

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Борисенка Максима Юрійовича

**«Чисельний та експериментальний аналіз вільних коливань багатокутних пластин і циліндричних оболонок з конструктивною неоднорідністю»,**

поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за

спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

**Актуальність теми дисертації.** Багатокутні пластини і циліндричні оболонки з різною формою поперечного перерізу широко використовуються як складові елементи багатьох сучасних конструкцій. Наприклад, у літальних та космічних апаратах, корпусах надводних і підводних суден, ядерних реакторах, сховищах різного призначення, та інших об'єктах. У багатьох випадках, залежно від функціонального призначення та умов експлуатації, пластинчасті та циліндричні оболонкові конструкції мають форму, що ускладнюється отворами та вирізами, змінною товщиною та іншими конструктивними особливостями. Задачі аналізу динамічної поведінки сучасних конструкцій, елементи яких моделюються пластинами та оболонками, продовжують бути актуальними на сьогоднішній час. Про це свідчить величезна кількість досліджень, присвячених даній проблемі. Але треба відзначити, що у випадку складної геометричної форми пластин та оболонок при наявності отворів, вирізів, змінної товщини та інших ускладнень об'єктів, кількість досліджень суттєво менше, ніж для прямокутної геометрії пластин. Як правило у цьому випадку застосовуються чисельні наближені методи, які потребують перевірки отриманих результатів, в тому числі завдяки проведенню експериментальних досліджень. Дана робота, як раз і присвячена поширенню методу скінчених елементів для дослідження вільних коливань багатокутних пластин з урахуванням конструктивних особливостей та циліндричних оболонок зі складною геометрією поперечного перерізу з подальшою перевіркою отриманих результатів завдяки розробленим експериментальним підходам. Таким чином проблема, що розглядається в даній роботі є актуальною.

Дослідження, результати яких наведені в дисертаційній роботі, проведено в межах переліку пріоритетних наукових проблем фізико-математичних і технічних наук, затверджених НАН України. Розроблені та розвинені в роботі методи та отримані обчислювальні та експериментальні результати увійшли до відповідних звітів з тем науково-дослідних робіт відділу обчислювальних методів Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України: НДР №1.3.1.401, номер державної реєстрації 0115U005709, 2016-2020 рр.; НДР №1.3.1.410, номер державної реєстрації 0117U000700, 2017-2021 рр.; НДР №1.3.1.433, номер державної реєстрації 0120U105681, 2021-2025 рр.; НДР №1.3.1.452-23, номер державної реєстрації 0123U100910, 2023-2024 рр., НДР ІМех-2024/2», номер державної реєстрації 0124U002590, 2024 р.; НДР ІМех-2025/1, номер державної реєстрації 0125U000036д, 2025-2026 рр.; НДР №1.3.1.468-25, номер державної реєстрації 0125U000957, 2025-2026 рр.



**Новизна** викладених у дисертаційній роботі результатів полягає в наступному:

- запропоновано чисельний підхід для розрахунку частот та форм вільних коливань ізотропних багатокутних пластин, трикутної, чотирикутної, п'ятикутної та шестикутної форми із урахуванням змінної товщини, наявності отворів різного радіуса та їх розміщення, а також різних типів крайових умов. Запропонований підхід базується на основі методу скінченних елементів;

- розвинено метод розрахунку частот та форм вільних коливань замкнутих та незамкнутих циліндричних оболонок еліптичного поперечного перерізу сталої та змінної товщини, циліндричних оболонок гофрованого поперечного перерізу з різною кількістю гофрів, з різним характером розкриття та різними граничними умовами на торцях, а також товстостінних циліндричних оболонок;

- вперше розроблено комбінований підхід для розрахунку частот вільних коливань ізотропних багатокутних пластин різної товщини на основі модифікованої формули для розрахунку частот вільних коливань ізотропної прямокутної пластини та розраховані методом скінченних елементів коефіцієнти для кожної багатокутної пластини з різними граничними умовами, які залежать від співвідношення товщини до сторони пластини;

- вперше з метою демонстрації коливань в реальному часі та визначення з достатнім ступенем достовірності частот і форм вільних коливань багатокутних пластин розроблено експериментальний підхід на основі резонансного методу та створено віброкомплекс;

- вперше на основі стробогологафічної інтерферометрії розроблено експериментальний підхід та створено відповідний стробокомплекс для визначення частот і форм вільних коливань багатокутних пластин та товстостінних циліндричних оболонок. Важливо, що розроблений стробокомплекс демонструє коливання поверхні пружного тіла у вигляді інтерференційних картин, дає можливість змінювати режим віброзбудження та амплітуду коливань, з високим ступенем достовірності досліджувати спектр частот і форм вільних коливань;

- на основі запропонованих чисельних та експериментальних підходів проведено аналіз вільних коливань широкого класу пластин і оболонок з різною конструктивною неоднорідністю. Отримано нові результати у вигляді числових значень частот та ілюстрацій форм вільних коливань. Проведено порівняння результатів отриманих за допомогою різних підходів а також виявлені закономірності впливу геометричних параметрів, фізико-механічних характеристик матеріалу та граничних умов на спектр частот і форм вільних коливань кожного з розглянутих пружних елементів.

**Обґрунтованість та достовірність результатів, наведених у дисертації** забезпечується застосуванням обґрунтованих чисельних методів і критерію практичної збіжності отриманих результатів; коректністю проведення експериментів та вимірювань; фізично правдоподібною інтерпретацією отриманих результатів; порівняльним аналізом точності та узгодженням результатів отриманих різними методами; чисельними



розв'язками тестових задач

**Практичне значення.** Отримані результати та розвинені підходи можуть бути використанні при розв'язанні широкого класу практичних задач визначення динамічних характеристик вільних коливань пластинчастих та оболонкових елементів з різною конструктивною неоднорідністю; розвинений чисельний підхід дає можливість отримувати достовірну інформацію про спектр частот і форми вільних коливань елементів конструкції в умовах максимально наближених до реальних умов експлуатації без значних затрат коштів та часу, змінюючи різні параметри, обирати оптимальні геометричні розміри, економічно вигідні матеріали та способи закріплення для забезпечення міцності, стійкості та надійності конструкції; розроблений комбінований підхід дає можливість швидко визначити частоти і форми вільних коливань багатокутних пластин різної товщини з різними граничними умовами; розвинені експериментальні підходи дають можливість в реальному часі демонструвати вільні коливання пружних тіл, а одержані результати застосовувати для оцінки результатів, отриманих різними теоретичними методами. Результати отримані комбінованим підходом були передані для впровадження в розрахункову практику державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля». Результати дисертаційного дослідження використано в рамках виконання цільової програми з оборонної тематики за напрямом прикладні дослідження і розробки згідно з договорами IMex-2024/2 та IMex-2025/1.

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, семи розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків. Структура, обсяг та оформлення дисертаційної роботи відповідають вимогам, які висуваються до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук, а саме наказу МОН № 40 від 12.01.2017 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» із змінами, внесеними згідно з наказом МОН № 759 від 31.05.2019.

Результати, викладені в дисертаційній роботі, у повній мірі оприлюднені в наукових фахових виданнях України та у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus, які відповідають наказу МОН № 1220 від 23.09.2019 «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», а також пройшли належну апробацію шляхом представлення матеріалів дослідження на ряді наукових семінарів, а також міжнародних та всеукраїнських конференціях.

#### **Зауваження.**

1. В підпункті 2.4.1 наведено основні співвідношення МСЕ для plate-елемента та вказано, що відповідні співвідношення можна вивести для інших типів скінченних елементів з різною кількістю вузлів. Було б доцільно записати відповідні співвідношення для інших елементів якими виконується скінченно-елементна розбивка об'єктів дослідження, а саме для brick- та tetra- елементів.

2. В другому розділі представлені результати розрахунків частот і форм вільних коливань трикутних пластин різної товщини з різними варіантами жорстко закріплених



країв в свою чергу для інших багатокутних пластин різної товщини проведено розрахунок для деяких з варіантів жорстко закріплених країв. Було б цікаво провести аналіз розрахунків для багатокутних пластин з усіма варіантами жорстко закріплених країв.

3. В роботі резонансним методом проведено визначення частот і форм вільних коливань пластин з жорстко закріпленим отвором та вільними краями і не розглянуті інші варіанти закріплення.

4. В роботі розглянуті гофровані кругові оболонки з різними способами закріплення. Було б цікаво розрахувати частоти і форми вільних коливань гофрованих еліптичних оболонок.

5. Методом стробогологафічної інтерферометрії визначені динамічні характеристики товстостінної оболонки з жорстко закріпленим одним торцем і не розглянуті інші способи закріплення, наприклад, жорстко закріплені два торці.

6. В роботі розглянуто тільки ізотропні структури. Бажано було б звернути увагу на розрахунок пластин та оболонок, вироблених із сучасних композитних та ФГМ матеріалів.

Втім, зазначені зауваження не стосуються актуальності проведених досліджень, наукової новизни, достовірності та практичної цінності отриманих результатів і не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи. Зроблені зауваження мають більш рекомендаційний характер. Зауваження можуть стати приводом розвитку, вдосконалення та поширення наведених підходів до широкого спектру задач механіки з метою створення відповідної бази та приєднання до штучного інтелекту.

#### **Повнота викладення результатів дисертаційних досліджень у опублікованих працях.**

Основні результати дисертації висвітлені в 39 наукових працях, з них 18 статей у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України і статті у наукових періодичних виданнях інших держав із наукового напрямку, з якого підготовлено дисертацію; три публікації, які є розділами у різних колективних монографіях видавництва Springer; одна стаття у науковому журналі який не включений до Переліку наукових фахових видань України; 17 публікацій в матеріалах вітчизняних та міжнародних наукових конференцій. Дванадцять праць опубліковано у різних періодичних виданнях, включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України та у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus.

#### **Відповідність змісту реферату основним положенням дисертаційної роботи.**

Наукові роботи, результати яких увійшли у дисертацію, опубліковані після захисту кандидатської дисертації.

Зміст реферату повністю відображає основні положення дисертаційної роботи та відповідає змісту розділів дисертації, містить основні результати виконаних досліджень і дає змогу достатньо повно оцінити наукову новизну і практичну цінність. Стиль викладання матеріалу у дисертації та реферату відповідає загальноприйнятим вимогам. Тема, зміст та результати дисертаційної роботи відповідають паспорту спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла (технічні науки).



Докторська дисертаційна робота не містить матеріалів, викладених у кандидатській дисертації здобувача. **Плагіат відсутній.**

**Висновок про дисертацію в цілому та відповідність її чинним вимогам.** В цілому, дисертаційна робота Борисенка М.Ю. виконана на досить високому науковому рівні і є цілісним науковим дослідженням, в якому отримані нові наукові результати, що в сукупності є вагомим внеском у вирішення актуальної наукової проблеми механіки деформівного твердого тіла, зокрема механіки пластинчатих та оболонкових систем. У дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову проблему визначення частот і форм вільних коливань багатокутних пластин і циліндричних оболонок з конструктивними неоднорідностями на основі чисельних та експериментальних методів, а також встановлено закономірності впливу геометричних параметрів, фізико-механічних характеристик матеріалу та граничних умов на спектр частот і форм вільних коливань кожного з розглянутих пружних об'єктів.

На підставі вищевикладеного, вважаю, що в цілому дисертаційна робота Борисенка М.Ю. **«Чисельний та експериментальний аналіз вільних коливань багатокутних пластин і циліндричних оболонок з конструктивною неоднорідністю»** є завершеною науковою працею. В ній містяться нові наукові результати, що спрямовані на вирішення важливої науково-технічної проблеми механіки пластинчатих та оболонкових систем.

Вважаю, що за актуальністю теми, новизною, обсягом досліджень, практичною та теоретичною цінністю результатів, дисертаційна робота Борисенка М.Ю. 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 **Максим Юрійович Борисенко** за вирішення актуальної проблеми механіки пластин і оболонкових систем, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент,

професор кафедри прикладної математики  
Національного технічного університету «ХП»,  
доктор технічних наук, професор

 Лідія КУРПА

Особистий підпис проф. Л.В. Курпи засвідчую.

Вчений секретар НТУ «ХП», проф.

 Максим Малько

