

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Григор'євої Людмили Олександрівни «**Чисельне моделювання динамічних процесів в п'єзоелектричних тілах з урахуванням дисипативних властивостей та неоднорідності матеріалу**» на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Актуальність теми дисертації. Конструктивні елементи з п'єзоелектричних матеріалів широко застосовуються в сучасній техніці, зокрема в машино- і приладобудуванні, медицині, радіоелектроніці тощо. П'єзоелектричні резонатори, фільтри, генератори, ультразвукові випромінювачі і приймачі функціонують при гармонічних навантаженнях. Нестаціонарний режим навантаження є основним для п'єзоперетворювачів, що використовуються в датчиках, іскрових генераторах, приладах контролю в адаптивних механічних системах тощо. Останнім часом внаслідок підвищення вимог до надійності, низьковольтажності, мініатюризації, умов функціонування в мікроелектронних системах значного розповсюдження набули п'єзоелементи неоднорідної структури, в яких комбінуються п'єзокераміка, п'єзополімери та пасивні (неп'єзоелектричні) матеріали. Вказане визначає актуальність теми дисертаційної роботи, присвяченої розвитку теорії й методів дослідження динамічних процесів у п'єзоелектричних елементах конструкцій при усталених та нестаціонарних зовнішніх впливах.

Останнім часом п'єзоелектричні сенсори у формі накладок, закріплених на конструкціях, або інтегрованих у вигляді шарів композитного матеріалу, широко застосовуються для контролю деформацій та діагностики пошкоджень (Structural Health Monitoring), а також як сенсори й актуатори в системах активного демпфування коливань елементів конструкцій. Особливої актуальності такі технології набувають у випадку конструкцій із композиційних матеріалів. Крім того, сучасні високоефективні п'єзоелектричні перетворювачі мають композитну структуру, що забезпечує підвищення їхніх експлуатаційних характеристик.

Проектування структурно-неоднорідних п'єзоелектричних матеріалів для елементів конструкцій, які працюють в умовах динамічних навантажень, потребує використання фізично обґрутованих моделей розсіювання енергії в матеріалах та у зовнішньому середовищі, а також відповідних математичних методів аналізу напружено-деформованого стану. У зв'язку з цим тема представленої дисертаційної роботи є безперечно актуальною.

Об'єктом дослідження є нестаціонарні та усталені коливання однорідних та неоднорідних електров'язкопружних тіл.

## Аналіз змісту і структури дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Григор'євої Л.О. складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 329 найменувань та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 340 сторінок, обсяг основного тексту дисертації становить 276 сторінок. В першому та другому розділі проведено грунтовний огляд сучасного стану досліджень неоднорідних п'єзоелектрических тіл та описано постановку задач гідроелектров'язкопружності.

Основні результати досліджень викладені у 3-5 розділах роботи.

Третій розділ присвячено розвитку чисельних методів дослідження усталених осесиметрических коливань однорідних та композитних п'єзоелектрических циліндрів. Проводиться порівняння різних підходів до врахування демпфування коливань, а саме комплексних модулів, затухання за Релеєм, затухання з коефіцієнтом, незалежним від частоти.

В четвертому розділі розвинуто узагальнений чисельний підхід до аналізу пульсуючих коливань багатошарових та функціонально-неоднорідних плоских тіл, циліндрів та куль. Для врахування демпфування коливань вводиться чотирипараметрична модель демпфування, що враховує п'єзоелектричні та діелектричні втрати. Порівнюються процеси затухання коливань внаслідок дисипативних втрат та взаємодії з акустичним середовищем.

В п'ятому розділі розвинуто підхід до дослідження динаміки функціонально-неоднорідних тіл складної геометрії в тривимірній постановці за допомогою методу скінчених елементів. Досліджуються власні, вимушенні та нестационарні коливання змодельованого елемента. Із змодельованого процесу затухання коливань визначаються дисипативні характеристики п'єзоелемента.

Наукова новизна роботи полягає у розробці чисельної методики дослідження динамічного електромеханічного стану неоднорідних п'єзоелектрических елементів конструкцій з урахуванням дисипативних властивостей матеріалу і аналізу на її основі динамічних процесів таких елементів при усталених та нестационарних електромеханічних навантаженнях.

Зокрема,

- одержано числові розв'язки задач нестационарних радіальних коливань товстостінних багатошарових та функціонально-градієнтних радіально поляризованих циліндрів і куль з урахуванням їх взаємодії із зовнішнім середовищем і розсіювання енергії коливань;
- виявлено нові закономірності переходних процесів у багатошарових та функціонально-градієнтних плоских тілах, циліндрах та кулях з урахуванням електромеханічних втрат енергії та впливу зовнішнього акустичного середовища;
- розроблено та реалізовано алгоритм розрахунку планарних осесиметрических коливань тонких круглих та кільцевих поляризованих за

товщиною п'єзоелектричних пластин при електричних та механічних нестационарних навантаженнях;

- отримано та чисельно реалізовано розрахункові співвідношення для визначення електрорушійної сили п'єзоелектричних радіально поляризованих тіл обертання та поляризованих за товщиною круглих і кільцевих пластин при нестационарних механічних навантаженнях;

- проведено систематизацію, чисельну реалізацію та порівняння різних способів врахування дисипативних властивостей матеріалу, а саме комплексних модулів, альфа-демпфування, бета-демпфування, демпфування за Релеєм, сталого коефіцієнта демпфування та запропонованої чотирипараметричної моделі електромеханічного демпфування коливань;

- розвинуто підхід до дослідження вільних, гармонічних та нестационарних коливань функціонально-неоднорідних електров'язкопружних елементів у тривимірній постановці методом скінченних елементів.

Наукові положення дисертаційної роботи, які виносяться на захист, є новими і не повторюють результати, за якими здобувачка захистила кандидатську дисертацію.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі. Сформульовані в дисертаційній роботі Григор'євої Л.О. наукові положення, результати, висновки та рекомендації є теоретично обґрунтованими та базуються на аналізі наукових джерел за даною проблемою, коректній постановці і реалізації мети дослідження. Обґрунтованість результатів дисертаційного дослідження підтверджується детальним аналізом вибраних фізико-математичних моделей та чисельних методів розв'язання, а також публікаціями в рецензованих наукових виданнях та обговоренням основних положень і висновків на міжнародних наукових конференціях.

Достовірність отриманих у роботі результатів дослідження забезпечується математично і фізично коректною постановкою розглянутих початково-крайових задач теорій в'язкопружності, електропружності, гідроелектропружності, механіки композитів; застосуванням апробованих математичних методів, методів механіки рідин і механіки спадкового середовища, а також практичною збіжністю обчислювальних алгоритмів. Про достовірність отриманих результатів також свідчить їх узгодженість з наявними в літературі дослідженнями інших авторів.

Наукова значущість результатів дисертаційної роботи полягає у побудові загальної методики та розвитку чисельних підходів до моделювання та дослідження коливань неоднорідних елементів конструкцій з урахуванням дисипативних властивостей матеріалів та взаємодії з акустичними

середовищами, що забезпечило аналіз ряду прикладних задач динамічної електропружності та гідроелектропружності.

Практичне значення роботи визначається можливістю використання розроблених автором методів, алгоритмів і програмних засобів для проєктування нових і покращення технічних характеристик наявних п'єзоелектричних перетворювачів багатошарового та функціонально-неоднорідного конструктивного виконання. Отримані автором результати створюють наукове підґрунтя для проєктування таких елементів і зменшує об'єм натурних експериментів.

Розроблені підходи можуть бути використані при вивченні та прогнозуванні процесів деформування п'єзоелектричних перетворювачів неоднорідної структури, експлуатованих в умовах усталених та нестационарних електромеханічних навантажень, оптимізації геометричних та матеріальних параметрів. Результати дослідження становлять інтерес для фахівців, що займаються проєктуванням п'єзоелектричних пристройів, а частина результатів може бути включена у навчальний процес при вивченні методів дослідження динамічних режимів роботи електропружинних елементів конструкцій.

#### Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Результати досліджень висвітлено та опубліковано в 39 наукових працях, у тому числі:

- 1 розділ у колективній монографії закордонного видання (Scopus) (здобувачка приймає участь у постановці задач, розробці чисельного алгоритму розв'язання та аналізі отриманих результатів);
- 22 статті у наукових періодичних виданнях, включених до переліку фахових видань України, з них 4 статті опубліковано у виданнях, віднесені до другого-третього квартилів (Q2-Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports (здобувачка взяла участь у постановці задач, розробці чисельного алгоритму розв'язання та аналізі отриманих результатів);
- 1 стаття видана у науковому періодичному виданні, що було включене до переліку фахових видань України на момент публікації («Теоретическая и прикладная механика») (здобувачка взяла участь у постановці задач, розробці чисельного алгоритму розв'язання та аналізі отриманих результатів);
- 15 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях та симпозіумах.

Опубліковані праці повністю відображають основний зміст дисертації та відповідають вимогам п.8. «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197 та «Вимогам до опублікування результатів

дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України 23 вересня 2019 року № 1220.

Ідентичність змісту реферату, анотацій та основних положень дисертації. Змісті реферату та анотації в достатній мірі відображають зміст дисертації та висвітлюють її основні результати та висновки в необхідному обсязі.

Як зауваження та пропозиції щодо роботи варто зазначити таке:

1. Перехідні процеси в розглянутих в роботі гідроелектров'язкопружних системах моделюються лінійними співвідношеннями електропружності та рівняннями акустичного наближення, тому варто було би сформулювати умови і вказати межі застосовності розглянутої моделі.
2. Наведені в роботі результати відповідають випадку нульових початкових умов. На практиці ж, зокрема, при керуванні нестационарними коливаннями елементів адаптивних систем виникає необхідність розгляду модельних задач з неоднорідними початковими умовами. Доцільно було би на деяких прикладах показати, яким чином початкові умови впливають на розв'язок задач.
3. В роботі практично не висвітлено питання врахування частотної залежності дисипації енергії. Загалом застосована для числових досліджень модель демпфування за Релеєм не підтверджується експериментальними даними і є малопридатною до застосування в широкому частотному діапазоні, а її широке застосування при числовому моделюванні елементів конструкцій в програмах на основі МСЕ виправдовується лише зручністю реалізації і лінійністю отриманої моделі.
4. Автором не розглянуто можливість застосування моделі пружно-пластичного матеріалу для врахування розсіювання енергії за умов нестационарних режимів роботи п'єзоелектричних елементів. Зокрема, значного поширення набула модель Бук-Венна, яка використовується для опису гістерезисних втрат у п'єзоелектричних перетворювачах.
5. Для визначення меж застосування представлених математичних моделей динаміки структурно-неоднорідних п'єзоелементів, що базуються на лінійній теорії розсіювання енергії в матеріалах, доцільно вказати рівень напружень (деформацій), характерних для режимів роботи досліджуваних об'єктів.
6. Розроблені підходи врахування дисипативних властивостей матеріалів можуть бути використані для активного та пасивного демпфування коливань

п'єзоелектрично неактивних елементів конструкцій, що в роботі не було зроблено.

7. Зауваження до структури дисертації: розділ 2, так як і розділ 1, має оглядовий характер. Крім того, розділ 2 не має висновків.

Втім, ці зауваження не змінюють загального позитивного враження щодо основного змісту роботи, новизни положень і обґрунтованості висновків і не применшують її наукового та практичного значення. Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, вона належним чином оформлена та ілюстрована. Сукупність отриманих в роботі результатів можна кваліфікувати як суттєвий внесок в розв'язання важливої наукової проблеми механіки деформівного твердого тіла, яка полягає у розробці ефективної чисельної методики дослідження динамічного електромеханічного стану однорідних та неоднорідних п'єзоелектричних елементів конструкції з врахуванням дисипативних властивостей матеріалу. Основні результати дисертації повною мірою висвітлено в наукових фахових виданнях, апробація результатів роботи проведена на численних, в тому числі міжнародних, конференціях та симпозіумах. Робота доповідалася на 5 семінарах різного рівня в трьох наукових установах та отримала позитивні відгуки. Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації.

Таким чином, подана дисертаційна робота «Чисельне моделювання динамічних процесів в п'єзоелектричних тілах з урахуванням дисипативних властивостей та неоднорідності матеріалу» задовольняє вимогам «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197 щодо докторських дисертацій, а її авторка, Григор'єва Людмила Олександровна, заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент,

завідувачка кафедри архітектури та дизайну  
Національного університету «Чернігівська політехніка»  
доктор технічних наук, доцент



Олена САВЧЕНКО

Підпис д-ра техн. наук Савченко О.В. засвідчує:

Вчений секретар

Національного університету  
«Чернігівська політехніка»

Надійшло 10.09.2025р.



05.09.2025р.



Олександр Сидоренко

Вчений секретар співізводчої вченої ради № 16.166.01.