

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ
им. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТ СО РАН)**

проспект Академика Лаврентьева, 1
г. Новосибирск, 630090
Тел.: (383)330-90-40; 330-84-80; факс 330-84-80
Эл. почта: director@itp.nsc.ru
ИНН/КПП 5408100040/540801001
ОКПО 03534009 ОГРН 1025403648786

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального
государственного
бюджетного учреждения науки

Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе Сибирского
отделения Российской академии наук

Академик РАН Д.М. Маркович

От _____ № 15314 _____
На _____ от _____ 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работы Поплевина Антона Валерьевича на тему «Экспериментальное исследование вихревого течения, возбуждаемого волнами на поверхности жидкости», представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа Поплевина Антона Валерьевича посвящена экспериментальному исследованию процессов генерации и динамики вихревых течений, возбуждаемых нелинейными поверхностными волнами. Понимание механизмов нелинейного обмена энергией между вихревыми движениями имеет принципиальное значение для описания атмосферных и океанических течений, астрофизических процессов и управления поверхностными потоками в технических системах. Несмотря на значительные успехи в теоретическом моделировании, количественные экспериментальные данные о генерации и эволюции вихрей под действием волн оставались ограниченными. Проведённое исследование восполняет этот пробел и позволяет продвинуться в понимании закономерностей формирования вихревых структур и перехода от двумерного к трёхмерному режиму турбулентности, что делает работу актуальной.

Целью представленной работы являлось экспериментальное изучение механизмов формирования и развития вихревого движения, возбуждаемого слабо-неколлинеарными поверхностными волнами, а также статистических свойств таких течений и процессов кластеризации частиц-трассеров на поверхности воды.

В соответствии с намеченной целью были поставлены следующие задачи:

1. Создать экспериментальную установку для формирования двух поверхностных волн под углом друг к другу и провести серию экспериментов по формированию вихревого течения слабо-неколлинеарными волнами при различных параметрах накачки.

2. Исследовать распределения завихренности и энергии вихревого движения, генерируемого слабо-неколлинеарными поверхностными волнами на частоте 2.34 Гц.

3. Провести серию экспериментов по формированию вихревых течений при разных глубинах жидкости.

4. Построить и сравнить функции плотности вероятности энергии и энтрофии вихревого движения на поверхности глубокой и мелкой воды.

5. Получить и проанализировать характер затухания энергии и энтрофии по времени на поверхности мелкой и глубокой воды – $E(t)$ и $\Phi(t)$.

6. Провести серию экспериментов по процессам кластеризации частиц на поверхности воды при различных значениях фоновых течений.

7. Построить и определить форму распределения плотности кластеров по площади и сравнить с результатами численного моделирования.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 85 наименований. Объем диссертации составляет 99 страниц машинописного текста, 43 рисунка.

Анализ содержания работы и основных положений, выносимых на защиту

Во введении проанализировано общее направление исследования. В этой части работы раскрыта актуальность и новизна; представлены цель и задачи исследования; приведены основные положения, выносимые на защиту; указана научная и практическая значимость.

В первой главе представлены основные механизмы формирования вихревых течений, генерируемых поверхностными волнами, а также представлен развёрнутый обзор литературы, посвященный волновым и вихревым системам.

Во второй главе приведены экспериментальные исследования вихревых течений, которые возникают при нелинейном взаимодействии поверхностных волн под небольшим углом друг относительно друга. Было показано, что слабо-неколлинеарные поверхностные волны могут формировать устойчивое полосообразное вихревое течение с характерным пространственным масштабом, который определяется параметрами возбуждаемых волн. Также выделены два вклада в завихренность: вклад дрейфа Стокса и Эйлеров вклад. Структура и масштаб течений хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями.

Третья глава посвящена исследованию формирования и затухания вихревого движения при условиях мелкой и глубокой воды. Выявлено, что процессы затухания энергии и энтрофии

принципиально отличаются и зависят от глубины жидкости: на поверхности мелкой воде затухание экспоненциальное, а при большой глубине затухание немонотонное, что связано с перераспределением энергии между поверхностными и объёмными вихрями. Также показано, что PDF-распределение модуля завихренности на ранних стадиях возбуждения близко к гауссовскому независимо от амплитуды волн, а распределения энергии демонстрируют отклонения от нормального закона.

В четвёртой главе представлены экспериментальные исследования процессов кластеризации полиамидных частиц на поверхности воды. Установлено, что частицы образуют устойчивые кластеры, динамика которых определяется локальной структурой вихревого поля. Экспериментально показано, что распределение площадей образуемых кластеров подчиняется закону Парето в широком временном диапазоне. Сравнение полученных данных с результатами численного моделирования показало хорошее согласие и подтвердило ключевую роль фонового течения в формировании распределения.

Диссертацию завершают заключение, благодарности и список литературы.

На защиту автор выносит следующие научные положения.

1. Полосообразное вихревое течение формируется на поверхности жидкости при возбуждении слабо-неколлинеарных стоячих гравитационных волн. Его структура определяется углом между волнами, а пространственные характеристики согласуются с теоретическими предсказаниями.
2. Вертикальная завихренность может быть представлена в виде суммы вклада дрейфа Стокса и Эйлера члена: $\Omega = \Omega_S + \Omega_E$, причём вклад Эйлера члена приводит к накоплению полной завихренности на временах, превышающих время установления волнового движения, в отличие от вклада дрейфа Стокса.
3. При уменьшении глубины жидкости переход от трёхмерного к двумерному вихревому течению приводит к перестройке структуры вихревого поля и сопровождается изменением статистических характеристик турбулентного движения. В объеме мелкой воды вихревое течение жидкости является двумерным, а в объеме глубокой жидкости – трехмерным.
4. Распределение числа кластеров полиамидных частиц по размеру на поверхности жидкости подчиняется степенному закону Парето. Это распределение возникает вследствие случайных процессов слияния и распада кластеров.
5. Кластеризация частиц происходит при сохранении суммарного размера кластеров и степенном распределении количества кластеров по площади. Параметры получающегося распределения Парето зависят от длительности эксперимента, скорости фоновых течений и наличия внешнего возбуждения.

Научную новизну диссертационной работы Поплевина Антона Валерьевича можно сформулировать следующим образом:

- Впервые экспериментально показано, что взаимодействие слабо-неколлинеарных поверхностных волн на воде приводят к формированию устойчивого полосообразного течения, масштаб которого определяется волновыми параметрами. Показано, что после включения накачки вклад Стокса в завихренность выходит на стационарное значение относительно быстро, в то время как Эйлеров вклад имеет характерное время выхода на стационар на 1.5 порядка больше.
- Для системы поверхностных волн, возбуждаемых в ячейке с регулируемой глубиной жидкости, исследованы статистические свойства вихревого движения. Впервые показано, что на начальных стадиях возбуждения вихревого движения PDF модуля завихренности описываются распределением Гаусса независимо от амплитуды волн. При этом для распределения энергии выявлены отличия от нормального закона: на поверхности мелкой воды — при малых амплитудах волн, на поверхности глубокой воды — при увеличении времени накачки, что связано с формированием крупномасштабных вихрей.
- Впервые установлено, что квазистационарное распределение размеров кластеров полиамидных частиц на поверхности воды подчиняется закону Парето в широком диапазоне времён (до 120 часов) и хорошо описывается степенной функцией $C/x-p$. Численные расчёты, учитывающие распад крупных кластеров, подтвердили экспериментальные наблюдения. Выявлена ключевая роль фонового течения в формировании распределения.

Апробация результатов диссертационной работы и публикации

Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на многочисленных научных конференциях. Личный вклад Автора в получении результатов настоящего исследования несомненен. По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, определенных ВАК.

Соответствие диссертационной работы критериям, предъявляемым к диссертациям

Диссертационная работа Поплевина Антона Валерьевича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научных задач, имеющих значение для развития направления исследований в области физики конденсированного состояния. В частности, результаты проведённого исследования расширяют существующее представление о механизмах взаимодействия волн и вихрей на поверхности жидкости и перехода к турбулентным режимам.

Представленная диссертация обладает внутренним единством, разделы и результаты исследования являются взаимосвязанными. Используются современные методы оптической

визуализации (PIV, трекинг частиц, FFT-анализ), что обеспечивает высокую достоверность данных. Результаты работы и выносимые на защиту научные положения обладают научной новизной, в достаточной степени аргументированы и обоснованы автором.

Как любая большая работа, диссертация А.В. Поплевина не свободна от недостатков. В качестве замечаний следует отметить следующее:

На наш взгляд, теоретическое введение написано недостаточно ясно. Некоторые формулы даны без пояснений, что затрудняет понимание и интерпретацию экспериментальных данных, представленных в диссертации.

Второй важный момент связан с трейсерами. Обнаруженная в работе коагуляция и разброс их размеров, по нашему мнению, существенно влияют на точность данных. Однако в диссертации отсутствует анализ возможных погрешностей.

Есть и более мелкие замечания. Так, автор использует термин «глубина», хотя на самом деле имеется в виду толщина слоя воды. Глубина ассоциируется с погружением, а в диссертации речь идет о слое воды.

В работе также есть рисунки с функциями плотности вероятности (PDF) амплитуд модуля завихренности. На оси абсцисс указано «квадрат модуля амплитуды», но диапазон значений идет от отрицательных чисел к положительным. Это выглядит небрежно и не совсем корректно.

В конечном итоге, отмеченные замечания не ставят под сомнение большой объем проделанной работы, не затрагивают основных результатов, не снижают значимость проведенного исследования и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы, а носят, в основном, уточняющий характер. Диссертационная работа Поплевина Антона Валерьевича «Экспериментальное исследование вихревого течения, возбуждаемого волнами на поверхности жидкости» является законченным научным исследованием, выполненном Автором на высоком научном уровне. Положения, выносимые на защиту, представляют собой оригинальный научный результат, который является решением актуальной научной проблемы. Диссертационная работа «Экспериментальное исследование вихревого течения, возбуждаемого волнами на поверхности жидкости» полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор, Поплевин Антон Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Автореферат полностью отражает содержание представленной диссертации.

Доклад по материалам диссертации был представлен и получил положительную оценку на научном семинаре «Семинар лаборатории моделирования» Федерального государственного

бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук от 14 октября 2025 г., протокол № 19-2025 г.

Отзыв составили:

Главный научный сотрудник лаборатории
моделирования, доктор физико-
математических наук по специальности
01.04.14 теплофизика и молекулярная
физика

Тел.: +7(913)9283935

Эл. почта: nemir@itp.nsc.ru

С.К. Немировский

Ведущий научный сотрудник лаборатории
моделирования, доктор физико-
математических наук по специальности
01.04.14 – «теплофизика и теоретическая
теплофизика»

Тел.: +7(913)7140173

Эл. почта: luiza.kondaurova@yandex.ru

Л.П. Кондаурова

Подпись заверяю

Ученый секретарь ИТ СО РАН

кандидат физико-математических наук



А.А. Ягодницына

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

Адрес: 630090, Новосибирская область, город Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, дом 1

Тел. +7(383) 330-90-40; телефакс: +7(383) 330-84-80.

Эл. почта: director@itp.nsc.ru