

ОТЗЫВ

Официального оппонента д.ф.-м.н. Петрова Александра Георгиевича на диссертационную работу **Рязанова Даниила Александровича** «Бигармонические аттракторы внутренних волн» представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) – «Механика жидкости газа и плазмы»

Актуальность темы диссертации обеспечивается существенным влиянием рассматриваемых в диссертации эффектов фокусировки внутренних волн, называемых аттракторами внутренних волн, на процессы протекающие в мировом океане. Учет фокусировки внутренних волн в океанах и наличия аттракторов внутренних волн способен пролить свет на тонкости понимания источников вертикального перемешивания и волновой турбулентности. Помимо стратифицированных жидкостей результаты работы могут быть обобщены и на вращающиеся слои жидкости. Кроме теоретических исследований в ходе выполнения диссертационной работы был разработан программный комплекс для решения задач, требующих моделирования течения несжимаемой неоднородной жидкости. В основу численных расчетов положен квазигидродинамический подход, разработанный в институте прикладной математики им. Келдыша под руководством Б.Н. Четверушкина. Разработанный с его помощью комплекс применялся для моделирования аттрактора внутренних волн и сравнивался с результатами моделирования методом спектральных элементов. Сравнение показало высокую точность разработанного комплекса. Показано, что по сравнению с методом спектральных элементов он обладает большей универсальностью. С использованием открытого исходного кода OpenFOAM программный комплекс может иметь очень широкую область применения. Например, для численных экспериментов по осаждению частиц малой

инерции в неоднородной жидкости и в условиях сложной геометрии, что невозможно с использованием метода спектральных элементов.

Общая характеристика работы. Во введении к диссертации поставлены цели и задачи проведенного исследования, обозначена актуальность, его значимость и новизна. Там же говорится о возможном интересе к проделанной работе со стороны исследователей океана, биологов и инженеров, перечислены возможные приложения работы. Введение включает в себя раздел посвященный личному вкладу автора, выносимым на защиту положениям и списку публикаций и конференций, в которых автор принимал участие.

Обзор литературы, следующий за введением, сосредоточен на истории теории внутренних волн, существующих методов их исследования, основных уравнениях, описывающих динамику стратифицированной жидкости, фокусировке внутренних волн и понятиях аттрактора внутренних волн как продукта этой фокусировки.

За обзором литературы следует глава о методах исследования аттракторов внутренних волн. Первый из этих методов – метод трассировки лучей, полученный на основе модели идеальной жидкости в линейном приближении. Затем следует описание экспериментальных установок, которые воспроизводят явление аттрактора внутренних волн в лабораторных условиях и, наконец, идет раздел, посвященный численным исследованиям. Особое внимание в этой главе уделяется квазигидродинамическому подходу и его реализации на базе открытого программного продукта OpenFOAM. Метод обладает рядом преимуществ перед классическими подходами: методом конечного объема (алгоритм PISO), методом спектральных элементов.

В главе номер три рассматриваются бигармонические аттракторы внутренних волн, порожденные волнопродуктором, который действует на стратифицированную жидкость комбинированием двух монохроматических

колебаний. Автор диссертации качественно описывает и количественно анализирует полученные результаты в этой главе с использованием интерпретации динамики средней кинетической энергии в резервуаре и частотно-временных характеристик течения в середине одного из лучей бигармонического аттрактора внутренних волн.

Основные выводы и итоги проделанной работы вынесены автором в заключение, а ссылки на использованную при написании диссертации литературу приведены в списке использованных источников.

Научная новизна и достоверность результатов. Результаты, полученные диссертантом в ходе выполнения работы, являются новыми. Во-первых, потому что показана высокая эффективность этого метода на хорошо изученных задачах: обтекание обратного уступа, течение в косоугольной каверне, циркуляция в условиях свободной конвекции, решенных ранее другими методами. Во-вторых, автор применил квазигидродинамический подход к решению новой задачи гидродинамики: формирование бигармонического аттрактора внутренних волн в трапециевидном резервуаре. В-третьих, обнаружено фазовое смещение колебаний горизонтальной компоненты скорости на аттракторе по сравнению с волнопродуктором.

Достоверность полученных результатов подтверждается апробацией на множестве научных конференций и семинаров, в которых участвовал автор, наличием публикаций по теме диссертационного исследования, строгой математической постановкой и надежностью используемых методов. Разработанная диссертантом программа прошла описанные в диссертации процедуры верификации и валидации.

Практическая ценность результатов. Работа представляет ценность для исследователей океана и иных стратифицированных или вращающихся жидкостей, где возникают, распространяются и могут фокусироваться внутренние волны.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы в дальнейших исследованиях аттракторов внутренних волн в условиях реальной геометрии морского дна и наличия малоинерционных твердых частиц.

Замечания:

- 1) В книге Дж. Бэтчелора «Введение в динамику жидкости» в разделе «применение теоремы о количестве движения» приводится решение задачи о внезапном расширении трубы, в которой по формуле $p_2 = p_1 + \rho U_2(U_1 - U_2)$ определяется давление за уступом при малой вязкости жидкости. Неплохо было бы проверить согласованность этого давления с расчетами автора.
- 2) Приведенные численные эксперименты исключительно двумерные, хотя, очевидно, что экспериментальные установки, описанные автором в главе номер 2 трехмерные, как и данные этих экспериментов.
- 3) В работе автор часто приводит аналогии с океаном, при этом не учитывает температурные распределения в своей работе.

Перечисленные замечания не снижают общей ценности работы. Содержание диссертации Д. А. Рязанова соответствует специальности 01.02.05. – «Механика жидкости, газа и плазмы». Исследования, проведенные диссертантом, соответствуют должному научному уровню, результаты представляют важность и интерес для научного сообщества и в полной мере представлены в публикациях и корректно отражены в автореферате.

Считаю, что диссертационная работа «Бигармонические аттракторы внутренних волн» удовлетворяет требованиям Положения ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. (01.02.05) – «Механика жидкости, газа и плазмы», в том числе соответствует требованиям п. 9 положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением

правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор – Рязанов Даниил Александрович заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составил официальный оппонент

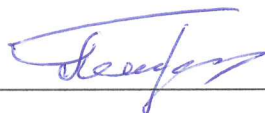
Петров Александр Георгиевич

д.ф.-м.н., профессор, Главный научный сотрудник в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

E-mail: petrovipmech@gmail.com

21.10.2021



А.Г. Петров

Подпись главного научного сотрудника А. Г. Петрова заверяю,

Начальник отдела кадров



Подлесная Н. И.

21.10.2021