

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Досаева Александра Сергеевича «ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ВОЛН НА ВОДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
МЕТОДА КОНФОРМНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ», представленную на  
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 1.6.17 – океанология

Диссертационная работа А.С. Досаева посвящена разработке и применению численных методов моделирования нелинейных волн на воде на основе метода конформных преобразований. Работа выполнена в Федеральном исследовательском центре «Институт прикладной физики Российской академии наук» и затрагивает широкий круг актуальных задач современной нелинейной гидродинамики и океанологии.

Актуальность темы исследования не вызывает сомнений. Изучение нелинейной динамики поверхностных волн имеет фундаментальное значение для физической океанологии, дистанционного зондирования морской поверхности, исследования механизмов ветро-волнового взаимодействия, процессов генерации и диссипации энергии волнения, а также для прикладных задач, связанных с прогнозированием опасных морских явлений. Современные задачи моделирования волнения требуют высокоточных вычислительных методов, способных учитывать существенно нелинейные эффекты, взаимодействие волн различных масштабов, влияние поверхностного натяжения, вязкости и сдвиговых течений. В этой связи развитие методов моделирования на основе конформных преобразований представляет собой перспективное и востребованное направление исследований.

Научная новизна работы определяется рядом оригинальных результатов, полученных автором. В диссертации предложена численная модель ветровых волн дециметрового диапазона на основе уравнений Дьяченко с учетом ветровой накачки и вязкого затухания; установлен физический механизм горизонтальной асимметрии необрушающихся гравитационно-капиллярных волн; построены полностью нелинейные

решения для уединенных волн на глубокой воде с постоянной завихренностью; исследованы взаимодействия таких солитонов; предложена регуляризация квазитрехмерной конформной модели, устраняющая нефизическую неустойчивость для почти поперечных возмущений. Полученные результаты являются новыми и имеют существенное значение для развития численных методов океанологической гидродинамики.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 106 страниц, работа содержит 32 рисунка и 136 библиографических источников.

Во введении автор подробно обосновывает актуальность темы исследования, анализирует современное состояние области численного моделирования волн на воде и формулирует цели и задачи работы. Значительное внимание уделено обсуждению ограничений существующих моделей, основанных на уравнениях Навье-Стокса, а также преимуществ методов, использующих потенциальное приближение и конформные преобразования. Автор аргументированно показывает, что полностью нелинейные методы моделирования являются особенно эффективными при исследовании коротковолновой части спектра ветровых волн и процессов, связанных с сильной нелинейностью. Во введении также сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения о научной новизне, практической значимости, достоверности результатов и апробации работы.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена истории развития методов численного моделирования волн на воде. Автор последовательно рассматривает эволюцию подходов, начиная от ранних методов MAC и PIC, основанных на решении уравнений Навье-Стокса, и заканчивая современными потенциальными моделями и спектральными методами. Подробно обсуждаются методы VOF, MEL, HOSM, а также модели на основе интегральных уравнений и конформных преобразований. Существенным достоинством главы является не только широкий охват литературы, но и критический анализ преимуществ и ограничений различных методов. Автор показывает, что использование конформных координат обеспечивает высокую вычислительную эффективность благодаря применению быстрого преобразования Фурье и позволяет моделировать существенно нелинейные

режимы волнения. Обзор литературы хорошо структурирован и демонстрирует высокий уровень владения материалом.

Во второй главе исследуется физический механизм горизонтальной асимметрии необрушающихся гравитационно-капиллярных волн. Данная задача имеет важное значение для интерпретации данных дистанционного зондирования морской поверхности и понимания процессов ветрового волнового взаимодействия. Автор рассматривает динамику крутых волн дециметрового диапазона, генерирующих паразитную капиллярную рябь на переднем склоне волны. В работе подробно анализируются существующие гипотезы возникновения асимметрии, обсуждаются экспериментальные данные и ограничения ранее предложенных объяснений.

Особый интерес представляет построенная автором численная модель, основанная на уравнениях Дьяченко с учетом ветровой накачки и вязкого затухания. Для учета диссипативных эффектов используются модифицированные граничные условия, а ветровое воздействие моделируется специальной параметризацией внешнего давления. Автор подробно выводит систему уравнений в конформных координатах и описывает используемую численную схему. Важным достоинством работы является сопоставление результатов моделирования с данными лабораторных экспериментов и более точными расчетами на основе уравнений Навье—Стокса.

Наиболее значимым результатом второй главы является установление механизма горизонтальной асимметрии необрушающихся волн. Показано, что в отсутствие обрушений ключевую роль играют напряжения Рейнольдса, связанные с пакетом паразитной капиллярной ряби. При этом полученные значения асимметрии оказываются существенно меньше наблюдаемых в экспериментах при сильном ветре, что позволяет сделать вывод о важной роли микрообрушений и обрушений в формировании асимметрии реальных волн. Полученные результаты представляют существенный научный интерес и являются важным вкладом в физику ветрового волнения.

Третья глава посвящена моделированию уединенных волн на глубокой воде с постоянной завихренностью. Рассматриваемая задача является актуальной в связи с необходимостью учета влияния вертикально-неоднородных течений на динамику поверхностных волн. Автор отмечает,

что наличие сдвигового течения существенно изменяет дисперсионные и нелинейные свойства волн, а также приводит к существованию новых типов решений — солитонов на глубокой воде.

В главе построены полностью нелинейные решения уравнений Эйлера для волн конечной амплитуды на фоне постоянной завихренности. Автор исследует стационарные решения, анализирует распад локализованных возмущений и моделирует взаимодействие солитонов. Представляет интерес вывод о том, что рассматриваемые солитоны устойчивы при амплитудах ниже критической и способны формироваться в результате эволюции локализованных начальных возмущений. Показано также, что взаимодействие солитонов носит почти упругий характер, однако сопровождается фазовым сдвигом, отсутствующим в интегрируемой модели Бенджамина-Оно.

Следует отметить высокий уровень численного исследования и аккуратность интерпретации результатов. Полученные выводы могут представлять интерес не только для гидродинамики поверхностных волн, но и для изучения внутренних волн в океане.

Четвертая глава посвящена исследованию квазитрехмерной конформной модели и моделированию подковообразных волн. Автор рассматривает перспективную модель Рубана, основанную на предположении о медленном изменении полей в поперечном направлении. Основное внимание уделено анализу применимости данной модели для описания существенно трехмерных процессов.

Важным результатом главы является предложенная автором регуляризация модели, устраняющая нефизическую неустойчивость, возникающую для коротковолновых возмущений, распространяющихся почти перпендикулярно к основному направлению волны. Автор демонстрирует, что после регуляризации модель корректно воспроизводит развитие неустойчивости волны Стокса, связанной с 5-волновыми взаимодействиями, а также формирование подковообразных волн. Сравнение с результатами анализа на основе точных трехмерных уравнений показывает практически идеальное совпадение положения зон неустойчивости и удовлетворительное совпадение величин инкремента. Данный результат представляет значительный практический интерес,

поскольку открывает возможности применения квазитрехмерных моделей для решения широкого круга океанологических задач.

Работа выполнена на высоком научном уровне. Автор демонстрирует глубокое понимание физики нелинейных волн, современных методов вычислительной гидродинамики и математического аппарата теории потенциальных течений. Диссертация содержит значительный объем оригинальных численных исследований. Полученные результаты являются достоверными, что подтверждается сравнением с экспериментальными данными, аналитическими результатами и расчетами других авторов.

Следует отметить хорошее качество оформления диссертации, логичность изложения и высокий уровень иллюстративного материала. Автореферат и опубликованные работы адекватно отражают содержание диссертации.

В качестве замечаний можно отметить следующее.

1. В ряде мест диссертации обсуждение физических механизмов носит преимущественно качественный характер, тогда как количественный анализ вкладов различных факторов мог бы быть расширен.
2. При обсуждении ограничений квазитрехмерной модели было бы полезно более подробно рассмотреть границы применимости приближения медленной поперечной изменчивости.
3. Некоторые разделы обзора литературы являются весьма подробными и могли бы быть несколько сокращены без ущерба для содержания работы.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации и не затрагивают основных научных результатов работы.

Диссертация Досаева Александра Сергеевича «Численное моделирование нелинейной динамики волн на воде с использованием метода конформных преобразований» является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей новые научные результаты, имеющие существенное значение для развития методов математического моделирования и физики поверхностных волн.

**Я считаю, что представленная диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 29.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Проведенная работа полностью соответствует специальности 1.6.17 Океанология, и ее автор, Досаев Александр Сергеевич, несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.**

Я, Шамин Роман Вячеславович, даю согласие на обработку диссертационным советом моих персональных данных, связанных с защитой данной диссертации.

Шамин Роман Вячеславович

доктор физико-математических наук (специальность 25.00.20 -- океанология)

Государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский городской университет управления Правительства Москвы имени Ю. М. Лужкова», заведующий кафедрой. 107045, г. Москва, ул. Сретенка, д. 28,

+7-916-372-88-42, ShaminRV@ks.mos.ru

Подпись Р.В. Шамина заверяю.

