

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Черданцева Андрея Викторовича
"Волновая структура пленки жидкости и процессы обмена дисперсной фазой в дисперсно-кольцевом газожидкостном течении", представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05-механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа посвящена исследованию волновой гидродинамики пленок жидкости, обдуваемых высокоскоростным турбулентным потоком газа, срыва капель с поверхности пленки и обратного осаждения капель, а также захвату пузырьков воздуха жидкой пленкой. Кольцевой и дисперсно-кольцевой режимы течения газожидкостной смеси характеризуются высокими коэффициентами теплоотдачи и используются во многих задачах энергетики. Такой режим течения встречается в трубопроводах при шельфовой добыче полезных ископаемых, а также в аварийных ситуациях при эксплуатации атомных реакторов. Таким образом, **актуальность** темы диссертации не вызывает сомнений.

Дисперсно-кольцевой режим течения характеризуется повышенной сложностью и многообразием явлений, возникающих при взаимодействии волновой поверхности пленки жидкости с турбулентным потоком газа. Важными вопросами являются гидродинамическая устойчивость межфазной поверхности, нелинейная эволюция волн, процессы генерации и взаимодействия волн существенно различных масштабов. Взаимодействие нелинейных волн высокой амплитуды с газовым потоком приводит к срыву капель с гребней крупных волн и уносу капель газовым потоком. Унос жидкости приводит к значительному утонению пристенной пленки; в случае сильного нагрева стенок канала унос может приводить к формированию сухих пятен и пересыханию стенок, что, в свою очередь, чревато перегревом стенок и разрушением промышленной установки. Зародышами сухих пятен могут служить возмущения остаточной пристенной пленки ударами капель, осаждающихся из газового потока, и пузырьки газа, захваченные пленкой жидкости. В **первой главе** диссертации показано, что экспериментальных исследований, рассматривающих гидродинамику дисперсно-кольцевого течения во всей ее полноте и при этом на высоком уровне детализации, чрезвычайно мало. В подавляющем большинстве экспериментальных работ по этой теме исследования ведутся в рамках интегрального подхода, т.е., посредством измерения интегральных характеристик потока с последующим эмпирическим обобщением результатов. Работы, посвященные исследованию волн на поверхности пленки или капель в ядре потока, как правило, ограничиваются измерением средних характеристик волн или капель, а также не рассматривают взаимосвязи между

каплями и волнами. **Новизна** результатов данной работы обусловлена постановкой задач исследования, принципиально отличающейся от большинства предшествующих работ, а именно, нацеленностью на комплексное исследование волновых процессов и процессов обмена дисперсной фазой, на высоком уровне детализации и с особым вниманием к взаимосвязи между процессами.

Экспериментальное исследование таких процессов сопряжено со значительными техническими сложностями и предъявляет высокие требования к методам измерений. Для решения поставленных задач в работе используется метод лазерно-индуцированной флюоресценции. Во **второй главе** проводится тщательный анализ достоверности измерений толщины пленки жидкости данным методом, включая анализ погрешностей, моделирование искажений, возникающих на участках с крутым наклоном межфазной поверхности, и прямое экспериментальное сравнение данной методики с методом PLIF, выполненное посредством проведения одновременных измерений двумя методами на одном и том же участке течения. Глубокая проработка методических вопросов вкупе с использованием сложных методов обработки данных, описанных в следующих главах, свидетельствует о высокой **достоверности** результатов измерений.

Благодаря использованию полевого метода измерения толщины пленки с высоким разрешением были обнаружены качественно новые явления, возникающие в рассматриваемых условиях эксперимента. Так, например, в **третьей главе** было показано, что при высоких скоростях газа даже тонкие пленки жидкости, с поверхности которых не происходит срыва капель, обладают двухволновой структурой, не наблюдающейся при малых скоростях обдува. Новые ("вторичные") волны возникают благодаря неустойчивости заднего склона "первичных" нелинейных волн, что приводит к повышению площади и шероховатости межфазной поверхности, а процессы испускания и поглощения вторичных волн первичными указывают на значительную сложность переноса жидкости в пленке даже в этом, сравнительно простом, случае. Генерация вторичных волн была воспроизведена в ходе моделирования такого течения. Сравнение с моделированием также показало важность еще одного качественного изменения: подавления капиллярного предвестника нелинейных волн при высоких скоростях обдува, не предсказываемого используемой моделью.

В **четвертой главе** аналогичные подходы были применены к исследованию течений с высокими числами Рейнольдса жидкости, при которых имеет место унос жидкости в дисперсную фазу. Было показано, что все волны ряби, существующие на поверхности пленки, генерируются на задних склонах крупномасштабных волн возмущения. Относительная координата точки, в которой возникла отдельная волна ряби, определяет

дальнейший сценарий развития этой волны: либо медленное движение по остаточному слою, подобно описанным выше "вторичным" волнам, либо быстрое движение по гребню волны возмущения и разрыв на капли газовым потоком. Эксперименты вблизи входа в канал показали, что волны возмущения не развиваются непосредственно из волн максимального роста, как предполагается во многих моделях течения, а формируются в результате множественных слияний этих волн. Помимо обнаружения качественно новых закономерностей, в третьей и четвертой главах проведен большой объем работ по количественному исследованию характеристик волн различных типов в различных условиях, характеристик процессов генерации вторичных волн и волн медленной ряби, а также поперечной неравномерности поверхности пленки.

В пятой главе проводилось исследование динамики дисперсной фазы одновременно с изучением волновых процессов. Было показано, что из примерно десятка представленных в литературе гипотез, описывающих механизм срыва капель с волн возмущения, справедливы лишь два механизма, известные как "bag break-up" и "ligament break-up". Прочие гипотезы являются либо альтернативным описанием тех же процессов, либо следствием использования недостаточно тонких методов измерений. Также было выяснено, какие волновые процессы являются предпосылкой реализации каждого из двух сценариев. Совокупность полученных данных по волновым процессам и процессам отрыва позволила опровергнуть большинство предположений, на которых базируются существующие физические модели уноса. Был обнаружен массовый захват пузырьков пленкой жидкости вследствие ударов капель, осаждающихся из газового потока. Показано, что такой механизм захвата является новым и реализуется при малых углах удара; это условие чаще всего выполняется на поверхности остаточного слоя между волнами возмущения. В дальнейшем пузырьки захватываются и аккумулируются волнами возмущения. Также по данным о скорости пузырьков и толщине окружающего их слоя жидкости сделаны оценки поля скорости в волне возмущения и показано существование зоны повышенного трения под задним склоном такой волны.

По результатам каждой главы сделаны обобщающие разделы, подчеркивающие наиболее важные и новые результаты, а также сформулированы общие выводы по диссертации. **Обоснованность** выводов диссертации не вызывает сомнения: во всех случаях выводы прямо подтверждаются экспериментальными результатами, представленными в форме фрагментов пространственно-временных полей толщины пленки, а также графиков и таблиц. Полученные результаты по исследованию различных аспектов течения находятся в согласии друг с другом, формируя цельную и непротиворечивую картину.

По содержанию диссертации можно высказать следующие **замечания**:

1. Работа существенно выиграла бы, если по тексту диссертации добавить схемы, иллюстрирующие рассматриваемые процессы и механизмы (например, механизмы срыва капель с поверхности пленки; процесс генерации волн быстрой и медленной ряби на задних склонах волн возмущения в режимах с уносом жидкости в дисперсную фазу; новый сценарий захвата пузырьков при наклонных ударах быстрых капель с формированием борозды на поверхности пленки и др.).
2. Формирование и эволюция рассматриваемых волн происходит вследствие взаимодействия пленки жидкости с относительно высокоскоростным потоком воздуха. Однако, в диссертации не уделено должного внимания измерению характеристик турбулентного потока воздуха (профили осредненных скоростей, профили пульсационных скоростей и т.п.).
3. Хорошо бы привести характерные значения частот турбулентных пульсаций скорости воздуха для условий экспериментов (скорость газа, диаметр канала) и провести их сравнение с измеренными частотами рассматриваемых волн (начальные волны, волны возмущения, волны быстрой ряби).
4. Одним из двух (помимо инерционности) ключевых параметров, характеризующих двухфазные (дисперсные) потоки, является концентрация дисперсной фазы (капель, пузырей). Именно она определяет наличие и интенсивность межфазных взаимодействий. Полезно было бы привести характерные значения концентрации (массовой, объемной, счетной) хотя бы на выборочных режимах в некоторых локальных областях.
5. Изменяются ли основные положения (выводы) диссертации, если геометрия (диаметр труб) экспериментальных установок №1 и №2 увеличится в несколько раз?
6. В работе сделан акцент на изучении особенностей волнового пленочного течения, однако формирующиеся волны относительно большой геометрии могут оказывать значительное обратное влияние и на параметры высокоскоростного потока газа. Этому факту полезно было уделить внимание.
7. В работе незаслуженно мало внимания уделено динамике капель в ядре газового потока, а также динамике пузырей внутри волн возмущения. Простые оценки особенностей движения капель (пузырей) с привлечением известных безразмерных критериев украсили бы имеющиеся уникальные экспериментальные данные.
8. Хорошо бы сделать несколько больший акцент на оценке (анализе) возможности существования в потоке капель небольших размеров (менее 50 мкм) учитывая то, что диагностика таких капель осложнена вследствие ограниченного пространственного разрешения.

Приведенные замечания носят характер рекомендаций и не снижают общую высокую оценку работы. Диссертация Черданцева Андрея Викторовича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой экспериментально исследованы фундаментальные явления, определяющие гидродинамику дисперсно-кольцевого течения. Проведенный автором анализ результатов способствует углублению понимания физики сложного взаимодействия пленок жидкости с турбулентным потоком газа, убедительно опровергает ряд используемых в моделях упрощающих предположений и закладывает базу для развития новых, физически обоснованных теоретических моделей, что можно квалифицировать как научное достижение в области исследования многофазных течений. Все основные результаты работы опубликованы, преимущественно в журналах из перечня ВАК, а также в трудах международных конференций. Автореферат диссертации адекватно отражает содержание и основные выводы работы.

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 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Черданцев Андрей Викторович, безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент

Заведующий отделом 2.2.4 ОИВТ РАН,
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.

А.Ю. Вараксин

Сведения о составителе отзыва:

Вараксин Алексей Юрьевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН; почтовый адрес: 111558, Москва, Федеративный пр-т, д.38, к.1, кв.61; адрес электронной почты: varaksin_a@mail.ru; наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН); должность: заведующий отделом.

Подпись А.Ю. Вараксина заверяю

Ученый секретарь ОИВТ РАН,
д.ф.-м.н.



Р.Х. Амиров

Адрес организации: 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13 стр.2, тел.: +7(495)4858345