



УТВЕРЖДАЮ
Зам. директора ИБРАЭ РАН
по научной работе

Р.В. Арутюнян

31 января 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию
Черданцева Андрея Викторовича

«Волновая структура пленки жидкости и процессы обмена дисперсной фазой в дисперсно-кольцевом газожидкостном течении»,
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность темы диссертации Черданцева А.В., посвященной экспериментальному исследованию гидродинамики дисперсно-кольцевого режима газожидкостного течения, не вызывает сомнений. Исследуемый в работе режим течения имеет место при подаче в канал газожидкостной смеси с высоким газосодержанием, а также вследствие интенсивных фазовых превращений - при конденсации пара или выкипании жидкого теплоносителя. Примерами практических приложений, в которых встречается такой режим течения, являются аппараты теплообмена, химические реакторы, системы очистки газов, парогенераторы и тепловые тракты атомных электростанций. Создание промышленных кодов, используемых при проектировании и эксплуатации реакторов, требует построения замыкающих соотношений, в основе которых, как правило, лежат эмпирические и полуэмпирические корреляции. Интерес к получению фундаментальных знаний о гидродинамике дисперсно-кольцевых потоков с целью снизить уровень эмпиризма при моделировании течения был в значительной мере инициирован мировыми центрами атомной промышленности. В диссертации Черданцева А.В. рассматриваются фундаментальные основы дисперсно-кольцевого режима течения, включая возникновение, эволюцию и взаимодействие волн различных типов на поверхности пленки жидкости, а также образование и осаждение капель, захват газовой фазы жидкой пленкой. Работа посвящена прямому экспериментальному исследованию этих явлений при помощи передовых оптических методов, с акцентом на выявление взаимосвязи между волновыми процессами и процессами обмена дисперсной фазой.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Работа представлена на 431 странице, включая 177 рисунков и 4 таблицы. Список литературы состоит из 708 наименований.

Во **Введении** дано обоснование актуальности исследований, сформулированы цели и задачи, приводятся основные положения и наиболее важные научные результаты, выносимые на защиту, кратко изложено содержание диссертации.

В **главе 1** приведен подробный обзор литературы по теме исследований. Обзор начинается с описания режимов двухфазного газожидкостного течения, режимных границ дисперсно-кольцевого течения, условий наличия срыва капель с поверхности пленки. Рассмотрены практические приложения, в которых реализуется дисперсно-кольцевой режим течения, а также основные результаты измерений интегральных характеристик потока (интенсивность уноса жидкости, средняя толщина пленки, перепад давления).

Приведено качественное описание волн различных типов, встречающихся при различных волновых режимах течения обдуваемых газом пленок жидкости. Дан детальный анализ существующих методов измерения толщины пленки жидкости, основанных на различных физических принципах. Проанализированы известные данные о количественных характеристиках волн на поверхности пленки жидкости и влиянии внешних условий на эти характеристики, о развитии волновой структуры с расстоянием от входа в канал и о трехмерности волн различных типов. Перечислены известные данные о поле скорости в жидкой пленке и в турбулентном потоке газа над волнистой поверхностью.

Перечислены и проанализированы все предложенные ранее механизмы срыва капель с поверхности пленки, противоречия между гипотезами и связь гипотез с известными данными о волновой структуре пленки жидкости. Приведены основные данные о каплях, увлекаемых турбулентным газовым потоком. Проанализированы известные результаты по исследованию удара капли о поверхность жидкости в различных условиях. Рассмотрены возможные механизмы захвата пузырьков газа пленкой жидкости и немногочисленные существующие данные по свойствам пузырьков в пленке жидкости. Рассмотрены существующие эмпирические корреляции, описывающие поведение интегральных параметров потока и их надежность. Проведен обзор подходов к численному моделированию дисперсно-кольцевых потоков и результатов такого моделирования. Рассмотрены теоретические подходы к упрощенному моделированию волнового течения пленок жидкости, границы применимости существующих моделей и попытки экстраполяции упрощенных подходов на случай дисперсно-кольцевого потока.

По итогам анализа литературы выявлены наименее исследованные вопросы гидродинамики дисперсно-кольцевого течения, сформулированы цели и задачи исследования, очерчен диапазон условий для проведения экспериментальных исследований.

В главе 2 приведено описание экспериментальных установок, условий экспериментов и методов исследования. Использовались рабочие участки различной формы и размеров, а также с различной ориентацией потока относительно направления силы тяжести. Проведен анализ размерных и безразмерных комплексов, используемых для описания режимных параметров. Дано подробное описание основного экспериментального метода, используемого в работе - метода лазерно-индуцированной флюоресценции, основанного на яркости флюоресценции. Описано физическое явление, лежащее в основе методики, процедура пересчета яркости флюоресценции в толщину пленки жидкости, способы калибровки метода в различных условиях эксперимента. Метод позволяет проводить полевые измерения локальной толщины пленки жидкости с высоким пространственным и временным разрешением, получая мгновенные профили поверхности пленки в одном сечении канала либо в прямоугольной области стенки канала. Показано, что метод также позволяет детектировать отдельные элементы дисперсной фазы и исследовать их динамику одновременно с динамикой поверхностных волн. Описана стереоскопическая модификация метода, позволяющая определять три координаты капель, сорванных с поверхности пленки, и изучать опрокидывающиеся волновые структуры на поверхности пленки. Проведен анализ случайной и систематической погрешности при ЛИФ-измерениях. Показано, что основным источником ошибок при ЛИФ-измерениях является повышение коэффициента отражения при увеличении наклона межфазной поверхности. Проведено моделирование хода лучей лазера и флюоресценции при ЛИФ-измерениях в пленке жидкости, каплях и пузырьках, определены границы применимости метода. Проведено прямое экспериментальное сравнение ЛИФ-метода с независимым методом планарной лазерно-индуцированной флюоресценции (ПЛИФ), подтверждены результаты моделирования хода лучей. Обнаружены и проанализированы источники искажений при использовании ПЛИФ-метода. Показано, что ЛИФ-метод оптимальным образом удовлетворяет требованиям, предъявляемым к измерительной методике для решения поставленных задач.

В главе 3 приведены результаты исследований волновой структуры обдуваемой газом пленки жидкости в отсутствие срыва капель с поверхности пленки. Такие режимы реализуются при высоких скоростях газового потока и низких расходах жидкой фазы. Анализ пространственно-временных записей толщины пленки, полученных при помощи ЛИФ-метода, позволил обнаружить качественные изменения волновой структуры пленки жидкости при повышении скорости обдува. Ключевым изменением является возникновение неустойчивости задних склонов нелинейных волн, развившихся вследствие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца ("первичные волны"). Результатом вторичной неустойчивости является генерация медленных "вторичных волн", распространяющихся по остаточному слою между первичными волнами. Другим качественным изменением волновой картины при повышении скорости газа является подавление капиллярного предвестника нелинейных волн. Для исследования совместной пространственно-временной эволюции первичных и вторичных волн были развиты методы автоматической идентификации характеристических линий волн различных типов и измерены значимые волновые характеристики. При помощи анализа пространственных и временных спектров записей толщины пленки обнаружено подобие записей толщины пленки при различных скоростях газового потока, с линейным масштабированием по основной частоте и полной энергии спектра. Выяснено, что отклонения от такой структуры наблюдаются при достаточно низких скоростях газового потока, при которых воздействие силы тяжести становится сравнимым с касательным напряжением трения со стороны газа. Проведено моделирование развития волн на поверхности тонких обдуваемых газом пленок жидкости в рамках сравнительно простых двумерных интегральных моделей с автомоделным профилем скорости в жидкой пленке. В результате моделирования удалось качественно воспроизвести генерацию вторичных волн, что позволяет существенно сузить поле поиска причин возникновения вторичной неустойчивости. Количественные различия между моделированием и экспериментом связаны с отсутствием подавления капиллярного предвестника нелинейных волн в теоретической модели.

В главе 4 приведены результаты волновой структуры пленок жидкости в режимах со срывом капель с поверхности пленки и уносом жидкости в дисперсную фазу. Анализ пространственно-временных записей толщины пленки позволил выявить некоторое подобие с волновой структурой в режимах без уноса: было обнаружено, что на задних склонах крупномасштабных "волн возмущения" генерируются волны "медленной ряби", распространяющиеся по остаточному слою между волнами. Качественное отличие от режимов без уноса состоит в дополнительной генерации волн "быстрой ряби", покрывающих поверхность волн возмущения и разрушаемых на капли газовым потоком. Методом PIV было исследовано поле скорости жидкости в волне возмущения и обнаружена область повышенного трения на стенке, совпадающая с областью генерации волн ряби. Показано, что волны возмущения формируются из-за слияния начальных высокочастотных волн. Слияние сопровождается скачкообразным увеличением продольного размера и инициирует генерацию волн быстрой ряби. Аналогичные явления обнаружены вдали от входа в канал. Развита метод обработки на основе преобразования Радона, позволяющий исследовать поведение волн ряби с привязкой к фазе волны возмущения. Проведено прямое сравнение волновой структуры в опускном и восходящем потоках при прочих равных условиях. Показано, что область остаточного слоя более чувствительна к направлению потока по сравнению с волнами возмущения, вследствие локального торможения потока газа волнами возмущения. Исследовано течение в широком горизонтальном канале прямоугольного сечения. Выявлено влияние боковых стенок канала на локальные характеристики волн возмущения и исследована трехмерная структура волн возмущения. Показано, что волны быстрой ряби трехмерны и расположены на гребне волны возмущения в шахматном порядке, а их поперечный размер уменьшается с ростом скорости газа.

В главе 5 приведены результаты исследования процессов обмена дисперсной фазой между пленкой жидкости и газовым потоком, а именно, процессы отрыва и осаждения капель, а также захвата пузырьков газа пленкой жидкости. Проведено прямое экспериментальное исследование актов срыва капель. Показано, что размер капель сразу после отрыва значительно превышает средний размер капель в потоке. Выявлена взаимосвязь между известными механизмами отрыва капель и трехмерной структурой волн быстрой ряби. Переосмыслены режимные карты реализации различных механизмов срыва капель. Показано, что большая часть существующих гипотез, объясняющих механизм срыва капель, не соответствует экспериментальным наблюдениям. Критический анализ упрощенных моделей, предсказывающих интенсивность уноса жидкости в дисперсную фазу, показал, что предположения, лежащие в основе таких моделей, демонстрируют качественное и количественное расхождение с реальной волновой структурой и процессами отрыва.

В качестве тестирования применимости метода ЛИФ к изучению ударов капель по поверхности пленки проведено исследование нормального удара капли по покоящемуся слою жидкости. В ходе исследования развиты методы отдельного изучения эволюции жидкости в падающей капле и жидкости в покоящемся слое. В ходе исследования ударов капель, осаждающихся из газового потока на обдуваемую газом пленку жидкости, было обнаружено три сценария взаимодействия капли с волновой поверхностью: удар с формированием кратера и вторичным брызгоуносом, удар с формированием борозды и интенсивным захватом пузырьков газа, а также удар с частичным выживанием капли. Показано, что сценарии удара определяются углом наклона траектории капли к поверхности пленки, а также типом и фазой волны, по которой приходится удар.

Показано, что захват пузырьков газа происходит, в основном, благодаря ударам капель под малым наклоном к поверхности пленки, которые реализуются в области остаточного слоя жидкости. Волны возмущения, проходя по остаточному слою, вбирают захваченные пузырьки и накапливают их. Форма распределения пузырьков по размерам объясняется не каскадом дробления пузырьков, как считалось ранее, а особенностями взаимодействия падающей капли с поверхностью пленки. Также проведена оценка поля скорости в жидкости с использованием пузырьков в качестве трассеров; результаты согласуются с результатами PIV-измерений.

Выводы по диссертации приведены по главам, основные результаты сформулированы в общем **заключении** по диссертации.

Материал диссертационной работы изложен четко, ясно и, за исключением обзора, подробно проиллюстрирован рисунками. Содержание работы позволяет сделать заключение, что ее автор провел целенаправленную работу по решению важных задач по выявлению и прямому экспериментальному исследованию базовых гидродинамических процессов, определяющих динамику и интегральные характеристики дисперсно-кольцевого течения.

В диссертации Черданцева А.В. корректно указываются ссылки на авторов и указываются источники цитирования, откуда заимствуются материалы. Приведено описание личного вклада автора.

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций. В диссертации представлены корректные постановки всех решаемых задач. При их формулировке проведен критический анализ обширной литературы по исследуемой проблеме, выявлены неясные и противоречивые сведения, сформулированы требования к экспериментальным методам, способным решить поставленные задачи, сформулированы ограничения диапазона условий экспериментов, в которых на данном этапе возможно создать

последовательное и при этом максимально полное описание течения. Результаты внутренне непротиворечивы и соответствуют общим физическим представлениям.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций соответствует принятой в рамках специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Достоверность результатов обусловлена использованием современных методов измерений, обладающих широкими возможностями. В частности, в работе используются полевые методы измерения локальной толщины пленки с высоким пространственным и временным разрешением, допускающие возможность трехмерных измерений и исследование капель и пузырьков одновременно с исследованием волновой структуры. Проведена объемная работа по анализу достоверности измерительной методики: детально проработана процедура калибровки метода в различных условиях, проведен анализ случайной и систематической погрешности измерений, выявлены недостатки метода и проведено их масштабное теоретическое и экспериментальное исследование. Для анализа данных используются интеллектуальные алгоритмы автоматической обработки, разработанные соискателем, а также общеизвестные методы обработки сигналов, адаптированные к решаемым задачам.

Новизна представленных в диссертации положений заключается в следующем:

1. Данная работа является первым систематическим применением ЛИФ-метода к полевым измерениям пленки жидкости и дисперсной фазы в дисперсно-кольцевом режиме течения.
2. Обнаружены качественные изменения волновой структуры тонких пленок жидкости при увеличении скорости газа: неустойчивость задних склонов волн и подавление капиллярного предвестника.
3. Обнаружена генерация волн медленной и быстрой ряби на задних склонах волн возмущения.
4. Обнаружено, что волны возмущения формируются путем слияний высокочастотных волн Кельвина-Гельмгольца.
5. Впервые определена взаимосвязь механизмов атомизации пленки жидкости с трехмерной волновой структурой волн быстрой ряби.
6. Обнаружены новые сценарии взаимодействия капель, осаждающихся из газового потока, с волновой пленкой жидкости. Определены условия реализации каждого из сценариев.
7. Обнаружены новые сценарии захвата пузырьков газа пленкой жидкости и впервые описана динамика захваченных пузырьков в волнах возмущения и в остаточном слое.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты соответствуют глубокому пониманию вопросов, связанных с гидродинамическими процессами, реализующимися в дисперсно-кольцевых потоках. Полученные результаты составляют целостную картину гидродинамической структуры дисперсно-кольцевого течения с четко прописанной взаимосвязью между отдельными явлениями. Данная картина позволяет упорядочить существующие представления о гидродинамике дисперсно-кольцевого режима и отсеять ряд гипотез, высказанных ранее на основе умозрительных рассуждений или более грубых экспериментов. В то же время, полученная картина является значительным усложнением существующих представлений.

Полученные результаты можно использовать для развития существующих и разработки принципиально новых теоретических и численных моделей течения обдуваемых газом пленок жидкости, а также для верификации моделей. Такие модели могут быть имплементированы в промышленные коды, используемые при создании и эксплуатации промышленных установок, в том числе, в термогидравлических кодах ядерных реакторов.

Материалы диссертации рекомендуется использовать специалистам ИБРАЭ РАН, ОИВТ РАН, МЭИ, ИАТЭ и других организаций, занимающихся исследованием гидродинамики многофазных потоков в различных практических приложениях. Полученные результаты представляют интерес для теоретических и экспериментальных групп ИТПМ СО РАН, МФТИ, НИИ Механики МГУ и других исследовательских институтов и университетов.

Замечания по диссертации:

1. Автором создан обширный обзор литературы по исследуемой теме. В то же время, различные направления исследований описаны с разной степенью детализации. В частности, в обзоре уделено сравнительно мало внимания трехжидкостным моделям дисперсно-кольцевого режима течения и моделям волнового течения пленок жидкости, применимых при малых расходах жидкости и газа.

2. Кроме того, было бы уместно снабдить некоторые разделы обзора поясняющими рисунками. Это упростило бы понимание читателями основных понятий, используемых в диссертации, таких как различные типы волн, гипотезы, описывающие механизмы срыва капель, и т.д.

3. Разработанная автором стереоскопическая модификация метода ЛИФ представляется весьма перспективным методом исследования. К сожалению, в диссертации представлены лишь качественные результаты, полученные с использованием этого метода.

4. На основе сделанных автором наблюдений в работе выполнен критический анализ физических моделей, предсказывающих интенсивность уноса жидкости в дисперсную фазу. Перспективным направлением развития работы был бы аналогичный анализ существующих эмпирических корреляций и их возможная корректировка с учетом экспериментальных результатов, полученных в диссертации. К сожалению, этого в работе сделано не было.

Публикации, отражающие основное содержание работы. По теме диссертации автором опубликовано 25 работ в рецензируемых периодических изданиях и трудах международных конференций. В журналах из списка, рекомендованного ВАК, по теме диссертации опубликовано 20 статей (из них 18 в международных изданиях). Количество публикаций удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям. Основные результаты хорошо апробированы, они обсуждались на международных симпозиумах, всероссийских конференциях и семинарах.

Заключение

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки по представленной диссертационной работе и не носят принципиального характера. Диссертация Черданцева Андрея Викторовича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований дисперсно-кольцевого режима газожидкостного течения выявлены механизмы возникновения и взаимодействия разноплановых элементов потока, и выполнено комплексное описание гидродинамических явлений и взаимосвязи между явлениями, представляющее собой углубление и усложнение представлений о гидродинамике такого течения, что можно квалифицировать как научное достижение в области гидродинамики двухфазных потоков.

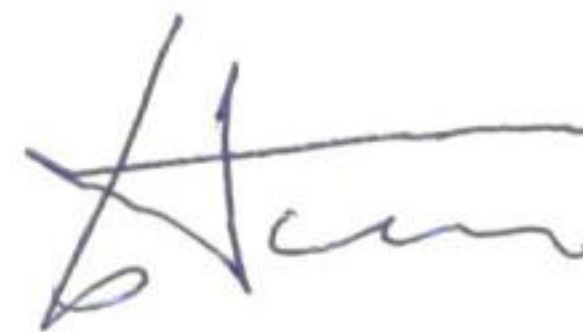
Исходя из актуальности, новизны, научной и практической значимости данной работы, можно сделать заключение, что диссертация Черданцева Андрея Викторовича

«Волновая структура пленки жидкости и процессы обмена дисперсной фазой в дисперсно-кольцевом газожидкостном течении», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет всем критериям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор, Черданцев Андрей Викторович, заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук.

Данный отзыв обсужден на заседании ФГБУН «Институт проблем безопасного развития атомной энергетики» РАН 31 января 2019 года (протокол №1).

Отзыв составлен:

Зав. отделом №15 «Перспективных исследований и математического моделирования» ИБРАЭ РАН,
д.ф.-м.н., профессор



Головизнин Василий Михайлович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем безопасного развития атомной энергетики» Российской Академии Наук.

Почтовый адрес: 115191, Россия,
г. Москва, ул. Большая Тульская, 52
Телефон: +7 495 955-22-86
Факс: +7 495 958-11-51
Эл. почта: pbl@ibrae.ac.ru
Сайт: <http://www.ibrae.ac.ru>