких волн с равной вероятностью могла закончиться как быстрым слиянием горбов с образованием нестационарной одногорбой волны, так и выходом на близкий к стационарному режим распространения. В силу указанных особенностей экспериментальное исследование двугорбых волн представляет собой гораздо более сложную задачу по сравнению со случаем одногорбых.

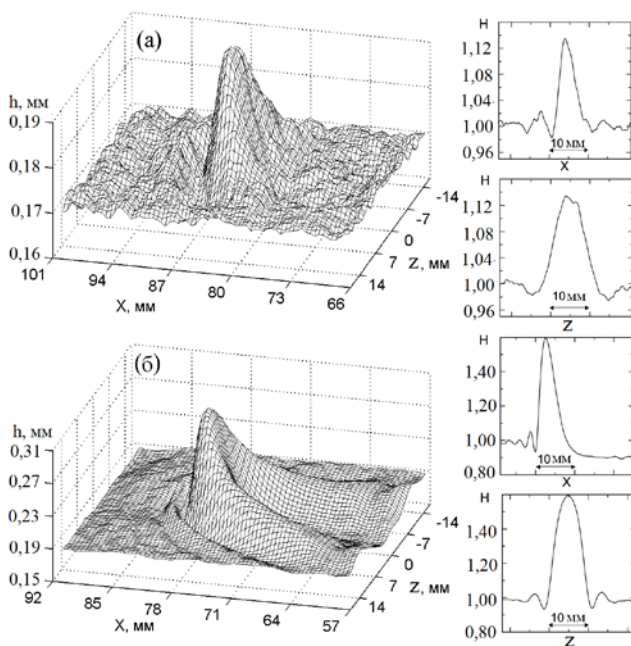


Рисунок 10. Форма стационарных волн. а)  $Re = 2,2$ ; б)  $Re = 3,7$ . Справа показана форма волны в продольном и поперечном сечениях, проходящих через ее вершину,  $H = h/h_N$ .

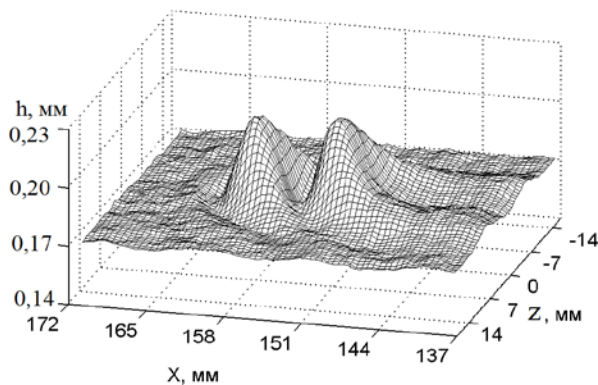


Рисунок 11. Стационарная двугорбая волна.  $Re = 2,2$ .

Двугорбые стационарные волны были зарегистрированы в узком диапазоне чисел Рейнольдса при  $1,9 \leq Re \leq 2,2$ .

**В заключении** диссертации сформулированы основные результаты:

1. С использованием локальных датчиков электропроводности исследована эволюция возбужденных двумерных волн малой амплитуды на поверхности пленки жидкости стекающей по внутренней поверхности вертикальной трубы в присутствии спутного или противоточного газового потока. Основное внимание уделялось получению характеристик волн, развивающихся по линейному сценарию, когда нелинейные эффекты не оказывают существенного влияния на полученные волновые характеристики. Полученные экспериментальные данные представлены в виде дисперсионных зависимостей пространственных инкрементов и фазовых скоростей от волнового числа.

Показано, что пространственные инкременты волн, попадающих в окрестности волн максимального роста, возрастают при любом направлении течения газа по сравнению со случаем свободно стекающих пленок. Фазовая скорость волн, особенно в окрестности волн максимального роста, имеет сильную чувствительность к скорости противоточного течения газа и быстро уменьшается с ее увеличением. В случае спутного течения фазовая скорость волн слабо чувствительна к скорости газа и незначительно увеличивается с ростом скорости газа. Характер поведения дисперсионных кривых показывает, что область волновых чисел, в которых течение неустойчиво, сужается по сравнению со случаем течения под действием гравитации при наличии противотока газа и расширяется при наличии спутного газового потока.

2. Разработана система диагностики пленочных течений методом ЛИФ, позволяющая определять скорость и мгновенную форму трехмерных волн на поверхности стекающих по пластине пленок жидкости. Проанализированы основные источники погрешностей метода, включая оптические искажения, возникающие из-за волнистости свободной поверхности пленки. Показана возможность применения метода ЛИФ для исследования эволюции локализованных трехмерных возмущений.

3. В широком диапазоне чисел Рейнольдса пленочного течения  $1,5 < Re < 100$  проведено экспериментальное исследование эволюции локализованного трехмерного возмущения на вертикально стекающих пленках жидкости. Выявлено два основных сценария эволюции – развитие волнового пакета и формирование уединенной трехмерной волны подковообразной формы. При числах Рейнольдса пленочного течения от нескольких единиц до 70 – 80 для образования уединенной волны начальное возмущение должно обладать энергией, превышающей некоторое пороговое значение. При более низких энергиях возмущения из локализованного возмущения развивается волновой пакет.

4. В области малых чисел Рейнольдса  $Re < 5$  впервые

зарегистрированы уединенные стационарные трехмерные волны и измерены их характеристики. Отличительной особенностью таких волн является подковообразная форма основного гребня, между боковыми сторонами которого имеется узкая желобообразная впадина с пониженной, по сравнению с невозмущенной, толщиной пленки. Сравнение измеренных характеристик уединенных стационарных волн с теоретически предсказанными значениями показывает хорошее соответствие.

### **Список публикаций по теме диссертации**

#### **В журналах из перечня ВАК:**

1. Алексеенко С. В., Маркович Д. М., Харламов С. М., Черданцев А. В. Экспериментальное исследование линейной устойчивости течения пленки жидкости в присутствии газового потока // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2004. – № 4. – С. 119 – 129.

2. Алексеенко С. В., Антипин В. А., Гузанов В. В., Маркович Д. М., Харламов С. М. Стационарные уединенные трехмерные волны на вертикально стекающей пленке жидкости // ДАН. – 2005. – Т. 405. – № 2. – С. 193 – 195.

3. Alekseenko S. V., Antipin V. A., Guzanov V. V., Kharlamov S. M., Markovich D. M. Three-dimensional solitary waves on falling liquid film at low Reynolds numbers // Physics of Fluids. – 2005. – Vol. 17. – P. 121704.

4. Alekseenko S. V., Aktershev S. P., Cherdantsev A. V., Kharlamov S. M., Markovich D. M. Primary instabilities of liquid film flow sheared by turbulent gas stream // Int. J. Multiphase Flow. – 2009. Vol. 35. – P. 617 – 627.

5. 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. – Т. 36. – № 22. – С. 1 – 8.

#### **В материалах конференций:**

6. Alekseenko S., Cherdantsev A., Kharlamov S., Markovich D. Characteristics of liquid film in a vertical pipe in presence of gas flow // Proc. of 5-th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Thessaloniki, Greece, 24-28 September. - 2001. - Vol. 3. - P. 1991-1996.

7. Alekseenko S. V., Cherdantsev A. V., Kharlamov S. M., Markovich D. M. Linear waves on a falling liquid film in presence of turbulent gas stream. // Proc. of 3<sup>rd</sup> International Conference on transport phenomena in multiphase systems, Kielce, Poland, 23-27 of June. - 2002. - P. 349-355.

8. Alekseenko S. V., Antipin V. A., Cherdantsev A. V., Kharlamov S. M., Markovich D. M. Gas-driven disturbance waves on vertical liquid film // Proc. of 3<sup>rd</sup> international symposium on two-phase flow modeling and experimentation, Pisa, 22-24 of September. – 2004. - ven. 46, 7 P.

9. Alekseenko S. V., Antipin V. A., Cherdantsev A. V., Kharlamov S. M.,

Markovich D. M. Waves on vertical liquid film sheared by turbulent gas flow // Proc. of 16<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering, Praha, 22-26 of August. – 2004. - P.5.205, 12 P.

10. Alekseenko S. V., Antipin V. A., Markovich D. M., Kharlamov S. M. Experimental Study of the Evolution of Three-Dimensional Waves on a Falling Film // Proc. of the 2nd Int. Berlin Workshop – IBW2 on Transport Phenomena with moving Boundaries. 9-10 October 2003, Berlin, Germany. VDI Verlag GmbH Dusseldorf. – 2004. - P. 49-61

11. S. Alekseenko, V. Antipin, S. Kharlamov, D. Markovich. Evolution of Three-Dimensional Waves on a Falling Film // Proc. of 5th International Conference on Multiphase Flow, ICMF'04 Yokohama, Japan, May 30–June 4. – 2004.

12. Алексеенко С. В., Антипин В. А., Маркович Д. М., Харламов С.М. Уединенные трехмерные волны на вертикально стекающей пленке жидкости // Тезисы докладов всероссийской конференции Задачи со свободными границами: теория, эксперимент, приложения. Бийск, 4 – 8 июня 2005 г.

13. S. Alekseenko, V. Antipin, V. Guzanov, S. Kharlamov, D. Markovich. Solitary waves in falling liquid films // Book of abstracts of The International Topical Team Workshop Two-phase Systems for Ground and Space Applications. Brussels, Belgium, 19-21 September 2006, P.8-9.

14. S. Kharlamov, V. Guzanov, D. Crey. On applicability of LIF method for field measurement of local thickness of liquid films // Book of abstracts of The International Topical Team Workshop Two-phase Systems for Ground and Space Applications. Brussels, Belgium, 19-21 September 2006, p.100-101.

15. S. Alekseenko, V. Antipin, V. Guzanov, S. Kharlamov, D. Markovich. Evolution of solitary three-dimensional waves on vertically falling liquid films// Proc. of 6th International Conference on Multiphase Flow. Leipzig, Germany, July 9-13, 2007. S5\_Wed\_C\_37, 4 P.