

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Печука Василя Дмитровича

на тему «Регулярна і хаотична динаміка в механіці хрестоподібних хвиль»

представлену на здобуття ступеню доктора філософії

в галузі знань 13 «Механічна інженерія»

за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»

Актуальність теми дисертації

Одним із найдешевших видів транспорту є морські перевезення. Україна, як свідчить досвід та дані, є країною-експортером величезної кількості зернових, перевезення яких здійснюється саме морськими шляхами.

У суднобудуванні, а наша країна є саме тією державою, що буде океанські (та морські) судна, однією з серйозних проблем є міцність конструкції корпусу корабля, здатність витримувати багаторазові навантаження від морських та океанських поверхневих хвиль, які описуються різними типовими для певних регіонів хвильовими пакетами (основних 7 пакетів).

Оскільки корпус корабля являє собою пружне тіло (оболонку із перегородками всередині), то при взаємодії «поверхнева хвиля - корпус корабля» виникають пружні хвилі у корпусі корабля. Відбувається це завдяки ефекту Пуассону. Йдеться про зв'язність повздовжніх та поперечних деформацій у твердому деформованому тілі. На поверхні корпусу корабля виникають рухи, що є перпендикулярними до напрямку руху морських хвиль. Оскільки швидкість поширення пружних хвиль у твердому деформованому тілі є незрівнянно більшою (кілька кілометрів за секунду проти кілька десятків метрів за секунду) ніж швидкість поширення морських поверхневих хвиль, у примезовому шарі на поверхні корабля зароджується рух рідини уздовж поверхні судна – перпендикулярно до набігаючі хвиль.

Тому розробка адекватної теорії, яка б була в змозі описувати хрестоподібні хвилі, є актуальним науково-практичним завданням.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1) Вперше побудовано модель і визначено закономірності хрестоподібних хвиль в прямокутному басейні скінченних розмірів, що безпосередньо збуджуються коливаннями хвилепродуктора.

2) Вперше доведено можливість перекачки енергії безпосередньо від хвилепродуктора до хрестоподібних поверхневих хвиль.

3) Удосконалено чисельні алгоритми для підрахунку розв'язків систем диференціальних рівнянь із запізнюванням.

4) Удосконалено чисельний алгоритм для підрахунку старшого показника Ляпунова.

5) Вперше досліджено вплив запізнювання на динаміку хрестоподібних хвиль.

6) Вперше визначено параметри усталених режимів коливань хрестоподібних хвиль в прямокутних басейнах;

7) Вперше встановлено можливість збудження хаотичних хрестоподібних поверхневих хвиль;

Достовірність отриманих результатів підтверджується порівнянням їх із загальноновизнаними експериментальними даними, несуперечністю із основними законами фізики і математикою.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

Зміст дисертаційної роботи здобувача Печука Василя Дмитровича повністю відповідає освітньо-науковій програмі третього рівня вищої освіти «Прикладна механіка» із спеціальності 131 «Прикладна механіка» з галузі знань 13 «Механічна інженерія».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Механічна інженерія».

Звіт на подібність та оригінальність свідчить про те, що дисертаційна робота Печука Василя Дмитровича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою із використанням загальноприйнятої термінології. Матеріал роботи викладено послідовно науковим стилем мовлення. Робота має чітку логічну структуру.

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списків літератури. Загальний обсяг роботи – 133 сторінки.

Вступ містить аналіз теми роботи, обґрунтовано її актуальність та сформульовано мету, завдання і методи дослідження. У вступі також надано інформацію про наукову новизну та практичне значення отриманих в дисертаційній роботі результатів.

У першому розділі наводиться огляд досліджень з тематики дисертації. Наводиться, у першому підрозділі, стан розробки теорії хрестоподібних хвиль. Зокрема зазначається, що основи взаємодії рідини та конструкції вперше були закладені в фундаментальних працях лорда Релея і далі продовжувалися радянською школою механіків – Гутіним Л.Я., Грінченко В.Т., Вовком І.В., Бабенко В.В. та Воропаєвим Г.О. Крім того, в роботах відомого англійського гідромеханіка Г. Лемба доведено про істотний вплив рідини на коливання пластини, і отже збурення поперечної складової імпульсу швидкості рідини (через тертя із твердою стінкою – опонент).

Продовжує огляд робіт праця Фарадея (1831 рік), де вперше детально описано явище утворення хрестоподібних хвиль. Крім хрестоподібних хвиль,

при коливанні тіл на поверхні рідини також утворюються звичайні резонансні хвилі. Ці хвилі мають нижчу за хрестоподібні частоту та меншу амплітуду. У вступі зазначено, що питанням переходу від одного типу хвиль до іншого, класифікація та умови створення резонансу присвячена дана дисертаційна робота.

Продовжують оглядову частину роботи опис експериментів Танеди. Танеда експериментально показав, за допомогою келиха що має форму півсфери, утворення поверхневих хвиль, що викликані вібруючою сферичною поверхнею. Так само, горизонтальний циліндр скінченої довжини здатний генерувати, при коливальному русі у вертикальному напрямку, поверхневі хвилі. Наводяться також експериментальні дослідження Гаррета К.Я., який показав перетворення енергії хвилепродуктору в хрестоподібні хвилі.

Далі, у першому розділі увага привертається до здобутків саме тих, що стосуються безпосередньо дослідження даної роботи. Мова про хаотично усталені режими в детермінованих динамічних системах. Якщо встановлені режими в системі переважно мають хаотичний характер, то розуміння динаміки системи пов'язані, таким чином, не з регулярними, а з її хаотичними модами. Робиться висновок про те, що аналіз динамічного хаосу в системі породжує потребу у виявленні та дослідженні більш складних характеристик системи, ніж ті, на яких базується розуміння закономірних режимів.

Оскільки вже мова зайшла про хаотичні властивості системи, то продовжує перший розділ огляд робіт з теорії хаосу. Зокрема наведено посилання на фундаментальні роботи Арнольда В.І., Гукенгеймера Дж. і Холмс Ф., Ліхтенберга А. і Лібермана М, Ю. І. Неймарка і П. С. Ланди, Г. М. Заславського і Р. З. Сагдеева, Ф. Муна, Г. Шустера, В. С. Аніщенко, А. Ф. Вакакіса, Л. І. Маневича і Ю. В. Міхліна, С. П. Кузнецова, В. Т. Грінченка, В. Т. Мацепури і А. А. Снарського, Т. С. Краснополюскої і А. Ю. Швеця, Н. А. Магнітського, В. В. Яновського.

Що стосується піонерських досліджень хаотично усталених режимів коливань у гідропружних системах, то слід зазначити цикл робіт Дж. Майлза,

який зміг довести появу вказаних режимів в динаміці поверхневих хвиль у рідині. Далі наводяться експериментальні виявлення хаотичних хвиль в знаменитій американській лабораторії Голлуба та одночасно школою нелінійної фізики під керівництвом Рабіновича М.І. За цими дослідженнями наводяться теоретичні дослідження щойно згаданих явищ. Вказано на моделі та методи розв'язання математичних задач, які відповідають цим моделям.

Одним із основних напрямків досліджень даної дисертаційної роботи є вивчення так званих систем із запізнюванням. Це таке фізичне явище, коли на динаміку системи впливає певна передісторія, тобто у певний момент часу не тільки стан системи визначає наступну її поведінку, але і сукупність її станів впродовж певного попереднього проміжку часу (передісторія). Наводиться огляд робіт у цій області досліджень, зокрема робіт, що присвячені математичним методам розв'язання задач, які описуються системами із запізненням.

Наприкінці оглядової частини повертається увага на новий підхід, а саме новий явний гібридний метод для систем диференціальних рівнянь із запізненням. Це метод п'ятого порядку точності, який базується на явних методах Рунге-Кутти та побудові поліномів Ньютона для передісторії моделі. Вказано на некоректність застосування класичного алгоритму Бенеттіна у випадку існування в системі декількох атракторів, зокрема прихованих. І тому в роботі запропоновано метод підвищення точності алгоритму Бенеттіна для дисипативної динамічної системи.

У другому розглянуто сучасні методи теорії динамічних систем. У першому підрозділі введені такі поняття як динамічна система та атрактор. Особливу увагу приділено тому, що в залежності від ступеня врахування різних факторів, отримуються різні математичні моделі, які якісно описують різні динамічні процеси. Саме тому динамічну систему ототожнюють із її математичною моделлю. Далі наводиться класифікація динамічних систем, а саме розрізнення потокових (неперервних) динамічних систем та каскадних (дискретних). Другий тип характерний тим, що каскадні динамічні системи

визначаються лише даними на дискретній множині значень часу. Вводяться поняття консервативної та дисипативної динамічної системи, а також автоколивальної системи. Наступний зміст роботи у даному підрозділі присвячено поняттям регулярного та хаотичного атракторів – областей притягання траєкторій руху (стану) системи. У другому підрозділі другого розділу вводяться поняття диференціальних рівнянь та систем із запізнюванням, теореми існування та єдності розв'язків відповідних рівнянь та систем рівнянь. У третьому підрозділі йдеться вже про методи чисельного інтегрування, без яких не можна обійтися при розв'язанні складних нелінійних диференціальних рівнянь. У якості здобутку автору наводиться новий явний гібридний метод п'ятого порядку точності та оцінка локальної похибки чисельного інтегрування отриманого за цим методом.

Оскільки хаотична динаміка пов'язана із стійкістю руху, то неодмінним її атрибутом будуть критерії стійкості. Тому у четвертому підрозділі йдеться про старший показник Ляпунова, який відповідає за стійкість. Наведено алгоритм Бенеттіна та його модифікація -- новий універсальний алгоритм оцінки старшого показника Ляпунова в дисипативній системі. Цей алгоритм враховує особливість хаотичних атракторів і головне – він не залежить від форми розміру та структури самого атрактора та їх кількості в фазовому просторі системи.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено саме фізичному явищу – хрестоподібним поверхневим хвилям у прямокутному басейні. Дана загальна характеристика задач і моделей. Зазначено, що ці хвилі моделюються на основі рівнянь Ейлера динаміки нестисливої течії рідини без урахування ефектів в'язкості. Наведено результати лабораторних експериментів, які проводилися у Інституті гідромеханіки НАН України та зазначено фізичні умови створення хрестоподібних хвиль (частота приблизно вдвічі менша за частоту основних хвиль, що генеруються хвилепродуктором). Здійснено математичне моделювання цих хвиль. Ще одним здобутком даної роботи є нова математична модель, що описує пряме збудження хрестоподібних хвиль

коливаннями хвилепродуктора. Так зазначено, що Гаррет першим показав, що хвилепродуктор збуджує коливання середнього рівня рідини, які служать збудником хрестоподібних хвиль. При цьому він зазначив, що коливання середнього рівня рідини вільної поверхні недостатні для збудження хрестоподібних хвиль. Натомість хрестоподібні хвилі повинні отримувати енергію від коливань хвилепродуктора, але математично довести Гаррет це не зміг. Це зроблено у даній роботі.

Четвертий розділ присвячено чисельному аналізу та хаотичній поведінці динамічної системи. Наводиться нелінійне диференціальне рівняння для коливань рівня вільної поверхні, яке розв'язується чисельно. У другому підрозділі четвертого розділу наводиться порівняння алгоритмів підрахунку старшого показника Ляпунова. Порівнюються результати, що отримуються за класичним алгоритмом Бенеттіна та його модифікацією, запропонованою в даній роботі. У третьому підрозділі четвертого розділу можна побачити результати чисельного експерименту щодо розрахунку хаосу в динамічній системі із запізнюванням. Зазначено на суттєвість врахування факторів запізнювання при дослідженні регулярної і хаотичної динаміки системи що описує хрестоподібні хвилі в басейні.

У висновках дисертаційної роботи зазначені основні наукові результати, зокрема математична можливість перекачування енергії від хвилепродуктора до хрестоподібних хвиль, побудовано новий чисельний алгоритм розв'язання диференціальних рівнянь та систем із запізнюванням, вперше досліджено вплив запізнювання на динаміку хрестоподібних хвиль.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій»

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати роботи висвітлені в 11 наукових публікаціях здобувача, серед яких 6 статей у фахових журналах. Результати, які отримані в дисертації, апробовані на 5 доповідях на фахових конференціях.

Усі публікації повністю відображають результати, представлені в дисертаційній роботі і відзначаються високим рівнем дотримання академічної доброчесності.

Недоліки та зауваження по дисертаційній роботі

1. В роботі зазначено про важливість взаємодії хвиль із пружною деформованою поверхнею, але не зроблено оцінок малості ефекту впливу деформації поверхні на генерацію нормальних мод руху рідини, оскільки при деформації твердої поверхні, завдяки ефекту Пуассону, генерується перпендикулярний до набігаючих хвиль імпульс (кількість руху). Це, разом із нестійкістю поверхневих хвиль може бути джерелом зародження хрестоподібних хвиль. Адже за теоремою про збереження кількості руху (імпульсу) не може генеруватися рух частинок рідини у перпендикулярному напрямку, якщо до цього цієї складової не було.

2. На початку четвертого розділу можна було трохи більше приділити уваги тому як розв'язувалося нелінійне рівняння, як застосовувався новий метод для його розв'язання.

3. В роботі наведено теореми про існування і єдиність розв'язку математичної задачі, яка описує хаотичну динаміку. Але загально відомо, що нелінійні системи мають у кожний момент часу можливість існування двох (і більше, в залежності від ступеня нелінійності) розв'язків, що і призводить до хаотизації руху (в рідині це турбулентний рух). Можливо, єдиність забезпечується передісторією, тобто запізнюванням в системі. Але про це чітко не сказано.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують отримані в роботі нові наукові результати, їх практичну значимість та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Печука Василя Дмитровича на тему «Регулярна і хаотична динаміка в механіці хрестоподібних хвиль» виконана на високому науковому рівні, не порушує

принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, розв’язує наукове завдання, що має важливе значення для галузі знань 13 – «Механічна інженерія». Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6—9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Печук Василь Дмитрович заслуговує присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 131 «Прикладна механіка».

Офіційний опонент

к.фіз.-мат. н., доц. каф. Гідрогазових систем Державного некомерційного підприємства “Державний університет ”Київський авіаційний інститут”,
МОН України

Павло ЛУК’ЯНОВ