

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

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».

Диссертационная работа Харламова С.М. посвящена экспериментальному исследованию волновых процессов в пленочных течениях жидкости. Пленочные течения жидкости широко используются в различных технологических установках в связи с наличием развитой свободной поверхности, интенсифицирующей процессы тепломассообмена. Присутствие на свободной поверхности системы волн приводит к увеличению тепломассообмена, а при наличии газового потока над пленочным течением – к изменению коэффициента межфазного трения, срыву капель с вершин волн и т.д. Исследование формирования волн в пленочных течениях требует решения сложной нестационарной нелинейной задачи с учетом эффектов дисперсии, накачки и диссипации энергии. Задача дополнительно осложняется трехмерным нерегулярным характером волновой картины при росте числа Рейнольдса пленочного течения, что требует введения статистических характеристик потока. В этой связи одним из плодотворных подходов является исследование базовых элементов волновой картины с помощью построения иерархии упрощенных математических моделей, допускающих сравнение с экспериментом в контролируемых условиях. В свою очередь, экспериментальное исследование волновых процессов в жидких пленках требует развития сложных оптических методов полевого типа, позволяющих надежно регистрировать эволюцию трехмерных волновых картин с высоким пространственным и временным разрешением. **Актуальностью** пленочных течений жидкости в приложениях и сложностью их теоретического и экспериментального изучения обусловлено проведение диссертационного исследования Харламова С.М.

### **Оценка содержания диссертации.**

Рецензируемая диссертационная работа характеризуется полнотой и завершенностью. Текст диссертации 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. Во введении обоснована актуальность исследуемой темы, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость работы, а также основные положения, выносимые на защиту, описан личный вклад автора, приведены сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

**Первая глава** диссертации посвящена обзору литературы по проблеме исследования пленочных течений жидкости. В связи с обширностью литературы по данному вопросу обзор структурирован в виде трех разделов. В первом разделе изложена история развития экспериментальных и теоретических исследований плоских и пространственных волновых полей в стекающих пленках жидкости, описаны основные теоретические подходы. Во втором разделе рассмотрена литература по волновым режимам в случае дисперсно-кольцевого течения при наличии спутного или встречного потока газовой фазы. В третьем разделе приведено детальное описание и анализу существующих экспериментальных методов исследования волновых полей в жидких пленках, причем особое внимание уделено наиболее современным полевым оптическим методам различных типов.

**Вторая глава** диссертации приведено описание экспериментальных установок и измерительных методик, использованных в работе. Подробно описан гидродинамический контур установки, обеспечивающий стабильную циркуляцию жидкости в системе и контролируемые условия на входе при формировании пленки. Приведено описание конструкции установки для исследования дисперсно-кольцевого течения при наличии спутного либо встречного потока газа. Детально описана конструкция установки для исследования эволюции трехмерных волновых возмущений, в т.ч. ее ключевых частей в виде источника локализованных трехмерных возмущений и рабочих участков. Автором подробно описан модифицированный теневой метод измерения локальной толщины пленки, метод, использующий датчики проводимости и метод индуцированной лазером флуоресценции (ЛИФ). Подробно рассмотрены вопросы калибровки, влияния оптических искажений на результаты, полученные с помощью метода ЛИФ. Глава завершается детальным анализом точности контроля входных параметров и погрешностей измерений всех ключевых величин.

**Третья глава** посвящена описанию результатов экспериментального исследования начальной эволюции волн на поверхности пленки жидкости при кольцевом режиме газожидкостного течения. Основной целью экспериментов являлось получение дисперсионных характеристик для волн, развитие которых происходит по линейному сценарию развития. Измерения проводились на начальном участке с помощью датчиков проводимости. Вносимое в систему возмущение имело гармонический характер. Определялись пространственный инкремент амплитуды волн и фазовая скорость волн в свободно стекающей пленки и при наличии спутного либо встречного потока газа. Показано, что при любом направлении потока имеется область частот, в которой наличие течения газа приводит к росту инкремента. Обнаружено, что встречное течение газа влияет на характеристики волн сильнее, чем спутное. В частности, фазовая скорость волн весьма чувствительна к скорости встречного потока газа, влияние спутного потока газа выражено существенно слабее. Выполнено сравнение экспериментальных данных с расчетами. Проведено исследование влияния радиуса канала на дисперсионные характеристики, установлено, что в изученном диапазоне параметров это влияние является слабым. Получены дисперсионные характеристики в зоне стабилизации течения. Выполнен анализ влияния флуктуаций средней толщины пленки на параметры возбужденных волн. Сделаны выводы о влиянии флуктуаций в случае свободной и обдуваемой пленки. В частности, для случая спутного течения показано, что высокий уровень неконтролируемых флуктуаций может качественно объяснить сильное занижение измеренных значений инкремента по сравнению с расчетом в области коротких волн.

**Четвертая глава** посвящена описанию результатов экспериментального исследования эволюции локализованных трехмерных возмущений на вертикально стекающих пленках жидкости. Возбуждение волн происходило с помощью локализованного источника на начальном участке течения, для которого пленку можно считать гладкой, а фоновые возмущения – пренебрежимо малыми. Особое внимание уделено поиску стационарных волн, возникающих в процессе эволюции начального возмущения. Для измерения локальной толщины пленки при умеренных числах Рейнольдса (несколько десятков) использовалась двухканальная система с датчиками проводимости с вынесенными в поток электродами и двухканальная система измерений модифицированным теневым методом. При этом для волн, близких по параметрам к стационарным, возможен пересчет временных картин в пространственные. Показано, что переход к пространственной уединенной волне можно организовать при различных уровнях возбуждения как «сверху» так и «снизу». При малых числах Рейнольдса для

измерения пространственных полей волн использовался метод ЛИФ. Показано существование двух характерных сценариев развития волновой картины при внесении локализованного возмущения. Для  $Re > 2,5$  при малых энергиях возбуждения происходит быстрый рост амплитуды начального импульса с одновременной генерацией волнового пакета, а при больших энергиях возбуждения волна развивается в виде уединенной подковообразной волны. Для  $Re \leq 2,5$  при малых энергиях возбуждения начальный импульс медленно эволюционирует в виде уединенной подковообразной волны, а при больших энергиях возбуждения происходит быстрый развал начального возмущения на группу сложно взаимодействующих волн. Показано существование стационарных одnogорбых подковообразных волн, качественно близких к теоретически предсказанным, причем амплитуды и скорости распространения волн близки к теоретически предсказанным. Было также показано, что в узкой области параметров при специальном подборе начального возмущения можно зарегистрировать двугорбые стационарные волны.

**В заключении** диссертации сформулированы основные результаты исследований.

Следует отметить полученные в диссертации **основные результаты**:

- С использованием локальных датчиков электропроводности исследована эволюция возбужденных двумерных волн малой амплитуды на поверхности пленки жидкости стекающей по внутренней поверхности вертикальной трубы в присутствии спутного или противоточного газового потока. Экспериментально измерены характеристики волн, развивающихся по линейному сценарию. Полученные данные представлены в виде дисперсионных зависимостей пространственных инкрементов и фазовых скоростей от волнового числа. Показано, что пространственные инкременты волн, попадающих в окрестности волн максимального роста, возрастают при наличии газового потока над пленкой по сравнению со случаем свободно стекающих пленок. Фазовая скорость волн чувствительна к скорости противоточного течения газа и быстро уменьшается с ее увеличением. В случае спутного течения фазовая скорость волн слабо чувствительна к скорости газа. Показано, что область волновых чисел, для которых течение неустойчиво, сужается по сравнению со случаем течения под действием гравитации при наличии противотока газа и расширяется при наличии спутного газового потока.
- Разработана система диагностики пленочных течений методом ЛИФ, позволяющая определять скорость и мгновенную форму трехмерных волн на поверхности стекающих по пластине пленок жидкости. Проанализированы основные источники погрешностей метода, включая оптические искажения, возникающие из-за волнистости свободной поверхности пленки. Показана возможность применения метода ЛИФ для исследования эволюции локализованных трехмерных возмущений.
- В широком диапазоне чисел Рейнольдса пленочного течения  $1,5 < Re < 100$  проведено экспериментальное исследование эволюции локализованного трехмерного возмущения на вертикально стекающих пленках жидкости. Выявлено два основных сценария эволюции – развитие волнового пакета и формирование уединенной трехмерной волны подковообразной формы. Показано, что при числах Рейнольдса пленочного течения от нескольких единиц до 70 – 80 для образования уединенной волны необходимо начальное возмущение, обладающее энергией, превышающей некоторое пороговое значение. При низких энергиях локализованного возмущения происходит формирование волнового пакета.
- В области малых чисел Рейнольдса  $Re < 5$  впервые зарегистрированы уединенные стационарные трехмерные волны и измерены их характеристики. Отличительной

особенностью таких волн является подковообразная форма основного гребня, между боковыми сторонами которого имеется узкая впадина с пониженной толщиной пленки. Показано хорошее соответствие между измеренными и теоретически предсказанными характеристиками уединенных стационарных волн.

Все результаты были получены впервые и не имеют аналогов в других работах.

**Научная и практическая значимость работы** заключается в разработке и усовершенствовании локальных и полевых методов измерения толщины жидкой пленки, которые могут быть использованы в широком круге смежных задач. Результаты экспериментов получены в строгой постановке, позволившей исследовать применимость существующих полных и редуцированных моделей волновых процессов на поверхности пленочных течений жидкости.

**Достоверность результатов** обосновывается тщательной разработкой методик проведения экспериментов, проведением тестовых опытов и калибровок, подтверждается сравнением полученных результатов с известными данными других теоретических и экспериментальных работ, тщательным анализом погрешностей измерений.

**По содержанию диссертационной работы имеется несколько замечаний:**

1. На рис. 4.8 и 4.12 пространственные картины волн приведены в виде уровней серого цвета. При оформлении рисунков было бы желательно использовать цветовую шкалу, которая позволяет однозначно связать цветовую кодировку с уровнем серого, в противном случае и красным и синим зонам в исходной цветной иллюстрации соответствуют темные зоны при переходе к монохромному изображению.
2. На странице 97 диссертации сформулирован экспериментальный критерий стационарности волны: «Волна считалась стационарной, если все указанные характеристики оставались для нее постоянными в нижней части безволновой зоны пленочного течения на протяжении не менее трех характерных продольных размеров». Чем обусловлен выбор именно такого критерия? Существуют ли другие критерии?
3. На рис. 4.22 приведена картина стационарной двугорбой волны. В этом контексте можно было бы провести некоторые аналогии с экзотическими формами уединенных волн в смежных задачах, например, в стратифицированной жидкости.

### **Заключение**

Диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу в области экспериментального исследования волновых процессов в пленочных течениях жидкости.

Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. Текст диссертации хорошо отредактирован и практически не содержит опечаток и технических ошибок оформления. **Автореферат** достаточно полно отражает содержание диссертации.

**Основные результаты** исследований опубликованы в 15 работах, включая 5 статей в журналах из списка ВАК. Работа прошла апробацию на многочисленных конференциях российского и международного уровня и соответствует специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа «Экспериментальное исследование эволюции волн на поверхности стекающих пленок жидкости» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Харламов Сергей Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Я, Ерманюк Евгений Валерьевич, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой Харламова С.В.

Официальный оппонент, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией «Экспериментальной прикладной гидродинамики», заместитель директора ИГиЛ СО РАН по научной работе

05.06.2018

 Е. В. Ерманюк

Подпись д.ф.-м.н., заведующего лабораторией «Экспериментальной прикладной гидродинамики», заместителя директора ИГиЛ СО РАН по научной работе заверяю

Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН, к.ф.-м.н.  И. В. Любашевская

Ерманюк Евгений Валерьевич  
доктор физико-математических наук  
специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы,  
заведующий лабораторией «Экспериментальной прикладной гидродинамики»,  
заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения  
Российской академии наук, <http://www.hydro.nsc.ru/>

Почтовый адрес: 630090, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, д. 15

Телефон: +7 (383) 333 18 99;

Электронная почта: [ermanyuk@hydro.nsc.ru](mailto:ermanyuk@hydro.nsc.ru)