

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Пермский федеральный
исследовательский центр
Уральского отделения
Российской академии наук
(ПФИЦ УрО РАН)
филиал

**Институт механики сплошных сред
Уральского отделения
Российской академии наук
(ИМСС УрО РАН)**

614013, г. Пермь, ул. Ак.
Королёва, 1
тел. (342) 237-84-61, факс (342)
237-84-87
e-mail: mvp@icmm.ru, <http://www.icmm.ru>
ОКПО 15727771, ОГРН
1025900517378
ИНН 5902292103, КПП 590201001

№ 17400/23-м104
05.06.2018г.

на № _____
от _____

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор «Института механики
сплошных сред Уральского отделения
Российской академии наук» -
филиала Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Пермского
федерального исследовательского
центра Уральского отделения
Российской академии наук
(«ИМСС УрО РАН»)
академик РАН

В.П. Матвеев /В.П. Матвеев/
"05" 06 2018 г.

О Т З Ы В

Ведущей организации «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения наук (ранее Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук) о диссертационной работе **Харламова Сергея Михайловича** «Экспериментальное исследование эволюции волн на поверхности стекающих пленок жидкости», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

1. Актуальность темы исследований. Интерес к пленочным течениям жидкости обусловлен как фундаментальной, так и прикладной значимостью этих течений. Актуальность исследования пленочных течений с прикладной точки зрения связана с тем, что они реализуются в различных технологических процессах и присутствуют в технологических установках различного назначения. При этом волновая структура пленочного течения оказывает существенное или определяющее влияние на режимы

работы технологических установок. Кроме того, волны, образующиеся при течении жидких пленок, являются классическим объектом для изучения нелинейных эффектов, дисперсии, накачки и диссипации энергии, что делает этот вид течений привлекательным для теоретических исследований, результаты которых могут быть применены для развития теории нелинейных волновых явлений в других физических системах.

Волновые процессы при пленочных течениях жидкости активно исследуются на протяжении нескольких последних десятилетий. Поскольку моделирование пленочных течений в полной постановке, в рамках уравнений Навье-Стокса с заданием граничных условий на свободной поверхности волновых пленок является сложной задачей, требующей больших вычислительных ресурсов, для теоретического исследования волновых режимов течения в основном используются упрощенные системы уравнений пониженной размерности или эмпирические модели, основанные на статистическом анализе экспериментальных данных. Теория двумерных волновых режимов пленочного течения жидкости под действием силы тяжести разработана к настоящему времени достаточно полно. В то же время, трехмерные волновые режимы гравитационного пленочного течения и волновые режимы течения пленок, обдуваемых газовым потоком, исследованы в гораздо меньшей степени, что отчасти связано с отсутствием в литературе достаточного количества экспериментальных данных, необходимых для верификации развиваемых применительно к таким режимам теоретических моделей. Получению таких данных посвящена диссертационная работа Харламова Сергея Михайловича, что является **актуальной** задачей.

2. Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 119 страницах, содержит 68 иллюстраций и 1 таблицу. Библиографический список включает 181 наименование и приведен на 13 страницах.

Во **введении** показана актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов и описан личный вклад автора работы.

В **первой главе** приведен обзор литературы и описано современное состояние исследований, посвященных волновым режимам пленочного течения жидкости. Основное внимание уделено обзору результатов, полученных для пленок, либо

свободно стекающих под действием силы тяжести, либо образующихся при дисперсно-кольцевом режиме газожидкостного течения. Кроме того, в этой главе приведен достаточно подробный обзор как традиционных, так и новых методов диагностики пленочных течений с акцентом на методах, позволяющих измерять волновые характеристики пленочного течения. В заключении к первой главе на основании проведенного анализа литературы сформулированы цель и задачи исследования.

Во **второй главе** приведено описание экспериментальных установок и измерительных методик, использованных в работе, обсуждены погрешности измерений методов. Особое внимание уделено принципам построения системы для проведения полевых измерений локальной толщины пленок жидкости методом лазерно-индуцированной флуоресцентной (ЛИФ). Описаны принципы калибровки системы ЛИФ, рассмотрены оптические искажения применительно к исследуемым в работе трехмерным волнам на поверхности вертикально стекающей пленки жидкости.

В **третьей главе** представлены результаты экспериментального исследования начальной эволюции гармонических волн на поверхности пленки жидкости при кольцевом режиме газожидкостного течения. Основной целью этих экспериментов являлось получение дисперсионных характеристик для волн, начальная эволюция которых происходит по линейному сценарию. Полученные результаты приведены в виде зависимостей фазовой скорости и пространственного инкремента амплитуды от волнового числа для разных параметров течения. В конце главы рассмотрены особенности проведения экспериментов, которые могут приводить к отклонению экспериментально полученных в работе дисперсионных зависимостей фазовой скорости и инкремента от волнового числа от случая плоскопараллельного течения.

В **четвертой главе** представлены результаты экспериментального исследования эволюции локализованных трехмерных возмущений на вертикально стекающих пленках жидкости. Особое внимание в этих экспериментах уделялось поиску стационарных волн. Повышенный интерес к таким волнам связан с тем, что для них упрощается сопоставление теории и эксперимента. Для случая стационарных волн отсутствует необходимость в точном соответствии начальных условий для теоретической и экспериментальной задач, достаточно, чтобы эволюция начального трехмерного возмущения приводила к образованию стационарной волны. Полученные результаты приведены в виде графиков, показывающих эволюцию формы начальных

возмущений вниз по течению вдоль выделенных вертикальных профилей. Для зарегистрированных стационарных волн приведена также их трехмерная форма.

3. Научная новизна диссертационной работы:

Впервые экспериментально определены дисперсионные зависимости фазовой скорости и инкремента амплитуды для развивающихся регулярных двумерных волн малой амплитуды на вертикальной пленке жидкости при наличии турбулентного газового потока.

Разработана система диагностики пленочных течений методом ЛИФ, позволяющая определять скорость и мгновенную форму трехмерных волн на поверхности стекающих по пластине пленок жидкости.

Впервые экспериментально исследованы закономерности эволюции локализованных трехмерных возмущений на поверхности вертикально стекающих пленок жидкости. Впервые экспериментально показано существование уединенных стационарных трехмерных волн и измерены их характеристики.

4. Научная и практическая значимость диссертационной работы.

Результаты экспериментов по исследованию волновых характеристик на поверхности пленок, обдуваемых газом или свободно стекающих по вертикальной поверхности, получены в детерминистской постановке и позволяют проводить прямое сравнение результатов эксперимента и теоретического анализа. Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для апробации теоретических моделей, разрабатываемых для описания гидродинамики пленочных течений.

Методы измерений, разработанные и адаптированные автором для исследования пленочных течений жидкости, позволяют исследовать структуру трехмерных волн на поверхности пленок жидкости с высоким пространственным разрешением и могут применяться для исследования течения тонких слоев жидкости в различных конфигурациях.

5. Достоверность полученных результатов обеспечивается: проведением специальных тестовых и калибровочных экспериментов; использованием методов измерений, отработанных на близких к исследуемым объектах; оценкой погрешностей измерений; воспроизводимостью результатов экспериментов; сопоставлением, когда это возможно, полученных результатов с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов.

6. Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы в достаточной мере опубликованы в научной литературе, в том числе, в 5 рецензируемых статьях в журналах, входящих в список ВАК, а также в трудах 10 конференций, на которых они представлялись.

7. Диссертация и реферат написаны понятным научным языком. Содержание диссертации достаточно полно раскрывает постановку, методы решения поставленных задач и полученные результаты. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

8. Рекомендации по использованию результатов диссертации.

Полученные результаты могут быть использованы в российских научных и образовательных учреждениях, занимающихся проблемами течений с межфазными границами раздела (Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, НИИ механики МГУ им. Ломоносова и др.)

9. Замечания по содержанию и оформлению работы.

1. Часть полученных результатов представлена в размерном, а часть в безразмерном виде. В частности, зависимости скорости и амплитуды стационарных волн от числа Рейнольдса лучше было бы привести в безразмерном виде.

2. Анализ оптических искажений метода ЛИФ выполнен в двумерной постановке. Рассмотрение трехмерного случая позволило бы точнее определить область применимости метода.

3. В диссертации отсутствует ссылка на подробный обзор ранних работ по исследованию пленочных течений (Fulford G. D. "The flow of liquids in thin films." *Advances in Chemical Engineering*. Vol. 5. Academic Press, 1964. P. 151-236.).

4. Как влияет на результаты тип поверхности, ее шероховатость?

Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы С. М. Харламова. Недостатков, ставящих под сомнение достоверность полученных результатов, не обнаружено.

10. Заключение по диссертации. На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа Харламова Сергея Михайловича «Экспериментальное исследование эволюции волн на поверхности стекающих пленок жидкости» является

законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне, и соответствует специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Результаты, полученные в диссертации, достоверны и вносят существенный вклад в понимание процессов волновой эволюции при течениях со свободной поверхностью. Рецензируемая диссертационная работа отвечает всем требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор – Харламов Сергей Михайлович – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Диссертация Харламова Сергея Михайловича заслушана и обсуждена на семинаре ИМСС УрО РАН протокол №6/18 от 18 апреля 2018 года.

Отзыв составлен:

Зав. Лабораторией вычислительной
гидродинамики «ИМСС УрО РАН»,
д.ф.-м.н. по специальности 01.02.05.
+7 (342) 237 83 31, e-mail: lubimova@icmm.ru

Любимова

Любимова Татьяна Петровна

