

ОТЗЫВ

официального оппонента Бойко Виктора Михайловича на диссертационную работу Черданцева Андрея Викторовича «Волновая структура пленки жидкости и процессы обмена дисперсной фазой в дисперсно-кольцевом газожидкостном течении», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы.

Актуальность. Диссертация Черданцева А.В. посвящена экспериментальному исследованию дисперсно-кольцевых газожидкостных течений, которые реализуются в широком спектре промышленных установок (теплообменные тракты АЭС, устройства "мокрой" очистки газов, технологические процессы перегонки нефти, химические технологии). При разработке новых технологий, использующих газожидкостные пленочные течения, остро ощущается недостаточность знаний о физических процессах, обуславливающих форму и динамику волновой структуры пленки жидкости с образованием капель в дисперсно-кольцевом потоке. Эти процессы чрезвычайно сложны как для экспериментального исследования, так и для физического и численного моделирования. Всеобъемлющий теоретический анализ практически невозможен из-за сложности взаимосвязанных нестационарных физических явлений, которые обусловлены динамикой и физикой межфазного взаимодействия, гидродинамическими неустойчивостями, тепло- и массопереносом. Поэтому проводились в основном экспериментальные исследования интегральных характеристик газожидкостного потока. В последние два десятилетия наметился значительный прогресс в разработке новых технологий численного моделирования процессов аэродинамического взаимодействия газовых потоков с пленками и каплями жидкости. Для валидации вычислительных технологий требуется тестирование путем качественного и количественного сравнения с результатами экспериментов по максимальному числу параметров. Это в свою очередь предъявляет очень высокие требования к деталям и качеству экспериментального исследования физики процессов взаимодействия поверхности пленки жидкости с потоком газа. Исследования, представленные в работе, лежат в данном русле и, безусловно, являются **актуальными**.

В работе Черданцева А.В. методами лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) выполнено прямое экспериментальное изучение волновых процессов и процессов обмена дисперсной фазой, определяющих гидродинамику и интегральные характеристики дисперсно-кольцевого режима течения. Рассмотрен и решен широкий комплекс проблем, связанных:

- с адаптацией оптических диагностических методов к измерению толщины тонких пленок жидкости и параметров дисперсной фазы,
- с исследованием механизмов формирования и структуры волн возмущения и волн ряби,
- с исследованием механизмов образования двухфазной среды путем диспергирования жидкости или захвата пузырьков газа.

Получены новые научные результаты, имеющие высокую **актуальность** и **практическую ценность**, так как могут быть использованы для тестирования и модификации существующих теоретических и численных моделей, для создания новых моделей, для анализа существующих корреляционных зависимостей, а также при разработке новых и совершенствовании существующих технологий и аппаратов.

Научная новизна обусловлена тем, что впервые была разработана модификация метода ЛИФ для полевых измерений локальной толщины пленки жидкости одновременно с исследованием элементов дисперсной фазы. Выявлен механизм формирования волны возмущения, обнаружена неустойчивость заднего склона волн возмущения и явление генерации на них волн быстрой и медленной ряби в режимах с уносом жидкости в дисперсную фазу. Проведен критический анализ гипотез, описывающих механизм срыва капель, а также физических моделей, предсказывающих интенсивность уноса жидкости в дисперсную фазу. Выявлены три сценария взаимодействия осаждающихся капель с поверхностью пленки и новый сценарий захвата пузырьков газа пленкой жидкости.

Достоверность результатов обеспечивается использованием для измерения толщины пленки жидкости комплекса современных панорамных оптических методов, включая ЛИФ, ПЛИФ и PIV с высоким пространственно-временным разрешением, подтверждается анализом систематических погрешностей измерения, моделированием хода лучей прямого и отраженного света для лазерного излучения и флюоресценции в цилиндрических каналах, а также прямой кросс-валидацией независимых методов. Надежность измерений волновых характеристик обеспечивается применением специально разработанных методов автоматической идентификации пространственно-временных траекторий волн различных типов, исключая субъективный фактор, а также использованием адаптированных статистических методов анализа на больших выборках для измерения характеристик волн.

Апробация. Основные результаты диссертации опубликованы в научной печати, в том числе 20 статей - в рекомендованных ВАК высокорейтинговых рецензируемых журналах, таких как «International Journal of Multiphase Flow», «Physics of Fluids», «Experiments in Fluids», «Atomization and Sprays», а также.

докладывались и обсуждались на Международных и Всероссийских конференциях.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографии из 708 наименований. Общий объем работы оставляет 431 страницу, включая 177 рисунков и 4 таблицы

Во введении обосновывается актуальность исследований, указана цель работы, определена научная новизна и практическая ценность работы, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер, в ней полно представлено современное состояние исследований и место работ диссертанта в данной области науки. Справедливо отмечается, что по причинам практического характера, основной объем исследований был посвящен прямому измерению интегральных характеристик потока, оставляя без внимания процессы взаимодействия поверхности пленки жидкости с турбулентным потоком газа. Частично такой подход объясняется ограниченностью имеющихся экспериментальных методик. На основе проведенного анализа литературы выявлены нерешенные проблемы и сформулированы 6 основных задач, решаемых в диссертации.

Вторая глава является определяющей в плане диагностики. Основное внимание уделяется высокоинформативным бесконтактным оптическим методам измерения толщины пленки жидкости. В качестве основного выбран метод лазерно-индуцированной флюоресценции. Рассмотрены различные модификации метода (ЛИФ, ПЛИФ), различающиеся полнотой представления данных по толщине пленки жидкости. Показано, что метод ЛИФ позволяет изучать совместную пространственно-временную эволюцию волн различных типов, движущихся с разными скоростями (процессы генерации, развития, взаимодействия и слияния волн), а также отдельные элементы дисперсной фазы: капли, срывающиеся с поверхности пленки, и пузырьки газа, захваченные пленкой жидкости. Проведен анализ случайной и систематической погрешности метода. Установлено, при каких условиях могут возникать систематические ошибки, приводящие к значительным завышениям толщины пленки. Разработаны методы выделения областей с наличием искажений, а также способы предотвращения влияния искажений на измерение средних характеристик.

Третья глава посвящена исследованию пространственно-временной эволюции волн различных типов, возникающих на поверхности тонких пленок жидкости. Особо хочу подчеркнуть, что для измерения характеристик первичных и вторичных волн был разработан специальный алгоритм автоматической обработки данных. Это позволило исключить субъективный фактор в обработке данных, что существенно

повышает достоверность и надежность экспериментальных результатов. В основе алгоритма лежит автоматическая идентификация характеристических линий первичных и вторичных волн. Были измерены средние значения длин переднего и заднего склонов первичных волн, а также определена относительная координата генерации вторичных волн на заднем склоне первичных волн. Приведены результаты спектрального анализа пространственно-временных записей толщины пленки, где положение максимума в спектре описывает первичные волны; вторичные волны в силу их нерегулярности не приводят к появлению локализованных пиков в спектре сигнала. Выполнено детальное исследование эволюции волн, их динамические и амплитудные характеристики. Впервые показано, что на поверхности пленки сосуществуют волны двух типов, получивших название первичных и вторичных волн. Первичные волны возникают вследствие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в результате нелинейного развития возмущений максимального роста. Вторичные волны генерируются вследствие неустойчивости задних склонов первичных волн.

В **четвертой главе** представлены результаты исследования совместной пространственно-временной эволюции волн возмущения и волн ряби. Детально исследован и подробно описан экспериментально наблюдаемый процесс отрыва капель с поверхности пленки и унос их в ядро газового потока. Выявлены причины диспергирования пленок жидкости газовым потоком. Обнаружена трехволновая структура пленочной поверхности и установлено, что она является ключевой закономерностью дисперсно-кольцевого течения, наблюдаемой во всем исследованном диапазоне параметров. Отработана технология и выполнены измерения мгновенных полей скорости жидкости в волнах возмущения методом PTV. Установлено, что пристенный слой жидкости движется с разной скоростью по длине волны возмущения. Обнаружено, что области генерации волн быстрой и медленной ряби соответствует локальное повышение трения на стенке. Исследования методом ЛИФ процессов формирования волн возмущения и их последующего развития позволили зарегистрировать на поверхности пленки регулярные высокочастотные волны неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Показано, что при слиянии таких волн формируются крупномасштабные структуры, покрытые волнами быстрой ряби. Эти результаты являются новыми и важными для моделирования процессов срыва и осаждения капель, интенсификации межфазного трения и теплообмена в таком потоке.

В **пятой главе** приведены результаты исследования процессов обмена дисперсной фазой (капли жидкости, пузырьки газа) между пленкой жидкости и газовым ядром. Визуализирована динамика срыва капель с поверхности волн

возмущения, показано, что сценарии дробления жидкости соответствуют механизмам "bag break-up" и Определена связь этих сценариев с трехмерной структурой волн быстрой ряби. Выявлены особенности реализации сценария "ligament break-up" при разрушении пленки и вторичного дробления крупных капель. Измерены скорости и размеры капель. Установлено, что полученные настоящей работе данные о размерах капель по Саутеру значительно превышает результаты ранних измерений.

Следующий важный процесс в обмене дисперсной фазой между пленкой жидкости и газовым ядром - это диспергирование жидкости при наклонных ударах капель по поверхности пленки. При наклонных ударах под малыми углами обнаружены три сценария: - с формированием асимметричного кратера и вторичным брызгоуносом; - с формированием борозды на поверхности пленки; - с частичным выживанием падающей капли и вторичным брызгоуносом из материала капли. Особо хочу отметить, что в качестве тестовой исследована очень красивая классическая задача нормального падения капли на покоящуюся поверхность жидкости, с образованием и эволюцией кратера, возникающего при ударе капли, и динамика растекания материала капли (подкрашена люминофором) по внутренней поверхности кратера.

И завершает главу экспериментальное исследование динамики газовых пузырьков в пленке жидкости, в котором выявлены и детально исследованы различные сценарии захвата пузырьков, а также обнаружен новый механизм захвата.

В целом работа выглядит завершено: задачи, поставленные во введении выполнены, выводы диссертации аргументированы.

Автореферат Черданцева А.В. создает целостную картину о представленной работе. Его содержание полностью соответствует основным идеям и выводам диссертации.

По существу диссертации **замечаний** нет. По оформлению диссертации всего одно замечание:

1. Надписи почти на всех рисунках сделаны на английском языке (в автореферате это частично исправлено).

Таким образом, рецензируемая диссертация является научно-квалификационной работой, в которой разработаны новые подходы к решению ряда актуальных задач механики многофазных сред и получены новые результаты. Совокупность выполненных автором исследований можно квалифицировать как важное научное достижение, состоящее в развитии научного направления - газожидкостные пленочные течения.

Считаю, что представленная к защите диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной самостоятельно и на высоком научно-техническом уровне, соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, в соответствии с п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013г., и другим критериям, установленным в разделе II этого Положения. Автор диссертации Черданцев Андрей Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук



В.М. Бойко

Подпись В.М. Бойко удостоверяю:
Ученый секретарь ИТПМ СО РАН, к.ф.-м.н.

Ю.В. Кратова

Ю.В. Кратова