

Отзыв официального оппонента

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»

Диссертация Черданцева А.В. посвящена экспериментальному исследованию волнового течения пленок жидкости в дисперсно-кольцевом двухфазном потоке. Потоки такой структуры широко распространены во многих технологических процессах (тепловая и атомная энергетика, химические, нефтехимические технологии и др.). Почти 50 лет после публикации монографии Хьюитта и Холл-Тейлора, посвященной кольцевым двухфазным течениям, отмечены огромным числом публикаций по этой тематике; в обсуждаемой диссертации библиографический перечень составляет 708 наименований, из которых очень большая доля приходится на работы последних 5-10 лет. Сложность взаимодействия пленки жидкости с турбулентным потоком газа, отрыв и осаждение капель жидкости, возможность захвата пузырьков газа пленкой, - все это гарантирует сохранение внимания к этой проблематике в обозримой перспективе и подтверждает **актуальность** выбранной темы диссертации.

Главные результаты диссертации обеспечены огромным объемом тщательных экспериментов с использованием современных оптических методов, при реализации которых и интерпретации результатов измерений автор проявил высокую квалификацию и творческий подход. **Достоверность** полученных результатов обеспечена теоретическим анализом принципов и методов оптических исследований, сопоставлением используемых в экспериментах методов ЛИФ и ПЛИФ, анализом случайной и систематической погрешности измерений, использованием интеллектуальных методов обработки данных. Согласие измеренных значений средней толщины пленки и их среднеквадратичного отклонения с надежными данными предшествующих исследований также свидетельствуют в пользу достоверности результатов измерений.

Следует отметить, что уже в самой методике исследований характеристик волн и дисперсных объектов посредством лазерно-индуцированной флюоресценции (ЛИФ), содержатся признаки научной новизны (стереоскопическая модификация ЛИФ-метода с использованием дополнительной камеры, совместные измерения при помощи ЛИФ- и ПЛИФ-методов). Хотя главным является выявление качественно новых характеристик дисперсно-кольцевых течений, которые и определяют **научную новизну** работы. При высоких скоростях газа обнаружены качественные изменения в волновой структуре тонких пленок жидкости: генерация вторичных волн и подавление капиллярного предвестника, генерация волн быстрой и медленной ряби на задних склонах волн возмущения. Выявлен механизм формирования волн возмущения за счет слияния высокочастотных коротких волн в режимах с уносом жидкости в дисперсную фазу; предложен новый механизм формирования капель, связанный с особенностями формы и расположения волн быстрой ряби на гребнях волн возмущения. Обнаружен новый тип взаимодействия капель с пленкой жидкости при малых углах удара, сопровождающийся захватом пузырьков газа; показано, что этот механизм захвата воздуха вносит основной вклад в насыщение пленки пузырьками газа.

Обоснованность научных положений диссертации подтверждается глубоким анализом научной литературы по исследуемой тематике и корректной постановкой решаемых задач. Полученные выводы уточняют и развивают существующие представления о гидродинамике обдуваемых газом пленок жидкости и процессах обмена дисперсной фазой. Автор неоднократно проводит сравнение результатов измерений и их качественного анализа с данными опытных и численных исследований других работ, в том числе, самых последних по времени.

Научная и практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты способствуют более глубокому пониманию процессов взаимодействия между турбулентным потоком газа и волновой пленкой жидкости. На основе экспериментальных наблюдений автором проведен критический анализ упрощающих предположений, используемых в ряде существующих моделей. Теперь без учета результатов диссертации Черданцева едва ли возможно разрабатывать теоретические модели дисперсно-кольцевых потоков. Эти результаты могут быть использованы также для верификации численных моделей таких потоков, что актуально для создания прикладных расчетных кодов для атомной энергетики и других приложений.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка статей автора по теме диссертации и списка использованной литературы. Работа изложена на 431 странице, содержит 177 рисунков и 4 таблицы. Список литературы включает 708 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность и новизна работы, сформулированы цели и задачи исследований, приведены наиболее важные научные результаты, положения, выносимые на защиту, кратко изложено содержание диссертации.

В **первой главе** приведен обзор режимов многофазных потоков и роли дисперсно-кольцевого режима течения, описаны примеры приложений исследуемого режима, методы и результаты измерений интегральных параметров потока. Дано качественное описание волновой структуры поверхности пленки, проведен анализ методов измерения локальной толщины пленки жидкости, приведены результаты измерений волновых характеристик в различных условиях. Проведен обзор состояния исследований динамики дисперсной фазы, описаны существующие подходы к моделированию дисперсно-кольцевых потоков.

Во **второй главе** дано описание четырех экспериментальных установок и методов измерений, рассмотрены физические основы метода лазерно-индуцированной флюоресценции, проанализированы погрешности и искажения при измерениях ЛИФ-методом, представлены результаты прямого экспериментального сравнения методов ЛИФ и ПЛИФ.

В **третьей главе** приведены результаты исследований эволюции волновых тонких пленок жидкости под воздействием потока воздуха. Показано, что при высоких скоростях газа на поверхности пленки сосуществуют два типа волн, различающихся характеристиками и пространственно-временным поведением. Проведено сравнение с результатами моделирования эволюции возмущений в рамках нескольких моделей.

В **четвертой главе** исследуется взаимосвязь между крупномасштабными волнами возмущения и мелкими волнами ряби, покрывающими всю поверхность пленки в режимах с капельным уносом жидкости. Показано, что волны ряби генерируются волнами возмущения, при этом часть волн ряби движется быстрее породившей их волны возмущения и разрушается газовым потоком, в результате чего происходит отрыв капель. Сами волны возмущения формируются при слиянии начальных высокочастотных волн вблизи входа в канал. Изучено влияние условий эксперимента (формы канала, ориентации потока, вязкости рабочей жидкости) на волновые характеристики.

В **пятой главе** рассмотрены процессы обмена дисперсной фазой между пристенной пленкой жидкости и газовым ядром. Детально описаны процессы разрушения волн быстрой ряби, ведущие к реализации одного из сценариев формирования капель. Предложена классификация возмущений поверхности пленки вследствие ударов капель, падающих на пленку из газового ядра. При малых углах удара капель по отношению к поверхности остаточного слоя жидкости происходит захват большого количества пузырьков газа. Большая часть пузырьков газа попадает в пленку жидкости именно за счет таких ударов. Исследована дальнейшая эволюция пузырьков газа в остаточном слое и в волнах возмущения.

Выводы диссертации сформулированы по итогам каждой главы. В **Заключении** кратко обобщены основные результаты и выводы работы.

В целом, можно констатировать, что в результате выполненных диссертантом исследований построена ясная модель структуры дисперсно-кольцевых газожидкостных потоков, включающая информацию о волновой поверхности пленки с волнами разного типа, об условиях уноса капель в газовый поток, о результатах удара капель о поверхность пленки и условиях захвата газовых пузырьков пленкой. Такие структуры обнаружены в вертикальных цилиндрических каналах при опускном и восходящем движении потока и в плоском течении в широком горизонтальном канале. В экспериментах использовались три жидкости с различной вязкостью (вода и водные растворы глицерина двух концентраций) и воздух при атмосферном давлении; расход жидкости соответствовал числам Рейнольдса от 16 до 1350, скорость воздуха изменялась от 0 до 60 м/с. Важный вывод работы – универсальность выявленных структур волнового течения при всех исследованных направлениях течения (с небольшими количественными различиями измеренных характеристик);

Все результаты работы **опубликованы** в рецензируемых научных изданиях. Всего по теме диссертации автором опубликовано 25 работ, 20 из них в журналах, рекомендованных ВАК, 5 - в рецензируемых сборниках международных конференций. Автореферат дает адекватное представление о содержании диссертации.

Замечания по содержанию и оформлению диссертации:

1. Выявленные в работе характеристики дисперсно-кольцевого течения, строго говоря, могут быть отнесены только к тем параметрам газа и жидкости, которые охвачены опытами. Для большинства приложений, использующих двухфазные потоки с кольцевой структурой, характерны достаточно высокие приведенные давления. В тепловой и атомной энергетике рабочее давление примерно на два порядка превосходит атмосферное, так что плотности фаз различаются не на три порядка, как в обсуждаемой работе, а только на один. В статьях сотрудников ФЭИ им. Лейпунского (Kirillov P. L. et al. *Multiphase Science and Technology*, 26 (2014), 1-61, 83-137) отмечалось изменение профиля массовой скорости жидкости с М-образного при $p \leq 10$ МПа к выпуклому при более высоких (до 13.7 МПа) давлениях. Этот вывод качественно согласуется с опытными результатами цитируемой в диссертации работы Nakazatomi M. & Sekoguchi K. (1996b), которые свидетельствуют об изменении механизмов уноса и осаждения капель в водовоздушном потоке при давлениях выше 10 МПа. Для диоксида углерода, углеводородов, хладонов, широко используемых в технике и имеющих относительно невысокое критическое давление, область их применения часто относится к приведенным давлениям на уровне 0.3-0.6. Вероятно, и в этих случаях реальные структуры двухфазного потока сильно отличаются от исследованных в диссертации.
2. Было бы очень желательно, иметь не только качественное описание структуры волн, механизмов ее перестройки при изменении расходов фаз, механизмов уноса капель, но и количественные соотношения для интенсивности уноса и осаждения капель, для средней толщины пленки, что очень важно для приложений. Автор иронично отзывается о приближенных физических моделях, справедливо указывая на их дефекты. Но прикладные технологии используют (вероятно, неоптимальным образом) кольцевые двухфазные потоки. А проектируются и эксплуатируются соответствующие установки на основе доступных, порой грубых, соотношений. Это, собственно, не замечание, а пожелание и, возможно, не диссертанту, а тем, кто будет строить более обоснованные расчетные уравнения, используя результаты обсуждаемой работы.
3. Автор многократно упоминает неустойчивость Кельвина-Гельмгольца как причину возникновения волн на поверхности пленки, повторяя давно укоренившееся в этой области заблуждение. Классическая работа Гельмгольца рассматривает возникновение неустойчивости при относительном движении двух идеальных, неограниченно

протяженных в направлении от границы жидкостей. Именно для этого случая получено уравнение для критической скорости; его, кстати, использовал в 1958 г. N. Zuber при создании модели кризиса кипения. То, что фактически имеют в виду, говоря о неустойчивости Кельвина-Гельмгольца применительно к реальным течениям в каналах, к поверхности пленки, в частности, - это всего лишь уравнение Бернулли для струйки жидкости, согласно которому давление жидкости снижается при обтекании выступа (гребня волны).

4. Наконец, мелкая придирка. Диссертация написана хорошим русским языком, число опечаток очень мало, имея в виду огромный объем текста. Но в русском языке нет слова «ривулет». Эта двойная калька с французского, используемая некоторыми коллегами из ИТФ Новосибирска, абсолютно не оправдана. Русское «ручей» не только не уступает в точности, но и позволяет использовать оттенки (ручеек).

Заключение:

Приведенные замечания не изменяют общей положительной оценки работы. Диссертация Черданцева Андрея Викторовича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой экспериментально исследовано взаимодействие турбулентного потока газа с пристенной пленкой жидкости. Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как научное достижение в области исследования гидродинамики сложных режимов двухфазных течений.

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 требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Черданцев Андрей Викторович, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор
кафедры инженерной теплофизики
Московского энергетического института


Ягов Виктор Владимирович

31.01.19.

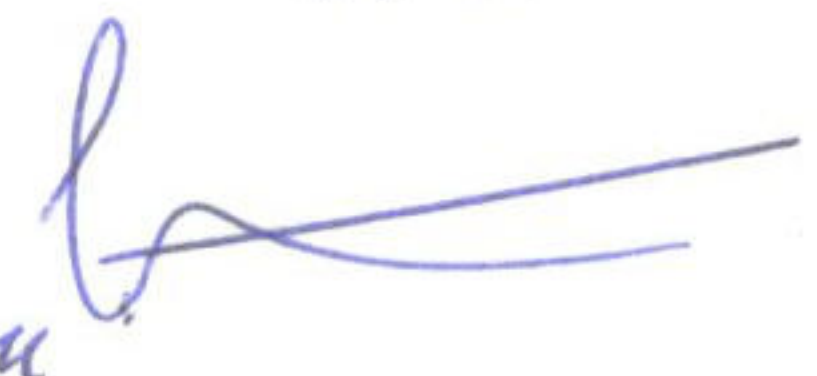
Подпись профессора Ягова В.В. заверяю



НИУ «Московский энергетический институт»
Институт тепловой и атомной энергетики,
Кафедра инженерной теплофизики

111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 17.

Тел.: +7(495)362-75-01, эл. почта: yagovvv@mpei.ru


Кузовлев
И.В.