

ВІДГУК

**опонента на дисертаційну роботу Печука Василя Дмитровича
«Регулярна і хаотична динаміка в механіці хрестоподібних хвиль»,
представлену на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії з
галузі знань 13 «Механічна інженерія»,
за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»**

Відгук підготовлено на підставі вивчення поданої дисертаційної роботи, яка складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списків використаних джерел, а також переліку наукових публікацій, зарахованих за темою дисертаційної роботи.

Актуальність теми дослідження.

Поверхневі хвилі в рідині являють собою широко розповсюджене явище, дослідженню якого присвячено роботи від стародавніх часів до сьогодення. За певних умов на вільній поверхні рідини виникають хрестоподібні хвилі, природа та існування яких до цього часу викликає дискусії. На даний момент не існує єдиного строгого пояснення даного явища. В даній роботі пропонується модель хрестоподібних хвиль в прямокутному басейні скінченних розмірів, що збуджуються коливаннями хвилепродуктора. В басейні Інституту гідромеханіки НАН України проведено експеримент, що ілюструє появу хрестоподібних хвиль в результаті роботи хвилепродуктора. Для сучасної прикладної механіки характерна відсутність аналітичного розв'язку математичних моделей досліджуваного процесу або явища. Це призводить до широкого застосування чисельних методів та комп'ютерних розрахунків при проведенні досліджень. Тому перед автором було поставлено задачу чисельного дослідження динаміки отриманої моделі. В якості параметру, що характеризує цю динаміку, згідно сучасної теорії динамічних систем, обрано експоненту Ляпунова. Також досліджено вплив фактору запізнювання на характер динаміки даної системи.

Резюмуючи можна стверджувати, що вибраний напрямок досліджень є

актуальним, а обрана тема дисертації і поставлені в ній завдання щодо розв'язання задач по визначенню характеристик динаміки моделі та методи дослідження є перспективними.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

В даній роботі використано фундаментальні положення класичної механіки рідини, прикладної механіки, сучасної теорії динамічних систем, сучасних методів проведення чисельних розрахунків, а також лабораторний експеримент. Для моделювання системи, що описує хрестоподібні хвилі використано класичні методи Рунге-Кутти і явний гібридний метод автора, що оснований на методах Рунге-Кутти п'ятого порядку збіжності. Дані методи використані з контролем похибки обчислень. Збіжність авторського явного гібридного методу доведена аналітично. Регулярні режими отримані в результаті чисельного моделювання відповідають отриманим експериментально. Тому наукові положення та висновки дисертації є достовірними і обґрунтованими.

Наукова новизна одержаних результатів:

- побудовано модель і виявлено деякі закономірності хрестоподібних хвиль в прямокутному басейні скінченних розмірів, що спричинені коливаннями хвилепродуктора;
- доведено можливість перекачки енергії від хвилепродуктора до хрестоподібних поверхневих хвиль;
- Визначено деякі параметри усталених режимів коливань хрестоподібних хвиль в прямокутних басейнах;
- встановлено можливість збудження хаотичних хрестоподібних поверхневих хвиль;
- розроблено новий чисельний метод розв'язку систем з запізнюванням;
- розроблено новий алгоритм підрахунку експоненти Ляпунова;

- досліджено вплив факторів запізнювання на динаміку хрестоподібних хвиль.

Практичне значення одержаних результатів.

Для виконання дослідження побудовано новий чисельний алгоритм для систем звичайних диференціальних рівнянь із запізнюванням, що підходить для дослідження широкого спектру складних реальних задач, що наразі виникають в прикладній механіці.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у Відділі вихрових рухів Інституту гідромеханіки НАН України та застосовано при обчисленні експоненти Ляпунова в дисипативних динамічних системах та при дослідженні впливу факторів запізнювання на динаміку гідродинамічних моделей. Робота виконувалась в рамках напрямків фундаментальних досліджень Київського національного університету будівництва і архітектури.

Повнота викладу основних наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих роботах.

По матеріалах досліджень за темою дисертації опубліковано 6 наукових статей, 1 з яких в міжнародному науковому виданні що індексується у міжнародних науково-метричних базах, зокрема у Scopus і Web of Science, 1 – у виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України з присвоєнням категорії “А”, 4 статті у науковому виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України категорії «Б».

За матеріалами проведених досліджень зроблено доповіді на чотирьох міжнародних конференціях, одна з яких увійшла до книги збірки вибраних наукових праць конференції, що індексується у Scopus.

Публікації відповідають змісту і науковим положенням дисертації. Основні наукові результати і методи дисертації апробовані на міжнародних конференціях. Наявність серед публікацій матеріалів у закордонних виданнях

включених до Scopus і Web of Science свідчить про високе наукове значення роботи.

Оцінка основного змісту дисертаційної роботи.

У **вступі** зазначено основні положення дисертації: актуальність теми дисертаційної роботи, мета і завдання дослідження, об'єкт і предмет дослідження, наукова новизна та практична цінність отриманих результатів. Також у вступі наведено особистий внесок здобувача, структура і обсяг дисертаційної роботи, надані відомості про апробацію та публікації.

В **першому розділі** виконаний огляд вітчизняних та закордонних літературних джерел, в котрих викладено аналіз сучасних проблем дослідження.

В **другому розділі** автором наведено основні методи сучасної теорії динамічних систем, а також основні означення. Описані диференціальні рівняння із запізнюванням аргументу, означення та постановка початкової задачі, теореми існування і єдиності розв'язку та класичні методи Рунге-Кутти. Показано узагальнення методів Рунге-Кутти для систем із запізнюванням та описано авторський явний гібридний метод п'ятого порядку збіжності для динамічних систем із запізненням. Наведено алгоритм Бенеттіна з модифікаціями та запропоновано новий універсальний алгоритм оцінки старшого показника Ляпунова для дисипативних динамічних систем.

В **третьому розділі** в описано загальний стан та основні рівняння, що описують динаміку хрестоподібних хвиль в прямокутному басейні. Показано лабораторний експеримент, фотографії хрестоподібних хвиль та виведено нову математичну модель, що описує пряме збудження хрестоподібних хвиль коливаннями хвилепродуктора.

В **четвертому розділі** при дослідженні усталених динамічних режимів нової системи, що описує хрестоподібні хвилі, що виникають в прямокутному басейні з хвилепродуктором, продемонстровано ефективність запропонованої методики підрахунку старшого показника Ляпунова. Проведено порівняння класичного алгоритму Бенеттіна з новим. Використовуючи авторський метод

розв'язку систем диференціальних рівнянь із запізнюванням, показано, як фактор запізнювання призводить до хаотизації хвиль.

Основні досягнення дисертації у стислій формі надано в **загальних висновках**.

Зауваження за текстом дисертації.

За текстом дисертації виявлені наступні зауваження, які не впливають на загальну наукову і практичну цінність проведеного дослідження і можуть бути розглянуті як питання для дискусії:

1. Запропонована методика обчислення старшого показника Ляпунова не дозволяє знаходити значення молодших показників Ляпунова.

2. При дослідженні динамічних режимів в моделі використано не всі відомі характеристики хаотичних процесів, зокрема не застосовано описаний в роботі спектр Фур'є або, наприклад, фрактальну розмірність атратора.

3. В тексті дисертації та підписах під рисунками присутні дрібні описки, що не впливають на загальне позитивне враження від оформлення дисертації.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність в цілому, оформлення.

Дисертація написана державною мовою та відповідає вимогам МОН до оформлення дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

В роботі пропонується нова модель виникнення хрестоподібних хвиль в прямокутному басейні скінченних розмірів, що збуджуються коливаннями хвилепродуктора. Необхідно відзначити комплексний підхід до вирішення поставленої задачі. Виконано експериментальне дослідження в лабораторії інституту Гідромеханіки НАН України, проведено чисельні розрахунки на основі запропонованої моделі, здійснено впровадження результатів роботи. Автором розроблено чисельний метод для інтегрування систем з запізнюванням та новий покращений алгоритм підрахунку старшого показника Ляпунова. Дані методи разом з класичними було застосовано до нової системи рівнянь, яка

описує хрестоподібні хвилі в прямокутному басейні скінченних розмірів, що збуджуються коливаннями хвилепродуктора. Отримані в результаті регулярні динамічні режими цієї системи співпадають з експериментальними даними. Теоретично показана можливість виникнення та існування хаотичних хрестоподібних хвиль.

Представлена до захисту дисертація є завершеною і впорядкованою, пройшла апробацію і має теоретичну і практичну цінність для відповідної галузі науки 131 «Прикладна механіка».

Загальний висновок.

Дисертаційна робота «Регулярна і хаотична динаміка в механіці хрестоподібних хвиль» відповідає усім вимогам, що висуваються до дисертацій, які подаються на здобуття ступеня доктора філософії, згідно «Порядку присудження ступеня доктора філософії ...», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44, та напрямку наукового дослідження освітньо-наукової програми КНУБА з вищезазначеної спеціальності, а її автор Печук Василь Дмитрович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка».

Опонент:

Кандидат фізико-математичних наук,
учений секретар
Інституту гідромеханіки
НАН України

Наталія ДИМИТРІЄВА