

ВІДЗИВ ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Ю.В. Троценка «Розвиток методів аналітичної механіки в задачах про коливання багатокомпонентних механічних систем», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.01 – теоретична механіка.

Розглядувана дисертаційна робота присвячена розробці аналітичних методів побудови наближених розв'язків задач про коливання конструкцій, що містять в собі жорсткі та пружні резервуари з великими масами рідини та приєднані тверді тіла скінчених розмірів. Такі конструкції широко використовуються в ракетобудуванні, авіабудуванні та інших галузях промислового будівництва.

Актуальність роботи обумовлена недостатнім ступенем дослідженості таких багатокомпонентних механічних систем та потребою інженерної практики в наявності відносно простих та високоточних методів розрахунку коливань розглянутих конструкцій.

Робота складається зі вступу, шести розділів, висновків та списку використаних джерел.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми, визначено наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів.

Перший розділ присвячений аналізу існуючих праць за темою дисертаційної роботи, огляду методів дослідження динаміки механічних систем, що вивчаються в роботі.

Другий розділ роботи присвячено дослідженню поперечних коливань довільної оболонки обертання з приєднаним до одного з її торців абсолютно твердого тіла скінчених розмірів. Побудована загальна математична модель руху розглядуваної механічної системи під дією зосереджених та розподілених навантажень. На цій основі сформульована спектральна задача про неосесиметричні коливання даної конструкції з використанням методу Рітца. На відміну від традиційного методу Рітца розклади для переміщень оболонки в даній задачі являються взаємопов'язаними через кінематичні параметри твердого тіла які також підлягають визначенню. У зв'язку з цим автором запропонована загальна схема побудови алгебраїчної системи виходячи не з квадратичного функціоналу, а за допомогою його варіації та вдало введеним нових операторів від переміщень оболонки. Це значно спростило алгоритм розв'язання задачі та його подальше програмування. При побудові координатних функцій для апроксимації переміщень оболонки використовувались поліноми Лежандра, абсолютні значення яких на відрізку їх ортогональності не ростуть зі збільшенням їх порядку. Це значно підвищило стійкість обчислювального процесу по відношенню до степеневого базису. Розроблений на цій основі алгоритм дає можливість розраховувати не тільки частоти і форми коливань оболонок середньої

товщини, а і моменти та перерізуючі сили в кожній точці їх середньої поверхні.

Сформульована спрощена постановка розглядуваної задачі на власні значення, яка базується на гіпотезі плоских поперечних перерізів для деформацій оболонки з врахуванням деформацій зсуву та інерції повороту перерізів, та побудовані її точні розв'язки. Показано, що теорія балок Тимошенка має істотно більшу область застосувань по відношенню до балок Ейлера – Бернуллі.

Система диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами, що описує вільні коливання пружної оболонки обертання має одну із суттєвих особливостей, що обумовлена тонкостінністю оболонки і наявністю малого параметра при старшій похідній. Присутність такого параметра приводить до того, що в розв'язку граничної задачі можуть виникати вузькі примежові зони з великими градієнтами розв'язків. Це приводить до істотного ускладнення апроксимації шуканих розв'язків. У зв'язку з цим виникає важлива проблема розробки наближених методів для розв'язання сингулярно збурених задач, які мали б однакову збіжність як при середніх, так і при малих значеннях параметра. Такі методи в літературі отримали назву рівномірних методів за параметром.

Третій розділ роботи присвячено розробці аналітичного методу розв'язання спектральної задачі про коливання довільних оболонок обертання в умовах її сингулярного збурення. Для випадку довільної оболонки обертання, що незамкнена в меридіональному напрямку в роботі попередньо встановлена формальна структура шуканого розв'язку вихідних рівнянь. Вона включає в себе регулярну частину, що розкладається в степеневий ряд, а також частину, що включає в себе аналітичну функцію з експоненціальним множником. Вклад у загальний розв'язок функцій з експоненціальним множником суттєвий лише поблизу границь оболонки на відстані порядку малого параметра від краю.

Для куполоподібних оболонок встановлюється також асимптотична поведінка обмежених регулярних розв'язків в околі їх полюса, який являється регулярною особливою точкою для вихідних рівнянь. Знайдена асимптотика розв'язків забезпечує скінченність деформацій оболонки в її полюсі.

Використовуючи ці результати в роботі сформульовані основні принципи побудови базисних функцій розв'язання розглядуваної спектральної задачі методом Рітца.

Для оцінки ефективності запропонованих алгоритмів наведено розрахунок частот і форм власних коливань циліндричної, сферичної і зрізаної конічної оболонок.

Розрахунки показують, що розроблений алгоритм відноситься до числа алгоритмів рівномірних за параметром. Окрім цього запропоновані системи базисних функцій забезпечують поточкову збіжність розв'язків і їх перших чотирьох похідних в усій області інтегрування вихідних рівнянь. Поточкова

збіжність розв'язків та їх похідних дозволила автору перевірити задоволення розв'язків вихідним рівнянням.

Таким чином, на поєднанні аналітичної теорії диференціальних рівнянь і варіаційного методу автором запропоновано досить ефективний метод побудови наближених розв'язків спектральних задач теорії оболонки в умовах їх сингулярного збурення.

При розв'язанні граничних задач для рівнянь з розривними коефіцієнтами, розривними граничними умовами або навантаженнями може бути використаний метод, який базується на розбитті області визначення шуканих функцій на окремі підобласті, водючи на суміжних границях підобластей умови спряження. Застосування методу Рітца до розв'язання задач спряження не знайшло належного розвитку у зв'язку із складністю виконання умов спряження.

Четвертий розділ роботи присвячений розвитку метода Рітца до побудови розв'язків спектральних задач з використанням декомпозиції області визначення шуканих розв'язків.

Метод базується на побудові, із залученням множників Лагранжа, узагальненого функціонала, для якого всі умови спряження являються природними граничними умовами. Отриманий функціонал складає основу для побудови наближених розв'язків задач з використанням декомпозиції області. При цьому розв'язки представляються у вигляді незалежних розкладів в кожній з підобластей.

Ефективність запропонованого підходу проілюстровано на одновірній задачі про вільні коливання стержня з кусково-неперервними характеристиками та на двовірній спектральній задачі про коливання ідеальної рідини в резервуарі, що має складну форму тіла обертання. Результати проведених розрахунків свідчать про те, що запропонований метод Рітца володіє збіжністю в рівномірній метриці як для самих розв'язків, так і для похідних, що входять в граничні умови спряження.

Отримані результати при побудові систем базисних функцій для розв'язання спектральних задач теорії оболонки та при розв'язанні задач спряження на основі варіаційного методу далі використовуються в наступних розділах роботи при знаходженні розв'язків задач гідропружності.

Інтерес до дослідження динаміки пружних конструкцій з резервуарами, які частково заповнені рідиною викликаний запитами ракетної техніки, а також підвищеними вимогами до проектування промислових резервуарів в сейсмічно небезпечних районах.

П'ятий розділ дисертаційної роботи присвячений дослідженню поперечних коливань тонкостінного стержня з приєднанням до нього в деякому перерізі резервуаром у формі тіла обертання, що частково заповнений ідеальною рідиною, а також вертикально розташованого стержня, який має на вільному торці резервуар з рідиною.

На основі лінійної теорії руху твердих тіл з рідиною та пружних стержнів побудовані загальні математичні моделі динаміки розглядуваних

механічних систем під дією прикладених до них зовнішніх навантажень. Отримані граничні задачі для рівнянь в частинних похідних далі зводяться до системи звичайних диференціальних рівнянь з незалежною змінною по часу, застосовуючи при цьому метод Бубнова – Гальоркіна. Ці системи рівнянь набувають найбільш простого вигляду, якщо в якості базисних функцій взяти власні форми коливань стержнів з приєднаними до них резервуарами з рідиною. Для розв'язання цієї спектральної задачі в літературі широко використовуються чисельні методи які вимагають проведення великої кількості обчислень. На відміну від цих методів в розглядуваній роботі розв'язки спектральних задач будуються на основі варіаційних методів, які дають досить простий алгоритм знаходження розв'язків в аналітичній формі. При цьому в задачі про власні коливання стержня з підвісним резервуаром у зв'язку з наявністю розривних граничних умов, для побудови розв'язків використовується метод Рітца в поєднанні з методом декомпозиції області визначення шуканих функцій.

Окремо також розв'язана задача про коливання пружного стержня з приєднаним до його вільного торця резервуара з рідиною. Оскільки ця задача не має особливостей в граничних умовах, то при її розв'язанні отримано більш простий алгоритм по відношенню до алгоритму для стержня з підвісним резервуаром. Обидва алгоритми використовувались для незалежного контролю обчислень за запропонованими схемами. В роботі проаналізована ефективність алгоритмів розв'язання розглядуваних задач та наведено результати розрахунків частот та форм коливань даних механічних систем. На основі отриманих результатів розв'язані задачі про вимушені коливання розглядуваних конструкцій, що знаходяться під дією зовнішніх навантажень, а також при заданому гармонічному збуренні основи стержня. Наведено порівняння отриманих теоретичних результатів з існуючими експериментальними даними.

Дослідженню коливань пружних оболонок, які частково заповнені ідеальною рідиною присвячено велика кількість публікацій як вітчизняних, так і зарубіжних авторів. Найбільш розповсюдженим методом розв'язання задач гідропружності на теперішній час являється метод скінчених елементів.

Шостий розділ роботи присвячено розробці аналітичного методу розрахунку коливань довільних оболонок обертання з рідиною із врахуванням хвильових рухів її вільної поверхні.

В рамках лінійної теорії наведена диференціальна постановка розглядуваної задачі. Розв'язання цієї задачі гідропружності зводиться до розв'язання досить складної початково-граничної задачі, яка пов'язана з інтегруванням системи диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами для переміщень оболонки та побудовою розв'язків неоднорідної граничної задачі Неймана для потенціалу зміщень рідини. Розв'язки цих задач взаємопов'язані через силову взаємодію оболонки і рідини, а також через кінематичні умови на змоченій поверхні оболонки. На основі методу Бубнова – Гальоркіна побудова розв'язків розглядуваної задачі зводиться до

інтегрування системи звичайних диференціальних рівнянь з незалежною змінною по часу. При цьому використовуються власні функції спектральних задач про коливання рідини в абсолютно жорсткому резервуарі та про коливання оболонки з рідиною без врахування її хвильових рухів. Ефективні методи знаходження розв'язків першої задачі розроблені в роботах І.О. Луковського. В той же час для довільних оболонок обертання друга задача на власні значення має принципові труднощі при побудові її розв'язків. Для відокремлення гідродинамічної частини задачі від її пружної частини в роботі вводиться до розгляду обернений оператор, який нормальним прогином оболонки на її змочуваній поверхні ставить у відповідність потенціал зміщень рідини в області його визначення. Явний вираз такого оператора для довільних оболонок обертання можливо побудувати із використанням власних функцій спектральної задачі з параметром в граничній умові на змочуваній поверхні оболонки. Слід зазначити, що знаходження скінченного числа власних функцій введеної однорідної задачі являється досить складною самостійною задачею.

За допомогою введеного оберненого оператора вихідна задача зводиться до інтегрування системи інтегро-диференціальних рівнянь восьмого порядку відносно переміщень оболонки. Оскільки оболонка знаходиться під дією розривного динамічного навантаження зі сторони рідини, то при розв'язанні цієї системи для уникнення повільної збіжності розв'язків для переміщень оболонки застосовується метод декомпозиції області їх визначення, запропонований автором в четвертому розділі роботи. Згідно цього методу побудовано узагальнений функціонал, для якого всі вісім граничних умов спряження на сумісній границі введених підобластей являються природними граничними умовами. Це дозволило застосувати метод Рітца для знаходження його стаціонарних значень. Важливим при цьому являється те, що побудова оберненого оператора для гідродинамічної частини задачі зведена до розв'язання неоднорідної системи алгебраїчних рівнянь зі скінченим числом правих частин. На відміну від знаходження скінченного числа власних функцій задачі з параметром в граничній умові (для побудови оберненого оператора), побудова розв'язків отриманих неоднорідних алгебраїчних задач не викликає труднощів.

На основі запропонованого алгоритму наведені результати розрахунків неосесиметричних коливань циліндричної оболонки, частково заповненої рідиною. При цьому проілюстрована ефективність розв'язання задачі спряження на основі варіаційного методу, збіжність наближених розв'язків в залежності від кількості членів в розкладах для переміщень оболонки і для потенціалу зміщень рідини.

Відмічається повне співпадіння отриманих розрахункових даних з існуючими точними розв'язками задачі. Встановлено, що розв'язки, які отримані без врахування хвильових рухів рідини можуть бути використані для практичних розрахунків нижньої границі мінімальних частот коливань оболонки з рідиною.

Зауваження по дисертаційній роботі:

1. В роботі розглянуті переважно неосесиметричні коливання багатокомпонентних механічних систем, що вивчаються. Слід було б автору приділити увагу також вивченню осесиметричних коливань розглядуваних систем, які також представляють великий інтерес для інженерної практики.

2. Запропонована в роботі методика розв'язання задач гідропружності справедлива для оболонок обертання довільної конфігурації. У зв'язку з цим доцільно було б навести розрахункові дані для оболонок відмінних від циліндричної оболонки, для яких в літературі відсутні розрахунки.

3. В роботі з успіхом продемонстровано застосування варіаційного методу до розв'язання задач спряження для випадку, коли область визначення шуканих функцій розбивається на дві підобласті. Доцільно було б встановити можливості даного підходу для випадку, коли область розбивається на три і більше підобластей. Такі задачі виникають наприклад при вивченні коливань оболонок з дискретно розміщеними шпангоутами.

4. При дослідженні коливань конструкцій з підвісними резервуарами слід було б враховувати наявність в них трубопроводу, що розміщений вздовж осі симетрії резервуара. Це дало б можливість більш точно порівняти динамічні характеристики розглядуваної механічної системи з існуючими в літературі експериментальними даними.

5. У дисертації є деякі описки так, наприклад, на стор. 45 другий рядок знизу, слід замінити ANSIS на ANSYS та інші.

Усі зазначені зауваження та побажання ні в якому разі не знижують цінність дисертаційної роботи Ю.В. Троценка, яка виконана на високому науковому рівні.

Достовірність отриманих в роботі результатів підтверджується порівнянням отриманих розрахункових даних з існуючими теоретичними та експериментальними даними інших авторів, дослідженням практичної збіжності розроблених алгоритмів, перевіркою точності задоволення знайдених розв'язків вихідним рівнянням.

Практичне значення результатів роботи визначається розробкою нових підходів до розв'язання складних та важливих у практичному відношенні класів задач теоретичної механіки.

Автореферат адекватно відображає зміст дисертації.

В цілому робота виконана на високому науковому рівні і носить завершений характер. В ній отримані нові результати по розробці аналітичного методу розв'язання сингулярно збуреної спектральної задачі про коливання довільних оболонок обертання, по застосуванню метода Рітца до розв'язання задач з використанням декомпозиції області визначення шуканих розв'язків, по розробці аналітичного методу визначення власних коливань стержнів з підвісними резервуарами з рідиною, по визначенню коливань оболонок обертання, що частково заповнені рідиною на основі варіаційного методу.

Вважаю, що дисертаційна робота «Розвиток методів аналітичної механіки в задачах про коливання багатокомпонентних механічних систем» відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів» (Постанова КМУ від 24 липня 2013 р. № 567 зі змінами) щодо докторських дисертацій, а її автор Юрій Володимирович Троценко, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.01 – теоретична механіка.

Офіційний опонент
доктор фізико-математичних наук, професор,
провідний науковий співробітник науково дослідної частини
Донецького національного університету
імені Василя Стуса

Ю.М. Кононов

підпис *Кононов Ю.М.*
ЗАСВІДЧУЮ
Вчений секретар університету
Важенина О.Г.
«14» травня 2017р.



Надійшов до секретарівської
вченої ради ДДУ 15.06.2017р.
секретар ради *Канцелярія* / *Артемченко Е.В.*

