

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Терлецької Катерини Валеріївни
“Динаміка внутрішніх хвиль великої амплітуди”,
представлену на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми

Аналіз сучасної вітчизняної та світової наукової літератури в області гідромеханіки свідчить про постійний інтерес багатьох дослідників до проблеми моделювання процесів переносу скалярних полів стратифікованими течіями. Глибоке розуміння фізичних особливостей процесів, які виникають в неоднорідному середовищі з різною геометрією обмежуючих поверхонь, відкриває нові можливості у вирішенні проблеми моделювання хвильових процесів на морській поверхні, проблеми взаємодії хвильових процесів з транспортними засобами, конструкціями різного призначення, розташованих не тільки в морі, але і уздовж берегової лінії.

Багато із задач, пов'язаних з моделюванням і аналізом різних процесів в стратифікованому середовищі, описуються складними нелінійними диференціальними рівняннями з частковими похідними і з параметрами, які в даний час вдається тільки оцінити. Беручи до уваги складність геометрії фізичних течій різного масштабу, більшість таких задач можуть бути розв'язані сьогодні лише чисельно. Вони вимагають певних обчислювальних ресурсів, акуратності в алгоритмічній і чисельній реалізаціях. Однак аналіз і узагальнення чисельних результатів часто зустрічають певні труднощі, які пов'язані з оцінкою впливу ефектів різного масштабу при поширенні внутрішніх і поверхневих хвиль в стратифікованому середовищі.

З цих позицій, вирішення проблеми взаємодії хвиль великої амплітуди в стратифікованому середовищі відкриває не тільки нові можливості і перспективи розуміння фундаментальної проблеми поширення хвильових процесів в стратифікованому середовищі і їх взаємодій з твердими поверхнями різної геометрії, але і представляє певний практичний інтерес.

Актуальність теми досліджень обумовлена широким проявом хвильових процесів в морських і океанічних течіях при взаємодії з твердими поверхнями. Вивчення, аналіз, встановлення і уточнення важливих кількісних закономірностей хвильових процесів в стратифікованому середовищі вимагають сьогодні звернення до нових інноваційних технологій, пов'язаних з проведенням чисельного експерименту на сучасних обчислювальних системах. З цієї причини розробка нових методів і алгоритмів, що описують реальні фізичні процеси в рідинах, представляє сьогодні один із пріоритетних напрямків обчислювальної гідромеханіки. Вирішення цієї проблеми надасть безсумнівної стимулюючої дії при формуванні більш глибокого розуміння особливостей протікання хвильових процесів в складних гідродинамічних системах різного

масштабу, може сприяти відкриттю нових можливостей в інженерній діяльності при проектуванні різних гідротехнічних споруд і конструкцій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертації були виконані в рамках бюджетних тем і фундаментальних досліджень Інституту проблем математичних машин і систем Національної академії наук України, спільних міжнародних проектів (INTAS), науково-дослідних робіт молодих учених НАН України, проектів Державного фонду фундаментальних досліджень.

Метою дисертаційної роботи є виявлення основних властивостей і закономірностей виникнення і взаємодії внутрішніх хвиль великої амплітуди в стратифікованому середовищі при взаємодії потоку з твердими поверхнями складної геометрії.

Об'єктом дослідження є нелінійні хвильові процеси великої амплітуди в стратифікованому середовищі.

Предметом дослідження є загальні характеристики і основні закономірності виникнення внутрішніх хвиль великої амплітуди в стратифікованому середовищі при взаємодії потоку рідини з твердими поверхнями.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використовувалися загальноприйняті моделі суцільного середовища, надійні і коректні чисельні і аналітичні методи розв'язання задач математичної фізики, апробовані сучасні чисельні технології розпаралелювання багатовимірних початково-крайових задач, коректні аналітичні методи математичного аналізу.

Наукова новизна результатів роботи визначається:

- Визначенням діапазону параметрів застосування слабонелінійних моделей для опису динаміки усамітнених внутрішніх хвиль першої та другої моди;
- Удосконаленням узагальненої системи координат і проведеної паралелізації обчислень гідродинамічної моделі NH-ROM для розв'язання задачі еволюції внутрішніх хвиль великої амплітуди;
- Виявленням основних параметрів, які визначають процес поширення та взаємодії хвиль першої і другої бароклії мод, проведенням їх класифікації і виявленням основних механізмів затухання кожного класу хвиль;
- Обґрунтуванням і введенням параметру блокування, який достовірно описує процес трансформації внутрішніх усамітнених хвиль при взаємодії з донними перешкодами різної геометрії;
- Виявленням механізму генерації брізероподібних пакетів внутрішніх хвиль при взаємодії хвиль другої бароклії моди з підводною сходинкою;
- Встановленням нового режиму при фронтальній взаємодії внутрішніх хвиль великої амплітуди з утворенням нестійкості Кельвіна-Гельмгольца, яка проявляється до і після взаємодії хвиль;
- Проведенням класифікації взаємодії внутрішніх хвиль з трапецеїдальним шельфом, приведеною оцінкою втрат енергії хвиль в шельфовій зоні в залежності від параметрів хвиль та рельєфу дна;

- Встановленням нового режиму трансформації усамітнених внутрішніх хвиль з похилою донною поверхнею, в якому зсувна нестійкість є домінуючим механізмом трансформації хвиль;

- Кількісним описом донних надкритичних течій, які виникають при взаємодії сейші із неоднорідностями рельєфу дна в довгому вузькому озері;

- Практичними чисельними розрахунками параметрів усамітнених внутрішніх хвиль при їх взаємодії з неоднорідностями донної поверхні в наближенні в'язкої нестисливої рідини.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості застосування розроблених в роботі математичних і чисельних моделей процесу взаємодії внутрішніх хвиль в неоднорідній в'язкій нестисливій рідині із твердими поверхнями складної геометрії, проведенні оцінки втрат енергії хвиль в залежності від параметрів внутрішніх хвиль, стратифікації і рельєфу донної поверхні. Графічний матеріал і наведений аналіз фізичних закономірностей взаємодії внутрішніх хвиль різного масштабу з обмежуючими поверхнями можуть надати певну допомогу в інженерній діяльності при проектуванні пристроїв різного призначення. Результати дисертаційної роботи становлять безсумнівний інтерес для дослідників в області гідромеханіки, океанографії та інших областях науки та техніки.

Достовірність наукових результатів дисертації забезпечується використанням загальноприйнятих моделей суцільного середовища, коректністю математичної постановки задач і застосуванням надійних чисельних методів для їх розв'язання, контрольованою точністю інтегрування рівнянь руху суцільного середовища і несуперечністю отриманих результатів відповідним результатам інших авторів, які опубліковані в національній та світовій науковій літературі.

Структура дисертації. Робота складається з вступу, семи розділів, висновків, списку використаної літератури та додатку. Робота містить 330 сторінок основного тексту, 181 рисунок і 24 таблиці. Список літературних джерел містить 288 найменувань. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 390 сторінок.

Дисертація починається з анотації, виконаної українською та англійською мовами і списку наукових праць здобувача за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача.

У вступі наводиться короткий історичний аналіз спостережень взаємодії внутрішніх хвиль в реальних океанічних, морських середовищах, озерах, розглядаються джерела виникнення внутрішніх хвиль в стратифікованому середовищі. Окреме місце у вступі присвячено короткому огляду наукової національної та зарубіжної літератури за темою дисертації. Далі автор обґрунтовує актуальність теми дослідження, формулює мету, об'єкт і предмет дослідження, визначає наукову новизну і практичне значення роботи, вказує свій особистий внесок в наукових роботах і зв'язок досліджень, проведених в дисертації, з національними та зарубіжними науковими програмами, планами і темами. Потім наводяться коротка інформація, пов'язана з апробацією

досліджень на міжнародних наукових конференціях, публікаціями та структурою дисертації.

Викладення матеріалу і формулювання, наведені у вступі, відповідають вимогам ДАК України до кваліфікаційних робіт.

У першому розділі дисертації автор наводить загальне формулювання і основні рівняння і граничні умови в задачі поширення внутрішніх хвиль в стратифікованому середовищі. Показано, за яких умов загальна постановка задачі може бути зведена до лінійної і слабконелінійної теорій внутрішніх хвиль. Зокрема, розглядаються лінійні біжучі хвилі в стратифікованій ідеальній рідині, лінійні біжучі хвилі з двошаровій і тришаровій стратифікації, лінійна теорія внутрішніх хвиль в водоймах кінцевого розміру. У слабконелінейному наближенні наведені рівняння Кортевега-де Вріза і його деякі модифікації, Гарднера і Бенджаміна-Оно. У разі сильно нелінійної взаємодії внутрішніх хвиль в роботі наводяться моделі Міяти-Чоя-Камасси і Дюбрея-Жакотена-Лонга.

У заключній частині розділу автор розглядає задачу трансформації енергії, яка відбувається під час проходження внутрішніх хвиль шельфової зони морів для випадку наявності неоднорідностей на донній поверхні. Обґрунтовано, що дослідження динаміки внутрішніх хвиль великої амплітуди має проводитися в рамках повної системи рівнянь Нав'є-Стокса і з використанням передових технологій і методів розв'язання нелінійних систем диференціальних рівнянь з частковими похідними.

Другий розділ дисертації присвячений опису чисельного алгоритму моделі NH-ROM і гідродинамічної моделі MITgcm, які були застосовані при проведенні практичних розрахунків. Модель NH-ROM використовує тривимірні рівняння Нав'є-Стокса в наближенні Буссінеска. Модель NH-ROM використовує узагальнену вертикальну систему координат і допускає паралелізацію обчислювального процесу. У цій моделі зміна рівня вільної поверхні розраховується за явною схемою на основі рівняння нерозривності на поточному донному вузлі. Для опису вертикального зсуву в моделі для усереднених за Рейнольдсом характеристик застосовувалася модель підсіточної в'язкості.

Тестування моделей було проведено на задачі утворення вихорів Кельвіна-Гельмгольца на розрахунковій сітці з різним числом вузлових точок. Аналіз даних чисельного моделювання, лабораторних досліджень і даних аналітичного розв'язку задачі про розвиток гідродинамічної нестійкості на границі розділу стратифікованого середовища свідчать про достовірність розв'язку гідродинамічної задачі чисельними методами. Підтвердженням цього висновку є хороша узгодженість даних в задачі про трансформацію поверхневих хвильових пакетів в басейні з донною сходинкою.

У третьому розділі розглядається динаміка внутрішніх хвиль великої амплітуди першої бароклінної моди в прибережній шельфовій зоні. Окрему увагу автор приділила аналізу процесу трансформації хвиль над донними перешкодами різної геометрії.

В роботі показано, що визначальними характеристиками при взаємодії внутрішніх хвиль з континентальним схилом є: амплітуда хвилі, параметр блокування, рівний відношенню амплітуди хвилі до глибини нижнього шару над шельфом, і кут нахилу континентального шельфу.

Порівняльний аналіз результатів чисельного моделювання дозволив автору роботи провести класифікацію режимів взаємодії внутрішньої усамітненої хвилі першої бароклінної моди в умовах двошарової стратифікації: слабка взаємодія, помірна взаємодія, сильна взаємодія, перехідний режим і режим повного відбиття. Для кожного з режимів автор запропонувала діапазони значень параметра блокування, як для хвиль зниження, так і для хвиль підвищення. Проведено аналіз втрат енергії при проходженні внутрішньою хвилею донної сходинки.

Дослідження, наведені в цьому розділі дисертації, дозволили автору зробити висновок про те, що параметр блокування досить точно підходить для класифікації процесу трансформації внутрішніх хвиль першої та другої моди в умовах двошарової і тришарової стратифікації для широкого діапазону зміни параметрів хвилі і донної перешкоди.

В рамках чисельного моделювання процесу трансформації внутрішніх хвиль на континентальному схилі було виявлено новий вид неадіабатичного сценарію трансформації внутрішніх хвиль великої амплітуди. Показано, що зсувна нестійкість в цьому випадку є домінуючим механізмом в процесі трансформації хвиль великої амплітуди. Існування такого сценарію підтверджується спостереженнями в Південнокитайському морі, які були опубліковані у світовій науковій літературі.

У заключній частині розділу розглядається задача динаміки внутрішніх хвиль при взаємодії з підводними перешкодами різної геометрії. Аналіз кількісних даних показав, що зміна довжини перешкоди змінює форму хвилі, що пройшла. Збільшення довжини перешкоди призводить до зменшення амплітуди хвилі і генерації вторинних хвиль.

Четвертий розділ дисертації присвячений аналізу динаміки внутрішніх хвиль великої амплітуди другої бароклінної моди в тришаровій стратифікації. Такі хвилі характеризуються асиметричним зміщенням верхньої і нижньої ізопікн в середньому стратифікованому шарі. Особливістю такого режиму є існування замкнутих ліній току в рухомій системі координат, яке призводить до переносу маси такими хвилями.

Визначальними параметрами в динаміці внутрішніх хвиль другої бароклінної моди є локальне число Фруда і ефективне число Рейнольдса. Автором запропонована класифікація сценаріїв динаміки хвиль із зазначенням діапазону зміни цих параметрів: слабонелінійні хвилі, стійкі сільнонелінійні хвилі і нестійкі сільнонелінійні хвилі із зазначенням основних механізмів затухання хвиль.

Заклучна частина розділу присвячена аналізу взаємодії другої бароклінної моди з донною сходинкою. Показано, що при взаємодії мають місце три режими трансформації усамітненої хвилі другої бароклінної моди, кожен з яких

характеризується певним діапазоном параметра блокування. Вперше автор продемонстрував можливий сценарій генерації внутрішніх хвиль першої бароклінної моди при трансформації хвиль другої бароклінної моди. Для цього випадку в роботі визначено діапазон зміни значень параметра блокування.

У п'ятому розділі автор розглядає задачу фронтальної взаємодії усамітнених хвиль великої амплітуди. Визначальними параметрами взаємодії в цьому випадку є перевищення максимальної амплітуди хвиль в момент взаємодії і фазовий зсув. Дослідження показали, що хвилі помірних амплітуд при взаємодії залишаються стійкими, а взаємодія хвиль великої амплітуди супроводжується появою нестійкості Кельвіна-Гельмгольца.

Помічено, що взаємодія внутрішніх хвиль з докритичними значеннями амплітуд супроводжується утворенням вихорів Кельвіна-Гельмгольца, які після взаємодії руйнуються і хвилі продовжують своє поширення у вигляді усамітнених внутрішніх хвиль.

Дослідження показали, що при взаємодії внутрішніх хвиль великої і малої амплітуди нестійкість розвивається в хвилі великої амплітуди ще до моменту взаємодії. Однак вихори Кельвіна-Гельмгольца формуються в обох хвилях в момент найвищого підйому амплітуди внутрішніх хвиль.

У роботі проведена класифікація взаємодії внутрішніх хвиль другої моди: слабонелінійні хвилі, стійкі нелінійні хвилі і нестійкі нелінійні хвилі із зазначенням діапазонів зміни значень чисел Фруда і ефективних чисел Рейнольдса. Характерною особливістю взаємодії нестійкої нелінійної взаємодії є утворення послідовності локалізованих вихрових структур, взаємодія яких призводить до інтенсивного перемішування навколишньої рідини і зменшення амплітуд хвиль після зіткнення.

Шостий розділ присвячений аналізу режимів нахату усамітнених внутрішніх хвиль на похилий шельф. Для проведення класифікації були виділені визначаючі параметри: нормована амплітуда хвилі, параметр блокування і кут нахилу шельфової зони. Основна ідея класифікації взаємодії хвиль з прибережною донною поверхнею полягає в тому, що при накаті хвиль основними сценаріями в динаміці хвиль є перекидання внутрішніх хвиль і зміна полярності хвилі-зниження на хвилю-підвищення на континентальному схилі.

Отримані автором результати дозволили сформувати карту режимів нахату внутрішніх хвиль на континентальний шельф в Південнокитайському морі.

У сьомому розділі дисертації автор розглядає задачу чисельного моделювання процесу поширення сильнонелінійних внутрішніх сейш в довгих озерах. Основна увага в розділі приділена впливу рельєфу донної поверхні на динаміку і трансформації структури внутрішніх сейш. Показано, що наявність похилого дна призводить до досить швидкого загасання коротких внутрішніх хвиль. Основними механізмами руйнування сейши є перекидання хвиль і зсувна нестійкість.

Чисельний експеримент дозволив детально описати новий гідродинамічний ефект, пов'язаний зі руйнуванням хвиль на похилій донній поверхні з утворенням нестійкості Кельвіна-Гельмгольца. Показано, що при взаємодії

внутрішніх сейш з донною поверхнею може утворюватися локальне фокусування гідродинамічних потоків, яке призводить до утворення надкритичного внутрішнього потоку. Його еволюція призводить до утворення слідоподібного обурення на поверхні озера.

У заключній частині розділу автор наводить результати чисельного моделювання динаміки поля завихореності в озері Лох-Несс (Шотландія). Показано, що локалізовані вихрові структури, що виникають при взаємодії внутрішніх хвиль з донною поверхнею, утворюють локалізований в просторі вихровий слід, який багатьма спостерігачами інтерпретується як слід «озерних монстрів».

У висновках відображені основні результати дисертаційної роботи.

У додатку наводяться таблиці з параметрами внутрішніх хвиль і перешкод для різних чисельних експериментів, проведених в роботі, із зазначенням нумерації і позначень.

Текст дисертації написаний досить грамотно і акуратно, цілком логічно. Автореферат написаний цілком докладно, добре проілюстрований і повністю відображає зміст дисертації. Всі основні положення і висновки дисертаційної роботи викладені в авторефераті. Хотів би окремо відзначити розділ анотації в дисертаційній роботі, виконаний гарною англійською мовою.

В якості зауважень по роботі необхідно зазначити наступне:

1. На стор. 61 автор наводить рівняння Нав'є-Стокса у векторній формі, рівняння (1.1). При цьому перед рівнянням наводить текст: "Рівняння Нав'є-Стокса описують рух рідини, в декартовій системі координат вони мають вигляд:". Наскільки мені відомо, векторна форма запису рівнянь не залежить від обраної системи координат.

2. На стор.110 автор дисертації згадує число Куранта, яке пов'язує просторову і часову дискретизації фізичних полів в розрахунковій області для забезпечення стійкого режиму обчислень. Кожна чисельна схема, метод мають свої значення числа Куранта. Яке значення числа Куранта використовувалося при проведенні ваших обчислень? Непрямі оцінки дозволяють зробити висновок про те, що чисельна схема, швидше за все, була стійкою до чисельних збуджень. Проте, умови і параметри чисельного інтегрування нелінійних рівнянь в дисертаційній роботі не наводяться.

3. На стор.117 автор пише: «Для апроксимації рівнянь моделі використовуються метод центральних різниць за часом та по простору». Будь-яка трирівнева за часом чисельна схема не має властивості «самостарту», оскільки для початкового моменту часу є тільки один часовий шар фізичних полів, пов'язаний з початковими умовами. Яким чином здійснювався старт обчислень в моделі NH-POM? Деякі трирівневі чисельні схеми мають обмеження на значення числа Куранта не тільки зверху, але і знизу. Ваша чисельна схема має таку властивість?

4. Багато чисельних експериментів проводилися на тривимірній сітці, яка містить всього 5 вузлів по ширині розрахункової області. З якою метою

застосовувалася тривимірна сітка? Чи вистачало 5 вузлів на ширині розрахункової області? Які граничні умови ставилися на передній і задній стінках обчислювальної області?

5. У роботі проводиться порівняльний аналіз результатів чисельного експерименту з даними лабораторних вимірювань. З цієї причини на одній частині рисунків представлені дані в розмірних величинах, а на іншій частині – безрозмірні величини. В таких умовах досить складно проводити порівняльний аналіз даних. Ситуація в значній мірі спростилася б, якби всі представлені залежності були б виконані в умовах єдиного нормування.

6. На рис.2.16 представлені результати трансформації хвильового пакету для трьох значень безрозмірного хвильового числа. При цьому амплітуда вихідного хвильового пакета задавалася у всіх випадках однаковою і рівною $1.13 \cdot 10^{-4}$ м. Чи існують сьогодні способи реєстрації внутрішніх хвиль з такою амплітудою?

7. При розгляді задачі динаміки першої бароклінної моди в прибережних зонах автор вводить визначаючі параметри в задачі, що розглядалась на 146 стор. Зокрема, вводиться амплітуда внутрішньої хвилі, нормована на глибину верхнього шару $\alpha = a/h_1$ і параметр блокування з такою ж формулою. Ймовірно, автор мала на увазі $B = h_2/a$ для параметра блокування?

8. У розділі 3 (стор.202) при розгляданні процесу трансформації внутрішньої хвилі-зниження над трикутною перешкодою і перешкодою у вигляді півкола розглядаються моменти часу $T_0 + 6c$, $T_0 + 11c$ і т.д. Що являє собою момент часу T_0 ?

9. У тексті дисертації автор називає функцію току як “функція Струму” (стор.106, 221, 231 і т.д.). Струм – спрямований рух заряджених частинок, а функція току – векторна функція, ротор від якої визначає векторне поле швидкості в гідродинамічних течіях.

10. У деяких частинах дисертації посилання на літературу наведено не в порядку зростання номерів (наприклад, стор.133,134 і т.д.).

11. У роботі є деякі курйозні помилки. Зокрема, деякі рисунки в тексті називаються малюнками, а на стор.287 розглядався “шельф зі силами $0.52^\circ < \gamma < 21.8^\circ$ ” замість “... зі схилами ...”, а на стор.313 сказано, що “... точка ... знаходиться біля кордону ...” і деякі інші.

Вважаю за необхідне сказати, що висловлені зауваження істотно не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи і не зменшують цінності отриманих в ній результатів.

Основні результати дисертаційної роботи повністю відображені в 27 наукових статтях, з них 23 статті в спеціалізованих виданнях і в провідних міжнародних наукових виданнях, які входять в наукометричну базу даних SCOPUS, в 1 монографії (у співавторстві). Автор дисертації опублікував 3 наукові статті персонально. Частина результатів роботи обговорювалася на 26 міжнародних наукових фахових конференціях.

Все вище сказане дозволяє кваліфікувати розглянуту дисертаційну роботу як закінчену наукову роботу, яка в повній мірі задовольняє вимогам п.п. 9, 10 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013р. Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми, має незаперечне наукове і прикладне значення, оскільки містить нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності роблять суттєвий внесок у вирішення важливої науково-прикладної проблеми гідродинаміки контрольованого і керованого хвильового руху в стратифікованому середовищі.

Вважаю, що автор дисертації, **Терлецька Катерина Валеріївна**, заслуговує присудження їй шуканого наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук,

старший науковий співробітник,

професор кафедри

Автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

Теплоенергетичний факультет,

Національний технічний університет України

“КПІ ім. Ігоря Сікорського”

О.А. Гуржій

20 травня 2019 р.

Київ, Україна

Підпис Гуржія О.А. підтверджую

Учений секретар

КПІ ім. Ігоря Сікорського



А.А. Мельниченко