

О Т З Ы В

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

Актуальность исследований. Системы, в которых реализуются плёночные течения, обеспечивающие высокую скорость тепло- и массообмена, активно применяются в различных устройствах и промышленном оборудовании. По мере развития жидкостных технологий, основанных на использовании тонких плёнок, расширяется и круг задач, изучение которых представляет как фундаментальный, так и практический интерес. К таким задачам можно отнести интенсификацию процессов теплообмена в разнообразных аппаратах (испарителях, конденсаторах, кристаллизаторах, электролизёрах, парогенераторах, абсорберах, ректификационных колоннах), повышение эффективности систем термического контроля с капиллярной прокачкой теплоносителя, совершенствование технологий термического осушения и нанесения покрытий. Плёночные течения жидкостей реализуются в тепловых трактах АЭС и промышленных установках нефтегазовой промышленности. Жидкие плёнки применяют для защиты стенок камер сгорания и сверхзвуковых сопел жидкостных ракетных двигателей. Близкие к плёночным ривулетные течения реализуются в различных установках, используемых в энергетической, химической и пищевой промышленности, теплообменниках для сжижения природного газа.

Тонкие слои жидкости чувствительны к совокупному действию тепловых, гравитационных и механических воздействий, вызывающих неустойчивости различной природы или разрыв плёнки. Во многих случаях смещение баланса силовых, энергетических и массовых потоков, связанное с одновременным действием тепловых и механических эффектов, поддаётся управлению и может использоваться для многократной интенсификации или, наоборот, ослабления процессов тепломассообмена и создания новых комбинаций технологических условий. Это объясняет острую востребованность исследований, обеспечивающих получение знаний в области контроля и технологий управления режимами течений, подавления нежелательных возмущений и кризисных явлений в рабочих жидкостях. Значительная роль отводится экспериментальным исследованиям, которые обеспечивают эмпирическую базу для дальнейшего развития новых теоретических подходов к описанию динамики жидкостных систем и их верификации. Таким образом, исследование волновых процессов, их влияние на структуру и характеристики плёночных течений, проведённое Гузановым В. В., является актуальной и практически важной задачей.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, в котором обосновывается актуальность тематики исследования и формулируются цели и задачи, четырёх глав, заключения и списка литературы, содержащего 104 наименования. Объём составляет 97 страниц.

В первой главе анализируются современное состояние изучаемых проблем и известные результаты экспериментального и теоретического изучения режимов течений, переходных процессов и волнового взаимодействия в свободно стекающих плёнках, приводится обзор методов исследования, отмечены неполнота результатов или отсутствие отдельных данных для некоторых рассматриваемых задач.

Во второй главе приводится описание экспериментальных установок и используемых методик измерения и фиксации основных параметров.

Третья глава посвящена исследованию эволюции возбуждённых уединённых трёхмерных волн на поверхности вертикально стекающей жидкой плёнки и закономерностей их взаимодействия с регулярными двумерными волнами. Описаны два сценария трансформации начального локального возмущения, вносимого ударом капли. Проводится сравнение измеренных характеристик уединённых стационарных трёхмерных волн с результатами расчётов. Обсуждается область применимости существующих математических моделей для описания стационарных трёхмерных волн. Изучены характеристики стабильных режимов взаимодействия трёхмерных волн с двумерными.

В четвёртой главе представлены результаты экспериментального исследования процессов перехода от двумерного к трёхмерному волновому движению на поверхности свободно стекающей плёнки на различных участках области течения. Обсуждаются различия режимов перехода на малых расстояниях от распределителя, обусловленные начальными условиями. Описаны особенности волновых картин и упорядоченных структур на поверхности плёнки, возникающих на больших расстояниях от распределителя, и режимов перехода, характерных для течений, формирующихся при различных значениях числа Рейнольдса.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Научная новизна. К настоящему моменту хорошо известны фундаментальные результаты исследований волновых течений жидких плёнок, проведённых Капицей П. Л., Шкадовым В. Я., Накоряковым В. Е., Алексеенко С. В., Демехиным Е. А., Kalliadasis S., Chang H.-C., Ruyer-Quil C., Manneville P. и др. Тем не менее многие вопросы, связанные с процессами волнообразования и его влияния на тепло- и массоперенос в плёнках, остаются открытыми. В настоящее время отсутствуют систематические данные о количественных характеристиках стационарных трёхмерных волн и межволнового взаимодействия для жидкостей с разными физическими свойствами (вязкостью, поверхностным натяжением и т. п.) и переходных режимах при волновом движении в жидких плёнках; не вполне понятны механизмы управления самоорганизующимися пространственными структурами в тонких жидких слоях при совместном влиянии механических, структурных, тепловых и

гравитационных факторов, отсутствуют строгие критерии, определяющие условия формирования того или иного режима эволюции начальных пространственных возмущений, а также универсальные методики для получения пространственных и временных топологических и температурных характеристик плёночных течений, реализующихся в различных условиях.

В диссертационной работе Гузанова В. В. получены новые результаты, вносящие вклад в раздел механики жидкости, связанный с методами экспериментального исследования волновых процессов и тепломассообмена в жидких плёнках. Научная новизна представленных результатов состоит в следующем:

1. Экспериментально реализованы стационарные трёхмерные волны в жидкостях с разными физическими свойствами, характеристики которых хорошо согласуются с расчётными, полученными в рамках модели Капицы – Шкадова. На основе сравнения экспериментальных и теоретических данных определена область применимости математических моделей, традиционно используемых для описания стационарных трёхмерных волн, в терминах модифицированного числа Рейнольдса.

2. Экспериментально зафиксированы стабильные режимы взаимодействия трёхмерных подковообразных волн с высокочастотными двумерными волнами, для которых характерно сохранение параметров трёхмерной волны в одинаковых фазах каждого акта взаимодействия. Получены экспериментальные зависимости геометрических параметров трёхмерной волны в стабильных режимах взаимодействия для жидкостей с разными свойствами.

3. На основе анализа характеристик трёхмерных волн, образующихся при переходе от двумерного волнового движения к трёхмерному в диапазоне $10 < Re < 70$, установлены отличия их формы от подковообразных структур. Экспериментально доказана возможность формирования струй при переходном процессе, эволюция которых определяется начальными условиями.

4. Обобщены основные закономерности развития волнового движения при переходе от двумерных к трёхмерным волновым режимам. Выделены три сценария эволюции в различных диапазонах изменения числа Рейнольдса, описаны волновые картины, характерные для каждого сценария.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы обусловлена выбором экспериментальных методов, надёжность которых обеспечилась проведением калибровочных и тестовых испытаний, хорошей воспроизводимостью результатов и сопоставлением полученных экспериментальных данных с результатами других авторов.

Теоретическое и практическое значение работы заключается в выявлении закономерностей формирования волновых режимов разных типов, характеризующихся формированием упорядоченных структур различной топологии или иррегу-

лярных структур, и межволнового взаимодействия в свободно стекающих плёнках жидкостей с разными свойствами при различных условиях течения. Получены систематические экспериментальные данные о характеристиках стационарных подковообразных и уединённых трёхмерных волн в условиях их взаимодействия с регулярными двумерными структурами и трёхмерных волн, возникающих при потере устойчивости двумерного волнового течения. Результаты диссертации могут использоваться для верификации соответствующих математических моделей и теоретических подходов к описанию волновых движений и межволнового взаимодействия в жидких плёнках.

Оценка диссертации. По содержанию диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. В п. 2.2.2 автор описывает процедуру определения показателя поглощения рабочей жидкости. Как известно, этот параметр зависит от природы и состава вещества, а также от длины волны проходящего излучения. В растворах показатель поглощения может сильно меняться из-за изменения концентрации вследствие физико-химического взаимодействия молекул компонентов смеси. Поскольку в экспериментах использовались разные жидкости, включая растворы, а в горизонтальном микроканале – газожидкостная смесь, состав которой мог в разных сериях экспериментов различаться, и рабочие характеристики лазера также сохраняются в пределах некоторых погрешностей, возникает вопрос: насколько корректно определялся показатель поглощения? Особенно это касается газожидкостной смеси: как обеспечивалась однородность смеси, в которой от точки к точке вариации показателя поглощения могли быть значимыми? Второй момент, касающийся использования ЛИФ метода, связан с возможным формированием локальных температурных возмущений в жидкости, вызванных лазерным излучением, за счёт внутреннего тепловыделения. Или благодаря высокому квантовому выходу используемого флуорофора этот эффект незначителен? Или отсутствие этого эффекта обеспечивается каким-то иным способом?

2. В п. 2.6 кратко описан метод расчёта, позволяющий получить необходимые для сравнения с экспериментальными данными характеристики. Как определялось достаточное количество членов разложения (2.3)? Как определялись отрицательные значения инкрементов, обеспечивающие быстрое затухание волн – навязывались или вычислялись в процессе решения?

3. На рисунке 3.2, стр. 55, приводятся экспериментально зарегистрированные и расчётные волновые картины, при этом ни в подписях к рисунку, ни в тексте не указано чему соответствуют разные рисунки (а,г,ж), (б,д,з), (в,е,и)? Разным моментам времени?

4. В п. 3.2.1 приводятся результаты сравнения экспериментальных и расчётных данных. На стр. 56 автор упоминает о возникающем несоответствии между результатами расчётов и экспериментальной картиной и отмечает способ, позво-

ляющий «компенсировать» различия за счёт однократного смещения продольной координаты для результатов численного моделирования на фиксированную величину. Одинакова ли величина смещения или меняется для возмущений с разной энергией, для разных рабочих жидкостей? Можно ли установить какую-то формальную зависимость смещения от параметров эксперимента/системы, которая позволит в отсутствие экспериментальных данных для сравнения, корректно предсказывать геометрические характеристики волны на основе результатов моделирования?

5. В тексте диссертации встречаются опечатки (например, в формуле для числа Рейнольдса на стр. 51 используется толщина h , хотя далее вводится Нуссельтовская толщина h_N ; на стр. 59 «обезразмерны» вместо «обезразмерены» и др.), пунктуационные, синтаксические и орфографические неточности.

Сделанные замечания не снижают высокой положительной оценки результатов диссертационной работы, их научной и практической значимости.

Заключение по диссертации. Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. В целом можно заключить, что диссертация Гузанова В. В. «Экспериментальное исследование трёхмерных волн на вертикально стекающих плёнках жидкости», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы, соответствует паспорту специальности и может рассматриваться как завершённая научно-квалификационная работа, которая выполнена на высоком научном уровне и вносит вклад в развитие экспериментальных методов исследования волновых процессов в жидких плёнках. В работе приведены результаты экспериментальных исследований процессов волнообразования и межволнового взаимодействия в плёночных течениях, широко применяемых в разнообразных технологических процессах, установлены закономерности формирования разных режимов течений, возникающих в результате волновой эволюции при различных условиях. К несомненным достоинствам работы следует отнести получение систематических экспериментальных данных о характеристиках трёхмерных волн, необходимых для развития новых теоретических подходов и верификации математических моделей. Результаты работы представлены на всероссийских и международных конференциях и с достаточной полнотой опубликованы в 42 печатных работах, из них 17 – в ведущих журналах, входящих в перечень ВАК в действующей редакции и международные системы цитирования Web of Science и Scopus. Автореферат диссертации полно и правильно отражает её содержание.

По актуальности, новизне, научной и прикладной значимости, диссертационная работа Гузанова Владимира Владимировича «Экспериментальное исследование трёхмерных волн на вертикально стекающих плёнках жидкости» удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, согласно Положению о присуждении учёных степеней

в текущей редакции, а её автор заслуживает присуждения учёной 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)

Ведущий научный сотрудник,
заведующий отделом дифференциальных
уравнений механики ИВМ СО РАН

Бекежанова Виктория Бахытовна

03 ноября 2022 г.

Подпись Бекежановой Виктории Бахытовны заверяю

Учёный секретарь ИВМ СО РАН
к.ф.-м.н.



Вяткин Александр Владимирович

Почтовый адрес: 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

Телефон, e-mail: 8(391)290-51-42; vbek@icm.krasn.ru

Наименование организации: Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМ СО РАН) – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, отдел дифференциальных уравнений механики

Я, Бекежанова Виктория Бахытовна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертационной работы Гузанова Владимира Владимировича, и их дальнейшую обработку.