

На правах рукописи



Поплевин Антон Валерьевич

**Экспериментальное исследование вихревого течения, возбуждаемого волнами
на поверхности жидкости**

Специальность 1.3.8 —
физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Черноголовка – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук.

Научный руководитель: **Левченко Александр Алексеевич**,
доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН,
директор Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт физики твёрдого тела
имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук.

Научный консультант: **Филатов Сергей Васильевич**,
кандидат физических наук, старший научный
сотрудник Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт физики твёрдого тела
имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук.

Официальные оппоненты: **Ерманюк Евгений Валерьевич**,
доктор физико-математических наук, директор
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт гидродинамики им.
М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской
академии наук.

Улейский Михаил Юрьевич,
кандидат физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Тихоокеанский
океанологический институт имени В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии
наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук.

Защита состоится 23 декабря 2025 года в 14:30 на заседании диссертационного со-
вета 24.1.136.01 (Д002.100.02) на базе Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипьяна Россий-
ской академии наук по адресу: 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул.
Академика Осипьяна, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФТТ РАН и на сайте диссертационного совета: <http://www.issp.ac.ru/main/index.php/ru/dis-council.html>

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 года.

Учёный секретарь диссертационного совета

24.1.136.01 (Д002.100.02)

доктор физико-математических наук



Гаврилов Сергей Сергеевич

© Поплевин А.В., 2025

© ИФТТ РАН, 2025

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Нелинейность играет ключевую роль в динамике сложных природных и технических систем. Она определяет механизмы переноса энергии и импульса на разных пространственных и временных масштабах. Так слабая нелинейность в волновых системах приводит к сложным сценариям взаимодействия мод и возникновению как мелкомасштабных, так и крупномасштабных структур.

Волны на поверхности воды подразделяются на гравитационные и капиллярные в зависимости от своей длины. В реальных физических системах волновое движение нередко сопровождается генерацией вихревых течений, возникающих в результате нелинейного взаимодействия волн с не параллельными волновыми векторами. Понимание этих процессов имеет принципиальное значение для описания динамики атмосферных и океанических течений, распространения волн и вихрей в астрофизической и плазменной среде, а также для задач управления поверхностными течениями в прикладной гидродинамике.

Несмотря на существенные успехи в теоретическом описании волновых и вихревых систем, многие вопросы, связанные с генерацией вихрей, их структурой и механизмами диссипации, остаются открытыми. Наличие большого числа экспериментальных результатов, их объём пока не позволяют сформировать замкнутую теорию нелинейного взаимодействия волн и вихрей. Существенное влияние на характер наблюдаемых явлений оказывают как параметры возбуждения, так и граничные условия, включая глубину жидкости, наличие поверхностных плёнок и фоновые течения.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия волнового и вихревого движений на поверхности воды. В частности, изучается процесс генерации полосообразных вихревых течений, возникающих в результате возбуждения стоячих волн, распространяющихся под небольшим углом друг к другу. Установлено, что вихревое течение складывается из быстро формирующего вклада дрейфа Стокса и медленно нарастающего Эйлера течения, чувствительного к физическим условиям на границе раздела фаз. Показано, что глубина воды существенно влияет на структуру формируемого вихревого движения и характер затухания энергии и энтропии после прекращения накачки.

Кроме того, исследуются процессы кластеризации полиамидных частиц, визуализирующих вихревое движение на поверхности воды. Выявлено, что в таких системах реализуется устойчивое степенное распределение количества кластеров в зависимости от их площади, соответствующее распределению Парето. Экспери-

ментальные наблюдения и численное моделирование подтверждают, что структура и динамика кластеров существенно зависят от фонового течения на поверхности жидкости.

Полученные результаты расширяют современные представления о волновых и вихревых системах, их взаимодействии и процессах самоорганизации поверхностных структур в ограниченных геометриях. Тем самым они способствуют как развитию общей теории нелинейных систем, так и её приложениям в области управления поверхностными и геофизическими потоками.

Степень разработанности темы исследования. Исследование генерации вихревых течений на поверхности жидкости под действием нелинейных поверхностных волн активно развивалось в последние десятилетия. В работах [1—5] показано, что взаимодействие слабонелинейных волн, отличающихся направлениями волновых векторов, приводит к формированию локализованных вихревых структур и решёток вихрей. Особое внимание уделено влиянию амплитуды возбуждения, ориентации волн и геометрии системы на масштаб и интенсивность индуцируемых течений.

Влияние поверхностной плёнки на процесс генерации приповерхностного вихревого течения исследовалось в [6—8], где показано, что упругие плёнки усиливают затухание волн и, как следствие, увеличивают амплитуду индуцируемого потока.

В настоящей работе впервые проведено систематическое экспериментальное исследование формирования полосообразных вихревых течений при возбуждении пересекающихся поверхностных волн. Пространственно-временной анализ полей скорости и завихренности позволил выделить вклад дрейфа Стокса и Эйлера течения в динамику формируемых структур.

Активно изучается двумерная турбулентность вихревых систем при возбуждении нелинейных поверхностных волн как в экспериментах, так и в численных моделях. В работах [1; 2; 9] показано, что при возбуждении волн формируется двойной каскад энергии: от масштаба накачки как в сторону крупномасштабных структур, где энергия накапливается, так и в сторону мелкомасштабных структур, где происходит диссипация.

Экспериментальные исследования [5—7] показали, что динамика затухания вихрей зависит от глубины жидкости и частоты возбуждения. В мелких слоях формируется квазидвумерная турбулентность, где доминирует трение о дно, тогда как в глубоких слоях реализуется трёхмерная турбулентность с преобладанием объёмной вязкости. Однако систематическое исследование скоростей перестройки вих-

ревого поля и условий перехода к трёхмерному режиму ранее не проводилось.

В данной работе проведено прямое измерение пространственно-временных полей скорости и завихренности на стадии затухания при различных амплитудах возбуждения. Выявлена критическая глубина, при которой осуществляется переход от двумерной к трёхмерной турбулентности.

Изучение кластеризации пассивных частиц на поверхности жидкости является одним из актуальных направлений гидродинамики. В работах [10—12] показано, что под действием сложных приповерхностных течений распределение плотности частиц становится сильно неоднородным и описывается степенными законами, близкими к распределению Парето.

Однако количественная связь между нелинейной динамикой вихревого поля, генерируемого пересекающимися поверхностными волнами, и параметрами степенных распределений кластеров до сих пор оставалась неясной. В данной работе проведено комплексное экспериментальное исследование пространственного распределения частиц и его сопоставление с топологией вихревого поля. Установлено, что параметры распределений Парето напрямую связаны с интенсивностью и масштабом формируемых вихревых структур.

Целями данной работы являются:

1. Экспериментальное исследование особенностей генерации вихревого движения на поверхности жидкости, формируемого слабо неколлинеарными по поверхностными гравитационными волнами.
2. Экспериментальное исследование статистических свойств энергии и энтропии вихревого движения на поверхности глубокой и мелкой воды.
3. Экспериментальное изучение процессов кластеризации полиамидных частиц на поверхности воды.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить 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 раз-

ных глубинах жидкости.

4. Построить и сравнить функции плотности вероятности (PDF) энергии и энтропии вихревого движения на поверхности глубокой и мелкой воды.
5. Получить и проанализировать характер затухания энергии и энтропии 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.

Научная новизна:

1. Впервые экспериментально показано, что взаимодействие слабо-некол-линейных поверхностных волн на воде приводят к формированию устойчивого поло-сообразного вихревого течения, масштаб которого определяется волновыми параметрами. Показано, что после включения накачки вклад Стокса в завихренность выходит на стационарное значение относительно быстро (за время вязкого затухания волны), в то время как Эйлеров вклад имеет характерное время выхода на стационар на 1.5 порядка больше.
2. 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-распределения 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.
3. Впервые установлено, что квазистационарное распределение площадей 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.

Практическая значимость. Полученные экспериментальные результаты и выводы могут быть использованы в исследованиях нелинейных процессов в волновых и вихревых системах, проводимых в Институте прикладной физики РАН (Ниžний Новгород, Россия), Пермском государственном национальном исследовательском

университете (Пермь, Россия), Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова (Москва, Россия), Институте им. Вейцмана (Реховот, Израиль), Австралийском национальном университете (Канберра, Австралия) и других научных организациях.

Полученные знания о процессе кластеризации полиамидных частиц на поверхности жидкости, включая определение характерных времён роста кластеров в зависимости от интенсивности фоновых течений, могут быть полезны научным группам, изучающим процессы кластеризации и агрегации микрочастиц, таким как Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Москва, Россия), Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (Черноголовка, Россия), Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Москва, Россия), Бостонский университет (Бостон, США), Пенсильванский университет (Филадельфия, США) и других научных организациях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Полосообразное вихревое течение формируется на поверхности жидкости при возбуждении слабо-неколинеарных 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 Эйлерова члена: $\Omega = \Omega_S + \Omega_E$, причём вклад Эйлерова 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 площади 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 экспе-

римента, скорости фоновых течений и наличия внешнего возбуждения.

Методология и методы исследования. Методологическая основа работы опирается на системный подход, объединяющий теоретические, экспериментальные и аналитические методы. Теоретической базой служат положения гидродинамики, статистической физики и теории турбулентности, которые позволяют интерпретировать наблюдаемые явления как результат нелинейного взаимодействия волн, переноса энергии по спектру и формирования когерентных структур в квазидвумерных системах.

Экспериментальная методика заключалась в возбуждении слабо нелинейных поверхностных волн в резервуаре с регулируемой глубиной с помощью плунжерного механизма, обеспечивающего стабильные частоты и амплитуды колебаний. В качестве трассеров использовали частицы полиамида PA-12, что позволило визуализировать движение на поверхности. Динамика регистрировалась видеосъёмкой с последующей обработкой кадров.

Для анализа использовались методы цифровой визуализации потока: кросс-корреляционный анализ изображений (PIV) и трекинг частиц, позволившие получить поля скорости и завихренности. На их основе изучались пространственно-временные структуры, интенсивность вращения вихрей и характер переноса вещества. Спектральный анализ с использованием быстрого преобразования Фурье применялся для выявления каскадных процессов и оценки перераспределения энергии между масштабами.

Методы статистической обработки включали построение распределений скоростей и завихренности, анализ корреляций и сравнение с теоретическими законами (распределение Парето, степенные и экспоненциальные зависимости).

Системный характер исследования заключался в последовательности «эксперимент — обработка — теория»: лабораторные наблюдения дополнялись спектральным и статистическим анализом, а затем сопоставлялись с существующими моделями. Такой подход обеспечил целостное понимание механизмов генерации вихревых структур поверхностными волнами и позволил выявить новые закономерности их динамики.

Достоверность полученных результатов обеспечивается публикациями в рецензируемых ведущих физических журналах России и мира, а также обсуждениями на конференциях и семинарах. Результаты диссертации не противоречат данным, полученным другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на сле-

дующих конференциях и научных школах:

1. Поплевин, А.В. Кинетика генерации крупномасштабного вихревого течения слабо-неколлинеарными нелинейными гравитационными волнами / А.В. Поплевин // VIII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» : сб. тр. (15–20 апреля 2019) / Москва, НИЯУ МИФИ. – 2019. – С. 281.
2. Филатов, С.В. Генерация полосообразного вихревого течения неколлинеарными волнами на поверхности воды / С.В. Филатов, А.В. Поплевин, А.А. Левченко, В.М. Парфеньев // 20-я научная школа «Нелинейные волны-2022» : сб. тр. (7–13 ноября 2022) / Нижний Новгород. – 2022. – С. 205–206.
3. Филатов, С.В. Особенности генерации вихревого движения волнами на поверхности мелкой и глубокой воды / С.В. Филатов, А.В. Поплевин, А.М. Лихтер [и др.] // 20-я научная школа «Нелинейные волны-2022» : сб. тр. (7–13 ноября 2022) / Нижний Новгород. – 2022. – С. 208.
4. Филатов, С.В. Генерация вихревого движения волнами на поверхности мелкой и глубокой воды / С.В. Филатов, А.В. Поплевин, Д.Д. Тумачев [и др.] // 3-я Международная конференция, посвященная 60-летию ИФТТ РАН «Физика конденсированных состояний» : сб. тр. (29 мая – 02 июня 2023) / Черноголовка. – 2023. – С. 24.
5. Левченко, А.А. Генерация вихревого движения волнами на поверхности мелкой и глубокой воды / А.А. Левченко, С.В. Филатов, А.В. Поплевин [и др.] // 3-я Международная школа-конференция молодых ученых "Кайбышевские чтения": сб. тр. (16-20 октября 2023) / Уфа. – 2023. – С. 74.
6. Поплевин, А.В. Экспериментальное изучение процесса затухания вихревого движения на поверхности мелкой и глубокой воды / А.В. Поплевин // XXI научная школа «Нелинейные волны – 2024» : сб. тр. (5–11 ноября 2024) / Нижний Новгород. – 2024. – С. 192.
7. Поплевин, А.В. Экспериментальное исследование затухания вихревого движения на поверхности воды разной глубины / А.В. Поплевин // 4-я Международная конференция «Физика конденсированных состояний» ФКС-2025 : сб. тр. (2 – 6 июня 2025) / Черноголовка. – 2025. – С. 127.

Личный вклад. Все экспериментальные данные, представленные в работе, были получены при непосредственном участии автора. Исследования выполнены в Лаборатории Квантовых Кристаллов ИФТТ РАН в период с 2019 по 2025 гг.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 6

публикациях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, определённых ВАК:

- H1 The formation of Pareto distribution in tracer systems on the water surface / S.V. Filatov, A.V. Poplevin, A.A. Levchenko [et al.] // Results in Physics. — 2021. — Vol. 27. — P. 104446.
- H2 Pareto distribution in the system of polyamide particle clusters on the water surface / S.V. Filatov, E.V. Lebedeva, A.A. Levchenko [et al.] // Results in Physics. — 2021. — Vol. 29. — P. 104677.
- H3 Generation of stripe-like vortex flow by noncollinear waves on the water surface / S.V. Filatov, A.V. Poplevin, A.A. Levchenko, V.M. Parfenyev // Physica D: Nonlinear Phenomena. — 2022. — Vol. 434. — P. 133218.
- H4 Features of the generation of vortex motion by waves on the surface of shallow and deep water / S.V. Filatov, A.V. Poplevin, A. M. Likhter [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2022. — Vol. 16, № 6. — P. 1135–1145.
- H5 Vortex motion on the surface of shallow and deep water / A.V. Poplevin, A.A. Levchenko, A. M. Likhter [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2024. — Vol. 18, № 3. — P. 717–725.
- H6 Experimental Observation of Transition from Two-Dimensional Turbulent Vortex Flow of Water to Three-Dimensional / A.V. Poplevin, A.A. Levchenko, A. M. Likhter [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2025. — Vol. 19, № 3. — P. 616–620.

Объем и структура работы. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Полный объём работы составляет 99 страниц, включая 43 рисунка. Список литературы содержит 85 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, показана степень её разработанности, сформулированы цели и задачи исследования. Представлены научная

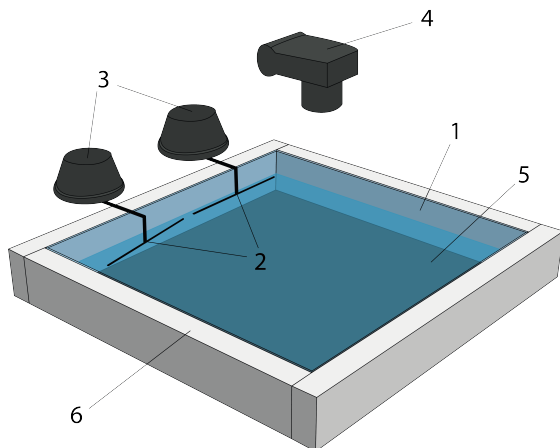


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: (1) — ванна, (2) — плунжеры, (3) — приводы плунжеров, (4) — камера, (5) — вода, (6) — теплоизоляция.

новизна и практическая значимость работы, описаны методология и методы, обоснована их достоверность. Кроме того, приведены сведения об апробации результатов, личном вкладе автора и публикациях по теме диссертации.

Первая глава содержит обзор основных понятий и подходов, связанных с взаимодействием поверхностных волн и формированием вихревых течений. Рассмотрены дисперсионные свойства волн, дрейф Стокса, формирование вихревых решёток и крупномасштабных вихревых течений, а также влияние поверхностной плёнки на поверхностные течения. Отдельное внимание уделено механизмам кластеризации частиц на поверхности жидкости.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию формирования полосообразных вихревых течений слабо-неколлинеарными поверхностными волнами, описана методика эксперимента, результаты наблюдений и обсуждение механизмов образования.

Исследования проводились в экспериментальной установке, схема которой показана на рисунке 1. Она включает ванну размером $70 \times 70 \times 20$ см, изготовленной из стекла толщиной 1 см, установленную на виброизолирующем столе Standa. Ванна заполнялась дистиллированной водой до глубины $d = 10$ см, сверху закрывалась прозрачным стеклом для защиты от пыли. Возбуждение волн осуществлялось двумя волнопродукторами, представляющими собой плунжеры из нержавеющей стали (диаметр 1 см, длина 30 см), приводимые в действие сабвуферами Pioneer TS-W254R

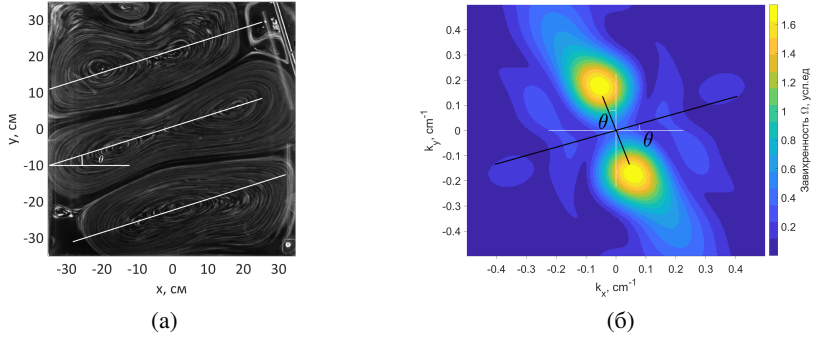


Рис. 2: (а) Треки полиамидных частиц, находящихся на поверхности жидкости, полученные через 1000 секунд после начала накачки. (б) Распределение вертикальной завихренности в k -пространстве, полученные через 1000 секунд после начала накачки. Концы чёрных линий обозначают положение пиков, рассчитанных теоретически с использованием закона дисперсии $\omega^2 = gk$ и условий резонанса, определяющих угол $2\theta = \arctan(3/4)$. Амплитуда волны, распространяющейся вдоль оси X , в стационарном режиме составляет 0.43 мм.

мощностью 250 Вт. Один плунжер был установлен под углом 19° к стенке, другой – параллельно ей. Синусоидальный сигнал с частотой 2.34 Гц задавался двухканальным генератором Agilent 33522B, усиливались и подавались на приводы; разность фаз между каналами составляла $\psi = \pi/2$.

Для визуализации поверхностного течения на воду наносились полиамидные частицы диаметром около 30 мкм, формирующие плоские кластеры размером 0.33 мм, которые полностью увлекались потоком. Посредством обработки видеоизображений пакетом PIVLab [13] для MATLAB происходило восстановление полей скоростей и вычисление вертикальной завихренности. Одновременно с этим регистрировались вертикальные колебания поверхности методом оптических искажений трафарета, подсвеченного светодиодами под дном ванны [14].

Спустя 1000 секунд после начала накачки на поверхности жидкости формируются 3 вихря (рисунок 2а), наклонённых под углом $\theta = 18^\circ$ к оси и имеют удлинённую форму. Можно сказать, что они образуют три полосы шириной $L = 23$ см каждая, а длина ограничивается размером системы. На рисунке 2б изображено распределение вертикальной завихренности в k -пространстве, где два ярких пика соответствуют вытянутой вихревой структуре, наклонённой под углом $\theta \approx 18^\circ$ к оси X . Ширина наиболее интенсивной вихревой структуры должна быть равна $L = \pi/(2k \sin \theta) \approx 23$ см, что хорошо согласуется с результатами на рисунке 2а.

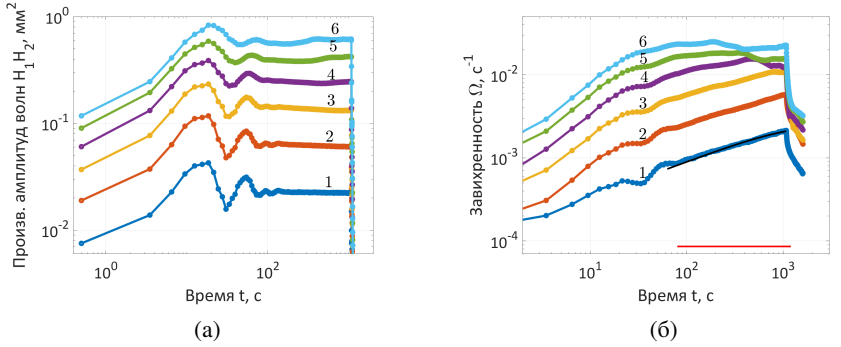


Рис. 3: Зависимость произведения амплитуд волн $H_1 H_2(t)$ от времени (а) и зависимость амплитуды вертикальной завихренности $\Omega(t)$ на поверхности жидкости (б). Разные кривые соответствуют разным значениям амплитуды волны H_1 , распространяющейся вдоль оси X , в стационарном режиме: 1 – 0.17 мм, 2 – 0.29 мм, 3 – 0.43 мм, 4 – 0.57 мм, 5 – 0.72 мм, 6 – 0.85 мм. Амплитуда второй волны $H_2 = 0.77H_1$, см. рисунок 3а. На рисунке 3б также показан теоретический результат, соответствующий модели при модуле сжатия поверхностной плёнки $\varepsilon = 0.37$ и времени $T_E = 1001$ с (чёрная линия), а также снос Стокса, оценённый по формуле (1) при $t > 10^2$ с (красная линия).

На рисунке 3а показана зависимость произведения амплитуд $H_1 H_2$ от времени для разных интенсивностей накачки. Стоячие волны устанавливаются в течение первых пяти секунд, т.е. за время, которое приблизительно равно времени пробега волн от плунжеров до противоположных стенок и обратно. Биения амплитуд колебаний затухают полностью примерно через 100 секунд, после чего произведение амплитуд становится постоянным. На рисунке 3а представлена зависимость $\Omega(t)$, начиная с 0.5 секунды после начала эксперимента. На временах короче 100 секунд она следует за изменениями произведения $H_1 H_2(t)$ амплитуд волн. На более длительных временах амплитуда волн не меняется, но завихренность $\Omega(t)$ (см. рисунок 3б) продолжает увеличиваться, т.е. наблюдается накопление Эйлера вклада $\Omega_E(t)$, поскольку вклад дрейфа Стокса $\Omega_S(t)$ остаётся на постоянном уровне.

В рамках теоретической модели вихревое движение, генерируемое ортогональными поверхностными волнами, описывается двумя вкладами: быстро нарастающим Стоксовым вкладом:

$$\Omega_S = \omega k^2 H_1 H_2 \sin 2\theta \cos^2 \theta \cos [2ky' \sin \theta]. \quad (1)$$

и медленно нарастающим Эйлеровым вкладом:

$$\Omega_E = \left(2 + \frac{\epsilon^2 / \cos^2 \theta}{2\sqrt{2}\gamma(\epsilon^2 - \epsilon\sqrt{2} + 1)} \right) \omega k^2 H_1 H_2 \times \cos^3 \theta \cos[2ky' \sin \theta] \operatorname{erf} \left[\sqrt{t/T_E} \right]. \quad (2)$$

Измеренная в эксперименте зависимость $\Omega(t)$ хорошо описывается суммой двух вкладов (1) и (2), представленной на рисунке 3б чёрной линией при модуле сжатия поверхностной плёнки $\epsilon = 0.37$ и времени $T_E = 1001$ с.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- в данной работе впервые экспериментально показано, что поверхностные волны, распространяющиеся под небольшим углом друг к другу, могут формировать полосообразное вихревое течение, масштаб которого определяется волновыми параметрами;
- выделены два вклада в вертикальную завихренность: быстро возникающий вклад Стокса и медленно накапливающийся Эйлеров вклад, описываемый функцией ошибок.

Третья глава посвящена исследованию особенностей вихревого движения на поверхности мелкой и глубокой воды, включая статистические свойства течений и переход от двумерного к трёхмерному режиму турбулентности.

В данной серии экспериментов использовались плунжеры длиной 68 см, расположенные параллельно смежным стенкам ванны на расстоянии ≈ 10 мм; глубина воды изменялась от 2 см до 19 см для исследования её влияния на формирование вихревого течения. Для визуализации потоков использовался вертикальный лазерный лист, подсвечивающий декорирующие частицы полиамида РА-12. Частота колебаний плунжеров составляла 6 Гц.

Функция плотности вероятности (PDF) модуля завихренности хорошо описывается функцией Гаусса на начальных временах при всех амплитудах волн накачки как в условиях мелкой воды (см. рисунки 4а и б), так и в условиях глубокой воды. В то время как PDF энергии описывается нормальным распределением только при малых амплитудах волн накачки. На поверхности глубокой воды распределения близки к нормальному лишь при начальных временах накачки, тогда как при больших временах наблюдается деформация распределения в результате возникновения крупномасштабного вихревого течения (см. рисунки 4в и г).

Затухание энергии и энтропии также зависит от глубины: на мелкой воде (2 см) формируется один крупный вихрь, и затухание как энергии, так и энтропии по-

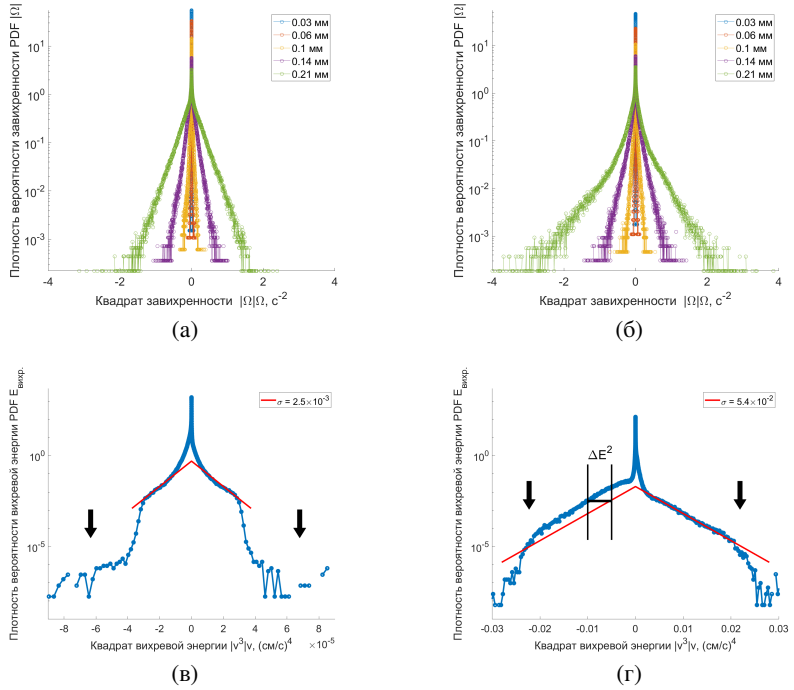
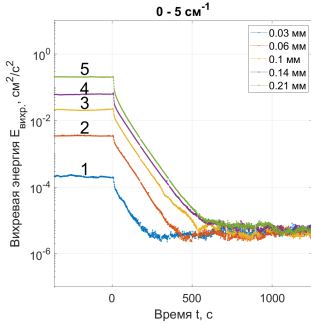


Рис. 4: PDF квадрата завихренности на поверхности воды через (а) 19 и (б) 1000 секунд после начала накачки при глубине 2 см; PDF энергии вихревого движения на поверхности воды при глубине (в) 2 см и (г) 19 см через 1000 секунд после начала накачки (амплитуды волн 0.03 и 0.04 мм соответственно).

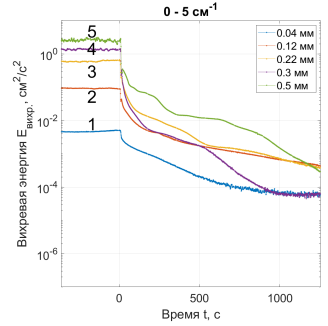
сле выключения накачки описывается экспоненциальным законом (см. рисунок 5а), обусловленным трением о дно. На глубокой воде возникают два вихря, а временные зависимости энергии и энтропии после выключения накачки оказываются не только неэкспоненциальными, но и немонотонными (см. рисунки 5б-г), что указывает на взаимодействие поверхностных и объёмных течений. При увеличении глубины от 2 до 4 см происходит переход от двумерной вихревой турбулентности к трёхмерной, что видно на рисунках 5д и г.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

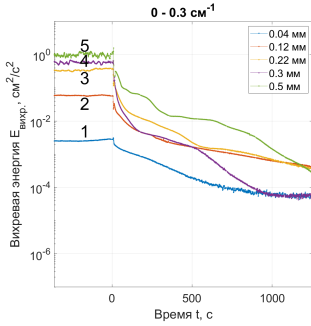
- PDF завихренности на ранних стадиях описываются гауссовой функцией, в то время как распределение энергии зависит от глубины и времени накачки.
- На мелкой воде затухание вихрей определяется трением о дно и имеет экс-



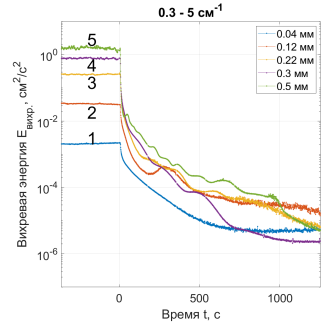
(а)



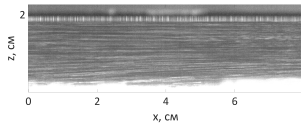
(б)



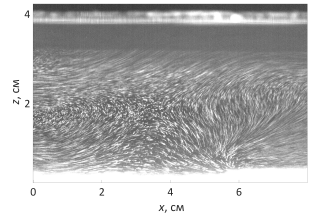
(в)



(г)



(д)



(е)

Рис. 5: (а–г) Зависимости энергии вихревого движения $E_k(t)$ от времени при постоянной накачке волнами разной амплитуды и после её выключения: (а) диапазон $0-5 \text{ см}^{-1}$ — глубина 2 см; (б) $0-5 \text{ см}^{-1}$, (в) $0-0.3 \text{ см}^{-1}$, (г) $0.3-5 \text{ см}^{-1}$ — глубина 19 см. (д, е) Треки полиамидных частиц в объёме воды глубиной 2 см (д) и 4 см (е) через 600 секунд после включения накачки при амплитуде волны 0.21 мм. Момент выключения накачки соответствует нулевой минуте.

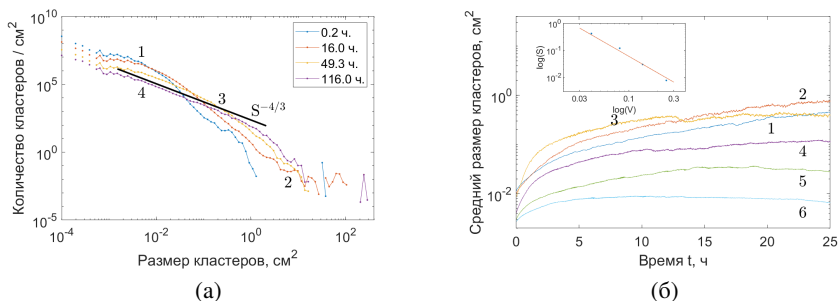


Рис. 6: (а) Распределение нормализованного числа структур на поверхности воды по их площади $N(S)$ через 12 минут (1), 16 часов (2), 49.3 часа (3) и 116 часов (4) после выключения накачки. Средняя скорость поверхностного течения составляет 0.01 см/с. (б) Зависимость средней площади кластеров $S_{\text{ср}}$ на поверхности воды от времени при различных значениях скорости фоновго течения в полулогарифмических координатах. На вставке показана зависимость максимальной средней площади кластеров от скорости течения на поверхности в логарифмических координатах (лог–лог масштаб). 1 – 0.006 см/с, 2 – 0.01 см/с, 3 – 0.04 см/с, 4 – 0.08 см/с, 5 – 0.14 см/с, 6 – 0.25 см/с.

попенциальный характер; на глубокой воде наблюдается взаимодействие поверхностных и объёмных течений.

Четвёртая глава посвящена исследованию процессов кластеризации полиамидных частиц на поверхности жидкости и их статистического описания.

В экспериментах по кластеризации частиц полиамида РА-12 использовалась ванна 70×70 см, заполненная дистиллированной водой. Частицы распылялись над ванной и опускались на поверхность воды под действием силы тяжести. Для формирования равномерного распределения частиц полиамида на поверхности использовалось интенсивное воздействие плунжеров, возбуждавших волны и вихри большой амплитуды; скорость течения в жидкости достигала 10 см/с. После выключения накачки выполнялась серия фотосъёмок поверхности в течение 120 ч: с интервалом 5 с в первые 1,5 ч и 30 с — оставшееся время. Обработка полученных изображений проводилась в центральной области размером 50×50 см². Эксперименты проводились при разных фоновых скоростях течения: от 0.005 см/с до 0.25 см/с.

Проведены длительные наблюдения за процессом трансформации макроскопических квазидвумерных кластеров, формирующихся из полиамидных частиц. Распределение нормализованной плотности вероятности размера кластеров описывается степенной функцией $N(S/S_0) \sim C(S/S_0)^{-n}$, соответствующей распределению Парето (см. рисунок 6а). Эксперименты показали, что средний размер кластеров

обратно пропорционален квадрату скорости фоновое течения (см. рисунок 6б).

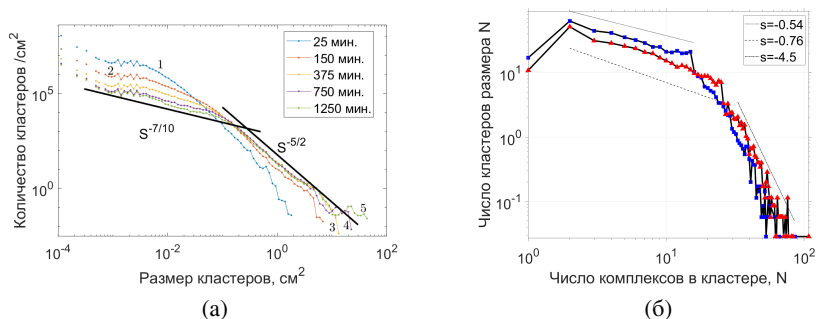


Рис. 7: (а) Распределение нормализованного числа кластеров по площади поверхности $N(S)$ через 25.2 минуты (1), 150 минут (2), 375 минут (3), 750 минут (4) и 1250 минут (5) после выключения возбуждения. (б) Результаты численного моделирования процессов агрегации и фрагментации в системе кластеров на поверхности воды при условии, что разрушение становится возможным, когда число комплексов в кластере достигает 15 (синие кривые) и 25 (красные кривые) или более.

На рисунке 7а распределение числа кластеров демонстрирует излом и два степенных участка, что указывает на различие механизмов кластеризации для малых и больших масштабов. На малых размерах доминируют локальные процессы, тогда как крупные кластеры формируются за счёт коллективной агрегации. Экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами численного моделирования (см. рисунок 7б), где воспроизводится тот же характер распределений.

В заключении сформулированы основные результаты проделанной работы.

В ходе работы проведены экспериментальные исследования и теоретический анализ, позволившие установить ключевые закономерности генерации и эволюции вихревых течений, формируемых взаимодействием слабо нелинейных волн на поверхности воды, а также процессов самоорганизации кластерных структур из нейтральных частиц на этой поверхности.

1. Показано, что взаимодействие слабо-неколлинеарных поверхностных волн приводит к формированию полосообразных вихревых течений с характерной шириной, определяемой волновыми параметрами. Вклад в вертикальную завихренность потока складывается из быстро устанавливающегося Стоксова вклада и медленно накапливающегося Эйлера вклада. Существенное увеличение последнего во времени связано с диффузионным характером формирования крупномасштабного течения и определяется условиями на границе, в частности наличием загрязнения

поверхности.

2. Установлено, что глубина воды оказывает определяющее влияние на характер вихревых структур. Энергия и энтрофии вихревого движения после прекращения накачки также зависят от глубины: в мелкой воде наблюдается экспоненциальное затухание, а в глубокой воде – немонотонные колебания, вызванные взаимодействием с объёмными течениями. Кроме того изучены статистические свойства поверхностных вихрей. PDF завихренности от квадрата завихренности при разных глубинах жидкости подчиняется распределению Гаусса. PDF вихревой энергии от квадрата вихревой энергии подчиняется распределению Гаусса при малых амплитудах накачки. Нарушение симметрии распределения происходит за счёт наличия крупномасштабного вихревого течения на поверхности жидкости.

3. Обнаружено, что в процессе кластеризации полиамидных частиц реализуется степенное распределение количества кластеров в зависимости от их площади, подчиняющееся распределению Парето. Суммарная площадь кластеров остаётся постоянной, а их число со временем убывает экспоненциально, что указывает на направленность процессов агрегации. Выявлена ключевая роль фонового течения в формировании распределений кластеров, что подтверждено результатами численного моделирования и хорошо согласуется с экспериментом.

Список литературы

1. Double Cascade Turbulence and Richardson Dispersion in a Horizontal Fluid Flow Induced by Faraday Waves / A. von Kameke, F. Huhn, G. Fernandez-Garcia [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2011. — Vol. 107. — P. 074502.
2. Inverse Energy Cascade and Emergence of Large Coherent Vortices in Turbulence Driven by Faraday Waves / N. Francois, H. Xia, H. Punzmann, M. Shats // *Physical Review Letters*. — 2013. — Vol. 110, № 19. — P. 194501.
3. Mesquita, O.N. Transport by capillary waves / O.N. Mesquita, S. Kane, J.P. Gollub // *Phys. Rev. A*. — 1992. — Vol. 45, № 6. — P. 3700–3704.
4. Nonlinear Generation of Vorticity by Surface Waves / S.V. Filatov, V.M. Parfenyev, S.S. Vergeles [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2016. — Vol. 116, № 5. — P. 054501.
5. Generation of vortices by gravity waves on a water surface / S.V. Filatov, S.A. Aliev,

- A.A. Levchenko, D.A. Khramov // JETP Letters. — 2016. — Vol. 104, № 10. — P. 702–708.
6. Lucassen-Reynders, E.H. Properties of capillary waves / E.H. Lucassen-Reynders, J. Lucassen // *Advances in Colloid and Interface Science*. — 1970. — Vol. 2, № 4. — P. 347–395.
 7. Формирование и затухание вихревого движения на поверхности жидкости / С.В. Филатов, Д.А. Храмов, А.М. Лихтер, А.А. Левченко // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. — 2017. — № 12. — P. 103–108.
 8. Formation and decay of vortex motion on a liquid surface excited by a wave cascade / V.M. Parfenyev, S.V. Filatov, M.Y. Brazhnikov [et al.] // *JETP Letters*. — 2020. — Vol. 111, № 10. — P. 549–561.
 9. Francois, N. Two-dimensional turbulence in three-dimensional flows / N. Francois, H. Xia // *Physics of Fluids*. — 2017. — Vol. 29. — P. 111107.
 10. Harshe, Y.M. Universal breakup of colloidal clusters in simple shear flow / Y.M. Harshe, M. Lattuada // *Journal of Physical Chemistry B*. — 2016. — Vol. 120, № 29. — P. 7244–7252.
 11. Restructuring and break-up of two-dimensional aggregates in shear flow / N.D. Vassileva, D. van den Ende, F. Mugele, J. Mellema // *Langmuir*. — 2006. — Vol. 22, № 11. — P. 4959–4967.
 12. Higashitani, K. Two-dimensional simulation of the breakup process of aggregates in shear and elongational flows / K. Higashitani, K. Iimura // *Journal of Colloid and Interface Science*. — 1998. — Vol. 204, № 2. — P. 320–327.
 13. Thielicke, W. PIVlab – towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB / W. Thielicke, E. Stamhuis // *Journal of Open Research Software*. — 2014. — Vol. 2.
 14. A technique for registering wave and vortex motions on a liquid surface / S. Filatov, A. Levchenko, M.Y. Brazhnikov, L. Mezhev-Deglin // *Instruments and Experimental Techniques*. — 2018. — Vol. 61. — P. 757–763.