

В І Д Г У К

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Глухова Юрія Петровича

«Динамічні задачі для шаруватої основи з початковими напруженнями
при дії рухомого поверхневого навантаження»,

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

Дисертаційна робота Глухова Ю.П. «Динамічні задачі для шаруватої основи з початковими напруженнями при дії рухомого поверхневого навантаження» присвячена важливій проблемі механіки деформівного твердого тіла, а саме, розробці та розвитку теоретичної основи, чисельної реалізації та практичному застосуванню методів розрахунку динамічної поведінки попередньо напружених шаруватих основ. Обсяг виконаних досліджень, їх глибина та рівень узагальнення повністю відповідають вимогам до докторських дисертацій.

Особливість дисертаційної роботи полягає в її прикладній спрямованості. Глухов Ю.П. не лише розробив новий метод, а й системно дослідив межі використання наближених моделей, що є вагомим для інженерної практики. Порівняння точних 3D-розв'язків із моделями пластини Тимошенка та моделлю зосереджених мас дає проєктувальникам чіткі орієнтири щодо можливості використання простіших моделей, або на необхідність точного просторового розрахунку.

Структура рукопису. Дисертація має анотацію, вступ, вісім розділів, висновки, список використаних джерел, в якому 251 найменувань, та додатки. Загальний обсяг дисертаційної роботи налічує 326 сторінок, де є 62 рисунки та 5 таблиць.

Основні наукові результати, отримані в дисертаційній роботі, опубліковані у 29 наукових працях: у 3 колективних монографіях, 26 наукових статтях, зокрема у 8 публікаціях в журналі «Прикладна механіка (квартиль Q2 та Q3), 6 публікацій в журналі «Доповіді НАНУ» (категорія Б), та решта – у фахових виданнях України категорії Б. Одинадцять статей автором опубліковано одноосібно. Основні результати, які є в публікаціях, отримані здобувачем самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувач брав участь у постановці задач, розробці підходу до їх розв'язання та в його реалізації. Ю.П. Глухову повністю належить ідея та розробка регуляційно-спектрального методу зі структурною регуляризациєю при розв'язанні просторових і двовимірних задач для багатошарової основи з початковими напруженнями; програмна реалізація розробленої методики; отримання числових результатів, їх ілюстрація та інтерпретація отриманих розв'язків.

Отримані наукові результати відповідають одному із основних напрямків наукових досліджень Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України та увійшли у звіти із 6 науково-дослідних робіт.

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність її теми; показані зв'язки роботи із науково-дослідними темами; сформульовані мета і завдання наукових досліджень; висвітлено наукову новизну, достовірність та практичне значення результатів роботи; перелічені публікації за темою дисертаційних досліджень та виділений особистий внесок здобувача у кожну із них та апробацію результатів дисертації.

У **першому розділі** проведено огляд відомих наукових праць, присвячених різним етапам дослідження динамічних процесів у шаруватих середовищах і розглянуто публікації вітчизняних та зарубіжних авторів, в яких розвивалися розв'язки задач динаміки шаруватих середовищ. Тут проаналізовано сучасний стан проблеми, що досліджується, а також обґрунтовано її актуальність.

Другий розділ містить головні принципи, на яких будується лінеаризована теорія пружності, основні рівняння та співвідношення стану стисливих і нестисливих тіл з початковими (залишковими) напруженнями, з пружним потенціалом довільної структури. Представлені загальні розв'язки просторових задач для випадків однорідного початкового стану. Результати досліджень, які наведені в цьому розділі, є загальними для різних моделей деформівних тіл і надають змогу при єдиному підході вивчати широкий спектр задач на поширення пружних хвиль в тілах з початковими напруженнями в них.

У **третьому розділі** опрацьовані загальні постановки задач про усталений рух елементів шаруватого попередньо напруженого півпростору (стисливого або нестисливого) при дії на його вільну границю рухомого навантаження. Сформульовані рівняння руху елементів багат шарового середовища та граничні умови із врахуванням загальних розв'язків просторових динамічних задач лінеаризованої теорії пружності для тіл, які мають початкові напруження.

Четвертий розділ присвячений розробці методу розв'язування просторових і плоских задач динамічних процесів у шаруватих середовищах – регуляційно-спектральний метод зі структурною регуляризациєю, який поєднує аналітичну точність інтегральних методів та числову стабільність матричних підходів. При використанні цього методу збіжність спектральних інтегралів забезпечується конструктивно – шляхом відбору фізично допустимих хвильових складових відповідно до радіаційних умов, без деформації контурів та введення штучних параметрів згасання. Метод базується на переході до спектральної області за допомогою інтегральних перетворень Фур'є та формуванні у кожному шарі хвильових складових у вигляді експоненціальних функцій.

У **п'ятому розділі** представлено розв'язки просторових і плоских задач, які сформульовані в розділі 3, про вплив рухомого навантаження на багат шаровий півпростір із залишковими напруженнями, при отриманні яких фізично коректні спектральні представлення побудовані завдяки використанню регуляційно-спектрального методу зі структурною регуляризациєю.

В межах постановок задач, сформульованих у розділі 3, **шостий розділ** містить дослідження впливу початкових напружень і швидкості руху поверхневого навантаження на величини коренів характеристичних рівнянь для стисливих і нестисливих елементів шаруватого середовища. Виконано чисельне

дослідження в межах теорії скінчених початкових деформацій для стисливого середовища із гармонічним потенціалом і для нестисливого із потенціалом типу Бартенєва-Хазановича. Виявлені значення швидкостей навантаження та початкових напружень, які суттєво зменшують або збільшують значення коренів характеристичних рівнянь.

У сьомому розділі в загальному вигляді наведені аналітичні результати для стисливого та нестисливого середовищ з довільним пружним потенціалом, для випадків нерівних і рівних коренів характеристичних рівнянь, для різних умов сполучення елементів двошарового середовища при будь-якої швидкості руху навантаження. Тут розглянуто дві наближені моделі двошарового (стисливого або нестисливого) півпростору: пружний півпростір з неоднорідністю у вигляді тонкого поверхневого шару; пружна пластина на пружному півпросторі. В якості навантаження розглядалася зосереджена сила, яка рухалася з постійною швидкістю по вільній поверхні.

У восьмому розділі отримані числові розв'язки досліджень динаміки наближених моделей двошарового півпростору.

Основні задачі, які розглянуті:

1. Вивчено вплив початкових напружень при різних швидкостях руху поверхневого навантаження, умовах контакту між елементами багатошарового середовища та механічних і геометричних параметрів на напружено-деформований стан шаруватого півпростору;
2. Порівнені розв'язки двовимірних задач для різних моделей двошарового півпростору: пружний шар на пружному півпросторі; пластина на пружному півпросторі; зосереджені маси на пружному півпросторі.
3. Порівнені розв'язки просторових і плоских задач в точній постановці.
4. Визначені межі застосування наближених моделей.

Актуальність теми дисертаційної роботи. Композитні шаруваті конструкції, зважаючи на їх високу міцність при малій вазі та стійкість до складних експлуатаційних впливів, знаходять широке застосування в машинобудуванні, транспорті та в будівництві, що обумовлює потребу у їх моделюванні та дослідженні динамічної поведінки під впливом різноманітних навантажень, зокрема рухомих, які є ключовими при проєктуванні залізничної та автомобільної інфраструктур, злітно-посадкових смуг, мостів, покриттів споруд, тощо. Еволюція транспортних систем спонукає до використання нових швидкісних режимів, що ускладнює характер навантажень на споруди та їх основу.

В наш час для аналізу поведінки конструкцій, зокрема і багатошарових, використовуються наближені чисельні методи, які є універсальними для вирішення складних інженерних задач. Проте в задачах на дослідження хвильових процесів при рухомому навантаженні, особливістю яких є наявність дисперсійних ефектів і критичних режимів, такими методами на завжди можна досягнути необхідної точності. Це обумовлює розвиток аналітично орієнтованих підходів, які дозволяють глибше дослідити механізми

формування напружено-деформованого стану та можуть виступати тестом для перевірки чисельних моделей.

Тому, тема дисертаційної роботи Глухова Ю.П., яка зорієнтована на дослідження динаміки шаруватих конструкцій під дією рухомих навантажень, є важливою для інженерної практики, геомеханіки, транспортної інфраструктури та матеріалознавства та актуальною.

Обґрунтованість результатів дисертації забезпечується застосуванням аналітичних методів, обґрунтованих чисельних методів і критерію практичної збіжності отриманих результатів; фізично правдоподібною інтерпретацією отриманих результатів; порівняльним аналізом точності та узгодженням результатів отриманих різними методами; розв'язками тестових задач.

Наукова новизна результатів роботи окреслюється отриманими в дисертації новими науковими результатами, а саме:

- розроблено регуляційно-спектральний метод зі структурною регуляризацією;
- виконано повні аналітичні розв'язки просторових і плоских задач у найзагальнішій постановці;
- представлено комплекс виявлених емерджентних механічних ефектів;
- проведено еталонний розв'язок для багатосарової полоси.

Практичне значення отриманих результатів та розвинених підходів полягає у можливості їх застосовувати при розв'язанні широкого класу практичних задач, зокрема в:

- транспортному будівництві для розрахунку напружено-деформованого стану дорожніх покриттів, залізничних колій, злітно-посадкових смуг під дією рухомих навантажень;
- задачах геотехніки при оцінці впливу залишкових напружень у ґрунтових масивах на їхню динамічну реакцію;
- машинобудуванні для розрахунку композитних шаруватих конструкцій, які працюють в умовах рухомих навантажень;
- верифікації чисельних методів при використанні отриманих аналітичних розв'язків як еталонних для перевірки програмних комплексів на основі чисельних методів.

ЗАУВАЖЕННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.

Оцінюючи в цілому дисертаційну роботу позитивно, маю висловити низку зауваження та рекомендації.

Зауваження 1.

У дисертації зазначено, що автором розроблено програмне забезпечення для реалізації запропонованого методу. Однак у тексті відсутній детальний опис програмної реалізації, архітектури програмного комплексу, інтерфейсу користувача. Це ускладнює оцінку готовності результатів до впровадження.

Тому автору бажано у майбутньому:

- розглянути можливість створення модуля для MATLAB або Python для вільного поширення;

- забезпечити супровід програмної реалізації при впровадженні результатів у проектні організації.

Зауваження 2.

У роботі розглядаються ідеалізовані умови контакту між шарами: жорсткий або не жорсткий (вільне ковзання). У реальних конструкціях (особливо в ґрунтових структурах) умови контакту є значно складнішими: можливе часткове зчеплення, наявність проміжних прошарків, клейових з'єднань, армувальних елементів, тому, як побажання, перспективним напрямом подальших досліджень вважаю доцільним моделювання проміжних (імпедансних) умов контакту, які описуються співвідношеннями типу: $\sigma = k \cdot \Delta u$, де: k – коефіцієнт жорсткості контакту, що дозволить більш наблизити модель до реальних умов.

Зауваження 3.

Усі дослідження виконано для плоских і прямолінійних границь шарів. У реальних об'єктах здебільше зустрічаються криволінійні границі, змінна товщина шарів, локальні неоднорідності. Тому, рекомендую в подальшому дослідити можливість застосування ідей регуляційно-спектрального методу до систем із неплоскими границями (наприклад, хвилясті поверхні, локальні потовщення, тощо).

Зауваження 4.

У роботі не розглядається вплив температури на напружено-деформований стан. Для багатьох інженерних застосувань (злітно-посадкові смуги, мостові переходи, конструкції в північних широтах) термопружні ефекти є суттєвими. Зважаючи на це, в перспективі було б доречним розробити термопружну модель шаруватої основи, яка б враховувала початкові напруження, рухоме навантаження та нестаціонарний температурний вплив.

Зауваження 5.

Незважаючи на численній апробації роботи на академічних конференціях, бажано б було представити її серед практичних інженерів – проектувальників доріг, мостів, фундаментів:

- у галузевих конференціях (наприклад, з транспортного будівництва, геотехніки);
- опублікувати статті у галузевих фахових виданнях («Автомобільні дороги», «Мости та тунелі», «Будівельні конструкції»);
- підготувати інформаційний лист для впровадження в проектних організаціях.

Зауваження 6.

Робота містить 62 рисунки, що є достатнім. Однак якість окремих рисунків (наприклад, 8.5, 8.6, 8.9) є низькою – погано розрізняються лінії, дрібний шрифт на осях, відсутні одиниці вимірювання. Тому для презентаційних матеріалів та електронної версії дисертації бажано підготувати більш якісний варіант ілюстрацій.

Зауваження 7.

Окремі розділи дисертації (зокрема розділи 2 та 3) містять надто детальний виклад загальновідомих положень лінеаризованої теорії пружності. Це виправдано прагненням до самодостатності викладу, але дещо збільшує обсяг

роботи. При підготовці монографії за матеріалами дисертації рекомендую скоротити виклад загальновідомих положень, зосередившись на оригінальних результатах автора.

Зауваження 8.

У дисертації зазначені можливі напрямки впровадження, але відсутні конкретні акти впровадження або угоди з підприємствами. Слід автору активізувати роботу по впровадженню результатів досліджень у практику проектування.

Зазначені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки результатів, отриманих у дисертаційній роботі, та можуть бути розглянуті як рекомендації для подальших досліджень автора.

Тема, зміст та результати дисертації відповідають паспорту спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Вважаю, що дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні та є завершеним науковим дослідженням, яке містить нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що в сукупності становить суттєвий внесок до розвитку механіки деформівного твердого тіла.

Дисертація має суттєву наукову та практичну новизну і відповідає вимогам п.7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» затверджених постановою КМ № 1197 від 17.11.2021 р., а її автор Юрій Петрович Глухов заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент
декан будівельного факультету
Київського національного університету
будівництва і архітектури,
доктор технічних наук, професор



Григорій ІВАНЧЕНКО

Особистий підпис професора Іванченка Г.М. засвідчую:
секретар Вченої ради КНУБА



Микола КЛИМЕНКО