

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертацію **Воропая Олексія Валерійовича**

«Використання інтегральних рівнянь Вольтерра

у нестационарних задачах динаміки пластин»,

яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Актуальність теми дослідження.

В дисертаційній роботі Воропая О. В. розв'язано важливу та актуальну проблему, яка надає подальшого розвитку теорії обернених задач механіки деформівного твердого тіла. Загальне визначення обернених задач – це задачі, в яких потрібно знайти причини та визначити фактори, залежно від класу оберненої задачі, при відомих наслідках і деякій додатковій інформації про об'єкт дослідження. У цій роботі розглядаються обернені нестационарні задачі, пов'язані з ідентифікацією законів змінення у часі силових збурень при відомих залежностях прогинів або деформацій від часу в деяких точках пластин при їх нестационарному деформуванні. Теоретичне розв'язання таких задач може знизити вартість і час досліджень, а іноді замінити натурний експеримент розрахунковим.

При розв'язанні задач в дисертації використовується теорія інтегральних рівнянь Вольтерра, яка, з математичної точки зору, покладена в основу дисертаційного дослідження. Це обумовлено тим, що при аналітичному розв'язанні диференціальних рівнянь за допомогою інтегрального перетворення Лапласа шукані розв'язання можуть бути отримані у вигляді інтегралів згортки (Дюамеля), які при відомому ядрі та невідомій функції навантаження є інтегральними рівняннями Вольтерра першого роду. Для їх розв'язання в роботі також застосовується сучасна теорія некоректних задач математичної фізики та дещо удосконалений комплекс математичних методів.

А саме:

– розроблено методику та обчислювальні алгоритми для дискретизації систем інтегральних рівнянь Вольтерра, а також розв'язання блокових систем лінійних алгебраїчних рівнянь із використанням регуляризуючого алгоритму Тихонова та узагальнених алгоритмів Крамера або Гаусса;

– набула подальшого розвитку методика вибору оптимальних значень параметра регуляризації Тихонова за допомогою додаткової апріорної інформації про навантаження, які ідентифікуються (додаткових умов механіки деформування), та теорії оптимізації при суперечливих критеріях;

– розроблено підхід, який дає можливість моделювати дисипативні властивості матеріалу на базі розв’язків у рамках теорії пружності для деформівних елементів конструкції з використанням диференціальних та інтегральних операторів;

– вперше розроблено згладжувальні лінійні інтегральні оператори для випадку внутрішнього в’язкого тертя (модель Кельвіна–Фойхта) і внутрішнього гістерезисного тертя (модель Бока–Шліппе–Колара) та одержано спеціальні матриці для модифікації ядер при числових розрахунках.

Головною перевагою, яка визначила високу ефективність нового методу інтегральних операторів, є те, що він не використовує інформацію про структуру розв’язків, а саме про частоти і форми вільних коливань континуума, і, отже, він не чутливий до похибок опису крайових умов і недосконалості прийнятих гіпотез деформування (Кірхгофа, С. П. Тимошенка та ін.). Тому метод можна використовувати в режимі обробки осцилограм, які отримані у результаті проведення експерименту.

Метод дозволяє виділяти з досліджуваних коливань так звану «пружну» складову і найменш трудомістким способом моделювати перехідні процеси при різних значеннях коефіцієнта тертя, що, наприклад, відповідає термічному стану матеріалу, який змінюється.

Крім того, використання інтегральних операторів для випадку внутрішнього тертя не є розповсюдженим, і тому запропоновані в цій роботі оператори можуть стати фундаментом **нового наукового напрямку** з урахування енергії дисипації при аналізі в’язкопружного деформування елементів конструкції.

Актуальність теми роботи підтверджується також тим, що вона виконувалася на кафедрі вищої математики НТУ «ХПІ» та на кафедрі деталей машин і ТММ ХНАДУ згідно з щорічними планами науково-дослідної роботи з 2005 по 2018 роки, а також з робочими планами бюджетної теми № 01-53-04 «Створення методів математичного моделювання з управління нестационарними деформаційними процесами» (ДР №0104U002046) і теми № 01-53-07 «Математичні основи експрес-аналізу механічних параметрів дорожнього покриття та дослідження його динамічних властивостей» (ДР №0107U001004).

Обґрунтованість наукових положень та рекомендацій, які сформульовані у дисертації є високою й обумовлена тим, що

– при розробці моделей розрахунку використовуються відомі фізичні закони, а також загальновідомі та адекватні гіпотези і припущення;

- обрано доцільний комплекс методів та обчислювальних алгоритмів, а також виконано їх удосконалення шляхом розробки нових підходів;
- ретельно розв'язано поставлені наукові задачі, а також детально проаналізовано результати числових розрахунків.

Обґрунтованість висновків та рекомендацій забезпечується тим, що вони безпосередньо впливають із отриманих результатів дисертаційної роботи.

Достовірність отриманих результатів підтверджується:

- відповідністю результатів розв'язання прямих і обернених задач;
- добрим узгодженням з результатами, які отримані іншими методами, або з результатами інших авторів;
- результатами теоретико-експериментальних досліджень.

Коротка характеристика та наукова новизна по розділах роботи.

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою. Вона складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і двох додатків. Загальний обсяг роботи – 359 сторінок, з яких основного тексту – 282 сторінки. Дисертація містить 165 рисунків. Список використаних джерел містить 300 найменувань на 36 сторінках. Додатки – 16 сторінок.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету і задачі дослідження, зазначено основні наукові результати, наведено відомості про публікації та апробацію основних положень, зазначено особистий внесок здобувача у наукові праці, які написані у співавторстві.

У **першому розділі** здійснено огляд робіт за темою дисертаційної роботи.

Слід відзначити, що в дисертації міститься широкий огляд наукових робіт, пов'язаних з побудовою обернених задач нестационарного деформування елементів конструкцій на базі теорії інтегральних рівнянь Вольтерра. Значна увага приділена ідентифікації навантажень та активному управлінню коливаннями. Вказані напрямки, у яких теорія обернених нестационарних задач на теперішній час недостатньо розвинута.

У **другому розділі** описано чисельно-аналітичні методи, що використовуються у роботі.

Розроблено методику та обчислювальні алгоритми для дискретизації систем інтегральних рівнянь Вольтерра, і потім розв'язання блокових систем

лінійних алгебраїчних рівнянь із використанням регуляризуючого алгоритму Тихонова та узагальнених алгоритмів Крамера або Гаусса.

Набула подальшого розвитку методика вибору оптимальних значень параметра регуляризації Тихонова за допомогою додаткової апріорної інформації про навантаження, які ідентифікуються (додаткових умов механіки деформування).

У **третьому розділі** розглянуто імпульсні впливи системи довільних складних навантажень (що мають не тільки поперечну, але й поздовжню складову) на прямокутні пружні ізотропні пластини середньої товщини в рамках уточненої теорії С. П. Тимошенка.

Вперше розв'язано обернену задачу про вплив на пластину декількох невідомих незалежних нестационарних навантажень, що діють одночасно.

Розроблено, побудовано і вперше реалізовано стійкі до збурювання вихідних даних обчислювальні алгоритми з відновлення складних імпульсних навантажень, що діють на прямокутні пластини типу С. П. Тимошенка.

Показана можливість урахування двосторонньої пружної інерційної основи на базі модифікації скінченно-різницевого ядра Коші та власних кругових частот.

У **четвертому розділі** описано нестационарне деформування пластин при наявності різних особливостей, які зосереджені у точці або локалізовані на малих областях (мас, додаткових опор та погашувачів коливань). У розділі наведена постановка задачі та математична модель, а також розв'язання задачі в загальному вигляді.

Розв'язано прямі та обернені (вперше) задачі моделювання нестационарних коливань прямокутних пластин за наявності зосереджених мас, додаткових зосереджених опор та погашувачів коливань.

Виконано декомпозицію реакції в'язкопружної опори на пружну та в'язку складові, що є особливо важливим у задачах оптимального проектування додаткових в'язкопружних опор.

Проведено аналіз впливу зосереджених особливостей на процес коливань, що може бути використано для зменшення амплітуд коливань відповідальних конструкцій із пластинчастими елементами.

У **п'ятому розділі** розв'язано низку задач, які стосуються управління нестационарними коливаннями механічних систем, що містять пластини.

Побудоване розв'язання некоректної задачі про управління нестационарними коливаннями прямокутної пластини з урахуванням різних зосереджених особливостей.

Показано специфіку роботи схем пасивного і активного віброзахисту пластини при нестационарних коливаннях та зазначено, що для відповідальних конструкцій необхідно комбінувати пасивні та активні елементи віброзахисту.

Вперше побудовано розв'язання задачі управління коливаннями на невеликій області відносно величини площі пластини.

Показано можливість значного зменшення амплітуд коливань по всій поверхні пластини скінченною системою керуючих навантажень (розглянуто систему чотирьох керуючих сил) та відносна стійкість розроблених програм і алгоритмів ідентифікації керуючих навантажень.

У **шостому розділі** розроблено підхід, який дає можливість моделювати дисипативні властивості матеріалу на базі розв'язань у рамках теорії пружності для деформівних елементів конструкції з використанням диференціальних та інтегральних операторів.

Вперше розроблено згладжувальні лінійні інтегральні оператори для випадку внутрішнього в'язкого тертя (модель Кельвіна–Фойхта) і внутрішнього гістерезисного тертя (модель Бока–Шліппе–Колара) та отримано спеціальні матриці для модифікації ядер при числових розрахунках.

Проведено експериментальне дослідження ударного навантаження прямокутної ізотропної пластини середньої товщини з метою обґрунтування теоретичних результатів.

Уточнено результати ідентифікації нестационарних навантажень на основі експериментальних даних при урахуванні дисипації енергії (при переході від пружних до в'язкопружних моделей).

У **висновках** наведено перелік основних наукових і практичних результатів одержаних у дисертаційній роботі.

У **додатках** наведено список публікацій здобувача, а також довідки про використання результатів дисертації.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблені О. В. Воропаєм математичні методи можуть бути узагальнені на інші механічні системи різних геометричних форм. Явний вигляд ядер у відповідних інтегральних рівняннях може відрізнитися в залежності від форми об'єкта, крайових умов, а також від характеру деформування (пружне, пластичне тощо). Але підходи до розв'язань інтегральних рівнянь та обробки ядер залишаться майже незмінними.

Результати роботи можуть бути використані для визначення даних про характер і величину нестационарних навантажень, що виникають у різних

механічних системах, на основі аналізу відгуку (переміщень, деформацій у деяких точках елементів конструкцій), а також виборі раціональних режимів управління коливаннями.

Результати досліджень та запропоновані підходи застосовано при виконанні науково-дослідних робіт та підтверджено довідками про використання результатів досліджень від Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, ТОВ «Океан-судоремонт» та корпорації «Співдружність».

Повнота викладених наукових положень та висновків.

Результати досліджень доповідались та обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях, а також опубліковані у провідних наукових фахових виданнях.

За темою дисертації опубліковано 51 наукову працю, серед яких одна одноосібна монографія, одна монографія в співавторстві, 29 наукових статей (з них 28 статей у фахових виданнях України, 12 входять до видань, які внесені до міжнародних наукометричних баз, 1 стаття у закордонному виданні), 20 опублікованих тез доповідей та матеріалів конференцій.

Публікації відповідають кожному розділу дисертації.

Автореферат дисертації Воропая О. В. повністю відображає зміст і суть результатів досліджень, які викладені в дисертації.

Оформлення дисертації.

Дисертація є закінченою науковою працею, що виконана у вигляді підготовленого рукопису, який підготовано згідно з вимогами дисертаційних робіт. Стиль викладання наукового матеріалу забезпечує його чітке та однозначне розуміння.

Зауваження до дисертаційної роботи.

Викладене вище свідчить про високий науковий рівень роботи та її відповідність вимогам, що пред'являються до докторських дисертацій. Проте, слід зазначити і ряд таких недоліків.

1. Застосування запропонованих підходів обмежується випадком «малих» деформацій, коли справедливо використання принципу суперпозиції.

2. Недостатньо висвітлено відмінність результатів при застосуванні різних моделей внутрішнього тертя.

3. У роботі розглянуто задачі про деформування шарнірно обпертих прямокутних пластин. Доцільно узагальнити викладені методи та підходи на

випадок пластин з іншими граничними умовами та з іншою, більш складною формою.

4. Автор розв'язує задачі, які є складними, але водночас і модельними. Було б цікаво узагальнити розв'язки на задачі удару, коли зона контакту описується на за допомогою теорії Герца.

Ці зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Висновки.

На підставі вищевикладеного, вважаю, що дисертаційна робота Воропая Олексія Валерійовича «Використання інтегральних рівнянь Вольтерра у нестационарних задачах динаміки пластин» є завершеною науковою працею, в якій містяться нові наукові результати, спрямовані на вирішення важливої науково-прикладної проблеми, яка пов'язана з ідентифікацією силових навантажень при нестационарному деформуванні елементів конструкцій.

Результати наукових досліджень кандидатської дисертації Воропая О. В. не виносяться на захист докторської дисертації.

Робота повністю відповідає за своїм змістом паспорту спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла, всім вимогам пунктів 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013, а її автор, Воропай Олексій Валерійович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент, доктор технічних наук,
старший науковий співробітник, завідувач
відділу вібраційних і термоміцнісних досліджень,
Інституту проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України

Сметанкіна Н.В.

Підпис д-ра техн. наук, с.н.с. Сметанкіної Н.В. засвідчую:

Учений секретар
Інституту проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України,
доктор технічних наук



Максименко-Шейко К.В.