

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 изучению процессов, при которых нелинейные поверхностные волны приводят к возникновению устойчивого вихревого движения на водной поверхности. Такие процессы играют важную роль в формировании крупномасштабных течений и обеспечивают перенос энергии в природных и технических системах, что делает их понимание существенным для современной физики жидкости. Несмотря на наличие развитого теоретического аппарата, количественные экспериментальные исследования, позволяющие проследить, как именно волны формируют вихревую структуру потока и как происходит переход к более сложным режимам течения, в литературе представлены крайне ограниченно. Выполненное исследование восполняет этот разрыв, предоставляя большой объем новых экспериментальных данных о механизмах зарождения вихрей и особенностях их развития во времени, что подтверждает высокую актуальность выбранной научной задачи.

Целью представленной работы являлось получение достоверных экспериментальных данных, позволяющих охарактеризовать механизмы образования вихревого движения под воздействием слабонеколлинеарных поверхностных волн и установить статистические свойства течений, включая закономерности кластеризации частиц на водной поверхности.

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 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.

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 содержит изложение базовых представлений о механизмах формирования вихревых течений, возникающих при действии поверхностных волн, а также аналитический обзор научных публикаций, посвящённых волновым и вихревым системам.

Во второй главе представлены результаты серии лабораторных экспериментов, в ходе которых исследовано формирование вихревого движения на поверхности воды при взаимодействии двух стоячих волн, распространяющихся под малым углом друг к другу. Показано, что такое взаимодействие приводит к возникновению устойчивого течения полосообразного типа, пространственные характеристики которого определяются параметрами волнового возбуждения. Установлено, что наблюдаемая завихренность складывается из быстрого вклада, связанного с дрейфом Стокса, и более медленного Эйлера компонента, а полученные параметры течений находятся в согласии с теоретическими моделями.

В третьей главе рассмотрены закономерности эволюции вихревого течения на поверхности воды при разных глубинах слоя. Показано, что характер затухания энергии и энтропии с течением времени определяется глубиной: в мелком слое наблюдается монотонное экспоненциальное снижение, тогда как при большой глубине изменение носит немонотонный характер из-за обмена энергией между поверхностными и объёмными вихрями. Установлено также, что на начальном этапе возбуждения распределение модуля завихренности близко к гауссовскому при любых амплитудах волн, в то время как для распределений энергии выявлены заметные отклонения от нормального закона.

В четвёртой главе рассмотрены экспериментальные результаты, полученные при изучении кластеризации полиамидных частиц, используемых для визуализации течения на поверхности воды. Установлено, что частицы не распределяются равномерно, а образуют устойчивые группы, формирование и динамика которых связаны с пространственной структурой вихревого движения. Показано, что распределение площадей кластеров описывается степенным законом Парето на протяжении широкого временного интервала, а сопоставление экспериментальных данных с численным моделированием демонстрирует их согласованность и подчёркивает влияние фонового течения на наблюдаемое распределение.

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 поверхностных 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^{-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 диссертационной работы неоднократно представлялись автором на научных конференциях, где получили профессиональное обсуждение. Самостоятельный вклад А.В. Поплевина в постановку экспериментов, обработку полученных данных и интерпретацию результатов не вызывает сомнений. По материалам исследования опубликовано шесть статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК.

Соответствие диссертационной работы критериям, предъявляемым к диссертациям

Диссертация Поплевина Антона Валерьевича на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, в котором решены задачи, имеющие значимость для развития физики конденсированного состояния. Полученные результаты вносят вклад в экспериментальное изучение взаимодействия поверхностных волн и вихревого движения и дают новое представление о механизмах, связанных с переходом к турбулентным режимам течения на поверхности жидкости. Работа отличается логической целостностью: главы связаны между собой, а выводы непосредственно опираются на полученные экспериментальные данные. Использование современных методов визуализации течений, включая PIV-измерения, трекинг частиц и FFT-анализ, обеспечило высокую степень надёжности результатов. Научные положения, выносимые на защиту, обладают новизной и достаточным обоснованием.

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

1. В диссертации представлен хороший, грамотно написанный обзор литературы, однако, поскольку объектом исследований являются капиллярные волны, можно было бы упомянуть большой цикл работ по турбулентности гравитационно-капиллярных волн, выполненный N.Mordant и соавторами, например: Aubourg Q., Mordant N. Nonlocal resonances in weak turbulence of gravity-capillary waves // Physical review letters. 2015. V. 114 (14), 144501

2. В диссертации встречаются неточные формулировки и опечатки, например, на стр. 30 имеется фраза «Подчеркнём, что направление распространения второй волны не совпадает с перпендикулярным наклоном плунжера», а в формуле (17) имеется опечатка в индексе.

3. На стр. 33 имеется утверждение: «Видно, что положение пиков на распределении волновой энергии в k -пространстве практически не меняется по мере увеличения амплитуды волны. Положение пиков на распределении вертикальной завихренности в Фурье-пространстве несущественно, но меняется». Является ли последнее следствием влияния завихренности, возникающей по мере формирования крупномасштабных вторичных течений при увеличении амплитуды колебаний?

4. В диссертации встречается буквальный перевод ряда терминов из зарубежной

литературы, для которых имеется устоявшаяся русскоязычная терминология. Например, используется термин «лазерный лист» (стр. 43) вместо «лазерный нож», «плоскость лазерного ножа», на стр. 60 имеется фраза, в которой вместо понятия «кор вихря» можно было использовать «ядро вихря».

5. На стр. 49 указано: «На рисунке 19в,г показаны зависимости модуля завихренности от времени $|\Omega(t)|$, рассчитанного по формуле 14.» По-видимому, речь идет об осредненном по области среднем квадратическом значении (RMS) энстрофии. Ниже по тексту вводится обозначение $|\Omega|_{av}$, которое, по-видимому, относится к установившемуся стационарному значению $|\Omega(t)|$ после завершения переходного процесса. Далее по тексту идет речь о функции плотности вероятности (PDF) амплитуд модуля завихренности $|\Omega|$. При внимательном чтении можно понять, о чем идет речь. Тем не менее можно было бы ввести более строгие определения и обозначения для осредненных по пространству и локальных величин.

6. В главе 4 методика описана очень кратко. Можно было бы добавить краткое описание о влиянии суточных изменений температуры, которые, по-видимому, присутствуют на рис. 33. Было ли это влияние устранено в теплоизолированной кювете? Из описания не совсем понятно, как изолировалась кювета от атмосферы лаборатории? Могли ли иметь значение какие-либо электростатические эффекты?

7. В обзоре литературы к главе 4 можно было бы более подробно описать различные механизмы сближения частиц в жидкости. В ИГиЛ СО РАН были выполнены интересные исследования одного из механизмов: Стебновский С.В. О механизме коагуляции дисперсных элементов в средах, изолированных от внешних воздействий // ПМТФ. 1999. Т. 40, №4. С. 156-161.

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», утвержденному 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 «Прикладная гидродинамика» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук от 03 декабря 2025 г., протокол № 29.

Официальный оппонент:

Ерманюк Евгений Валерьевич, доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», Врио директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук

04 декабря 2025 г.

Согласен на обработку персональных данных

04 декабря 2025 г.



Ерманюк Евгений Валерьевич

Ерманюк Евгений Валерьевич

Подпись Ерманюка Е.В. заверяю
Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН
кандидат физико-математических наук

А.К. Хе

04.12.2025

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15

<http://www.hydro.nsc.ru>

Телефон: (383)333-12-41; моб. тел.: +79134542272

факс: (383)333-16-12

адрес электронной почты: ermanyuk@hydro.nsc.ru