



На правах рукописи

Черданцев Андрей Викторович

**ВОЛНОВАЯ СТРУКТУРА ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ
И ПРОЦЕССЫ ОБМЕНА ДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ
В ДИСПЕРСНО-КОЛЬЦЕВОМ ГАЗОЖИДКОСТНОМ ТЕЧЕНИИ**

01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Новосибирск - 2018

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

Официальные оппоненты:

Вараксин Алексей Юрьевич, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, зав. Отделом гидродинамических и тепловых процессов в двухфазных потоках, г. Москва.

Бойко Виктор Михайлович, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, зав. Лабораторией оптических методов диагностики газовых потоков, г. Новосибирск.

Ягов Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", профессор Кафедры инженерной теплофизики, г. Москва.

Ведущая организация:

ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, г. Москва.

Защита диссертации состоится 20 февраля 2019 г. в 09.30 на заседании диссертационного совета Д 003.053.01 при ИТ СО РАН, расположенном по адресу 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН, <http://www.itp.nsc.ru>

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах 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

Автореферат разослан _____ 2019 г.

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



Кузнецов Владимир Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Дисперсно-кольцевой режим газожидкостного течения в каналах характеризуется наличием тонкой пленки жидкости на стенках канала, высокоскоростного потока газа в ядре канала и дисперсной фазы в виде капель жидкости, уносимых с поверхности пленки в ядро газового потока, а также пузырьков газа, захваченных пленкой жидкости. Поверхность пленки жидкости покрыта сложной системой волн, включающей крупномасштабные волны возмущения и мелкие волны ряби. Такой режим реализуется при течении газожидкостной смеси с высоким содержанием газовой фазы в каналах различной формы и размеров, при различных ориентациях потока.

Течение характеризуется большой площадью межфазной поверхности (возмущенная поверхность жидкой пленки, поверхность капель в ядре газового потока и поверхность пузырьков газа), высокой интенсивностью перемешивания (турбулентное течение в газовой фазе и в крупных волнах, процессы отрыва/осаждения капель), высокими коэффициентами теплоотдачи и сравнительно малыми затратами на прокачку жидкости через установку. По этим причинам дисперсно-кольцевой режим часто используется в аппаратах теплообмена (системы охлаждения, компактные теплообменники) и химической промышленности.

Формирование жидкой пленки может происходить как при подаче жидкости непосредственно на стенки канала, так и за счет осаждения капель из ядра газокapельного потока, за счет конденсации пара или за счет испарения и выкипания жидкости в нагреваемом канале. В результате такой режим может реализоваться в системах добычи и транспортировки нефти и газа, в штатном и аварийном режимах течения теплоносителя в ядерных реакторах на кипящей воде и водо-водяных реакторах, в тепловых трактах солнечных коллекторов с прямой генерацией пара и т.д. Утоньшение пленки жидкости вследствие уноса капель в ядро газового потока, усиленное возмущениями, вызванными ударами капель, и захватом пузырьков газа, может привести к формированию сухих пятен на стенках канала и последующему перегреву и разрушению стенок промышленного аппарата.

Ввиду высокой сложности течения, обусловленной многообразием и многомасштабностью физических явлений, имеющих место в дисперсно-кольцевом течении, модели, предсказывающие поведение интегральных характеристик такого течения, представлены, главным образом, эмпирическими корреляциями. Как правило, такие модели работают лишь в той области условий, в которой были получены, а попытки их обобщения на более широкие диапазоны параметров дают значительное

расхождение между предсказанными и измеренными значениями. Физически обоснованные модели волнового течения пленок жидкости, как правило, работают лишь для случаев малых чисел Рейнольдса жидкости и низких скоростей потока газа, и их результаты не могут быть экстраполированы на условия, характерные для дисперсно-кольцевого течения.

Развитие теоретических и численных моделей может быть осуществлено при помощи упрощающих базовых предположений, выработанных на основе детальной экспериментальной информации о разнообразных гидродинамических процессах, реализующихся в таком течении. Список таких процессов включает в себя: формирование, развитие и взаимодействие волн различных типов в режимах с уносом жидкости в дисперсную фазу и без уноса жидкости; срыв капель с поверхности пленки; удары капель, осаждающихся из ядра газового потока на поверхность пленки; захват пузырьков газа пленкой жидкости.

Сложность и многомасштабность течения предъявляют высокие требования к методам измерений локальной толщины пленки жидкости и параметров дисперсной фазы. Помимо отсутствия искажений и высоких требований к временному и пространственному разрешению методики, необходима возможность проведения полевых измерений пленки жидкости и совместимость данной методики с методикой исследования дисперсной фазы, поскольку различные волновые процессы и процессы обмена дисперсной фазой находятся в тесной взаимосвязи.

Целью работы является выявление и прямое экспериментальное изучение волновых процессов и процессов обмена дисперсной фазой, определяющих гидродинамику дисперсно-кольцевого режима течения и оказывающих влияние на его интегральные характеристики. Полученные результаты должны послужить материалом для валидации и модификации существующих теоретических и численных моделей, для создания новых моделей, а также для анализа существующих корреляционных зависимостей. Для этого должны быть решены следующие **задачи**:

- Выбор, развитие и адаптация методик, позволяющих проводить полевые измерения локальной толщины пленки жидкости одновременно с измерением параметров дисперсной фазы с достаточным разрешением и без существенных искажений.

- Исследование волновой структуры в режимах с числами Рейнольдса жидкости ниже критического (т.е., в отсутствие уноса жидкости в дисперсную фазу).

- Исследование структуры волн возмущения, механизма формирования волн возмущения и взаимосвязи между волнами

возмущения и волнами ряби, а также трехмерной структуры волн различных типов в режимах с уносом жидкости в дисперсную фазу.

- Определение механизмов отрыва капель с поверхности пленки и сравнительный анализ гипотез, описывающих механизм отрыва.

- Исследование сценариев взаимодействия капель, осаждающихся из газового потока, с поверхностью пленки жидкости, роли каждого из сценариев в процессах вторичного брызгоуноса и захвата пузырьков газа.

- Исследование сценариев захвата пузырьков газа пленкой жидкости, определение влияния сценариев захвата и волновой структуры пленки жидкости на эволюцию и характеристики захваченных пузырьков.

Методы исследования. Для полевых измерений локальной толщины пленки жидкости использовались различные модификации метода лазерно-индуцированной флюоресценции (ЛИФ-метод). Этот же метод применялся для исследования динамики элементов дисперсной фазы с привязкой к волновой структуре пленки жидкости. Для анализа волновых режимов в опускном потоке и кросс-валидации ЛИФ-метода использовался метод планарной лазерно-индуцированной флюоресценции (ПЛИФ). Для исследования совместной эволюции волн различных типов применялись двумерная и трехмерная модификации ЛИФ-метода. Для прямого измерения волновых характеристик использовались специально разработанные алгоритмы автоматической идентификации пространственно-временных траекторий индивидуальных волн, а также адаптированные методы спектрального, кросскорреляционного и статистического анализа. Для исследования актов уноса / осаждения капель дополнительно применялась стереоскопическая модификация ЛИФ-метода. Для измерения поля скорости в волне возмущения применялся метод PTV с использованием в качестве трассеров твердых флюоресцентных частиц либо захваченных пленкой пузырьков воздуха.

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

- В данной работе при помощи новых модификаций ЛИФ-метода впервые проведено исследование элементов дисперсной фазы (капель, пузырьков) одновременно с исследованием эволюции волн различных типов на поверхности обдуваемой газом пленки жидкости.

- Впервые экспериментально подтверждено наличие эффекта зеркала и показано влияние трехмерности волн на результаты измерений толщины пленки ПЛИФ-методом.

- В режимах течения тонких пленок жидкости, обдуваемых высокоскоростным потоком газа, обнаружена вторичная неустойчивость задних склонов долгоживущих нелинейных волн, в результате которой генерируются короткоживущие вторичные волны меньших масштабов. Впервые показана возможность моделирования вторичной неустойчивости задних склонов первичных волн в рамках простых моделей. Впервые экспериментально показано подавление капиллярного предвестника нелинейных волн при сильном обдуве.

- В режимах с уносом жидкости в дисперсную фазу обнаружена неустойчивость заднего склона волн возмущения, приводящая к генерации волн быстрой и медленной ряби. Показано, что такая генерация происходит в потоках различной ориентации в каналах различной формы и размеров. Разработан метод автоматической идентификации пространственно-временных траекторий волн возмущения на основе преобразования Радона, и впервые измерены характеристики волн быстрой и медленной ряби с привязкой к фазе волны возмущения.

- Впервые экспериментально показано, что волны возмущения формируются благодаря слиянию начальных высокочастотных волн вблизи входа в канал, а также выявлены аналогичные явления вдали от входа в канал.

- Обнаружена зона повышенного трения на стенке под задним склоном волны возмущения, в области генерации волн ряби.

- Впервые определена связь между механизмами отрыва капель, известными как bag break-up и ligament break-up, и трехмерной структурой волн быстрой ряби на поверхности волн возмущения.

- Обнаружено, что осаждение капель из газового потока под малыми углами на поверхность пленки жидкости сопровождается интенсивным захватом пузырьков газа пленкой жидкости. Показано, что сценарий захвата не соответствует известным механизмам захвата воздуха при ударе капли.

- Обнаружено, что широкий спектр размеров захваченных пленкой жидкости пузырьков газа возникает не вследствие дробления крупных пузырей, захватываемых волнами возмущения, а вследствие захвата мелких пузырьков при наклонных ударах капель.

- Впервые проведено сравнение характеристик захваченных пузырьков газа в волнах возмущения и в остаточном слое жидкости.

Теоретическая и практическая значимость результатов. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для создания новых физически обоснованных моделей течения, а также для тестирования и модификации уже существующих моделей. Такие модели

могут быть использованы в расчетных кодах нового поколения, предсказывающих поведение течения в конкретных промышленных установках в атомной энергетике, химической промышленности, аппаратах теплообмена, системах добычи и транспортировки нефти и газа, солнечной энергетике, и т.д. Также экспериментальные результаты могут быть использованы для валидации и модификации численных моделей, предсказывающих динамику дисперсно-кольцевого течения, критического анализа физических моделей и эмпирических корреляций, предсказывающих поведение волн и процессы отрыва капель. Результаты данной работы могут быть использованы для тестирования и модификации моделей, описывающих другие практические приложения, такие, как системы спрейного охлаждения, обледенение поверхностей в авиации, захват воздуха при наклонных ударах капель / твердых тел по поверхности жидкости.

На защиту выносятся:

- Развитие и адаптация метода лазерно-индуцированной флуоресценции к исследованию обдуваемых газом пленок жидкости совместно с элементами дисперсной фазы.
- Анализ источников ошибок при измерениях ЛИФ- и ПЛИФ-методами.
- Результаты качественного и количественного анализа двухволновой структуры на поверхности тонких пленок жидкости, обдуваемых интенсивным газовым потоком, а также сопоставление с результатами моделирования.
- Результаты качественного и количественного анализа процессов генерации волн быстрой и медленной ряби в дисперсно-кольцевом течении, механизма формирования волн возмущения, сравнение с результатами моделирования.
- Метод автоматической идентификации характеристических линий волн возмущения, результаты применения метода к исследованию влияния условий экспериментов на характеристики волн возмущения.
- Обнаружение зоны с высокой скоростью жидкости вблизи стенки канала под задним склоном волны возмущения.
- Результаты исследования трехмерной структуры волн возмущения и волн быстрой ряби.
- Результаты анализа гипотез, описывающих механизм отрыва капель, а также анализа физических моделей, предсказывающих интенсивность уноса жидкости в дисперсную фазу.
- Новые сценарии взаимодействия капель, осаждающихся из газового потока, с волновой поверхностью пленки жидкости.

- Новые сценарии захвата пузырьков газа пленкой жидкости. Полное количественное описание эволюции захваченных пленкой пузырьков газа.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается использованием современных методов измерения локальной толщины пленки жидкости с высоким пространственным и временным разрешением, позволяющим проведение полевых измерений, разрешенных по двум пространственным координатам и времени, а также в стереоскопической постановке. Надежность измерений толщины пленки подтверждается анализом погрешностей измерения в различных зонах течения, моделированием хода лучей прямого и отраженного света для лазерного излучения и флюоресценции, а также прямой кросс-валидацией независимых методов ЛИФ и ПЛИФ. Надежность измерений волновых характеристик обеспечивается применением специально разработанных методов автоматической идентификации пространственно-временных траекторий волн различных типов, и визуальной верификацией эффективности работы алгоритмов. Измерения характеристик волн различных типов и элементов дисперсной фазы проводились на больших выборках при помощи адаптированных к задаче методов анализа.

Личный вклад автора. Автором диссертации проведен обзор литературы по теме исследований, постановка задач, планирование и проведение экспериментальных исследований, осуществлена адаптация ЛИФ-метода к исследованию волновой структуры обдуваемых газом пленок жидкости, разработана модификация метода с целью изучения элементов дисперсной фазы одновременно с волновой структурой, развиты алгоритмы автоматической обработки данных для различных режимов течения, проведена обработка данных и анализ полученных закономерностей, сравнение с литературными данными и результатами моделирования, анализ существующих эмпирических и теоретических моделей, сформулированы выводы по диссертации.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 статей, 20 из которых входят в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК.

Апробация работы. Материалы по теме диссертации были представлены на следующих конференциях и семинарах: Int. Conf. Multiphase Flow (Leipzig 2007, Tampa 2010, Jeju 2013, Florence 2016); Int. Symp. Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics (Lisbon 2010,

2012, 2014, 2016, 2018); Int. Topical Team Workshop on Two-Phase Systems for Ground and Space Applications (Brussels 2008, Novosibirsk 2009, Cava de' Tirreni 2011, Beijing 2012, Bremen 2013, Baltimore 2014, Novosibirsk 2017); World Conf. on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (Krakow 2009, Lisbon 2013, Foz do Iguaçu 2017); Euromech Fluid Mechanics Conf. (Manchester 2008, Copenhagen 2014); APS Division of Fluid Dynamics (Pittsburgh 2013, San Francisco 2014, Portland 2016); Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems (Heidelberg 2012, Tainan 2015); Int. Symp. on Measurement Techniques for Multiphase Flows (Tianjin 2011, Sapporo 2015); Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing (Moscow 2011, Naples 2015); Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск 2008, 2010, 2012, 2014, 2016); Всероссийская молодежная конференция «Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей» (Новосибирск 2008, 2010); Всероссийская конференция молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск 2009, 2012); Всероссийская конференция "Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения" (Бийск 2011, Барнаул 2017); Всероссийская конференция «Фундаментальные основы МЭМС- и нанотехнологий» (Новосибирск 2012, 2015); Всероссийская конференция "Сибирский теплофизический семинар" (2010, 2015); Всероссийская конференция с международным участием "Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва" (Новосибирск 2017); Всероссийский семинар "Динамика многофазных сред" (Новосибирск 2017), V Всероссийская конференция с международным участием "Пермские гидродинамические научные чтения" (Пермь 2018). Результаты работы обсуждались на семинарах Института теплофизики СО РАН, на видеосеминаре ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбПУ – НИИМ МГУ – ОИВТ РАН, а также на семинарах в зарубежных университетах: University of Nottingham, Imperial College London, University College London.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка цитированной литературы, включающего 708 наименований. Общий объем диссертации - 431 страница, включая 177 рисунков и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность проблемы, дана общая характеристика работы, сформулированы цели и методы исследования.

Глава 1 посвящена обзору накопленного другими исследователями экспериментального и теоретического материала.

Первая часть обзора включает в себя описание режимов многофазных течений и условий, в которых реализуются кольцевой и дисперсно-кольцевой режимы течения, практическое применение дисперсно-кольцевого течения, методы и результаты измерений интегральных характеристик потока.

Вторая часть обзора посвящена описанию исследований волновой структуры обдуваемых газом пленок жидкости и включает в себя: качественное описание волновых режимов и волн различных типов, требования к методам измерений локальной толщины пленки жидкости и сравнительный анализ методов измерения, основанных на различных физических принципах, результаты измерений количественных характеристик волн возмущения, влияние условий эксперимента на эти характеристики, известную информацию о формировании и развитии волн возмущения и об их трехмерной структуре, а также информацию об измерениях поля скорости в жидкой и газовой фазах.

Третья часть обзора посвящена исследованиям дисперсной фазы и включает в себя: обзор гипотез, описывающих механизм срыва капель с поверхности пленки, краткое описание методов и результатов измерений параметров капель в ядре газового потока, информацию об исследованиях ударов капель по поверхности жидкости, а также описание исследований свойств пузырьков газа, захваченных пленкой жидкости, и механизмов захвата пузырьков.

Четвертая часть обзора дает представление о существующих моделях дисперсно-кольцевого течения: об эмпирических корреляциях для описания интегральных параметров потока, о численных моделях дисперсно-кольцевого течения, о моделях волнового течения тонких пленок жидкости, стекающих при слабом или отсутствующем обдуве, а также о попытках развития физических моделей волнообразования и уноса жидкости в условиях дисперсно-кольцевого течения. В пятой части подведены итоги обзора литературы, представлены цели работы и постановка задачи.

Глава 2 посвящена описанию экспериментальных установок и методов измерений.

Раздел **2.1** содержит перечень экспериментальных установок, различающихся ориентацией течения (опускное, восходящее, горизонтальное), формой поперечного сечения канала (круглая, прямоугольная), поперечными размерами и длиной канала. Дано описание условий экспериментов, в т.ч. диапазонов расходов жидкости и газа, рабочих жидкостей: вода и водоглицериновые растворы с

вязкостью $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (ВГР1) и $1,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (ВГР2). Также приведено сравнение различных безразмерных комплексов, используемых в качестве параметров задачи в различных работах.

Раздел **2.2** посвящен описанию измерения толщины пленки жидкости методом лазерно-индуцированной флюоресценции. Раздел содержит подробное описание принципа работы метода, вывод соотношений, позволяющих проводить достоверные измерения по упрощенной схеме, методы измерения основных параметров ЛИФ-метода, методы калибровки и методы организации опорного сигнала при работе на различных установках, в том числе, вблизи входа в канал, в условиях горизонтального и восходящего течений, а также в условиях низкой смачиваемости стенок канала. В этом же разделе приведено описание различных модификаций метода, различающихся полнотой пространственного представления данных по толщине пленки жидкости (Рис. 1). В двумерной модификации областью измерений служит участок продольного сечения канала. Метод регистрирует мгновенные профили поверхности пленки жидкости вдоль этого сечения с высокой частотой съемки. Экспериментальные данные представлены в виде двумерных массивов $h(x,t)$, где h - мгновенная локальная толщина пленки, x - продольная координата, t - время. Такое представление данных позволяет изучать совместную пространственно-временную эволюцию волн различных типов, движущихся с разными скоростями, в том числе процессы генерации, развития, взаимодействия и слияния волн.

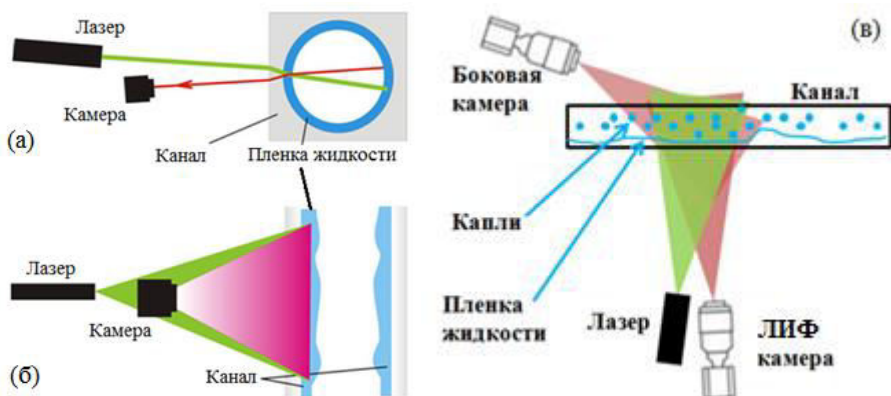


Рис. 1. Схема ЛИФ-метода в двумерной (а - вид сверху, б - вид сбоку) и стереоскопической (в) реализациях.

В трехмерной модификации регистрируется мгновенная форма поверхности пленки на прямоугольном участке канала (Рис. 2) и

исследуется эволюция этой поверхности во времени. Данные представлены в виде $h(x,y,t)$, где y - поперечная/азимутальная координата. Такое представление позволяет дополнительно исследовать поперечный размер и кривизну фронтов волн различных типов, а также процессы генерации / взаимодействия волн в трехмерном пространстве.

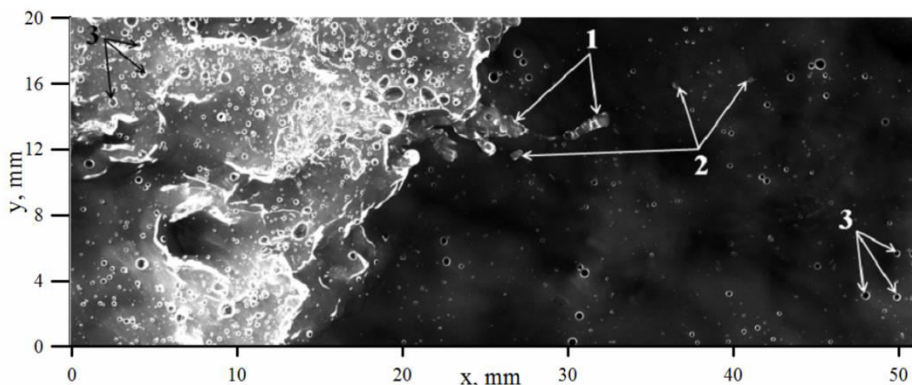


Рис. 2. Пример мгновенного распределения толщины пленки жидкости, $h(x,y)$, в графическом представлении (яркость прямо пропорциональна измеренной толщине пленки). Цифрами обозначены: жидкий лигамент (1), капли жидкости в газовом потоке (2), пузырьки газа, захваченные пленкой жидкости (3).

Помимо волн на поверхности пленки жидкости, ЛИФ-метод позволяет обнаруживать и изучать отдельные элементы дисперсной фазы, а именно, капли, срывающиеся с поверхности пленки, и пузырьки газа, захваченные пленкой жидкости (Рис. 2). Информация о скоростях, размерах и концентрации капель и пузырьков доступна одновременно с информацией о динамике волн. Кроме того, метод позволяет напрямую изучать взаимодействие элементов дисперсной фазы с волнами различных типов. Для получения информации о положении капель в трехмерном пространстве, а также для исследования сложных переходных жидких структур, была дополнительно разработана стереоскопическая модификация ЛИФ-метода, снабженная дополнительной камерой бокового вида (Рис. 1в).

В разделе 2.3 проведен анализ случайной и систематической погрешности при ЛИФ-измерениях толщины пленки жидкости. Случайная погрешность определяется, главным образом, шумом камеры и составляет около 5%. Основным источником систематической погрешности является увеличение коэффициента отражения от межфазной границы при повышении наклона межфазной поверхности.

Представлены результаты моделирования хода падающих и отраженных лучей, как для света лазера, так и для флюоресценции, и учет влияния особенностей хода лучей на измерения ЛИФ-методом. При наклонах поверхности пленки порядка 40° в ЛИФ-данных могут возникать локализованные пики со значительным завышением толщины пленки (Рис. 3).

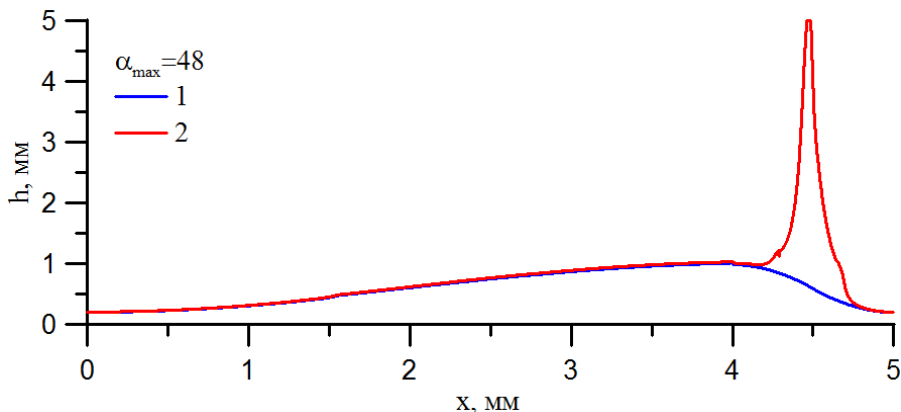


Рис. 3. Моделирование восстановления толщины пленки ЛИФ-методом при высоком (48°) наклоне переднего склона; 1 - модельная форма волны, 2 - модельные ЛИФ-измерения.

Основную роль в появлении таких пиков играет отражение флюоресцентного света, в результате которого камера интегрирует значения яркости флюоресценции вдоль значительно более длинного оптического пути. Локальные завышения толщины пленки практически невозможно предотвратить или компенсировать, однако они могут быть легко идентифицированы и устранены из последующего анализа записей толщины пленки. Также задача об искажениях решена для пузырька, захваченного пленкой жидкости, и капли жидкости, содержащей флюорофор.

В разделе **2.4** приведено описание методических экспериментов, направленных на прямое сравнение ЛИФ-метода с независимым методом планарной лазерно-индуцированной флюоресценции (ПЛИФ). В данных экспериментах флюоресценция возбуждалась лазерным ножом в одном продольном сечении канала, а ЛИФ- и ПЛИФ-измерения проводились одновременно при помощи двух камер, расположенных под разными углами к плоскости ножа. Также исследовалось влияние угла между плоскостью ножа и ПЛИФ-камерой на достоверность ПЛИФ-

измерений: эксперименты были проведены для традиционно используемого угла в 90° (ПЛИФ90) и для угла в 70° (ПЛИФ70). Был развит новый алгоритм измерения толщины пленки жидкости методом ПЛИФ для случаев сложной формы межфазной поверхности. Было подтверждено существование т.н. эффекта зеркала на ПЛИФ-измерения при течении в трубах, предсказанного в работе Häber et al. (2015).

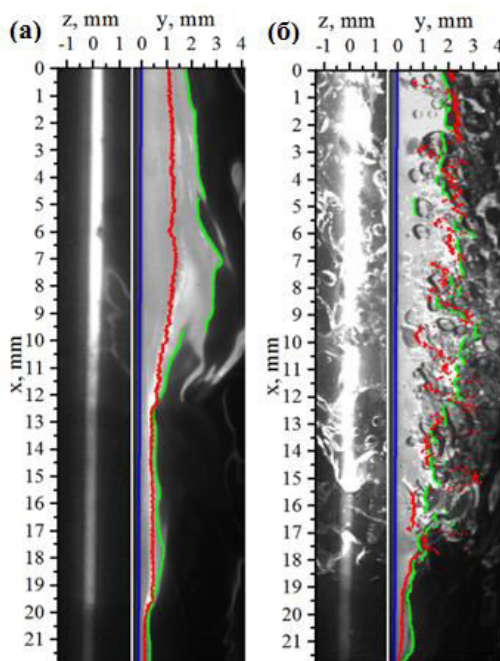


Рис. 4. Прямое сравнение ЛИФ- и ПЛИФ-методов. На рисунках (а) и (б) слева и справа даны примеры исходных ЛИФ- и ПЛИФ-изображений, на ПЛИФ изображения нанесены результаты измерения толщины пленки методом ЛИФ.

В рамках упрощенной модели безволновой пленки разработана поправка на учет эффекта зеркала, дающая хорошее соответствие с результатами ЛИФ-измерений, а также с положением артефактов, указывающих на истинное положение межфазной поверхности в ПЛИФ-изображениях. В то же время, ПЛИФ-метод уязвим к поперечной неравномерности толщины пленки, возникающей вследствие трехмерности волн, что может привести к сильной недооценке амплитуды волн. Этот эффект подавляется при уменьшении угла между плоскостью ножа и ПЛИФ-камерой. По этой причине для проведения измерений при использовании ПЛИФ-метода рекомендуется

использовать конфигурацию с углом 70° и менее. Несмотря на то, что при меньших углах завышение толщины пленки вследствие эффекта зеркала выражено сильнее, этот эффект, в отличие от эффекта трехмерности, может быть скомпенсирован. На шероховатой поверхности волн возмущения эффект зеркала подавляется, однако ПЛИФ-метод испытывает сильное влияние трехмерных волн и захваченных пленкой пузырьков газа. В частности, ПЛИФ90 в режимах с наличием волн возмущения значительно занижает толщину пленки, а гребни волн возмущения в ПЛИФ-данных практически неразличимы. Проведено прямое количественное сравнение ЛИФ- и ПЛИФ-методов в форме двумерных распределений значений толщины пленки, полученных разными методами, подтверждающее результаты качественного анализа искажений.

Глава 3 посвящена исследованию пространственно-временной эволюции волн различных типов, возникающих на поверхности тонких пленок жидкости, обдуваемых высокоскоростным ($V_G > 20$ м/с) потоком газа, при малых (порядка 20-40) числах Рейнольдса жидкости.

В разделе **3.1** описаны результаты применения метода ЛИФ в двумерной реализации к исследованию такого течения. В предшествующих работах считалось, что в этой режимной области волновая структура представлена случайными волнами ряби, причем зачастую предполагалось, что эти волны ряби и волны ряби на поверхности остаточного слоя в режимах с уносом обладают одинаковыми характеристиками. В данной работе было впервые показано, что на поверхности пленки в таких режимах сосуществуют волны двух типов, получивших название первичных и вторичных волн. Первичные волны возникают вследствие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в результате нелинейного развития возмущений максимального роста. Они выделяются большими значениями скорости, амплитуды и времени жизни. Вторичные волны генерируются вследствие неустойчивости задних склонов первичных волн. Эти волны распространяются по поверхности тонкого остаточного слоя между первичными волнами и исчезают при поглощении следующей первичной волной (Рис. 5). Единственное упоминание о существовании двух типов волн в данной режимной области было сделано Ohba & Nagaе (1993) на основе различия волн по поперечному размеру. В результате более широкие первичные волны, названные "кольцевыми", были обнаружены лишь в узком диапазоне скоростей газа. Проведение экспериментов в трехмерной постановке показало, что первичные волны характеризуются конечным поперечным размером, уменьшающимся с ростом скорости

газа. При этом первичные и вторичные волны существуют во всем исследованном в данной главе диапазоне скоростей газа.

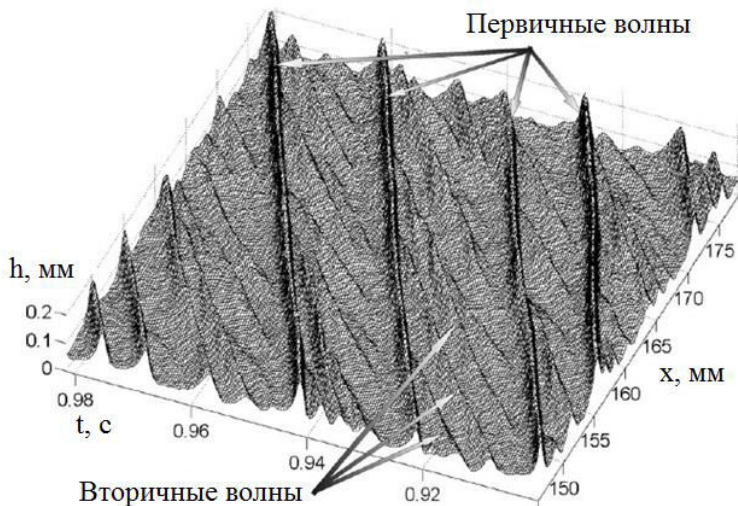


Рис. 5. Пространственно-временная запись толщины пленки в условиях отсутствия уноса жидкости в дисперсную фазу. $Re_L=40$, $V_G=27$ м/с.

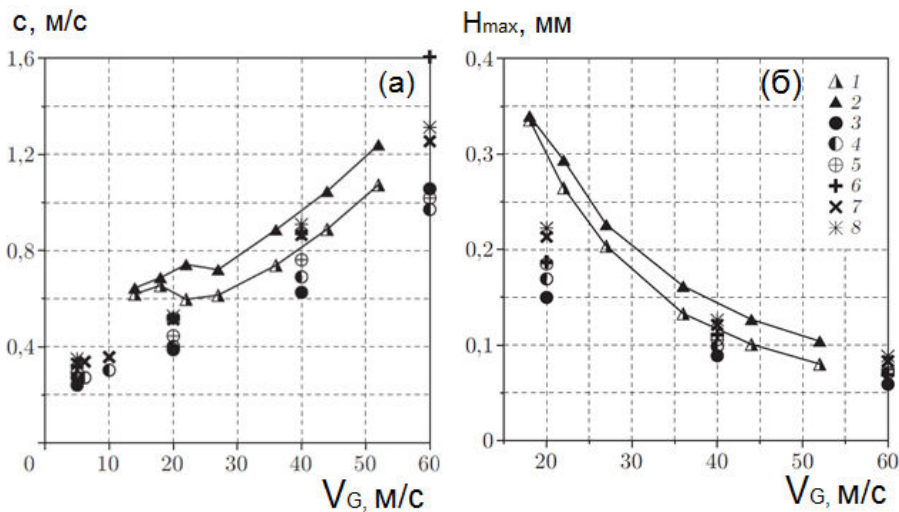


Рис. 6. Измеренные (1-2) и расчетные (3-8, различные решения) значения скорости (а) и амплитуды (б) первичных волн, источник: Trifonov (2013).

В разделе 3.2 представлены результаты измерения характеристик первичных и вторичных волн. Для решения этой задачи был разработан

алгоритм автоматической обработки данных в $x-t$ представлении. В основе алгоритма лежит автоматическая идентификация характеристических линий первичных и вторичных волн при помощи метода Кэнни поиска границ на изображениях. Разделение первичных и вторичных волн проводилось на основе расстояния, на котором наблюдалась рассматриваемая волна. Были измерены амплитуды (Рис. 6а) и скорости (Рис. 6б) первичных волн; результаты измерений показывают удовлетворительное согласие с расчетами Трифонова (Трифонов, 2013), однако расчет несколько занижает измеренные значения обеих величин. Были измерены средние значения длин переднего и заднего склонов первичных волн, а также определена относительная координата генерации вторичных волн на заднем склоне первичных волн. Область генерации располагается на расстоянии примерно $0,6-0,7L$ от начала первичной волны, где L - продольный размер первичной волны. Толщина пленки в области генерации вторичных волн значительно ближе к толщине остаточного слоя, чем к высоте гребня первичной волны.

В разделе 3.3 приведены результаты спектрального анализа пространственно-временных записей толщины пленки. Анализировались как временные, так и пространственные спектры сигнала.

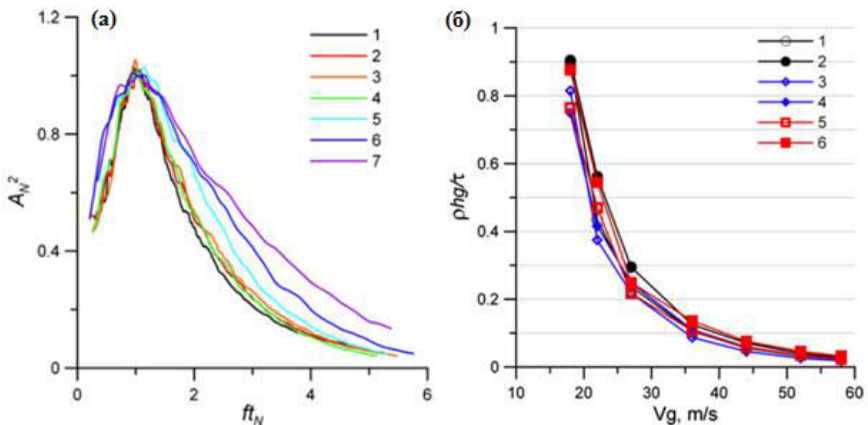


Рис. 7. (а) Нормированные временные спектры сигнала для разных скоростей газа. ВГР2, $Re_L = 40$. (1) $V_G = 58$ м/с; (2) $V_G = 52$ м/с; (3) $V_G = 44$ м/с; (4) $V_G = 36$ м/с; (5) $V_G = 27$ м/с; (6) $V_G = 22$ м/с; (7) $V_G = 18$ м/с. (б) Отношение силы тяжести к межфазному трению. $Re_L = 20$ (1, 3, 5); $Re_L = 40$ (2, 4, 6). Вода (1–2); ВГР1 (3–4); ВГР2 (5–6).

Положение максимума в спектре описывает первичные волны; вторичные волны в силу их нерегулярности не приводят к появлению локализованных пиков в спектре сигнала. Зависимость частоты следования первичных волн от параметров потока сходна с аналогичной зависимостью среднего межфазного трения. При линейной нормировке спектров сигнала на частоту максимума в спектре и энергию этой частоты спектры описываются единой универсальной зависимостью в широком диапазоне скоростей газа. Отклонения от универсальной зависимости наблюдаются при малых скоростях газа (Рис. 7а), при которых воздействие силы тяжести становится сравнимым с величиной межфазного трения ($\rho gh/\tau > 0,3$), Рис. 7б.

В разделе 3.4 описаны результаты моделирования волновой структуры поверхности пленки жидкости в режимах без уноса в эволюционной постановке с применением различных моделей пленочного течения и расчета напряжений со стороны газа.

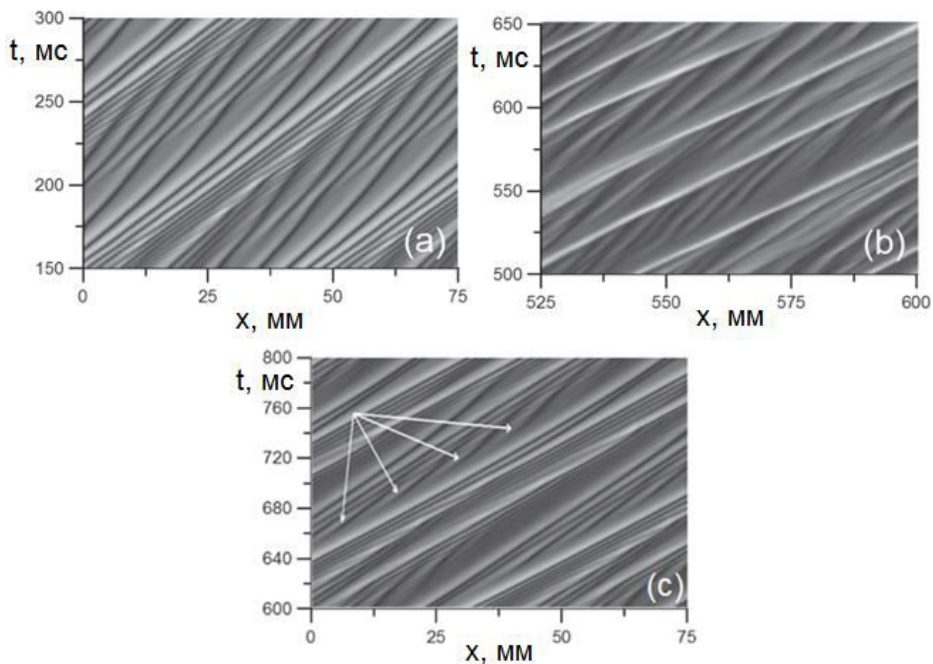


Рис. 8. Моделирование пространственно-временной эволюции первичных и вторичных волн. (а) Расчет по модели Шкадова. (б) Фрагмент экспериментальной пространственно-временной записи толщины пленки в тех же условиях и в том же масштабе. (с) Расчет по модели второго порядка. $Re_L=20$, $V_G=18$ м/с.

Было показано, что модель Шкадова существенно переоценивает роль капиллярного предвестника нелинейных волн (рис. 8а), в то время как в экспериментах при высоких скоростях газа предвестник подавляется полностью (рис. 8б). Более того, моделируемый предвестник взаимодействует с генерирующей его волной, что выражается в потере скорости и амплитуды основного горба одновременно с ростом первого горба предвестника. Использование модели второго порядка позволило частично подавить капиллярный предвестник и получить временно стабильные первичные волны. Для таких участков в модели была зафиксирована генерация вторичных волн, сходная с наблюдаемой в эксперименте (рис. 8с). Наличие предвестника приводит к понижению амплитуды и скорости первичных волн, а также расстояния между волнами.

Глава 4 посвящена исследованию волновой структуры пленки жидкости в режимах с уносом жидкости в дисперсную фазу.

В разделе **4.1** описаны результаты исследования совместной пространственно-временной эволюции волн возмущения и волн ряби при помощи ЛИФ-метода в двумерной постановке.

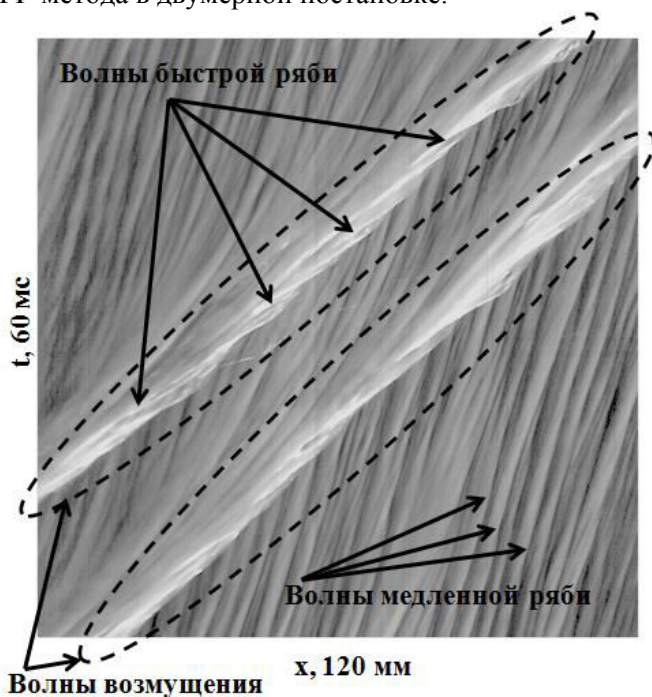


Рис. 9. Фрагмент матрицы $h(x, t)$ в графическом представлении для режима течения с уносом жидкости в дисперсную фазу. Расстояние от входа в канал, $x=500-620$ мм, $Re_L=140$, $V_G=27$ м/с.

Пример фрагмента пространственно-временной матрицы толщины пленки представлен на Рис. 9. Волны возмущения разделены участками тонкого остаточного слоя, поверхность которого покрыта волнами ряби. Эти волны "медленной" ряби генерируются на задних склонах волн возмущения и, замедляясь, движутся по поверхности остаточного слоя вплоть до их поглощения следующей волной возмущения. Такое поведение сходно с поведением первичных и вторичных волн в режимах без уноса. Поверхность волн возмущения также покрыта волнами ряби, которые генерируются на их задних склонах. В отличие от волн медленной ряби на поверхности остаточного слоя, эти волны движутся быстрее породивших их волн возмущения. Достигнув фронта волны возмущения, волны "быстрой ряби" исчезают либо вследствие затухания/опрокидывания на фронте волны возмущения, либо за счет их разрыва газовым потоком на мелкие капли. Именно таким образом происходит отрыв капель с поверхности пленки и унос их в ядро газового потока. В режимах без уноса первичные волны имеют гладкие гребни; такая структура более устойчива к разрушению газовым потоком. Сценарий эволюции волны ряби определяется относительной координатой ее возникновения: волны быстрой ряби генерируются ближе к фронту волны возмущения, а волны медленной ряби - дальше от него. Обнаруженная "трехволновая" структура является ключевой закономерностью дисперсно-кольцевого течения, наблюдаемой во всем исследованном диапазоне параметров, и позволяет в корне пересмотреть подходы к моделированию процессов срыва и осаждения капель, интенсификации межфазного трения и теплообмена в таком потоке.

Раздел 4.2 посвящен измерению мгновенных полей скорости в волнах возмущения методом PTV (particle tracking velocimetry). Измерения проводились в горизонтальном канале прямоугольного сечения для случая больших расходов жидкости и сравнительно малых скоростей газа. Поле скорости в жидкости измерялось в системе отсчета волны возмущения посредством фазового осреднения мгновенных полей скорости. Жидкость в волнах быстрой ряби движется быстрее волн возмущения; в основном объеме волны возмущения скорость жидкости близка к скорости распространения волны. В передней части волны возмущения жидкость вблизи стенки движется с малой абсолютной скоростью; в этой области волна возмущения взаимодействует с остаточным слоем. По мере проникновения вглубь волны возмущения пристенный слой жидкости ускоряется; под задним склоном волны возмущения скорость жидкости вблизи стенки достигает значений, близких к скорости волны возмущения. Локальное повышение трения на стенке происходит именно в области генерации волн быстрой и

медленной ряби. Покинув волну возмущения, жидкость вновь замедляется в области остаточного слоя.

В разделе 4.3 рассматриваются процессы формирования волн возмущения и их последующего развития. Задача решалась путем проведения экспериментов методом ЛИФ в двумерной постановке вблизи входа в канал. Было обнаружено, что вблизи входа поверхность пленки покрыта регулярными высокочастотными волнами, возникающими, скорее всего, благодаря неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. При слиянии таких волн формируются крупномасштабные структуры, покрытые волнами быстрой ряби, что соответствует описанию волн возмущения (Рис. 10а).

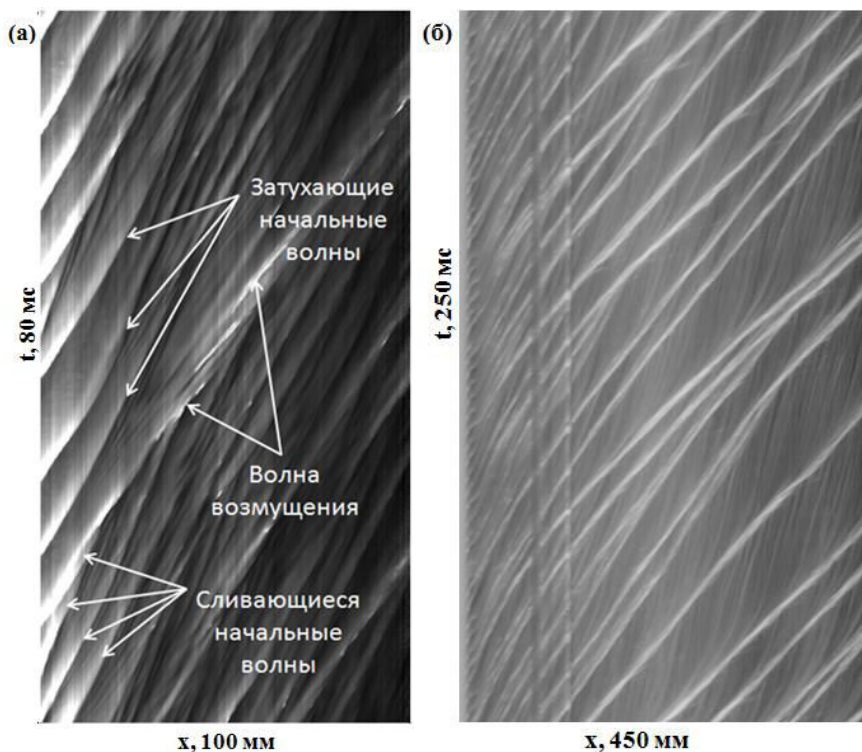


Рис. 10. (а) Фрагмент пространственно-временной записи толщины пленки, демонстрирующий процесс формирования волны возмущения. $Re_L=220$, $V_G=22$ м/с. (б) Запись на протяженном (450 мм) участке длины канала, демонстрирующая дальнейшее развитие волн возмущения. $Re_L=220$, $V_G=29$ м/с.

Таким образом, волны возмущения возникают вследствие слияния начальных высокочастотных волн, причем переход к волнам возмущения сопровождается скачкообразным увеличением продольного масштаба волновых структур. Анализ эволюции спектра сигнала вниз по потоку подтверждает ключевую роль актов слияния начальных волн в процессе перехода к волнам возмущения. Сходные явления были обнаружены вдали от входа в канал при формировании т.н. эфемерных волн, а также вблизи перехода к режимам с уносом. Эти наблюдения показывают, что обнаруженный механизм слияния не является следствием способа организации входного участка, а также позволяют понять, как именно происходит переход к уносу в случае повышения расхода жидкости вниз по потоку. Дальнейшее развитие (Рис. 10б) сопровождается ускорением и слиянием волн возмущения, приводящим к увеличению расстояния между волнами возмущения.

В разделе 4.4 описан метод автоматической идентификации характеристических линий волн возмущения на основе преобразования Радона. Использование такого метода позволило проанализировать применимость различных непрямых методов оценки волновых характеристик и исследовать основные параметры индивидуальных волн возмущения, таких как скорость, амплитуда, продольный размер.

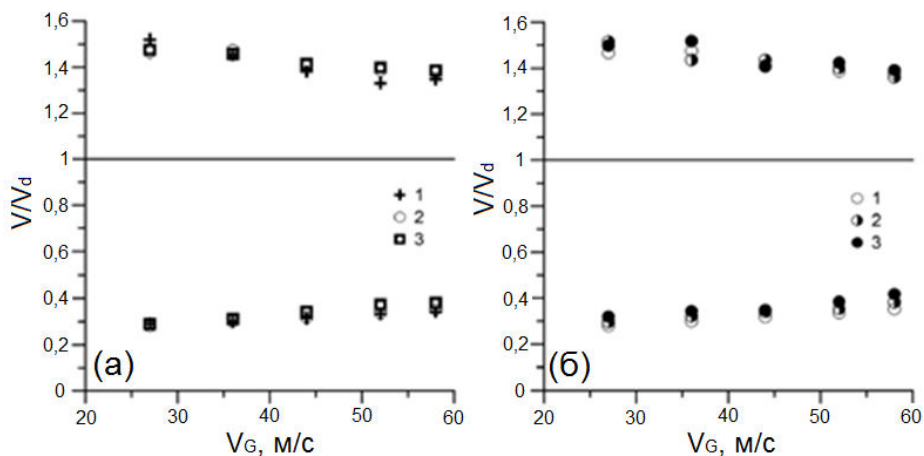


Рис. 11. Скорости волн быстрой ряби и волн медленной ряби вдали от волн возмущения, нормированные на скорость волн возмущения. (а) Влияние расхода жидкости, вода. (1) $Re_L = 142$; (2) $Re_L = 220$; (3) $Re_L = 350$. (б) Влияние вязкости жидкости при $Re_L = 220$. (1) Вода; (2) ВГР1; (3) ВГР2.

Было исследовано изменение скорости и частоты волн быстрой и медленной ряби с привязкой к фазе волны возмущения. В частности, было показано, что скорость волн быстрой и медленной ряби при нормировке на скорость породившей ее волны возмущения не зависит от параметров потока (Рис. 11), а также определены продольные масштабы волн возмущения (длина гребня, покрытого волнами быстрой ряби, длина заднего склона и расстояние, на котором стабилизируются свойства волн медленной ряби за волной возмущения).

В разделе 4.5 проводится прямое сравнение структуры пленки жидкости в опускном и восходящем течениях в одних и тех же условиях эксперимента. Показано, что скорость волн возмущения одинакова в опускном и восходящем течении для скоростей газа более 20 м/с. В то же время, скважность волн возмущения в восходящем течении ниже за счет снижения частоты волн возмущения (Рис. 12). Снижение скважности компенсируется утолщением остаточного слоя жидкости, и, как следствие, замедлением волн медленной ряби. Соответствие между опускным и восходящим течениями для остаточного слоя достигается при больших (порядка 40 м/с) скоростях газа. По-видимому, такое различие объясняется ослаблением газового потока в следе крупномасштабных шероховатых волн возмущения.

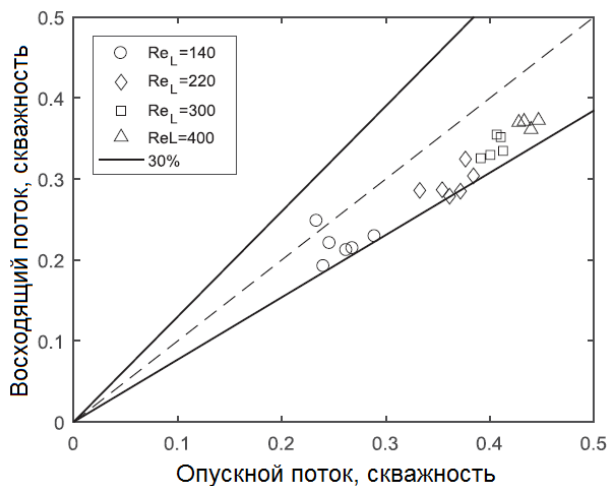


Рис. 12. Сравнение скважности волн возмущения в опускном и восходящем потоках.

В разделе 4.6 рассматривается течение в горизонтальном прямоугольном канале. Показано, что структура волн возмущения и процессы генерации волн быстрой и медленной ряби качественно

одинаковы при течении в каналах круглого и прямоугольного сечения, в опускном, восходящем и горизонтальном потоке. Зависимость волновых характеристик от расходов фаз также качественно одинакова во всех случаях. Количественно отличие горизонтального течения выражается в увеличении толщины пленки жидкости и амплитуды волн возмущения, а также в снижении скорости и частоты следования этих волн. Свой вклад в замедление волн вносят также боковые стенки прямоугольного канала. Вблизи стенок наблюдается понижение скорости и амплитуды волн возмущения, а также локальное повышение их частоты следования и продольного размера. Последние два эффекта связаны с трехмерностью волн возмущения. Показано, что волны возмущения в общем случае трехмерны: они характеризуются конечным поперечным размером, а их фронты имеют искривленную форму. При этом в потоке сосуществуют волны возмущения существенно разных поперечных размеров; кривизна фронтов снижается с увеличением ширины волны. При взаимодействии боковых краев волн возмущения происходит слияние с формированием волны значительно большего поперечного размера и меньшей кривизной фронта. В результате степень двумерности волн возрастает вниз по потоку. Другим сценарием повышения двумерности является поглощение узких волн широкими.

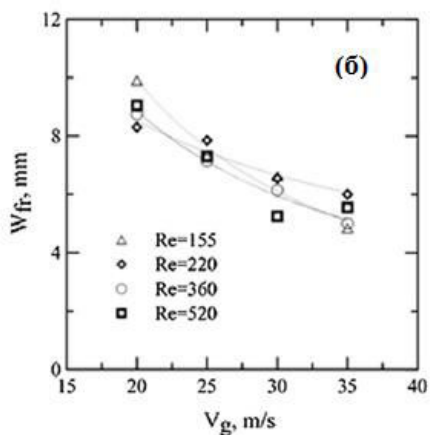
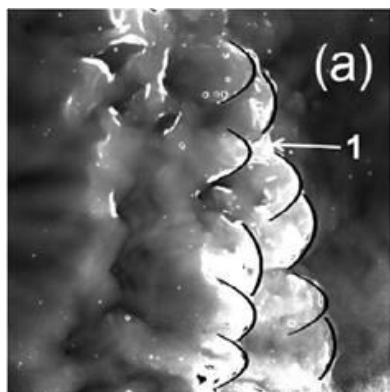


Рис. 13. (а) Форма и расположение фронтов волн быстрой ряби на поверхности волны возмущения. $Re_L=360$, $V_G=20$ м/с. Размер области 50 мм * 50 мм. Цифрой (1) показано место соединения боковых краев волн быстрой ряби. (б) Зависимость поперечного размера волн быстрой ряби от скорости газа.

Волны быстрой ряби также трехмерны, имеют подковообразную форму и характеризуются значительно меньшими продольными и поперечными размерами по сравнению с волнами возмущения. Волны быстрой ряби располагаются на поверхности волн возмущения в несколько слоев, расположенных в шахматном порядке (Рис. 13а). С увеличением скорости газа поперечный размер волн быстрой ряби уменьшается (Рис. 13б), что приводит к увеличению количества волн быстрой ряби на поверхности волны возмущения.

Глава 5 посвящена исследованию процессов обмена дисперсной фазой между пленкой жидкости и газовым ядром.

Раздел **5.1** посвящен исследованию свойств капель, срываемых с поверхности пленки, а также исследованию актов отрыва капель. Проведено измерение скоростей и размеров капель сразу после их отрыва с поверхности пленки. В процессе отрыва капли приобретают дополнительный импульс, в результате чего их начальная скорость в полтора-два раза превышает скорость волн быстрой ряби. Средний диаметр капель по Саутеру сразу после отрыва значительно превышает результаты ранних измерений, проведенных без привязки к стадии эволюции капли, в т.ч. после откачки пристенной пленки. Такое различие может объясняться вторичной атомизацией капель, более быстрым осаждением крупных капель, а также вторичным брызгоуносом. При помощи трехмерного и стереоскопического подходов было подтверждено, что основными механизмами срыва капель с поверхности волн возмущения являются сценарии "*bag break-up*" и "*ligament break-up*" (см. Azzopardi 1983).

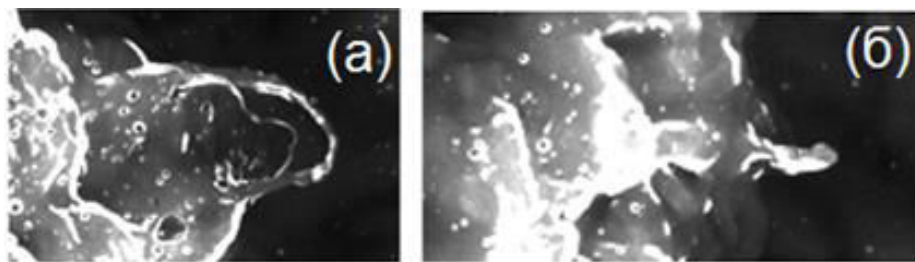


Рис. 15. Трехмерная ЛИФ-визуализация отрыва капель по сценарию *bag break-up* (а) и *ligament break-up* (б). (а) $Re_L = 360$, $V_G = 30$ м/с, область 20 мм * 13 мм; (б) $Re_L = 220$, $V_G = 30$ м/с, область 20 мм * 10 мм.

Была определена связь этих сценариев с трехмерной структурой волн быстрой ряби: *bag break-up* реализуется при разрыве всего фронта волны

быстрой ряби (Рис. 14а), а *ligament break-up* реализуется в местах соединения боковых краев волн быстрой ряби (Рис. 14б). При повышении скорости газа возрастает количество соединений краев волн и повышается вероятность реализации отрыва по сценарию *ligament break-up*. Существенную роль в процессе отрыва играет рост волн быстрой ряби, который может привести как к опрокидыванию волн ряби, так и к их разрыву.

Проведено сопоставление наблюдаемых в эксперименте сценариев срыва капель с многочисленными гипотезами, описывающими механизмы отрыва капель. Показано, что гипотезы, в основе которых лежит представление о гладкой волне возмущения, в лучшем случае представляют собой сильное упрощение реальных процессов. Существующие "физические" модели, предсказывающие интенсивность уноса, опираются на ряд не соответствующих действительности предположений относительно механизма отрыва, а также свойств волн возмущения и их трехмерной структуры.

Раздел 5.2 посвящен анализу ударов капель по поверхности пленки жидкости. В качестве тестовой задачи исследовано нормальное падение капли на покоящуюся поверхность жидкости, с добавлением флюорофора либо в падающую каплю, либо в слой жидкости. В результате отдельно исследованы эволюция кратера, возникающего при ударе капли, и динамика растекания материала капли по внутренней поверхности кратера.

В условиях дисперсно-кольцевого течения обнаружены три сценария взаимодействия капель, ударяющих с большой скоростью под малыми углами, с волновой поверхностью пленки жидкости: 1) Удар с формированием асимметричного кратера, сопровождающийся вторичным брызгоуносом. Исследовано влияние волн медленной ряби на эволюцию кратера; показано, что стандартные критерии определения порога всплеска не работают при малых углах удара. 2) Удар с формированием борозды на поверхности пленки, покрытой системой коротких волн, сопровождающийся захватом пузырьков газа (Рис. 15а). Показано, что размеры борозды определяются, в первую очередь, диаметром капли. 3) Удар с частичным выживанием падающей капли, сопровождающийся вторичным брызгоуносом из материала капли (Рис. 15б). Показано, что сценарий (1) реализуется, главным образом, на задних склонах волн возмущения, сценарий (2) - на поверхности остаточного слоя жидкости, сценарий (3) - на гребнях волн мелкой ряби. При этом сценарии (2) и (3) реализуются в узком диапазоне малых углов удара.

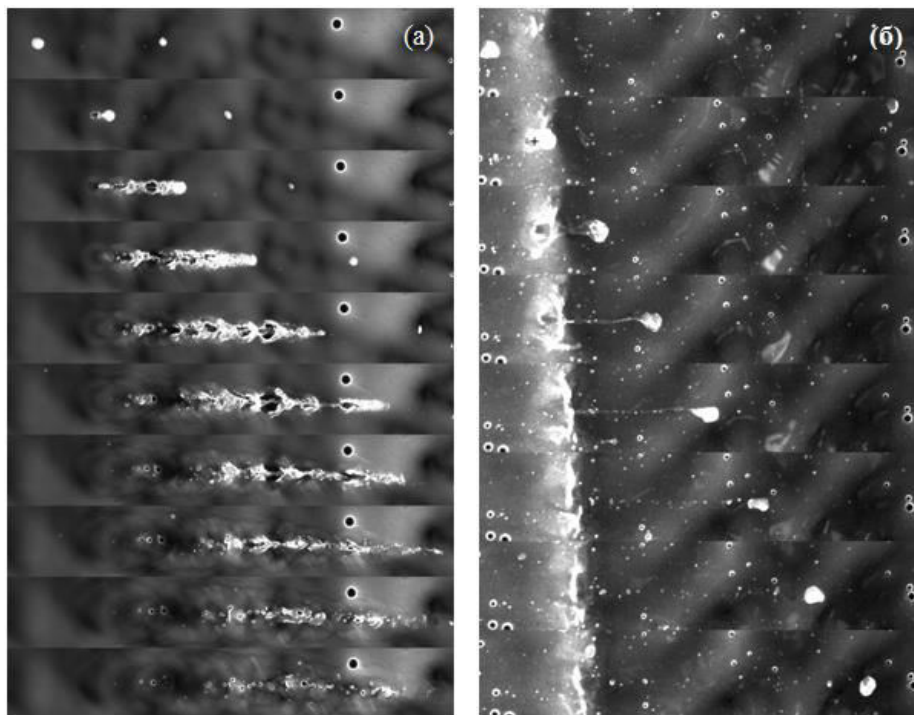


Рис. 15. (а) Пример удара капли с формированием борозды и захватом пузырьков газа. $V_G=25$ м/с, $Re_L=220$. Шаг по времени $T=0,2$ мс; размер области 28 мм * 4 мм. Диаметр капли $d=0,71$ мм, скорость капли $V_{xy}=20$ м/с. (б) Частичное выживание капли с формированием жидкой нити. $V_G=30$ м/с, $Re_L=360$. $T=0,2$ мс; область 16 мм * 3,2 мм. $d=0,78$ мм, $V_{xy}=10$ м/с.

В разделе **5.3** рассматривается динамика пузырьков газа, захваченных пленкой жидкости. Развита алгоритм автоматической идентификации пузырьков и измерения их скорости, размеров и толщины слоя жидкости, в котором заключен пузырек. Существуют три сценария захвата пузырьков: 1) при наклонных ударах быстрых капель с формированием борозды; 2) при ударах остатков переходных к уносу жидких структур; 3) при опрокидывании волн быстрой ряби. Первый сценарий реализуется на поверхности остаточного слоя; это новый механизм захвата пузырьков, связанный с сильной деформацией поверхности капли и/или пленки, не имеющий отношения к захвату воздушного диска между каплями и слоем жидкости, а также к другим известным механизмам захвата воздуха при ударах капель. Захват пузырьков происходит по мере продвижения капли; часть пузырьков разрушается при

восстановлении формы поверхности пленки; количество захваченных пузырьков зависит, в первую очередь, от размера капли; объем захваченного воздуха сравним с объемом капли. Сценарии (2) и (3) реализуются перед волнами возмущения и могут приводить к захвату сравнительно крупных пузырьков. Распределение пузырьков по размерам имеет экспоненциальную форму. Ранее такая форма объяснялась захватом пузырьков по сценарию (3) и каскадом дробления пузырьков (Rodriguez & Shedd 2004). В действительности такая форма распределения объясняется широким спектром размеров пузырьков, захватываемых по сценарию (1).

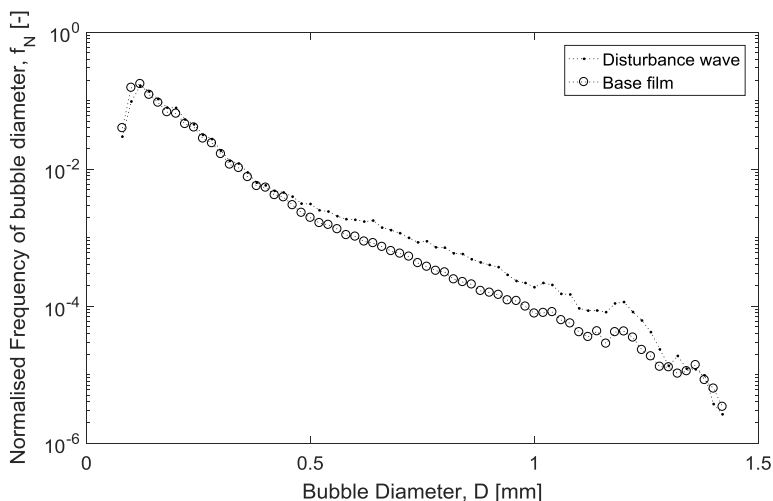


Рис. 16. Сравнение нормированных распределений пузырьков по размерам в остаточном слое и в волнах возмущения. $Re_L=520$, $V_G=35$ м/с.

Концентрация пузырьков в волнах возмущения значительно превосходит концентрацию пузырьков в остаточном слое, однако нормированные распределения пузырьков по размерам практически идентичны для пузырьков с диаметром менее 0,5 мм (Рис. 16); различие распределений в области крупных размеров объясняется вкладом сценариев (2) и (3). Таким образом, мелкие пузырьки захватываются остаточным слоем жидкости по сценарию (1) и аккумулируются волнами возмущения. Уничтожение пузырьков происходит как вследствие ударов капель, так и при попадании крупного пузыря в тонкий слой жидкости. Пузырьки следуют за течением жидкости и могут быть использованы в качестве трассеров для исследования профиля скорости в жидкости. Результаты такого исследования согласуются с PTV-экспериментами

(раздел 4.2) и подтверждают наличие локального максимума трения на стенке в области генерации волн быстрой и медленной ряби.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы, а также приведен список использованной литературы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана модификация метода лазерно-индуцированной флуоресценции, позволяющая проведение полевых измерений локальной толщины пленки жидкости одновременно с исследованием элементов дисперсной фазы.

2. Обнаружена неустойчивость заднего склона волн и подавление капиллярного предвестника нелинейных волн в режимах без уноса жидкости в дисперсную фазу. Показана возможность моделирования генерации вторичных волн при помощи двумерных моделей с автомодельным ламинарным профилем скорости в жидкости.

3. Обнаружено явление генерации волн быстрой и медленной ряби на задних склонах волн возмущения в режимах с уносом жидкости в дисперсную фазу. Показано, что сценарий эволюции волны ряби определяется координатой ее возникновения. Обнаружена область повышенного трения на стенке в области генерации волн ряби.

4. Обнаружено, что волны возмущения формируются вследствие слияния начальных высокочастотных волн, сопровождающегося скачкообразным увеличением продольного размера волны. Обнаружено существование сходных процессов вдали от входа в канал.

5. Определена взаимосвязь между механизмами срыва капель с поверхности волн возмущения и трехмерной структурой волн быстрой ряби. Проведен критический анализ гипотез, описывающих механизм срыва капель, а также физических моделей, предсказывающих интенсивность уноса жидкости в дисперсную фазу.

6. Обнаружены три сценария взаимодействия осаждающихся капель с поверхностью пленки, различающихся формой возмущения поверхности и выходом удара; определены условия реализации каждого из сценариев.

7. Обнаружен новый сценарий захвата пузырьков газа пленкой жидкости в результате наклонных высокоскоростных ударов капель по поверхности остаточного слоя жидкости. Определена роль волн возмущения в динамике пузырьков.

Список публикаций по теме диссертации:

1. Alekseenko, S.V., Antipin, V.A., Cherdantsev, A.V., Kharlamov, S.M., Markovich, D.M., 2008. Investigation of waves interaction in annular gas-

liquid flow using high-speed fluorescent visualization technique. *Microgravity Sci. Technol.*, 20(3-4): 271-275 (из перечня ВАК).

2. Alekseenko, S.V., Antipin, V.A., Cherdantsev, A.V., Kharlamov, S.M., Markovich, D.M., 2009. Two-wave structure of liquid film and waves interrelation in annular gas-liquid flow with and without entrainment. *Phys. Fluids*, 21: 061701-061704 (из перечня ВАК).

3. Alekseenko, S.V., Cherdantsev, A.V., Cherdantsev, M.V., Markovich, D.M., 2009. Investigation of secondary waves dynamics in annular gas-liquid flow. *Microgravity Sci. Technol.*, 21(Suppl. 1): 221-226 (из перечня ВАК).

4. Alekseenko, S.V., Cherdantsev, A.V., Heinz, O.M., Kharlamov, S.M., Markovich, D.M., 2011. An Image Analysis Method as Applied to Study the Space-Temporal Evolution of Waves in an Annular Gas-Liquid Flow. *Patt. Recogn. Image Analysis*, 21(3): 441-445 (из перечня ВАК).

5. Alekseenko, S., Cherdantsev, A., Cherdantsev, M., Isaenkov, S., Kharlamov, S., Markovich, D., 2012. Application of a high-speed laser-induced fluorescence technique for studying three-dimensional structure of annular gas-liquid flows. *Exp. Fluids*, 53(1): 77-89 (из перечня ВАК).

6. Alekseenko, S.V., Cherdantsev, A.V., Heinz, O.M., Kharlamov, S.M., Markovich, D.M., 2013. Application of the Image Analysis Method to Studies of the Space-Time Wave Evolution in an Annular Gas-Liquid Flow. *Patt. Recogn. Image Analysis*, 23(1): 35-43 (из перечня ВАК).

7. Alekseenko, S.V., Cherdantsev, A.V., Heinz, O.M., Kharlamov, S.M., Markovich, D.M., 2013. Analysis of spatial and temporal spectra of liquid film surface in annular gas-liquid flow. *Exp. Fluids*, 54(9): 1-12 (из перечня ВАК).

8. Alekseenko, S.V., Cherdantsev, A.V., Markovich, D.M., Rabusov, A.V., 2014. Investigation of droplets entrainment and deposition in annular flow using LIF technique. *Atomiz. Sprays*, 24 (3): 193-222 (из перечня ВАК).

9. Alekseenko, S.V., Cherdantsev, A.V., Heinz, O.M., Kharlamov, S.M., Markovich, D.M., 2014. Analysis of spatial and temporal evolution of disturbance waves and ripples in annular gas-liquid flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 67: 122-134 (из перечня ВАК).

10. Cherdantsev, A.V., Hann, D.B., Azzopardi, B.J., 2014. Study of gas-sheared liquid film in horizontal rectangular duct using high-speed LIF technique: three-dimensional wavy structure and its relation to liquid entrainment. *Int. J. Multiphase Flow*, 67: 52-64 (из перечня ВАК).

11. Alekseenko, S.V., Cherdantsev, A.V., Cherdantsev, M.V., Isaenkov, S.V., Markovich, D.M., 2015. Study of formation and development of disturbance waves in annular gas-liquid flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 77: 65-75 (из перечня ВАК).

12. Hann, D.B., Cherdantsev, A.V., Mitchell, A., McCarthy, I.N., Hewakandamby, B.N., Simmons, K., 2016. A Study of Droplet Impact on

Static Films Using the BB-LIF technique. *Exp. Fluids*, 57(4): 1-12 (из перечня ВАК).

13. Vozhakov, I.S., Cherdantsev, A.V., Arkhipov, D.G., 2016. Modelling secondary instability of thin co-current gas-sheared film. *Fluid Dyn. Res.*, 48 (6): 061420 (из перечня ВАК).

14. Cherdantsev, A.V., Hann, D.B., Hewakandamby, B.N., Azzopardi, B.J., 2017. Study of the impacts of droplets deposited from the gas core onto a gas-sheared liquid film. *Int. J. Multiphase Flow*, 88: 69–86 (из перечня ВАК).

15. Vasques, J., Cherdantsev, A., Cherdantsev, M., Isaenkov, S., Hann, D., 2018. Comparison of disturbance waves parameters with flow orientation in vertical annular gas-liquid flows in a small pipe. *Exp. Thermal Fluid Sci.*, 97: 484-501 (из перечня ВАК).

16. Hann, D.B., Cherdantsev, A.V., Azzopardi, B.J., 2018. Study of bubbles entrapped into a gas-sheared liquid film. *Int. J. Multiphase Flow*, 108: 181-201 (из перечня ВАК).

17. Alekseenko, S.V., Cherdantsev, A.V., Kharlamov, S.M., Markovich, D.M., Rabusov, A.V., Smagina, A.V. (2012). Various aspects of application of high-speed LIF-technique to studying the wavy structure of liquid film in annular gas-liquid flow. *AIP Conference Proceedings* 1428, 225 (из перечня ВАК).

18. Cherdantsev, A.V., Cherdantsev, M.V., Isaenkov, S.V., Markovich, D.M., 2017. Study of development of disturbance waves in annular gas-liquid flow. *J. Phys.: Conf. Series*, 899: 032008 (из перечня ВАК).

19. Isaenkov, S., Cherdantsev, A., Cherdantsev, M., Markovich, D., 2017. Quantitative analysis of transverse non-uniformity of liquid film at the initial stage of annular-dispersed flow. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 894: 012105 (из перечня ВАК).

20. Cherdantsev, A.V., 2018. Overview of Physical Models of Liquid Entrainment in Annular Gas-Liquid Flow. *AIP Conf. Proc.*, 1939: 020006-1–7 (из перечня ВАК).

21. Alekseenko S.V., Cherdantsev A.V., Isaenkov S.V., Markovich D.M. Circumferential non-uniformity of waves on liquid film in annular flow without liquid entrainment. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 1 (2): 139–151 (2013).

22. Cherdantsev, A.V., Tokarev, M.P., Vasques, J.C., Hann, D.B., Hewakandamby, B.N., Azzopardi, B.J., 2017. Study of droplets entrainment and deposition in gas-sheared liquid film flow using stereo-BBLIF approach. 9th World Conf Exp Heat Transfer Fluid Mech Thermodyn, 12-15 June, 2017, Iguazu Falls, Brazil, paper OC005 (12 pages).

23. Cherdantsev, A.V., An, J.S., Charogiannis, A., Markides, C.N., 2018. Cross-Validation Of PLIF And BBLIF Towards The Detailed Study Of Gas-Sheared Liquid Films In Downward Annular Flows. *Proc. 19th Int. Symp.*

Appl. Laser Imag. Tech. Fluid Mech., Lisbon, Portugal, 16 - 19 July 2018 (14 pages).

24. Cherdantsev, A.V, Isaenkov, S.V, Cherdantsev, M.V, Markovich, D.M., 2018. Experimental Study Of Primary Instability Of Thick Liquid Films Under Strong Gas Shear Using Laser-Induced Fluorescence And Shadow Techniques. Proc. 19th Int. Symp. Appl. Laser Imag. Tech. Fluid Mech., Lisbon, Portugal, 16 - 19 July 2018 (16 pages).

25. Hann, D.B., Loizou, K., Vasques, J., Tokarev, M.P., Cherdantsev, A.V. The Use Of POD Filtering To Study The Transition From 2D To 3D In Stratified Two-Phase Flow. Proc. 19th Int. Symp. Appl. Laser Imag. Tech. Fluid Mech., Lisbon, Portugal, 16 - 19 July 2018 (16 pages).

Подписано к печати 12 ноября 2018 г. Заказ № 15
Формат 60x84/16. Объем 2 уч.-изд. л. Тираж 110 экз.

Отпечатано в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1