

На правах рукописи

Рязанов Даниил Александрович

## **Бигармонические аттракторы внутренних волн**

01.02.05 — Механика жидкости газа и плазмы

### **Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в ИСП им. В.П. Иванникова РАН

Научный руководитель: к. ф.-м. н. Сибгатуллин Ильяс Наилевич старший научный сотрудник, института океанологии РАН

Официальные оппоненты: д.т.н., доцент Петров Петр Петрович, профессор кафедры математического обеспечения ЭВМ факультета вычислительной математики и кибернетики Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского (г. Нижний Новгород)

д.т.н., доцент Петров Петр Петрович, профессор кафедры математического обеспечения ЭВМ факультета вычислительной математики и кибернетики Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского (г. Нижний Новгород)

Ведущая организация: Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (г. Новосибирск)

Защита состоится 26 апреля 2021 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.024.01, созданного на базе ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 125047, Москва, Миусская пл., д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПМ им. М.В. Келдыша РАН <http://keldysh.ru>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
к.ф.-м.н.

М.А. Корнилина

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы.

Внутренние волны из-за особенностей своего распространения имеют возможность фокусироваться. Многократное отражение от наклонных поверхностей, которые являются частью рельефа морского дна, ведет к накоплению кинетической энергии и интенсификации движения стратифицированной жидкости. Такое явление называется волновым аттрактором. Волновые аттракторы в океанах из-за значительных запасов кинетической энергии должны влиять на необратимое перемешивание стратифицированной жидкости, седиментацию примесей, поведение живых организмов.

Волновые структуры, называемые волновыми аттракторами, в явном виде воспроизводятся на лабораторных установках, но их моделирование в условиях приближенных к природным имеет ряд значительных сложностей. Прежде всего из-за перехода к турбулентному режиму, большого количества источников внешних возмущений (вместо одного при лабораторных условиях), сложной геометрии морского дна и нелинейный профиль солености. Эти особенности течения в условиях приближенных к реальным может исказить четкую структуру волнового аттрактора, наблюдаемую в лабораторных условиях.

В этой работе рассматривается периодическое воздействие на стратифицированную жидкость с двумя частотами, которые соответствуют двум различным конфигурациям волновых аттракторов. Выясняется возможность существования аттракторов при бигармоническом воздействии на стратифицированную жидкость и способы взаимодействия внутренних волн различных частот.

Решение задач моделирования аттракторов внутренних волн в условиях сложных геометриях, порождаемых источниками возмущения различной частоты и амплитуды поможет описать течения, возникающие в результате многократных отражений внутренних волн от рельефа дна океана. Результаты моделирования позволят дать первичную оценку влияния аттракторов на перемешивание в стратифицированной жидкости,

на процессы седиментации различных веществ, на эрозию конструкций и рельефа в областях повышенной интенсивности движения жидкости, на паттерны поведения различных форм жизни в условиях сосуществования с аттрактором внутренних волн. Результаты работы представляют собой интерес для приложений в океанологии, экологии, биологии, астрофизики и вращающихся технических систем.

**Цель работы** – изучение явления бигармонического аттрактора, которое возникает при воздействии на стратифицированную жидкость двухчастотным волнопродуктором. С этой целью были поставлены следующие задачи **задачи**:

- Нахождение интервала частот внешних воздействий, при которых возникает аттрактор внутренних волн.
- Реализация численных экспериментов с помощью двух подходов: спектрально-элементного и конечно-объемного.
- Разработка новой программы для моделирования аттракторов внутренних волн на основе квазигидродинамического подхода.
- Верификация результатов численного моделирования.
- Описание особенностей волновых режимов при бигармоническом воздействии и значительно отличающихся частотах воздействия и малых амплитудах.
- Описание особенностей волновых режимов при бигармоническом воздействии, близких частотах воздействия и малых амплитудах.
- Описание особенностей нелинейных волновых режимов при бигармоническом воздействии и близких частотах воздействия.
- Сравнение динамики средней кинетической энергии и пульсации кинетической энергии для монохроматического режима и различных бигармонических режимов.

### **Методы решения поставленных задач**

Для решения поставленных задач были использованы методы математического моделирования механики сплошных сред, такие как метод спектральных элементов и метод конечного объема. Для предсказания формы аттрактора внутренних волн использовался метод трассировки

лучей. Для анализа данных использовался метод построения частотно-временных диаграмм при помощи быстрого преобразования Фурье.

**Научная новизна работы** выражается в конкретных результатах:

1. Получены аналитические выражения для границ частотного интервала существования аттракторов внутренних волн.
2. Получена геометрия течения, которая возникает в трапециевидном резервуаре, наполненном стратифицированной жидкостью при воздействии на жидкость внешними возмущениями с двумя различными частотами.
3. Проведён анализ результатов моделирования аттрактора внутренних волн при бигармоническом воздействии, полученных с помощью метода спектральных элементов. Для различных комбинаций возмущающих частот построен спектр, частотно-временная диаграмма и зависимость средней кинетической энергии от времени.
4. Реализован квазигидродинамический подход на базе метода конечного элемента. Проведено сопоставление результатов моделирования методов конечных объемов и методом спектральных элементов.

### **Достоверность результатов**

Достоверность полученных результатов гарантируется строгой математической постановкой, верификацией и валидацией разработанного алгоритма для решения поставленной задачи.

### **Практическая значимость**

Ранее эксперименты по исследованию бигармонических аттракторов, как численные так и натурные, не проводились. Теоретически, бигармонический аттрактор представляет собой новую устойчивую структуру, которая образуется в стратифицированной жидкости при воздействии на нее периодическим двухчастотным возмущением.

Положения и выводы диссертационного исследования могут быть использованы для подбора параметров волнового аттрактора в лабораторных условиях или при численном моделировании. Среди возможных

приложений результатов работы — задачи моделирования аттракторов внутренних волн на сложных геометриях, задачи моделирования течений со сложным спектром частотных воздействий на стратифицированную жидкость. Работа является первым шагом к моделированию течений, возникающих в условиях, приближенных к реальным океаническим, что позволит выяснить форму и вид природных аттракторов внутренних волн. Комбинация методов конечного объёма и квазигидродинамических уравнений позволила добиться существенного улучшения в точности моделирования и дала инструмент к усложнению геометрии расчётной области. Разработанная программа может быть применена не только к задачам моделирования аттрактора, но и к другим задачам гидродинамики с дозвуковыми и трансзвуковыми скоростями.

**На защиту выносятся следующие положения:**

- Найдены аналитические выражения для границ диапазонов частот колебаний волнопродуктора, которые способны порождать аттракторы.
- Показано, что при значительном отличии частот внешних воздействий и малых амплитудах воздействий волновой режим представляет из себя совокупность независимо существующих волновых аттракторов.
- Показано, что при близких частотах внешних воздействий и малых амплитудах возникает режим с биениями, характерной особенностью которых является малая амплитуда пульсаций на убывающем склоне огибающей.
- Показано, что при близких частотах внешних воздействий и средних амплитудах возникают биения, на одном цикле которых успевает происходить переход к турбулентности через триадные резонансы, и реламинаризация.
- Обнаружено наличие фазового сдвига между биениями на волнопродукторе и биениями средней кинетической энергии во всем объеме.
- Разработана и верифицирована новая программа для моделирования аттракторов внутренних волн и в целом динамики стратифицированных сред.

### **Личный вклад автора**

Исследования, результаты которых выносятся на защиту, были получены лично соискателем. Соискатель аналитически нашел диапазон частот внешнего воздействия при которых образуется аттрактор внутренних волн. Соискатель подобрал параметры эксперимента, провел расчеты и проанализировал полученные данные. Также принимал непосредственное участие в разработке реализации квазигидродинамического подхода на базе открытого программного комплекса OpenFOAM. Научный руководитель И. Н. Сибгатуллин поставил первоначальную задачу и участвовал в обсуждении результатов.

### **Аппробация работы**

Материалы диссертации представлялись на различных конференциях, семинарах, как российских так и международных:

- Открытая международная конференция ИСП РАН им. В.П.Иванникова. 5-6 декабря 2019 г, г. Москва Главное здание Российской академии наук (устный доклад).
- Международная конференция «Суперкомпьютерные технологии математического моделирования» (СКТеММ'19), 19-21 июня 2019, г. Москва (устный доклад).
- 13th OpenFOAM Workshop, Shanghai, China, Китай, 24-29 июня 2018 (устный доклад).
- XXIII международная конференция «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность». 25 февраля - 4 марта 2018, Московская область, г. Звенигород (стендовый доклад).
- Рязанов Д.А. Открытая конференция ИСП РАН им. В.П. Иванникова. 30 ноября - 1 декабря 2017 г. Москва главное здание Российской академии наук (стендовый доклад).

### **Публикации**

По результатам диссертации опубликовано 12 научных работ, входящих в базы данных и системы цитирования РИНЦ, Scopus, Web of Science, 2 из них входят в Перечень рецензируемых научных изданий,

рекомендованных Высшей аттестационной комиссией. Зарегистрирована программа для ЭВМ.

## **Сутрктюра и объем диссертации**

### **Содержание работы**

Работа состоит из введения где проведен обзор литературы, рассмотренны математические модели для изучения гравитационных и инерционных волн. Также рассматривается линеаризованная теория внутренних гравитационных волн и исследование волновых течений с помощью трассировки лучей.

Раздел с численным моделированием аттракторов внутренних гравитационных волн содержит в себе результаты моделирования аттракторов с помощью метода спектральных элементов и контрольного объема алгоритмами PISO и QHD на базе открытого программного продукта OpenFOAM. Также в этом разделе обусловлен выбор частот для моделирования бигармонических колебаний, приведены результаты моделирования и анализ данных.

Наконец приведен заключительный раздел с оновными выводами и список использованных источников.