

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертационную работу Квона Александра Зедоновича «Структура
и эволюция трехмерных волн на поверхности стекающих пленок
жидкости», представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика
жидкости, газа и плазмы

Актуальность темы диссертации

Пленочные течения жидкости активно изучаются благодаря их ключевой роли в технологических процессах, связанных с тепломассопереносом: большая площадь орошения при малых расходах и низкое термическое сопротивление обеспечивают высокую эффективность межфазного теплообмена. Известно, что дополнительная интенсификация тепломассообмена происходит за счет волнообразования и турбулизации поверхности пленки. Помимо прикладного значения, исследование динамики волновых процессов на поверхности пленки жидкости представляет большой научный интерес. Волновые движения пленки жидкости являются классическим объектом изучения, в которых проявляются различные нелинейные эффекты, неустойчивость, процессы накачки и диссипации энергии и т.п. Результаты исследований волновых пленок могут быть полезны для развития теорий нелинейных волновых явлений в других системах. Несмотря на многолетние исследования волновых пленок и существенный прогресс в описании двумерного волнового движения на поверхности пленок, трехмерные волновые режимы течения остаются слабо изученными. Недостаток количественных данных обусловлен ограничениями систем диагностики. Это в свою очередь затрудняет верификацию существующих и развитие новых теоретических моделей. Таким образом, установление закономерностей эволюции и определение структуры течения в трехмерных волнах на поверхности стекающих пленок является актуальной задачей гидродинамики, направленной на развитие фундаментальных представлений о нелинейных волновых процессах и создание теоретических основ технологических приложений.

В работе Квона А.З. получены **новые научные результаты**. В частности, получены новые экспериментальные данные о характеристиках поверхности волновой пленки на больших длинах пробега для различных жидкостей. Проведен детальный статистический анализ полей толщин пленок, в результате которого впервые обнаружен и охарактеризован полностью установившийся трехмерный волновой режим пленочного течения. Разработан, протестирован и успешно применен диагностический метод, позволяющий одновременно получать объемные поля скорости в волновых пленках (в том числе в трехмерных волнах) с привязкой к форме свободной поверхности. Новые данные о пространственной структуре

волновых течений позволили впервые провести количественное сопоставление экспериментальных полей скорости и толщин пленок с результатами расчетов по полной и упрощенной моделям WRIBL и оценить границы их применимости.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов работы обеспечивается применением современных высокоточных полевых методов оптической диагностики потоков таких, как лазерно-индуцированная флуоресценция (ЛИФ) для измерения толщины пленки и цифровая трассерная анемометрия (PTV) для получения данных о скорости, а также проведением большого количества калибровочных и тестовых экспериментов на хорошо изученных типах течений и последующим сопоставлением результатов с данными, приведенными в литературе.

Научная и практическая значимость. Результаты данной работы вносят весомый вклад в развитие нелинейной динамики пленочных течений. Разработанный комбинированный метод диагностики, обеспечивающий одновременное измерение формы свободной поверхности и объёмных полей скорости создает методологическую основу для дальнейших экспериментальных исследований сложных трёхмерных волновых структур не только в пленочных течениях, но и в других системах с развитой свободной поверхностью, а также для решения задач, требующих объёмных измерений скорости потока. Результаты проведенных с использованием новой методики исследований существенно дополняют и углубляют представления о процессах эволюции трехмерных волн, а результаты прямого сопоставления с результатами расчетов определяют область применимости используемых теоретических моделей. Полученные экспериментальные данные о режимах течения и их особенностях могут быть использованы при проектировании тепло и массообменных технологических устройств и определении их рабочих режимов.

Общая характеристика диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа представлена на 100 страницах, содержит 3 таблицы и 58 рисунков. Список литературы состоит из 82 наименований. Структура диссертации логична и полностью отражает этапы проведенного исследования.

Во *введении* обосновывается актуальность направления исследований трехмерных волновых режимов пленочных течений, подчеркивается практическая и теоретическая значимость. Формулируется цель диссертации и стоящие перед ней задачи. Представляются основные положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* диссертации приведен подробный обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных двумерным и трехмерным волновым режимам пленочного течения. Особое внимание уделено изученности трехмерных волновых режимов. Отмечены ограничения существующих экспериментальных методик и необходимость создания сложных теоретических моделей. На основе анализа литературы выявлены пробелы и определены ключевые проблемы в исследовании гидродинамики пленочных течений.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных установок и методик исследования. Подробно описаны принципы метода лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) для полевых измерений толщины пленок. Особое внимание уделено описанию разработанного комбинированного метода для измерения формы поверхности и трехмерных полей скорости в волновых пленках на основе использования камеры светового поля, методов ЛИФ и цифровой трассерной анемометрии (PTV). Приведены результаты тестовых экспериментов на хорошо изученных типах течения и выполнено сравнение с результатами других авторов. Выполнена оценка погрешностей применяемых методов. Совпадение полученных данных демонстрирует возможность применения методик для решения поставленных задач.

В *третьей главе* изложены результаты высокоскоростных ЛИФ измерений волновой картины на больших длинах пробега волн с использованием различных жидкостей (вода, водоглицериновые растворы). Рассмотрены режимы течений с естественной и искусственной генерацией волн. Представлен анализ статистических характеристик, построенных на основе полученных серий полей толщин пленок. Такой подход продуктивен для количественного описания и классификации режимов течения. Показана возможность существования двух сценариев развития волнового пленочного течения с трехмерной пространственной структурой в зависимости от числа Рейнольдса.

Четвертая глава посвящена экспериментальному изучению трехмерной структуры волнового течения пленок. Одновременно измерялись поля скорости и форма волны. Выявлена универсальная, для всех исследуемых жидкостей, картина течений. Показаны области притока и оттока жидкости в основной волне и сложная структура течений в капиллярной ряби и области возвратных течений в минимумах капиллярных предвестников. Проведено сравнение с результатами расчетов по интегральной модели пограничного слоя (WRIBL) и показано, что экспериментально полученные характеристики исследуемой волны в целом хорошо описываются полной моделью WRIBL, несмотря на небольшие отличия в форме волн.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам диссертационной работы, которые демонстрируют решение поставленных задач.

Замечания к диссертации.

1. Методика определения статистических характеристик толщины пленки как случайной величины описана недостаточно полно (гл. 3). Не приведены формулы и не описано, как вычисляются плотность вероятности толщины пленки и спектральная плотность мощности, поэтому неясно, почему последняя имеет размерность $\text{мм}^2 \text{с}$.
2. В п.5 «Новизны» следовало бы акцентировать, что полученные экспериментальные данные позволили впервые оценить границы применимости и выявить ограничения моделей WRIBLE.
3. При ссылке на источники в тексте диссертации было бы удобнее для читателя приводить фамилию первого автора и год публикации наряду порядковым номером в списке литературы.
4. Ряд ссылок на отечественные работы приведен на их переводные версии, а не на оригиналы, например, п. 19, 31, 53, 63 и т.д.
5. В тексте автореферата и диссертации имеются неудачные выражения, стилистические и орфографические погрешности, опечатки, описки и т.п., например, в диссертации вместо спектральной плотности мощности написано «спектральная мощность» (с. 59) или «спектральная плотность» (с. 69), «...отклонение амплитуды больших волн» (с. 18), «Отмечено существенное влияние как трехмерности» (с. 19), «исследование динамики ...2D нелинейных волн к локализованным трехмерным возмущениям» (с. 20). В автореферате на с. 9: «При использовании камеры светового поля для измерения PIV или PTV, положение...», «получать данные как для ЛИФ, так и для PTV», с. 15: «Эволюция функции».
6. В качестве пожелания для возможного приложения результатов работы можно рекомендовать провести анализ режимов волнового течения пленок имея в виду разработку способов интенсификации тепло - и массообмена, например, за счет увеличения площади свободной поверхности пленки.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

Настоящая работа является законченным диссертационным исследованием, выполнена на достаточно высоком научном уровне, а ее результаты имеют научно-практическую значимость. Основные результаты

диссертации доложены на многих международных и всероссийских конференциях и опубликованы в научной печати, в том числе в 12 статьях в журналах, включенных в перечень ВАК РФ. Автореферат верно отражает основное содержание диссертации.

Диссертационная работа по актуальности, научной новизне, основным положениям и выводам соответствует требованиям пунктов 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Квон Александр Зедонович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент

Губайдуллин А. А.
18.05.2026

доктор физико-математических наук, специальность ВАК 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», профессор, главный научный сотрудник, руководитель научного направления «Математическое моделирование в механике» Тюменского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес: 625026, г. Тюмень, ул. Таймырская, д.74

Телефон: +7 (3 452) 68-47 -56

E-mail : A.A.gubaidullin@yandex.ru

Подпись А.А. Губайдуллина удостоверяю
Ученый секретарь ТюмФ ИТПМ СО РАН
кандидат физ.-мат. наук



С.Л. Бородин