

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Глухова Юрія Петровича «Динамічні задачі для шаруватої основи з початковими напруженнями при дії рухомого поверхневого навантаження», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

1. Актуальність дослідження

Розвиток сучасної інфраструктури, включаючи високошвидкісні транспортні магістралі, злітно-посадкові смуги та об'єкти промислового будівництва, вимагає створення надійних математичних моделей для опису динамічної поведінки шаруватих конструкцій. Процеси деформування таких систем значно ускладнюються наявністю початкових напружень, різкими контрастами фізико-механічних властивостей шарів та складною хвильовою палітрою, що виникає під дією рухомих навантажень. З огляду на це, актуальність теми дисертаційної роботи є достатньо обумовленою. Особливу цінність становить розробка аналітично орієнтованих підходів, які забезпечують фізичну прозорість і дають усвідомлення феноменології поведінки досліджуваних динамічних процесів.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну та важливу проблему сучасної механіки деформівного твердого тіла, яка полягає у розвитку високоефективного методологічного апарату дослідження хвильової динаміки попередньо напружених багатошарових пружних тіл за рухомих поверхневих навантажень у рамках тривимірної лінеаризованої теорії пружності.

Варто зауважити, що спрямованість дисертаційної роботи Глухова Ю.П. на розробку аналітично-числових методів розрахунку багатошарових пружних основ є своєчасною та вкрай актуальною. Робота формує

фундаментальну базу, яка може слугувати еталоном для верифікації поширених чисельних алгоритмів та інженерних розрахункових комплексів.

2. Наукова новизна та ступінь обґрунтованості результатів

Наукові положення, сформульовані в дисертації, відзначаються високим рівнем математичної строгості в рамках тривимірної лінеаризованої теорії пружності для тіл з початковими напруженнями. До найбільш значущих слід віднести наступні результати.

- Розробка регуляційно-спектрального методу зі структурною регуляризациєю. Цей підхід відкриває можливість розв'язувати просторові динамічні задачі без застосування складних контурних деформацій у комплексній площині, що суттєво підвищує обчислювальну стабільність матричних схем при високих частотах.
- Отримання нових аналітичних розв'язків. Автором вперше отримано розв'язки просторових та двовимірних задач для багат шарових пружних основ (складених зі стисливих та нестисливих матеріалів) під дією рухомого навантаження.
- Виявлення емерджентних механічних ефектів. Дисертант довів, що наявність початкових напружень може призводити до появи локальних зон надвисокої чутливості хвильового поля, а також асиметрії впливу стиску та розтягу.
- Вперше розв'язано еталонну задачу про динаміку попередньо напруженої багат шарової полоси, яка може використовуватись для верифікації чисельних методів.
- На основі точних просторових розв'язків визначено межі застосування наближених моделей шаруватих основ.

Достовірність результатів забезпечується коректністю математичних постановок, узгодженістю аналітичних рішень із чисельними, а також граничним переходом до класичних моделей за відсутності початкових напружень.

3. Практичне значення результатів роботи

Практична цінність роботи полягає у створенні надійного інструментарію для інженерної практики. Розроблені алгоритми та математичні моделі відкривають можливості щодо проведення оптимізації транспортних та геотехнічних систем на етапі проектування стосовно підвищення експлуатаційної надійності. Еталонні розв'язки, отримані для багатошарової смуги, є критично важливими для тестування комерційних програмних комплексів. Крім того, визначення меж застосування наближених двовимірних моделей дає можливість суттєво зекономити обчислювальні ресурси без втрати інженерної точності.

4. Повнота викладення змісту та відповідність вимогам

Основні наукові результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи Глухова Ю.П. викладені з достатньою повнотою в опублікованих наукових працях. За темою дисертації опубліковано загалом 29 наукових робіт, що повною мірою відображають її зміст і відповідають вимогам МОН України щодо оприлюднення результатів докторських дисертацій.

Доробок здобувача включає публікації високого наукового рівня: 2 колективні монографії, видані у співавторстві в межах наукової проблематики дисертації; 1 розділ у колективній монографії, що вийшла у престижному міжнародному видавництві Springer; 26 наукових статей.

Особливо варто відзначити високий рівень представлення результатів у періодиці: 8 статей опубліковано у міжнародному науковому журналі «International Applied Mechanics», який індексується у міжнародних наукометричних базах та має квартилі Q2 і Q3. Ще 6 статей опубліковано у фаховому журналі «Доповіді НАНУ» (категорія «Б»), а решта – у фахових виданнях України категорії «Б».

Особистий внесок здобувача є вагомим і чітко окресленим: 11 наукових статей опубліковано автором одноосібно. У працях, виданих у співавторстві, Глухову Ю.П. повністю належить розробка ключового математичного інструменту роботи – регуляційно-спектрального методу зі структурною

регуляризацією, а також програмна реалізація, отримання та інтерпретація числових результатів.

Результати досліджень пройшли належну апробацію. Основні положення дисертації доповідалися та обговорювалися на численних міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях та симпозіумах у період з 2006 по 2025 рік (у тому числі в Києві, Львові, Дніпрі, Харкові, а також на міжнародних майданчиках у Берліні та Осло). Крім того, дисертація в повному обсязі отримала позитивну оцінку на кількох фахових і загальноінститутських семінарах Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України у 2024–2025 роках.

Кількість, якість і рівень публікацій свідчать про те, що результати дисертаційної роботи Глухова Ю.П. пройшли ретельну експертизу в міжнародному та вітчизняному науковому середовищі, є загальнодоступними для фахівців, а їх викладення в науковій літературі є вичерпним і повним.

5. Аналіз змісту дисертаційної роботи та її результатів

Структура дисертації є логічною та завершеною. Робота складається з анотації, вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел (251 найменування) та додатків. Загальний обсяг дисертації – 326 сторінок, ілюстративний матеріал подано 62 рисунками та 5 таблицями.

У *вступі* обґрунтовано актуальність, сформульовано мету, задачі, об'єкт, предмет, методи дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У *першому розділі* виконано ґрунтовний огляд досліджень динаміки шаруватих середовищ. Автор демонструє глибоке розуміння еволюції наукової думки – від класичних праць Ньютона, Ейлера, Бернуллі до сучасних робіт Ахенбаха, Гузя, Шульги та ін. Детально розглянуто та проаналізовано три основні підходи: балки на пружній основі, пластини на пружній основі та моделі пружного шару. Окрему увагу приділено розвитку теорії тіл із початковими напруженнями.

У *другому розділі* викладено основи лінеаризованої теорії пружності для тіл із початковими напруженнями. Наведено загальні рівняння та співвідношення для стисливих і нестисливих матеріалів із довільним пружним потенціалом.

У *третьому розділі* сформульовано загальні постановки просторових і плоских задач про усталений рух багатошарового попередньо напруженого півпростору. Розглянуто два типи початкового напруженого стану (загальний і симетричний), два типи основи (пружний півпростір і жорстка основа), два типи контакту (жорсткий і нежорсткий). Постановки виконано на високому науковому рівні.

Четвертий розділ є ключовим. Автором вперше запропоновано регуляційно-спектральний метод зі структурною регуляризацією. Суть методу полягає у введенні спеціальних регуляційних коефіцієнтів, які забезпечують автоматичне виділення фізично коректних (радіаційних) складових розв'язку та усунення зростаючих експоненціальних компонентів. Це дає змогу уникнути складних процедур контурного інтегрування (типу контуру Зоммерфельда) та забезпечує числову стійкість навіть за високої контрастності властивостей шарів. Метод органічно поєднує переваги інтегральних і матричних підходів.

У *п'ятому розділі* отримано аналітичні розв'язки просторових і плоских задач у просторі зображень Фур'є. Розв'язки подано в загальному вигляді для стисливих і нестисливих матеріалів, для різних типів початкового напруженого стану, для випадків рівних і нерівних коренів характеристичних рівнянь, для всіх можливих швидкостей руху навантаження.

У *шостому розділі* досліджено вплив початкових напружень і швидкості навантаження на корені характеристичних рівнянь. Виявлено умови існування кратних коренів, показано суттєвий вплив початкових напружень при дозвукових швидкостях.

У *сьомому розділі* розглянуто наближені моделі двошарового півпростору: модель зосереджених мас і модель пластини Тимошенка на пружному

півпросторі. Розв'язки отримано двома незалежними методами (інтегральних перетворень Фур'є та комплексних потенціалів), що підтверджує їх достовірність.

Восьмий розділ присвячено чисельним дослідженням. Здійснено систематичний порівняльний аналіз точних і наближених моделей, виявлено низку емерджентних механічних ефектів, визначено межі застосування наближених моделей. Особливо цінним є порівняння 2D- і 3D-розв'язків, яке дозволило кількісно оцінити похибки двовимірних моделей у локальній зоні навантаження.

6. Дотримання академічної доброчесності

Дисертаційна робота Глухова Юрія Петровича виконана самостійно та з суворим дотриманням принципів академічної доброчесності. За результатами аналізу тексту дисертації та опублікованих праць, а також враховуючи специфіку математичного моделювання і розв'язання задач механіки деформівного твердого тіла, можна зробити висновок, що у поданій дисертаційній роботі не виявлено ознак академічного плагіату, самоплагіату, фабрикації або фальсифікації наукових результатів. Отримані точні та наближені аналітичні розв'язки, алгоритми та чисельні дані є оригінальними і логічно впливають із застосованого математичного апарату. Усі запозичені ідеї, фундаментальні рівняння, методи та моделі (зокрема класичні теорії пружності, теорії пластин, методи інтегральних перетворень Фур'є та Мусхелішвілі) супроводжуються належними посиланнями на першоджерела. Список використаних джерел оформлений відповідно до чинних стандартів. У наукових працях, опублікованих у співавторстві (монографії та статті), особистий внесок здобувача є визначальним і чітко окресленим. Автором дотримано етичних норм щодо співавторів: зокрема, ідея та розробка ключового інструменту дослідження – регуляційно-спектрального методу зі структурною регуляризацією, а також його програмна реалізація та аналіз числових результатів належать здобувачеві одноосібно. Таким чином, дисертаційне дослідження Глухова Ю.П. цілком відповідає вимогам щодо

дотримання академічної доброчесності, встановленим Порядком присудження наукових ступенів.

7. Зауваження та пропозиції

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу загалом, варто вказати на окремі питання, що потребують уточнення або дискусії.

1. У роботі розглянуто постановки, де початковий напружено-деформований стан є однорідним. Водночас у реальних транспортних та композитних конструкціях початкові (залишкові) напруження часто мають виражений градієнтний або локалізований характер. Було б доцільно вказати, як саме розроблений підхід може бути адаптований до задач із неоднорідним початковим станом.
2. Порівнюючи дво- та три- вимірні моделі, автор зазначає, що в локальній зоні дії навантаження різниця між амплітудами може досягати 100%, і пояснює це природною властивістю тривимірної теорії. Однак саме ці пікові локальні напруження є визначальними для зародження втомних тріщин. У роботі не вистачає рекомендацій щодо того, як інженерам слід враховувати ці 100% розбіжності при розрахунку довговічності реальних конструкцій.
3. Автор уводить регуляційні коефіцієнти як множники при експоненціальних складових розв'язку. Проте в тексті дисертації відсутнє строге математичне доведення того, що запропонована процедура вибору коефіцієнтів гарантує збіжність спектральних інтегралів для всіх можливих комбінацій параметрів. Чи існують випадки (наприклад, кратні корені характеристичних рівнянь), коли метод потребує додаткового налаштування?
4. У підрозділі 4.3 зазначено, що метод забезпечує «природну збіжність спектрального інтегралу». Бажано було б чіткіше сформулювати критерії збіжності та навести оцінки похибок наближення. Це підвищило б математичну строгість роботи.

5. Чисельні дослідження виконано переважно для стисливого матеріалу з гармонічним потенціалом та нестисливого – з потенціалом Бартенєва-Хазановича. Було б корисно почути думку здобувача щодо чутливості критичних швидкостей та хвильових картин до вибору інших, більш складних феноменологічних моделей матеріалу, які застосовуються в сучасному матеріалознавстві.
6. У роботі використано класичні чисельні методи для оберненого перетворення Фур'є. Однак не наведено кількісних оцінок похибок, пов'язаних із дискретизацією, вибором кроку інтегрування, обрізанням нескінченних меж. Це особливо важливо для транс- і надзвукових режимів, де підінтегральні функції мають особливості. Рекомендую в наступних публікаціях висвітлити питання точності та збіжності чисельних алгоритмів.
7. Дослідження виконано для ізотропних матеріалів. У вступі зазначено, що у випадку ортотропного тіла пружно-еквівалентні напрямки співпадають з напрямками осей координат. Однак узагальнення методу на загальний випадок анізотропії в роботі не розглянуто. Враховуючи широке застосування анізотропних композитів, це обмежує сферу застосування розробленого підходу. Рекомендую визначити це як один із перспективних напрямів подальших досліджень.
8. У всіх постановках задач матеріал вважається ідеально пружним. Вплив в'язкопружного демпфування на хвильові процеси та критичні швидкості не досліджувався. Врахування навіть простіших моделей демпфування (наприклад, Кельвіна-Фойгта) могло б суттєво збагатити картину динамічної поведінки. Рекомендую розглянути можливість модифікації методу для в'язкопружних середовищ.
9. Автор активно використовує термін «емерджентні ефекти», однак у тексті відсутнє чітке визначення, які саме ефекти слід вважати емерджентними, а які є просто суперпозиційним проявом відомих закономірностей.

Не зважаючи на той факт, що робота є цілісним та зарешеним дослідженням, з огляду на важливість та актуальність тематики, доцільно також розглянути низку рекомендацій для подальшого провадження досліджень. Зокрема, отримані у роботі теоретичні результати потребують експериментального підтвердження. Тому автору варто ініціювати співпрацю з лабораторіями, які спеціалізуються на фізичному моделюванні хвильових процесів у шаруватих середовищах. У реальних ґрунтових основах механічні характеристики мають випадковий розподіл. Тому варто розглянути можливість поширення запропонованого методу на задачі зі стохастичними параметрами шарів. На основі отриманих результатів доцільно розробити інженерну методику розрахунку критичних швидкостей та резонансних режимів для типових конструкцій транспортних споруд. Нарешті, матеріали дисертації можуть бути використані при підготовці спеціальних курсів з динаміки шаруватих середовищ. Рекомендую автору підготувати навчальний посібник за тематикою дослідження.

8. Загальний висновок

Дисертаційна робота Ю.П. Глухова є завершеним, цілісним, оригінальним науковим дослідженням, яке містить фундаментальні результати в галузі механіки деформівного твердого тіла. Розроблений автором регуляційно-спектральний метод зі структурною регуляризацією є значним досягненням, що відкриває нові можливості для аналізу хвильових процесів у складних шаруватих системах.

Отримані результати є достовірними, обґрунтованими та новими. Вони пройшли належну апробацію на численних міжнародних і вітчизняних конференціях. Основні положення дисертації в повному обсязі відображено в 29 наукових публікаціях, серед яких 3 монографії та 8 статей у журналі «International Applied Mechanics» (Q2, Q3).

Вважаю, що дисертаційна робота «Динамічні задачі для шаруватої основи з початковими напруженнями при дії рухомого поверхневого навантаження» відповідає всім вимогам Постанови Кабінету Міністрів

України № 1197 від 17 листопада 2021 року «Порядок присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», а її автор – Глухов Юрій Петрович – заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 «Механіка деформівного твердого тіла».

Офіційний опонент:

член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
завідувач відділу механіки деформівного твердого тіла,
заступник директора з наукової роботи
Інституту прикладних проблем механіки
і математики ім. Я.С. Підстригача
НАН України

Юрій ТОКОВИЙ

15 червня 2026 р.