

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Поплевина Антона Валерьевича

«Экспериментальное исследование вихревого течения, возбуждаемого волнами на поверхности жидкости», представленную 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. Волны, распространяющиеся под небольшим углом друг к другу, создают условия для возникновения устойчивых приповерхностных вихрей, структура которых чувствительна к параметрам возбуждения, глубине жидкости и граничным условиям. Волново-вихревое взаимодействие определяет перераспределение энергии между волнами и медленными течениями и лежит в основе формирования крупномасштабных структур в приповерхностных потоках, что имеет значение как для фундаментальной физики нелинейных систем, так и для прикладных задач управления поверхностными течениями. До настоящего времени отсутствовали систематические экспериментальные данные, позволяющие количественно описать вклад дрейфа Стокса и Эйлерового механизма в генерацию завихренности, а также условия перехода вихревого поля от двумерного к трёхмерному режиму. Выполненное исследование устраняет этот пробел, демонстрируя закономерности формирования полосообразного вихревого течения, особенности затухания энергии и энтропии на мелкой и глубокой воде и связь статистики кластеризации частиц с топологией вихревых структур, что подтверждает актуальность представленной работы

Целью представленной работы являлось экспериментальное исследование формирования и развития приповерхностного вихревого движения, возникающего под действием слабо-неколлинеарных поверхностных волн, с выделением механизмов генерации завихренности, особенностей изменения структуры вихревого поля при различной глубине жидкости и статистических характеристик 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 рассмотрены физические механизмы возникновения вихревого движения, вызываемого поверхностными волнами, а также приведён подробный аналитический обзор публикаций, посвящённых исследованиям волновых и вихревых систем.

Во второй главе представлены результаты экспериментального исследования вихревого движения, формирующегося вследствие нелинейного взаимодействия поверхностных волн, распространяющихся под малым углом друг к другу. Показано, что такие волны приводят к возникновению устойчивого полосообразного течения с пространственными характеристиками, определяемыми параметрами возбуждения. Установлено, что наблюдаемая завихренность складывается из двух компонентов — обусловленного дрейфом Стокса и медленно формирующегося Эйлера вклада, — и что размеры и конфигурация получающихся течений находятся в согласии с теоретическими моделями.

Третья глава посвящена экспериментальному изучению формирования и последующего затухания вихревых течений на поверхности воды при различной глубине слоя. Показано, что характер убывания энергии и энтрофии определяется глубиной: в мелком слое наблюдается монотонное экспоненциальное затухание, тогда как в глубокой воде процесс имеет немонотонный вид вследствие

обмена энергией между поверхностными и объёмными вихревыми структурами. Установлено также, что на ранних этапах возбуждения распределение модуля завихренности по значениям близко к гауссовскому вне зависимости от амплитуды волн, тогда как распределения энергии демонстрируют отклонения от нормального закона.

В четвёртой главе рассматриваются особенности кластеризации полиамидных частиц, используемых для визуализации течения на поверхности воды. Показано, что частицы не распределяются равномерно, а формируют устойчивые кластеры, поведение которых связано с пространственной структурой возникающего вихревого движения. Установлено, что распределение площадей кластеров следует степенному закону Парето в течение широкого временного интервала, а сопоставление экспериментальных данных с результатами численного моделирования демонстрирует их согласованность и подчёркивает значимость фоновых течений в определении параметров получаемого 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-неколинейных 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-неколинеарных поверхностных волн на воде приводят к формированию устойчивого полоосообразного 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 Эйлера 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^{-n} . 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 выполненного исследования были представлены автором на ряде научных конференций и получили обсуждение в профессиональном сообществе. Личный вклад автора в получение экспериментальных данных и анализ результатов является очевидным. По теме диссертации опубликовано шесть статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень журналов, рекомендованных ВАК.

Соответствие диссертационной работы критериям, предъявляемым к диссертациям

Диссертационная работа Поплевина Антона Валерьевича на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, в котором решены научные задачи, значимые для развития направления физики конденсированного состояния. Полученные результаты вносят вклад в понимание механизмов взаимодействия поверхностных волн и вихревого движения на границе жидкой среды, а также особенностей перехода к турбулентным режимам течения. Работа отличается внутренней целостностью: разделы логически взаимосвязаны, а выводы вытекают

из проведённого эксперимента и анализа данных. Применение современных методов оптической визуализации, включая PIV-измерения, трекинг частиц и FFT-анализ, обеспечило высокую достоверность полученных результатов. Научные положения, выносимые на защиту, обладают новизной, аргументированы и обоснованы автором.

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

1. В уравнении (5) для Стоксовой завихренности не объясняется параметр θ .
2. Стр. 30. Каким образом получается угол 36° между волнами? Это резонансное условие или угол будет зависеть от ориентации плунжера?
3. Стр. 33. Не показано, как конкретно выделялись пики в k -пространстве для расчёта амплитуд волн и завихренности. В частности, как проводилась граница между пиками волновой энергии для двух волн?
4. В формуле (11) желательно привести оценку члена, зависящего от ϵ , по сравнению с 2. Это полезно для понимания, насколько вариации свойств поверхностной плёнки влияют на результаты эксперимента.
5. Глава 3.2. Следует указать, где находятся плунжеры на рис. 16-18.
6. В подписи к рис. 18 неправильно указана глубина.
7. На стр. 45 автор указывает, что после выключения накачки на мелкой воде формируется один крупномасштабный вихрь, а на глубокой — два. Насколько хорошо воспроизводится данный результат между экспериментами?
8. Почему для мелкой и глубокой воды диапазон амплитуд волн отличается больше, чем в два раза?
9. Автор упоминает фрактальность кластеров частиц полиамида. В этом случае площадь кластеров, определяемая по количеству занимаемых ими пикселей, должна зависеть от разрешения картинки. Однако, ни само разрешение, ни эффекты зависимости площади кластеров от него, в работе не упоминаются и не обсуждаются.
10. На рис. 33 видны колебания, по периоду близкие к суточным. Учитывалось ли это при выборе времён, для которых рассчитывались поля скорости и её градиента, а также распределение структур по площадям? Иными словами, эти распределения точно зависят от времени, прошедшего после выключения накачки, или, возможно, от времени суток?

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 лаборатории нелинейных динамических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук от 14 октября 2025 г., протокол № 123.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «теоретическая физика», ведущий научный сотрудник лаборатории нелинейных динамических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН Российской академии наук

02 декабря 2025 г.

Улейский Михаил Юрьевич

Согласен на обработку персональных данных

02 декабря 2025 г.

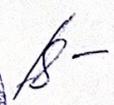
Улейский Михаил Юрьевич

Подпись Улейского Михаила Юрьевича заверяю

Ученый секретарь ТОИ ДВО РАН

кандидат географических наук



 Т.И.Клещёва

Контактная информация:

690041, Приморский край, город Владивосток, улица Балтийская, 43

Тел.: +74232313081

Эл. почта: uleysky@poi.dvo.ru