

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Ерманюка Евгения Валерьевича
на диссертацию Гузанова Владимира Владимировича «Экспериментальное исследование трёхмерных волн на вертикально стекающих плёнках жидкости», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность диссертационной работы

Интерес к изучению плёночных течений жидкости связан, в первую очередь, с использованием плёнок в различных технологических процессах в промышленных установках. Также исследование динамики волнового течения плёнки жидкости представляет исключительно научный интерес, поскольку плёнки представляют собой открытую систему, в которой проявляются различные неустойчивости, процессы диссипации и накачки энергии. Как известно, интенсивность процессов тепло- и массопереноса находится в прямой связи с волновой картиной на поверхности плёнки. Поэтому для понимания механизмов процессов переноса необходимо исследовать волновую структуру течений. При этом ввиду сложности и разнообразия процессов, происходящих в плёнке, изучение волн в плёночных течениях является отдельной важной задачей.

Двумерное волновое движение на поверхности плёнки к настоящему времени достаточно хорошо изучено, а результаты многолетних исследований обобщены в ряде монографий. Однако, в большинстве случаев, в реальных течениях невозможно использовать двумерный подход из-за трёхмерности возникающих на поверхности плёнки структур. Необходимость учёта трёхмерных эффектов осложняет как моделирование, так и проведение экспериментальных исследований. Для получения качественных экспериментальных данных необходимо использовать современные невозмущающие полевые методы диагностики, среди которых наиболее перспективным является метод лазерно-индуцированной флуоресценции.

Моделирование трёхмерных режимов плёночного течения с использованием полной системы уравнений Навье-Стокса остаётся крайне трудоёмкой задачей, поэтому в основном для моделирования используются упрощённые модели. Получаемые в моделировании данные о волнах на поверхности плёнок качественно схожи с экспериментальными наблюдениями, однако такие данные нуждаются в количественной проверке. Прямое сравнение результатов моделирования с экспериментом во многих случаях затруднено из-за зависимости течения от начальных условий и хаотичности процессов эволюции волн. Существенный прогресс в сопоставлении данных, полученных в моделировании и экспериментально, связан с регистрацией в экспериментах при малых числах Рейнольдса стационарных уединённых волн. Однако, существующие экспериментальные данные по характеристикам уединённых стационарных подковообразных волн носят отрывочный характер. Также для ряда режимов наблюдаются несоответствие результатов моделирования и экспериментальных наблюдений касательно формы волн. Таким образом, получение экспериментальных данных о трёхмерных волнах в широком диапазоне режимных параметров является актуальной задачей в области механики жидкости, направленной на определение области применимости существующих моделей и на устранение пробелов в экспериментальных наблюдениях.

Общая характеристика диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Работа представлена на 97 страницах, содержит 1 таблицу и 42 рисунка. Список литературы состоит из 104 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, определена цель и поставлены задачи исследования, представлены положения выносимые на защиту, сформулирована новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе диссертации, состоящей из двух разделов и заключения, приведен обзор экспериментальных и численных работ по исследованию гравитационно стекающих плёнок жидкости как в изотермическом, так и в неизотермическом случаях, а также обзор методов исследования плёночных течений. На основе анализа литературных данных обоснованы цели и задачи исследования, а также показана необходимость использования полевых методов измерений.

Вторая глава посвящена описанию методик исследований, экспериментальных установок и рабочих растворов. Достаточно подробно описаны принципы на которых базируется метод лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ), включая обоснование и описание проведения калибровочных измерений и процедуры восстановления мгновенных полей толщины из исходных изображений. Приведено подробное описание различных вариантов реализации системы для проведения ЛИФ измерений с использованием различного набора оборудования. Показана возможность применения метода ЛИФ для измерения толщины плёнок в неизотермическом случае. Описаны результаты проведения тестовых экспериментов. Также в данной главе проанализированы источники и величина погрешностей измерений.

В третьей главе, состоящей из двух частей и заключения, представлены результаты экспериментального исследования эволюции возбужденных уединённых трёхмерных волн на поверхности вертикально стекающей плёнки жидкости (в первой части) на участке безволновой плёнки, а также результаты экспериментального исследования взаимодействия такой трёхмерной волны с возбужденными регулярными двумерными волнами (во второй части). Показано существование двух сценариев эволюции начального возмущения: формирование цуга волн и эволюция в виде уединённой волны, которые также наблюдаются при моделировании с использованием модели Капицы-Шкадова. Использование метода ЛИФ позволило экспериментально зарегистрировать стационарные уединённые трёхмерные волны в широком диапазоне чисел Рейнольдса ($2 < Re < 40$) для жидкостей с различными физическими свойствами. Показано, что характеристики экспериментально зарегистрированных уединённых трёхмерных волн хорошо согласуются с результатами расчетов по модели Капицы-Шкадова вплоть до значений модифицированного числа Рейнольдса $\delta \approx 0,06$. Отклонение измеренных характеристик волн (с расслоением в зависимости от свойств жидкости) от теоретических наблюдается при превышении данного значения. При этом качественное сходство с теорией сохраняется. Во второй части главы показано, что в зависимости от частоты возбуждения двумерных волн эволюция трёхмерной волны, имеющей более высокую, чем двумерные, скорость, может идти по двум характерным сценариям: затухание трёхмерной волны (при низкой частоте двумерных волн) и устойчивое распространение (при высокой частоте) с сохранением волной характерной подковообразной формы. Для последнего случая зарегистрированы режимы взаимодействия, названные, стабильными, при которых характеристики трёхмерной волны повторяются в одинаковых фазах взаимодействия с двумерными при каждом последующем акте взаимодействия. Средние значения амплитуды трёхмерных волн в стабильных режимах взаимодействия хорошо обобщаются в безразмерных координатах (предложенных для описания стационарных уединённых трёхмерных волн) и располагаются существенно ниже амплитуд стационарных уединённых трёхмерных волн.

Четвертая глава посвящена экспериментальному изучению особенностей процессов перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению на поверхности вертикально стекающих плёнок жидкости как в начальной области течения (первая часть главы), так и при больших расстояниях (до 140 см) от распределителя (вторая часть главы). В первой части главы представлены результаты экспериментального исследования режимов перехода от регулярного двумерного к трёхмерному волновому режиму течения, как в случае естественной эволюции, так и в случае искусственного разрушения двумерных волн регулярной гребенкой из игл. Показано наличие существенного перераспределения жидкости в поперечном направлении, связанное с формированием трёхмерных волн из двумерных. Формирующиеся в результате разрушения двумерных волн трёхмерные волны имеют заполненный задний склон в отличие от подковообразных волн,

зарегистрированных в 3 главе, задний склон которых можно назвать «пустым». Исследование волновой картины на больших расстояниях (до 140 см) от распределителя во второй части главы позволило автору обобщить основные закономерности волновой эволюции при переходе от двумерного к трёхмерному волновому движению в диапазоне $5 < Re < 100$, в случае естественного разрушения двумерных волн. Для исследований использовался модифицированный метод теневой фотографии, описанный в главе 2, который позволил регистрировать на одном изображении светотеневую картину от элементов течения с большой (капиллярный предвестник) и малой кривизной свободной поверхности. Выделено три сценария эволюции. Первый сценарий, наблюдаемый при малых $Re < Re_1$, характеризуется отсутствием 2D-3D перехода. Второй сценарий (в интервале $Re_1 < Re < Re_2$) характеризуется формированием хорошо различимых струй. Волновая картина течения в этом случае зависит от начальных условий. При превышении порогового значения $Re > Re_2$ наблюдается третий сценарий эволюции, характеризующийся быстрым формированием трёхмерных волн после непродолжительной эволюции в верхней части течения. В этом случае струи становятся менее выраженными, а волновая картина в нижней части течения практически не чувствительна к начальным условиям.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам диссертационной работы.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Выдвинутые на защиту научные положения и выводы подтверждены и обоснованы в полной мере на основе логического анализа полученных результатов, сопоставления с имеющимися в литературе данными и высокой повторяемостью экспериментальных результатов.

Научная и практическая значимость полученных результатов состоит в полученных новых фундаментальных знаниях об эволюции трёхмерных уединённых подковообразных волн и их взаимодействии с регулярными двумерными волнами при различных условиях течения, а также в новых данных о формировании струй в процессе перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению и их связи с формируемыми трёхмерными волнами. Полученные экспериментальные данные о характеристиках стационарных уединённых волн позволяют делать выводы о применимости соответствующих теоретических моделей к описанию такого типа волн. Измеренная форма трёхмерных волн, возникающих в процессе разрушения двумерной волны, свидетельствует о ранее неправильной интерпретации формы подобного рода волн по теневым фотографиям. Формирование струй при переходе от двумерного к трёхмерному волновому движению должно учитываться при проектировании и планировании рабочих режимов тепло- и массообменных устройств, а также может являться критерием оценки применимости теоретических моделей к описанию волнового движения в определённой области режимных параметров плёночного течения.

Достоверность и научная новизна полученных результатов.

Достоверность полученных автором диссертации результатов и, соответственно, положений выносимых на защиту обеспечивается применением современных оптических полевых методов диагностики течений, их глубокой проработкой (проведение тестовых и калибровочных экспериментов с анализом погрешностей) и адаптацией под конкретные условия экспериментов, высокой степенью воспроизводимости волновой картины при одинаковых условиях возмущающего воздействия, а также сравнением с представленными в литературе данными. В качестве новизны следует отметить следующее: регистрация и измерение характеристик стационарных трёхмерных волн в широком диапазоне режимных параметров для различных жидкостей, экспериментальное исследование взаимодействия одиночной трёхмерной волны с возбужденными двумерными волнами и регистрация

стабильных режимов взаимодействия, экспериментальная регистрация формы волн при переходе от двумерного к трёхмерному волновому движению, регистрация формирования струй в процессе такого перехода, выделение трёх характерных сценариев эволюции, связанных с переходом от двумерного к трёхмерному волновому движению.

Замечания по диссертации

1. Во введении для полноты обзора можно было бы упомянуть о литературе работах по турбулентности капиллярно-гравитационных волн в горизонтальном слое жидкости при отсутствии среднего течения (см., напр., обзор Falcon E, Mordant N. «Experiments in Surface Gravity–Capillary Wave Turbulence» *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2022. V. 54, 1-25, <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-021021-102043>). В этих работах развит ряд интересных экспериментальных методов регистрации волновых полей.
2. На стр. 11 имеется фраза «При превышении $Re > Re^{(4)}$ наблюдается переход к обычной турбулентности». Был бы уместен комментарий, какую турбулентность можно считать обычной.
3. Обозначения осей на графиках с формой волн в главе 3 отличаются от общепринятых обозначений (которые используются в главе 4). При этом направление оси x (вдоль течения) в рамках одной главы 3 на разных рисунках направлена то в одну то в другую сторону, что затрудняет восприятие и анализ информации. Следует придерживаться однообразия в оформлении рисунков.
4. В главе 4 показано, что форма волн при распаде двумерной волны имеет заполненный задний склон и отличается от формы волн, зарегистрированных в главе 3. Остаётся непонятно, насколько подковообразные волны из главы 3 имеют отношение к волнам, наблюдаемым в реальных трёхмерных волновых режимах.
5. В тексте местами отсутствуют знаки препинания и присутствуют опечатки, в большинстве случаев, не мешающие восприятию текста, однако, к написанию заключительных разделов следует относиться более скрупулезно. Например, в выводах по главе 3 на стр. 69 в предложении «Причем основные закономерности ... согласуется...» должно быть «... согласуются...». Также в выводах по главе 4 на стр. 81 «Образующиеся в процессе перехода трёхмерные волны отличается...» должно быть «...отличаются...»
6. В каждом разделе приведены диапазоны значений числа Рейнольдса плёночного течения, в которых производилось исследование, также указано с какими рабочими жидкостями проводились эксперименты. Но остается непонятно, для всех ли жидкостей проводились эксперименты в указанном диапазоне или нет? Следовало бы привести исследованный диапазон для каждой жидкости.

Сделанные замечания не снижают значимость для науки и практики полученных в диссертации В.В. Гузанова результатов, положений и выводов.

Заключение

Диссертация В.В. Гузанова является законченной научно-квалификационной работой, выполненной самостоятельно, содержит результаты экспериментальных исследований, восполняющие недостаток данных о трёхмерных волнах и режимах перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению при вертикальном плёночном течении, соответствующие критерию новизны.

Диссертация В.В. Гузанова соответствует специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Автореферат соответствует тексту рукописи диссертации, которая написана правильным русским языком, в доказательном стиле и хорошо проиллюстрирована.

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации В.В. Гузанова «Экспериментальное исследование трёхмерных волн на вертикально стекающих плёнках жидкости» можно сделать обоснованное заключение о том, что диссертация соответствует требованиям п. 9 – 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября

2013 г. № 842 (ред. от 01.10.2018), а её автор Владимир Владимирович Гузанов заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физико-математических наук

(01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы)

Директор, главный научный сотрудник лаборатории экспериментальной прикладной гидродинамики ИГиЛ СО РАН

07.11.2022



Ерманюк Евгений Валерьевич

Подпись Е.В. Ерманюка удостоверяю

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

Хе Александр Канчерович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН).

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15

<http://www.hydro.nsc.ru>

Телефон: (383)333-12-41

факс: (383)333-16-12

адрес электронной почты: ermanyuk@hydro.nsc.ru