

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
**Пермский федеральный
исследовательский центр
Уральского отделения
Российской академии наук**
(ПФИЦ УРО РАН)

ул. Ленина, 13а, г. Пермь, 614990
тел. (342) 212-60-08, факс (342) 212-93-77
E-mail: psc@permisc.ru, http://www.permisc.ru
ОКПО 48420579, ОГРН 1025900517378
ИНН 5902292103, КПП 590201001

22.10.2021 № 337/1256 - 721

на № _____ от _____
[]

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Пермского
федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии
наук



А.А. Барях
2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского
федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской
академии наук

о диссертационной работе Рязанова Даниила Александровича

«Бигармонические аттракторы внутренних волн» на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. (01.02.05) –
механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа Рязанова Д.А. посвящена исследованию подходов для математического моделирования динамики стратифицированной жидкости при периодическом внешнем воздействии. В рамках диссертационной работы рассмотрены внутренние волны в стратифицированной жидкости и их фокусировка в трапецевидном резервуаре. После многократного отражения от стенок резервуара внутренние волны притягиваются к замкнутым траекториям называемыми аттракторами внутренних волн. Форма аттракторов зависит от соотношения между частотой вынужденных колебаний и частотой плавучести. В работе рассматриваются различные способы численного моделирования этого явления:

- 1) Метод спектральных элементов на базе открытого программного пакета Nek5000. Показано соответствие этого метода с данными, полученными в результате экспериментов, обозначены достоинства метода в виде точности и эффективности, а также недостатки в виде сложностей в реализации новых физических моделей и чрезвычайные сложности моделирования течений в областях сложной геометрии.
- 2) Метод конечных объемов на базе открытого программного пакета OpenFOAM. Показаны достоинства метода - легко изменяемый исходный код, простота реализации подходов для моделирования новых физических моделей, и недостатки метода - относительная дороговизна вычислений, наличие различных поправок и коррекций в алгоритме вычисления гидродинамических полей и неудовлетворительное количественное соответствие с результатами эксперимента.

- 3) Реализованный на базе открытого программного пакета OpenFOAM в ходе диссертационного исследования, квазигидродинамический подход. Этот метод имеет достоинства предыдущего подхода, в то же время демонстрирует сеточную сходимость к методу спектральных элементов, устраняя недостаток несоответствия экспериментальным данным.

При помощи реализованного подхода получена картина течения, которая возникает в трапециевидном резервуаре при наличии внешнего воздействия с двумя частотами, приводящими к образованию аттракторов. Показано что при таких условиях в резервуаре возникают два аттрактора внутренних волн. Рассчитаны спектры, возникающие в середине одной из сторон аттрактора, получены частотно-временные диаграммы течения в этой же точке, приведена динамика средней кинетической энергии в резервуаре.

В результате диссертационного исследования показано, что при малых внешних воздействиях сумма средних кинетических энергий в двух резервуарах с аттракторами с высокой точностью равна средней кинетической энергии в резервуаре с бигармоническим аттрактором и соответствующими частотами.

Объём и структура работы. Диссертационная работа изложена на 106 страницах, состоит из введения, трех глав и заключения. Работа содержит 59 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает в себя 90 наименований.

Актуальность темы исследования. Внутренние волны оказывают колоссальное влияние на глобальный климат и постоянно образуются в океанах и атмосфере. В океане внутренние волны могут многократно отражаться от рельефа морского дна, образуя при этом аттракторы внутренних гравитационных волн, которые способны аккумулировать огромные запасы кинетической энергии. Это явление в значительной степени определяет интенсивность вертикального перемешивания, влияет на седиментацию, распространение загрязнений в водоемах, распределение примесей, миграцию живых организмов и эрозию морского дна, инженерных конструкций.

Моделирование аттракторов внутренних волн, является чрезвычайно сложной задачей, поскольку инструменты численной симуляции должны иметь достаточную точность для количественного воспроизведения результатов последовательного отражения внутренних волн от границ расчетной области. До недавних пор с этим справлялись только методы высокого порядка, такие как метод спектральных элементов.

Недостатком метода спектральных элементов является сложность реализации, уже существующие популярные инструменты плохо задокументированы и реализованы с использованием устаревших технологий программирования, более того многие из них не допускают работу со сложной геометрией и реализацию собственных физических моделей, например, седиментации.

В данной работе предлагается не только средство для моделирования аттракторов внутренних волн, но и реализуется альтернативный подход, который может быть применен к широкому классу задач океанологии и гидродинамики.

Рассматриваемая задача вместе с реализованным подходом являются первым шагом к моделированию аттракторов внутренних волн в условиях реальной геометрии океанического дна, в условиях нескольких источников внутренних волн, в условиях наличия частиц малой инерции.

Содержание диссертации. Во введении чётко обозначены цели и задачи проведенного исследования, актуальность, научная новизна и значимость. Кроме того в этом разделе говорится о практической применимости исследования и потенциальном интересе для специалистов в соответствующих областях. Описаны также методы, применяемые в ходе работ, перечислены выносимые на защиту положения.

В первой главе уделяется должное внимание истории интереса к внутренним волнам, проводится обзор методов исследования внутренних волн, вводится понятие аттрактора внутренних волн. Здесь же рассматривается математическая постановка, приведены уравнения, описывающие динамику стратифицированной жидкости.

Вторая глава посвящена обзору современных методов исследования аттракторов внутренних волн, рассмотрены как экспериментальные, так и численные методы исследования этого явления. Рассмотрено исследование свойств волновых течений при помощи трассировки лучей и дисперсионного соотношения, полученного из линеаризованной системы уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска. Обсуждаются также численные методы исследования: метод спектральных элементов, метод конечного объема и реализация квазигидродинамического подхода. Последнему методу уделяется особое внимание, разработанный в ходе выполнения диссертационного исследования комплекс программ детально описан в тексте диссертации, приведены уравнения, их аппроксимация, проведена верификация и валидация.

Третья глава посвящена непосредственно бигармоническим аттракторам внутренних волн, количественному анализу поля скорости и средней кинетической энергии в резервуаре.

В заключении сформулированы выводы диссертационного исследования.

Научная новизна. Картина течения стратифицированной жидкости с периодическим двухчастотным воздействием, полученная Рязановым Д.А. является новым научным результатом. К таковому относится и частотно-временной анализ поля скорости, и анализ зависимости средней кинетической энергии от времени.

Получена новая реализация квазигидродинамического подхода на базе открытого программного комплекса OpenFOAM с использованием современных стандартов программирования. Разработанный комплекс тестировался на известных задачах течения в косоугольной каверне, обратного уступа и свободной конвекции. Кроме того, данные, полученные при расчёте монохроматического аттрактора, демонстрируют сеточную сходимость к экспериментальным данным.

Впервые обнаружено качественное отличие в амплитуде пульсаций на восходящем и нисходящем тренде средней кинетической энергии.

Теоретическая и практическая значимость. Работа представляет интерес для исследователей стратифицированной жидкости и внутренних волн, их зарождения, распространения и фокусировки. Теоретически, бигармонический аттрактор представляет собой не изученную ранее структуру, которая образуется в стратифицированной жидкости при воздействии на нее периодическим двухчастотным возмущением.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для подбора параметров моделирования аттракторов внутренних волн как в лабораторных условиях, так и при численном моделировании.

Разработанный программный комплекс, который сочетает в себе метод конечного объема и квазигидродинамический подход может быть применен исследователями при численном моделировании сжимаемой жидкости в приближении Буссинеска. Эта реализация позволила существенно улучшить точность моделирования методом конечного объема. Комплекс оснащен модулями для моделирования поведения частиц под действием сил сопротивления и плавучести.

Работа поддержана Российским научным фондом, грантом номер 19-11-00169. Исходный код разработанного программного комплекса размещен на сайте-хранилище исходного кода GitHub и открыт для использования и модификации.

Обоснованности и достоверность результатов диссертации. Автор в своей работе использует математические методы достоверность которых не вызывает сомнений. Разработанный в ходе выполнения работ программный комплекс подвергся всестороннему тестированию, был верифицирован на известных задачах механики сплошных сред для проверки адекватности результатов. Разработанный программный комплекс был также валидирован на задаче моделирования монохроматического аттрактора внутренних волн и имеет сеточную сходимость к результатам, полученным в ходе эксперимента. В ходе работы над диссертацией соискатель активно участвовал во всероссийских и международных конференциях, представлял результаты своей работы на научных семинарах, публиковал свои результаты в рецензируемых научных изданиях.

Публикации. Результаты работы изложены в 11 научных работах, 2 из которых входят в список ВАК. Имеется также свидетельство регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора отражен в полной мере в диссертации и автореферате.

Отмеченные недостатки.

- 1) Автор неоднократно говорит о расчетах реального океанического дна, при этом продемонстрированы были только двумерные расчеты в трапециевидном резервуаре.
- 2) Критика алгоритма PISO, которой автор подвергает этот алгоритм, уместна лишь при малых значениях шага по времени и при наличии дополнительных коррекций.
- 3) Точка пробы, которая используется для количественного анализа результатов численного моделирования, выбрана на одной из сторон аттрактора, в то время как гораздо интересней был бы результат в точках взаимодействия аттракторов.
- 4) Некоторые эксперименты проведены с основанием сверху.
- 5) В работе уделяется внимание влиянию вязкости на уширение пучка звуковых волн. Однако, волновой луч конечной ширины испытывает также

дефокусировку интерференционной природы, которая тем сильнее чем больше отношение длины волны к ширине пучка. Интересны оценки влияния этого механизма дефокусировки на ширину пучка звуковых волн в данной задаче.

- 6) В диссертации не рассматриваются схожие эффекты, возникающие во вращающихся жидкостях.
- 7) В тексте работы имеются опечатки

Диссертационная работа Рязанова Д.А. была заслушана и одобрена на научном семинаре Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук 8 августа 2021 года, протокол № 8 - 2021.

Таким образом, диссертация Рязанова Даниила Александровича является законченным научно-квалификационным исследованием, в которой он излагает результаты моделирования бигармонических аттракторов внутренних волн и разработку реализации квазигидродинамического подхода. Данная работа имеет значение для развития методов моделирования динамики стратифицированной жидкости в условиях приближенном к реальным. Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, согласно пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Рязанов Даниил Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. (01.02.05) – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв подготовили

Любимова

Любимова Татьяна Петровна, заслуженный деятель науки РФ, д.ф.-м.н. (механика жидкости, газа и плазмы), профессор, зав. лабораторией вычислительной гидродинамики

Голдобин Денис Сергеевич, к.ф.-м.н. (механика жидкости, газа и плазмы), зав. лабораторией подземной утилизации углерода

22.10.2021

ГГ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермской федеральной исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук

614990, Россия, г. Пермь,
ул. Ленина, 13а,
Телефон: +7 (342) 212-60-08
Факс: +7 (342) 212-93-77
E-mail: psc@permsc.ru

*Любимой Т.П. Любимовой
и ДС Голдобина Д.С. утверждено.*
*И.О. специалиста
по кадрам*
Кабанов
ИФИС УрО РАН

