

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертацію Терлецької Катерини Валеріївни “Динаміка внутрішніх хвиль великої амплітуди”, представленої на здобуття вченого ступеня доктора фізико-математичних наук по спеціальності 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.

Вивчення внутрішніх хвиль займає значне місце в сучасних дослідженнях гідродинаміки озер, морів та океанів. Високий рівень інтересу до цієї проблеми обумовлений не лише тим, що внутрішні хвилі присутні у всіх вказаних акваторіях, а, головним чином, тією роллю, яку вони відіграють в таких динамічних процесах як формування глобальної океанічної стратифікації і тонкої структури гідрофізичних полів, генерації мілкомасштабної турбулентності, горизонтального і вертикального обмінів у стратифікованих середовищах, які у значній мірі визначають характер екологічної ситуації водних акваторій на нашій планеті

Ключову роль в динаміці відмічених процесів відіграють внутрішні хвилі великої амплітуди, особливе місце серед яких займають самотні (усамітнені) хвилі з амплітудами в сотні метрів і характерними горизонтальними розмірами порядку кілометра. Такі хвилі можуть впливати на поширення акустичних хвиль, а в деяких випадках і на динаміку руху підводних об'єктів. Окремої уваги заслуговує дослідження процесів набігання такого класу хвиль на береги в шельфових зонах океану, де інтенсифікується вертикальний перенос поживних речовин з придонного шару, який тут значно інтенсивніший порівняно з відкритим океаном. В цих зонах має місце також розмив дна шельфу, що з часом приводить до зміни його топографії. Таким чином, роль великоамплітудних внутрішніх хвиль в обмінних процесах надзвичайно висока. Динаміка означеного класу процесів суттєво нелінійна, що значно ускладнює їх дослідження, а нелінійні моделі, які їх описують, стали розроблятися лише в кінці минулого століття у зв'язку з розвитком необхідних для цього обчислювальних комплексів. І хоч за останні пару десятиліть вже розроблені ефективні чисельні методи для відповідних розрахунків і проведено ряд як лабораторних, так і натурних експериментів, на підставі

яких одержано немало результатів фундаментального характеру, на багато запитань цієї проблеми ще не знайдено відповіді.

Саме визначення нелінійних аспектів цієї цікавої і ще недостатньо дослідженої проблеми – формування, трансформація в процесі еволюції і затухання гідродинамічних полів середовища внутрішніх хвиль великої амплітуди як в районах відкритого океану, так і в його шельфових зонах в рамках розробленої нелінійної чисельної моделі і складає суть дисертаційної роботи К.В.Терлецької. Такі дослідження необхідні для удосконалення теорії внутрішніх хвиль, розуміння причин і закономірностей мінливості гідрофізичних полів у великих озерах, морях і океанах, прогнозу обмінних процесів, які там відбуваються, а також для планування та інтерпретації результатів відповідних лабораторних та натурних експериментальних вимірювань.

З вищесказаного випливає безсумнівна науково-практична значимість та актуальність теми дисертації, а також відповідність її профілю спеціалізованої ради, де відбувається захист.

Дисертація складається з анотації, вступу, семи розділів, висновків, бібліографії і додатків.

В анотації коротко зформульовані предмет досліджень, мета роботи, наукова новизна одержаних результатів і список відповідних публікацій.

У вступі на підставі огляду виконаних раніше теоретичних робіт та натурних спостережень і аналізу ролі внутрішніх хвиль в гідродинамічних процесах всередині океану та на його шельфі формулюється мета і задачі досліджень та наукова новизна одержаних результатів і їх практична значимість. Проаналізована апробація результатів роботи на їх достовірність, зв'язок роботи з науковими програмами різних рівнів та науково-дослідними темами, в рамках яких одержані результати, що склали основу роботи, представлена структура дисертації, яка містить короткий зміст розглянутих в ній проблем і одержаних результатів.

У першому розділі представлена загальна постановка задачі внутрішніх хвиль для в'язкого нестисливого стратифікованого середовища з використанням рівнянь Нав'є-Стокса в наближенні Бусинеска і граничними умовами без врахування наявності на вільній поверхні поверхневих хвиль. Виконано огляд і аналіз лінійних біжучих внутрішніх хвиль у нев'язкому середовищі з дво- та тришаровими схемами стратифікації та лінійні внутрішні стоячі хвилі (сейші) у прямокутному басейні. Проаналізовані відомі стаціонарні солітонні розв'язки та межі їх справедливості для слабонелінійних хвиль у двошаровому середовищі скінченної глибини з слабкою нелінійністю і дисперсією (рівняння Кортевега – де Вріза з квадратичною нелінійністю, рівняння Гарднера з кубичною нелінійністю та модифіковане рівняння Кортевега – де Вріза з нульовим коефіцієнтом нелінійної квадратичності), так і солітонні розв'язки на глибокій воді (рівняння Бенджаміна-Оно). Відмічено, що з рівняння Гарднера для симетричної схеми стратифікації (два шари рівної товщини) реалізуються два розв'язки – усамітнена хвиля та брізери (осцилюючі хвильові пакети).

Проаналізовані існуючі сильнонелінійні моделі для описання внутрішніх хвиль великої амплітуди, які включають модель довгих хвиль Міяти - Чоя - Камасси для двошарової стратифікації з довільною нелінійністю і малими дисперсійними ефектами та модель Дюбрей - Жакотен - Лонга для середовищ скінченої глибини з неперервною стратифікацією. Зроблено висновок про необхідність для описання реальної динаміки внутрішніх хвиль великої амплітуди використовувати повну систему рівнянь Нав'є - Стокса.

У другому розділі роботи проаналізовані існуючі негідростатичні моделі тривимірних нестационарних рівнянь Нав'є - Стокса для стратифікованих середовищ. Представлена тривимірна гідродинамічна модель NH - POM для стратифікованих середовищ, яка використовує рівняння нерозривності, систему рівнянь Рейнольдса і рівняння переносу для скалярних величин (солоність, температура) з вільною границею та твердими границями. Характерними особливостями цієї моделі є використання узагальненої вертикальної системи координат, підсіткової моделі Смагоринського, виконання на твердих границях умови ковзання для швидкості та паралелізація коду моделі з використанням декомпозиції розрахункової області на підобласті, які на кожному часовому кроці обмінюються між собою необхідною інформацією.

Виконане в цьому розділі порівняння результатів чисельного моделювання генерації у прямокутному басейні внутрішніх хвиль для двошарової схеми стратифікації з відповідними лабораторними вимірюваннями та порівняння чисельних розрахунків з аналітичним розв'язком задачі про трансформацію пакета поверхневих хвиль над донним уступом у прямокутному каналі показало добру відповідність одержаних результатів. Додатково виконане порівняння відмічених вище результатів з розв'язком тієї ж задачі, одержаним з використанням іншої чисельної моделі MITgcm (США) також показало повну відповідність результатів обох розрахунків. Виконане порівняння підтверджує достовірність одержаних в рамках моделі NH - POM результатів та придатність цієї моделі для розв'язання задач, зформульованих в дисертаційній роботі.

У третьому розділі досліджується нелінійна динаміка усамітнених внутрішніх хвиль великої амплітуди першої бароклінної моди у прибережних зонах океану (область шельфу). Розглянуті процеси трансформації цих хвиль на неоднорідностях дна та динаміка їх руйнування на шельфі. Цей клас хвиль є найбільш енергомістким серед інших внутрішніх хвиль, тому вони відіграють важливу роль у процесах переносу і перемішування за рахунок турбулізації придонного шару і ерозії дна. В цьому розділі розглянуто три класи задач для відмічених внутрішніх хвиль:

1. Трансформація усамітнених хвиль підвищення та хвиль пониження над сходиною на дні для двошарової схеми стратифікації.
2. Трансформація усамітнених хвиль для тришарової схеми стратифікації.
3. Трансформація усамітнених хвиль на плавно неоднорідному дні (малі кути нахилу) для двошарової схеми стратифікації.

Результати експериментальних вимірювань та відповідних чисельних розрахунків дозволили встановити головні параметри, які визначають характер трансформації хвиль. Це введений в роботу параметр блокування (відношення глибини нижнього шару водного середовища над шельфом до амплітуди хвилі) вимінний від відомих, кут нахилу континентального шельфу та форма підводної перешкоди. Описані процеси зростання над сходинкою амплітуди хвилі підвищення з формуванням за нею хвильового хвоста та процес зменшення амплітуди хвиль пониження з трансформацією самої хвилі до вигляду, подібного до граничної відокремленої слабонелінійної хвилі Гарднера, за якою також формується поздовжній хвіст, який може трансформуватись у вторинний солітон. В околі кромки сходинки виявлено можливість утворення вихрової пари, яка викликає інтенсивне перемішування.

При набіганні хвилі-пониження на підводну сходинку одержана цікава картина формування над сходинкою сильнонелінійної хвилі-солібора і опуклої другої хвильової моди, а окрім відбитої хвилі першої моди формується дві других бароклінних моди – опуклої та вогнутої а також і вищих мод – третьої і четвертої.

Виконані чисельні розрахунки енергетики внутрішніх хвиль першої бароклінної моди показали, що втрати енергії цих хвиль над сходинкою не перевищують 50% величини енергії набігаючої хвилі. Цікаво, що вдало вибраний параметр блокування дозволив одержати авто модельний характер залежності втрат енергії для такої форми перешкоди від цього параметра.

Виконано розрахунки процесу трансформації внутрішніх хвиль великої амплітуди при набіганні їх на похилий берег в широкому діапазоні кутів нахилу та порівняння цих результатів з результатами відповідних лабораторних вимірювань. Показана можливість такого сценарію трансформації хвилі, коли спочатку переважає зсувна нестійкість, а потім зміною полярності хвиль без перекидання гребеню хвилі та трансформацією хвилі з досягненням її амплітуди своєї критичної величини, коли на її гребені виникає нестійкість Кельвіна – Гельмгольца з утворенням великих вихорів, після чого починається обвал хвилі, який веде до інтенсивного перемішування зони стратифікації між шарами постійної густини. Це приводить до зменшення амплітуди набігаючої хвилі і утворення позаду неї слабого болуса (вихрової пари). При цьому в усіх випадках формується відбита хвиля, при розрахунку коефіцієнта відбиття якої показана важлива роль врахування потоку псевдоенергії хвилі.

Окремо виконано моделювання трансформації усамітнених внутрішніх хвиль над підводними перешкодами різної геометрії – трикутника, півкола та прямокутника, коли спостерігається утворення вихрової пари, а у випадку прямокутної перешкоди має місце ще і утворення надкритичного струменя. Оцінені величини втрат енергії хвилі над кожною з розглянутих перешкод та показана важливість впливу довжини перешкоди на зміну форми набігаючої хвилі для даного класу задач.

У четвертому розділі представлені результати досліджень динаміки внутрішніх хвиль другої бароклінної моди у прибережних зонах за умов двошарової стратифікації з тонким перехідним шаром між ними. Проаналізовані механізми генерації цього типу хвиль та їх істотні особливості, які представляють інтерес для розуміння динаміки їх поведінки. Запропонована нова класифікація цих хвиль відносно двох визначальних параметрів їх динаміки – мінімального числа Річардсона Re_{min} та локального числа Фруда Fr_{max} . Встановлено неповну авто модельність динаміки хвиль другої моди по числу Рейнольдса через залежність параметра Річардсона від цього числа. Виконано чисельне моделювання взаємодії цих хвиль зі сходиною на дні. Для однакових величин амплітуди хвилі виконані розрахунки характеру взаємодії для трьох значень параметра блокування, в результаті чого були встановлені три характерні типи трансформації хвиль другої моди на такого роду перешкоді, а в діапазоні зміни параметра блокування $0.5 < B < 2.5$ окрім генерації за сходиною хвилі першої моди підвищення ще і генерації брізероподібного пакету внутрішніх хвиль.

У п'ятому розділі розглянута динаміка процесів фронтального зіткнення двох усамітнених хвиль першої бароклінної моди. Чисельне моделювання таких процесів проведено як для хвиль однакової, так і різної амплітуди, які, в свою чергу, можуть бути різної величини від малих до великих. Встановлено характер відповідних змін амплітуд та зсуву фаз кожної з хвиль. На відміну від малих та слабонелінійних хвиль при зіткненні хвиль великої амплітуди виникає зсувна нестійкість Кельвіна – Гельмгольца. Показано, що в залежності від відношень амплітуд нестійкість Кельвіна – Гельмгольца може виникати ще до зіткнення і після зіткнення (для однакових амплітуд), або тільки після зіткнення (для хвилі меншої амплітуди). В останньому випадку, коли амплітуди хвиль відрізняються суттєво, виникає нестійкість або більшої хвилі та розвиток в ній вихорів Кельвіна – Гельмгольца, або нестійкість в обох хвилях. Встановлено, що після фронтального зіткнення хвилі мало змінюють свою форму з деяким зсувом, а також утворюються фронтальні хвильові хвости, які містять близько 5% – 6% енергії хвилі.

При зіткненні хвиль другої бароклінної моди мають місце свої особливості для різних типів хвиль обумовлені різними механізмами їх генерації. У зв'язку з цим встановлені три типи взаємодії відповідно до класів хвиль – слабонелінійні хвилі без замкнутих ядер, стійкі сильнонелінійні хвилі із замкнутими ядрами і нестійкі сильнонелінійні хвилі. Для слабонелінійних хвиль має місце фазовий зсув та генерація невеликих вторинних хвиль. Для стійких сильнонелінійних хвиль однакової амплітуди з захопленими ядрами відбувається захоплення кожною хвилею ядра протилежної хвилі з невеликими втратами енергії і маси. При зіткненні нестійких сильнонелінійних хвиль виникає нестійкість Кельвіна – Гельмгольца з інтенсивним переміщенням та зменшенням амплітуд після зіткнення.

У шостому розділі для випадку двошарової стратифікації океану зроблена класифікація режимів нахату внутрішніх усамітнених хвиль пониження на трапецієвидний шельф, який є наближеною геометрією реальних шельфів. Використовуючи одержані в роботах інших дослідників критерії обвалення внутрішніх усамітнених хвиль над таким шельфом, який базується на параметрі блокування, введеного дисертанткою та критерії зміни полярності набігаючих хвиль, знайдені параметри, які визначають характер трансформації внутрішніх хвиль над підводними перешкодами. Це безрозмірна амплітуда хвилі α , параметр блокування B , введений в даній роботі та γ - кут нахилу материкового шельфу. На підставі використання поверхонь, які відповідні критеріям обвалу та зміни полярності у тривимірному просторі (α, B, γ) побудована тривимірна діаграма, яка визначає чотири характерні режими трансформації набігаючої хвилі, які відповідають наявності або відсутності процесів обвалу хвиль та зміни їх полярності. Результати лабораторних спостережень та чисельних розрахунків і дисертантки та зарубіжних авторів узгоджуються з побудованою діаграмою. Встановлено, що втрати енергії хвиль в процесі її трансформації на шельфі можуть досягати 55%. На підставі використання одержаної діаграми та відомих натурних даних побудована карта режимів нахату внутрішніх хвиль на шельф Південнокитайського моря.

У сьомому розділі представлені результати чисельного моделювання динаміки сильнонелінійних стоячих внутрішніх хвиль (сейш) у замкнутих водоймах з двошаровою стратифікацією (прямокутний басейн з та без похилого дна, з наявністю на дні пагорба та з наявністю області звуження ширини). Використовуючи співвідношення між п'ятью характерними масштабами часу (період найнижчої моди, масштаб часу балансування між нелінійністю, нестійкістю та дисперсією, масштаб часу формування бора, масштаб часу стійкості та масштаб часу дисипації) побудована діаграма п'яти характерних типів течії для параметрів η_{10} - відношення амплітуди поверхні розділу шарів у початковий момент до товщини верхнього шару і h_1 / H відношення товщини верхнього шару до глибини басейну. Виконані серії чисельних розрахунків для відмічених схем дозволили визначити характер і особливості відповідних гідродинамічних процесів для кожної з них. Характерними з них є залежність формування процесу перекидання хвиль від топографії дна, руйнування хвиль на похилому дні з формуванням нестійкості Кельвіна - Гельмгольца, формування двостороннього потоку, який в зоні вузькості каналу стає надкритичним і викликає інтенсивне перемішування. Особливо цікавим є виявлена в роботі можливість для випадку довгих і вузьких озер фокусування у сейшах потоку надкритичного струменя, який генерує рухоми вихрову пару з вертикальною віссю, що викликає видимі збурення на вільній поверхні озера. Це явище може пояснити реальну природу відомої всім легенди про водного монстра озера Лох - Несс.

У висновках сформульовані одержані в роботі нові наукові результати.

Додатки до роботи містять характеристики внутрішніх хвиль та перешкод, які розглядалися в чисельних експериментах, параметри чисельних експериментів та басейнів.

Таким чином, у дисертації на основі удосконаленої чисельної гідродинамічної моделі *PH-ROM* виконано дослідження динаміки поширення та взаємодії усамітнених внутрішніх хвиль великої амплітуди в тих зонах океану, де відбувається найбільш інтенсивна трансформація цих хвиль в результаті фронтальної взаємодії їх з іншими хвилями цього класу та взаємодії їх з похилими берегами та підводними перешкодами. Проведено аналіз характеру гідродинамічних процесів під час цієї взаємодії та його обумовленості визначальними параметрами динаміки взаємодії. Характерною особливістю виконаних досліджень є комплексний підхід до проблеми, від формування усамітнених хвиль в області їх генерації до всіх етапів взаємодії з іншими хвилями та перешкодами, з аналізом характерних областей цієї взаємодії та її обумовленості відповідними гідродинамічними параметрами.

Аналіз дисертації показує, що її авторка знаходиться в першій шерензі дослідників зформульованого в роботі наукового напрямку, які працюють у провідних наукових центрах передових країн світу і які не тільки обмінюються науковим досвідом, а і спільно співпрацюють при розв'язанні окремих конкретних задач. Одержані нею результати по динаміці внутрішніх хвиль великої амплітуди в шельфовій зоні океану, по структурі та просторово-часовим характеристикам гідродинамічних полів відповідних процесів для різних схем стратифікації середовища та топографії дна шельфу є новими і мають фундаментальний характер.

Розроблені в роботі сильнонелінійні чисельні моделі динаміки усамітнених внутрішніх хвиль великої амплітуди у шельфовій зоні океану, без сумніву, важливі для розуміння і подальшого дослідження фізики моря та теорії внутрішніх хвиль. Побудовані дисертанткою відмічені моделі фізично обґрунтовані, математично коректні, верифіковані на відомих результатах лабораторних, натурних та чисельних результатах інших авторів. Одержані в роботі результати відповідають сучасному світовому рівню досліджень в даному напрямку. З відміченого випливає достовірність розроблених в роботі моделей і, отже, вони можуть бути успішно використані в океанологічних та лабораторних дослідженнях не лише динаміки внутрішніх хвиль а і при вивченні інших класів нелінійних хвиль у стратифікованих середовищах. Результати роботи можуть також бути корисними при плануванні натурних досліджень та інтерпретації їх результатів, а також при розробці методів прогнозу екологічної ситуації в областях шельфових зон океану.

По дисертації мають місце наступні зауваження :

1. Розглянуті в роботі схеми стратифікації мають ступінчатий характер з тонким проміжним шаром неперервної зміни густини між сусідніми шарами з постійною густиною. Такі схеми стратифікації (або близькі до них) мають місце в реальних морських акваторіях, однак частіше розподіл стратифікації має шари з неперервним розподілом приведеної густини товщиною порядку десяти і більше метрів, наприклад, сезон-

ний термоклин. В роботі, однак, дослідження обмежені відносно малою товщиною проміжного шару.

2. В роботі не проводився аналіз характеру приповерхневих течій, обумовлених внутрішніми хвилями великої амплітуди, зокрема, їх енергетики, хоча відомо, і про це іде мова у Вступі до роботи про можливість їх помітного впливу на спектр поверхневих хвиль.
3. Використана в роботі чисельна модель відповідає турбулентному характеру руху в середовищі, однак в аналізі одержаних результатів немає турбулентних характеристик в розрахункових областях і не аналізується момент включення турбулентної моделі. Складається враження, що в переважній більшості випадків при розрахунках використовувались рівняння Нав'є-Стокса.
4. Можливість нового механізму утворення брізерів при взаємодії другої бароклінної моди з підводною сходинкою визначена лише в залежності від параметра блокування. З фізичної точки зору здається доречним наявність її залежності і від товщини проміжного шару.
5. В натурних умовах формування внутрішніх сейш відбувається паралельно з поверхневими сейшами, однак в роботі про їх взаємодію не йде мова.
6. При дослідженні динаміки другої бароклінної моди розглянуто лише один клас цих хвиль, який генерується механізмом інтрузійного потоку всередині шару розділу. На жаль про характерні особливості інших хвиль другої моди, які генеруються іншими чотирма механізмами, які, зокрема фігурують в інших розділах дисертації, в роботі не говориться.
7. У рівняннях моделі з приведеною густиною відсутні рівняння стану, а для рівнянн (1.86), яке використовується для розрахунку початкової форми внутрішньої хвилі, не приведені граничні умови.
8. У розділі 4.2 густина середовища задається приведеною, а рівняння переносу представлено для солоності.
9. В цілому робота написана непоганою українською мовою, однак одне слово впадає в очі на протязі читання всієї роботи. Це слово з класичного терміну "лінія течії", яке в роботі представлено як "лінія струму".

Відмічені недоліки, однак, не впливають, в цілому, на високу оцінку дисертаційної роботи К.В. Терлецької. Нею зформульована і розв'язана крупна наукова проблема з використанням удосконаленої, в тому числі і за її участю, нової чисельної моделі. В результаті виконаних досліджень в дисертації одержані серйозні і значимі нові наукові результати, в тому числі фундаментального характеру в області динаміки внутрішніх хвиль великої амплітуди в шельфових зонах морів і океанів. Вони суттєво збагачують і відкривають нові можливості для використання одержаних знань про характер і закономірності обмінних процесів в морях і океанах і формування в них глобальної стратифікації. Проведені дослідження виконані на високому науковому рівні, а їх авторка продемонструвала високу наукову ерудицію, широкий дослідницький кругозір, високий рівень володіння різними методами досліджень, як теоретичними, так і експериментальними.

В дисертації узагальнені результати досліджень авторки, які знайшли відображення у 80 публікаціях (включно з монографією у співавторстві), добре відомих і цитованих спеціалістами в області нелінійних внутрішніх хвиль в океані. З цих публікацій 54 входять до списку головних, що вийшли у фахових вітчизняних та зарубіжних виданнях фізико-математичного профілю.

Результати досліджень доповідались дисертанткою на багатьох наукових конференціях в Україні та за кордоном.

Вважаю, що дисертація К.В.Терлецької “Динаміка внутрішніх хвиль великої амплітуди” відповідає вимогам пункту 11 діючого “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння звання старшого наукового співробітника” та “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого Постановою Кабінету міністрів України від 24.07.2013 року № 567 із змінами, внесеними від 19 серпня 2015 року № 656, від 30 грудня 2015 року № 1139 та від 27 липня 2016 року № 56”, які пред’являються до докторських дисертацій, а її авторка заслуговує присудження їй вченого ступеня доктора фізико-математичних наук.

Автореферат відповідає змісту дисертації. Результати роботи можуть бути впроваджені Міністерством екології України для прогнозу процесів переносу та перемішування в районах морського узбережжя України, формування в них характерної стратифікації та відповідної екологічної ситуації.

Зав. відділом вихрових рухів
Інституту гідромеханіки НАНУ
Доктор фіз.- мат. наук

О. Г. Стеценко

