

Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний технічний університет

КАІРОВ ВОЛОДИМИР ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 539.3

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПІДКРІПЛЕНИХ
КОНСТРУКТИВНО НЕОДНОРІДНИХ ОБОЛОНОК З ОТВОРАМИ ТА
ПРИЄДНАНИМИ ТВЕРДИМИ ТІЛАМИ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ
НАВАНТАЖЕННІ

01.02.04 – Механіка деформівного твердого тіла

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Запоріжжя – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Донецькому національному університеті Міністерства освіти і науки України (м. Вінниця).

Науковий керівник:

академік НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор **Шевченко Володимир Павлович**, Донецький національний університет (м. Вінниця), завідувач кафедри прикладної механіки та комп'ютерних технологій.

Офіційні опоненти:

член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор **Гудрамович Вадим Сергійович**, Інститут технічної механіки НАН України та Державного космічного агентства України (м. Дніпро), завідувач відділу міцності і надійності механічних систем;

доктор технічних наук, професор **Гришак Віктор Захарович**, Запорізький національний університет (м. Запоріжжя), завідувач кафедри прикладної математики і механіки.

Захист відбудеться «13» грудня 2016 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 17.052.01 у Запорізькому національному технічному університеті (69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ауд. 153) о 13-30..

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Запорізького національного технічного університету (69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64) та на сайті університету у вкладці «Наука» – «Спеціалізована вчена рада».

Автореферат розісланий «05» 11 _____ 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради О.А. Міт'яєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У сучасному машинобудуванні, авіаційній і ракетно-космічній техніці та в інших галузях народного господарства широко використовуються конструкції з елементами у вигляді оболонок, які відрізняються достатньо високою міцністю, несучою здатністю та надійністю при мінімальній вазі. В більшості випадків оболонки мають неоднорідну структуру у вигляді отворів, приєднаних твердих тіл, підкріплюючих ребер та дискретних включень. Вказані конструктивні неоднорідності тонкостінних оболонок впливають на їх амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) і напружено-деформований стан (НДС) та є концентраторами напружень.

Поблизу цих концентраторів під дією динамічних навантажень можуть виникати великі напруги, які необхідно враховувати при проектуванні та розрахунку конструкцій на міцність. Врахування зазначених факторів значно ускладнює математичні моделі динамічної поведінки і вимагає розробки нових підходів до розв'язання задач віброміцності тонкостінних оболонок. Складність процесів, які розглядаються, викликає необхідність використання сучасних чисельних методів для розрахунку АЧХ та НДС оболонок з локальними конструктивними неоднорідностями. Одним з найбільш ефективних чисельних методів для задач даного класу є метод скінченних елементів (МСЕ).

Таким чином, визначення динамічної поведінки та НДС тонких оболонок обертання з конструктивними недосконаlostями є на сьогоднішній день актуальною і важливою науково-технічною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано в рамках індивідуального плану підготовки аспіранта за кафедрою прикладної механіки та комп'ютерних технологій Донецького національного університету. Проведені у роботі дослідження пов'язані з держбюджетними науково-дослідними темами вище названого університету, включеними до координаційного плану Міністерства освіти і науки України, а саме: «Розробка моделей та методів дослідження міцності і стійкості тонкостінних конструкцій, які знаходяться під дією силових і температурних полів» (№ ДР 0113U001528, 2013-2015 рр.), «Розробка методів дослідження міцності і стійкості тонкостінних конструкцій при дії різного виду статичних і динамічних навантажень» (№ ДР 0116U002522, 2016-2018 рр.), та з науково-дослідними держбюджетними темами Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова «Розробка математичних моделей і методів дослідження коливань і напружено-деформованого стану лопаткових і оболонкових елементів газотурбінних двигунів з урахуванням конструктивних і технологічних факторів» (№ ДР 0114U002009, 2014-2015 рр.), «Розробка математичних моделей і методів дослідження коливань і напружено-

деформованого стану тонкостінних оболонкових елементів з урахуванням конструктивних неоднорідностей» (№ ДР 0115U001959, 2015-2016 рр.).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методики дослідження динамічної поведінки тонкостінних циліндричних оболонок з конструктивними недосконалотями у вигляді отворів, приєднаних твердих тіл, підкріплюючих ребер та аналіз залежності АЧХ та НДС досліджуваних конструкцій від наявності вказаних недосконалотей.

Для досягнення сформульованої мети у роботі були визначені наступні напрямки дослідження:

- постановка задач для аналізу амплітудно-частотних характеристик та напружено-деформованого стану тонкостінних циліндричних оболонок з конструктивними неоднорідностями при різних граничних умовах в рамках лінійної теорії дискретно підкріплених оболонок;

- створення ефективного розрахункового апарату (математичних моделей, методик і алгоритмів розрахунку, програмного забезпечення) для дослідження АЧХ та НДС в пружних оболонках для різних видів граничних умов;

- отримання чисельного розв'язку сформульованих задач і встановлення нових залежностей та закономірностей впливу конструктивних недосконалотей на АЧХ та НДС досліджуваних конструкцій;

- чисельне дослідження достовірності розроблених математичних моделей та збіжності отриманих розв'язків;

- проведення експериментальних випробовувань по дослідженню АЧХ та НДС тонкостінних циліндричних оболонок та виявлення нових закономірностей впливу конструктивних недосконалотей;

- виконання порівняльного аналізу отриманих чисельних та експериментальних результатів для підтвердження достовірності та адекватності створених математичних моделей.

Об'єктом дослідження являються процеси НДС та коливань підкріплених пружних циліндричних оболонок з отворами та приєднаними твердими тілами при динамічному навантаженні.

Предметом дослідження являється вплив підкріплюючих ребер, отворів та приєднаних тіл на НДС та коливальні процеси тонкостінних циліндричних оболонок обертання.

Методи дослідження. Проведені у роботі теоретичні дослідження ґрунтуються на теорії тонких пружних оболонок у лінійній постановці з урахуванням допущень, основаних на гіпотезах Кірхгофа-Лява, та варіаційного принципу Лагранжа. Чисельне розв'язання задач здійснювалося за допомогою методу скінченних елементів.

Експериментальні дані отримано методами голографічної інтерферометрії (стробоголографічної та усереднення в часі) з допомогою розробленої методики та спеціального обладнання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

– розроблено математичні моделі динамічної поведінки і НДС тонкостінних пружних циліндричних оболонок, які дозволяють враховувати конструктивні особливості у вигляді отворів, приєднаних твердих тіл, поздовжньо-поперечних підкріплюючих ребер та нерівномірність розподілу їх інерційних, жорсткісних і геометричних характеристик;

– розвинуто ефективні чисельні методики, розроблено алгоритми та програми для рішення задач даного класу;

– отримано нові чисельні результати на підставі запропонованого підходу для широкого діапазону зміни геометричних і механічних параметрів досліджуваної оболонкової системи;

– встановлено розподіл амплітудно-частотних характеристик і полів динамічних напружень у складних неоднорідних тонкостінних циліндричних оболонкових конструкціях, обумовлений спільною присутністю отворів, систем приєднаних тіл, підкріплюючих ребер, їх розташуванням, кількістю, розмірами;

– отримано нові експериментальні результати методами голографічної інтерферометрії (стробоголографічної та усереднення в часі) на базі уточненої методики експериментальних досліджень, які визначають спільний вплив отворів, приєднаних твердих тіл, поздовжньо-поперечних підкріплюючих ребер на АЧХ та НДС досліджуваних складних оболонкових систем та підтверджують адекватність розроблених удосконалених математичних моделей і достовірність одержаних чисельних результатів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості безпосереднього застосування створених методик та програмного комплексу для аналізу АЧХ та НДС підкріплених тонкостінних оболонок за наявності отворів різної форми та приєднаних твердих тіл. Одержані в дисертації нові результати є теоретичною основою для методів розрахунку амплітудно-частотних характеристик і полів напружень оболонкових конструкцій при динамічному навантаженні.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в розрахунковій практиці ДП «Суднобудівний завод ім. 61 Комунара», ДП НВКГ «Зоря»–«Машпроект» та ВАТ «УкрНДІ ТСМ» для прогнозування віброміцності та несучої здатності оболонкових елементів газотурбінних двигунів та спеціальних суднових конструкцій. Запропоновані методики і алгоритми розрахунку, комплекс комп'ютерних програм та експериментальні дані можуть бути використані у роботі конструкторських бюро, науково-дослідних інститутів і підприємств, що займаються проектуванням і розрахунком оболонкових елементів в машинобудуванні, суднобудуванні, авіаційній та космічній техніці.

Окремі результати досліджень використовуються в навчальному процесі, зокрема – при вивченні спеціальних дисциплін з віброміцності тонкостінних конструкцій, а також при виконанні науково-дослідних держбюджетних тем у Донецькому національному університеті та у Національному університеті кораблебудування ім. адмірала Макарова.

Особистий внесок здобувача. Основні результати досліджень, що представлені у дисертаційній роботі та виносяться на захист, одержані автором особисто. У публікаціях, що виконані у співавторстві, внесок здобувача полягає в наступному: розробка методів визначення АЧХ оболонок з конструктивними недосконалостями, створення алгоритмів та програм розв’язання конкретних задач, проведення чисельних розрахунків [3, 7, 8, 10, 13]; постановка і розв’язок задач про вимушені коливання та НДС тонких неоднорідних оболонок, аналіз впливу конструктивних факторів [2, 5, 14]; проведення експерименту та обробка його результатів [4, 6, 11]. Праці [1, 9, 12] опубліковані автором одноосібно.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, що наведені в дисертації, доповідалися на наступних наукових конференціях: I–III Міжнародних науково-технічних конференціях «Актуальні проблеми прикладної механіки та міцності конструкцій» (Україна, Ялта, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенко, 2009–2011); V та VI Міжнародних науково-практичних конференціях «Актуальні проблеми механіки деформівного твердого тіла» (Україна, Донецьк, Донецький національний університет, 2008, 2010); I та II Міжнародних науково-технічних конференціях «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Україна, Миколаїв, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, 2011, 2012); IV та V Міжнародних науково-технічних конференціях «Актуальні проблеми прикладної механіки та міцності конструкцій» (Україна, Запоріжжя, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенко, 2012, 2015); XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія і інженерна освіта» (Україна, Севастополь, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2013); III Міжнародній науково-технічній конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми» (Україна, Миколаїв, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, 2007); XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія і інженерна освіта» (Україна, Одеса, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2015); I Всеукраїнській науково-технічній конференції «Комп’ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (Україна, Дніпропетровськ, Український державний хіміко-технологічний університет, 2015); XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Математичні

проблеми технічної механіки – 2016» (Україна, Дніпродзержинськ, Дніпродзержинський державний технічний університет, 2016).

У повному обсязі дисертація доповідалася та була схвалена на: міжкафедральних наукових семінарах з механіки суцільних середовищ при Донецькому національному університеті (Україна, Донецьк, Вінниця, Донецький національний університет, 2013–2015); міжкафедральному науковому семінарі з прикладної математики та механіки при Запорізькому національному університеті (Україна, Запоріжжя, Запорізький національний університет, 2016); міжкафедральному спеціалізованому семінарі «Механіка деформівного твердого тіла» при Запорізькому національному технічному університеті (Україна, Запоріжжя, Запорізький національний технічний університет, 2016).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в 14 наукових працях. Серед них 7 статей опубліковано в фахових виданнях України, з яких 4 належать до міжнародних наукометричних баз, а також 7 публікацій у матеріалах науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Робота загальним обсягом 182 сторінки складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 175 найменувань на 19 сторінках та 5 додатків на 13 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 150 сторінок та включає 35 рисунків та 14 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дослідження, формулюються мета та завдання роботи, визначаються об'єкт, предмет та методи досліджень, наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, а також особистий внесок здобувача, наводиться апробація результатів дисертації та кількість публікацій, виконаних за темою дисертаційної роботи.

В **першому розділі** наведено огляд наукових праць, в яких вивчаються питання, близькі за напрямком до теми дисертації, подано перелік та короткий опис змісту робіт, що стосуються дослідження коливань та НДС пружних тонкостінних оболонок з конструктивними неоднорідностями при динамічному навантаженні.

Найважливіші ідеї у створенні теорій та методів дослідження динаміки пружних оболонок знайшли відображення у роботах таких вчених, як С.О. Амбарцумян, І.Я. Аміро, В.А. Баженов, В.В. Болотін, В.З. Власов, О.С. Вольмір, І.І. Ворочич, О.Л. Гольденвейзер, Е.І. Григолюк, Я.М. Григоренко, В.З. Гришак, В.С. Гудрамович, О.М. Гузь, А.П. Дзюба, В.О. Заруцький, В.Д. Кубенко, В.І. Моссаковський, В.В. Новожилов,

В.І. Пожуєв, О.С. Сахаров, С.П. Тимошенко, В.П. Шевченко, М. Amabili, L.H. Donnell, D.A. Evensen, K. Marguerre.

Незважаючи на наявність великого числа робіт, виконаних з використання різних прикладних теорій та присвячених дослідженню окремих аспектів розглядаємої проблеми, існує цілий ряд актуальних задач, що мають важливе наукове і практичне значення, вимагають глибокого всебічного вивчення і подальшого розвитку розрахункових моделей, які використовуються для їх вирішення. Найбільш повно вивчені задачі вільних і вимушених коливань конструктивно однорідних оболонок, але практично відсутні дослідження динамічної поведінки підкріплених оболонок з отворами різної форми і приєднаними твердими тілами при урахуванні дискретного розміщення ребер, характерних для реальних конструкцій.

На сьогоднішній день в багатьох роботах при розрахунку підкріплених оболонок використовуються два основні підходи до розв'язання задач такого класу, які відрізняються способом врахування підкріплюючих елементів. Перший підхід полягає у використанні конструктивно-ортотропної моделі оболонки, другий – у врахуванні дискретного розміщення ребер. В даній роботі дослідження виконані з використанням розрахункової схеми, що ґрунтується на рівняннях класичної теорії оболонок з урахуванням гіпотез Кірхгофа-Лява та дискретної моделі розміщення підкріплюючих ребер. Серед чисельних методів для розрахунку неоднорідних конструкцій найбільш добре зарекомендував себе метод скінченних елементів (МКЕ), який є найбільш зручним при вирішенні динамічних задач для конструкцій складної геометричної форми.

Таким чином, розробка ефективного підходу до розв'язування задач про вільні і вимушені коливання та НДС конструктивно неоднорідних циліндричних оболонок представляє складну актуальну проблему механіки деформівного твердого тіла.

У другому розділі наведено постановку динамічних задач та рівняння коливань підкріплених циліндричних конструктивно неоднорідних оболонок обертання радіуса R з врахуванням дискретності розміщення ребер. Представлені основні співвідношення напружено-деформованого стану оболонок і підкріплюючих ребер у лінійній постановці в рамках гіпотез Кірхгофа-Лява та Кірхгофа-Клебша. Деформований стан оболонки може бути визначений через компоненти узагальненого вектору переміщень серединної поверхні $\{u\} = \{u_1, u_2, u_3\}^T$ та кути $\theta_1(\alpha_1, \alpha_2)$, $\theta_2(\alpha_1, \alpha_2)$ повороту нормалі до серединної поверхні відносно координатних осей. Схематичне зображення вказаної структури представлено в глобальній криволінійній ортогональній системі координат $(\alpha_1, \alpha_2, \xi)$ на рис.1.

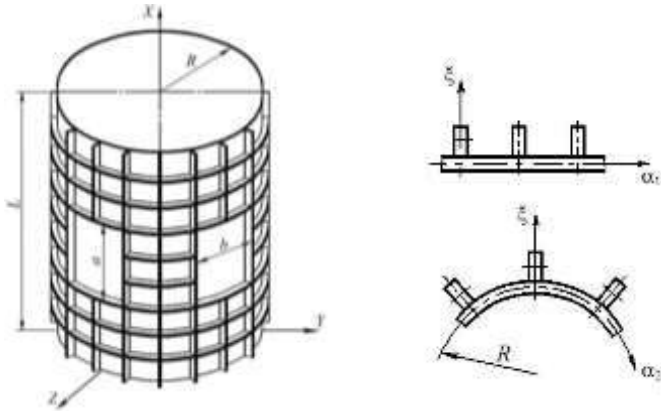


Рисунок 1 – Схематичне зображення оболонкової структури.

Вираз для деформації середньої поверхні пружної тонкостінної циліндричної оболонки має вигляд:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1}; & \varepsilon_2 &= \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \alpha_2} + u_3 \right); & \varepsilon_3 &= \frac{1}{R} \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_2} + \frac{\partial u_2}{\partial \alpha_1}; \\ \varepsilon_4 &= -\frac{\partial^2 u_3}{\partial \alpha_1^2}; & \varepsilon_5 &= -\frac{1}{R} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial^2 u_3}{\partial \alpha_2^2} - \frac{\partial u_2}{\partial \alpha_2} \right); & 2\varepsilon_6 &= \frac{2}{R} \left(\frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1} - \frac{\partial^2 u_3}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_2} \right); \\ \theta_1 &= -\frac{\partial u_3}{\partial \alpha_1}; & \theta_2 &= -\frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_3}{\partial \alpha_2} - u_2 \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Для виводу рівнянь коливань і визначення амплітудно-частотних характеристик та НДС неоднорідної дискретно підкріпленої оболонки використовується варіаційний принцип Лагранжа, згідно з яким:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = F, \quad (2)$$

де $\mathcal{L} = \Pi - T$ – функція Лагранжа;

Π, T – потенційна і кінетична енергії деформації і коливань дискретно підкріпленої оболонки;

q – вектор вузлових переміщень скінчено-елементної моделі конструкції;

F – вектор зовнішніх сил, прикладених до вузлів.

Потенційна енергія деформації оболонки обчислюється за формулою:

$$U = \frac{1}{2} \iiint_V \{q\}^T [B]^T [D_\sigma] [B] \{q\} dV = \frac{1}{2} \{q\}^T [K] \{q\} \quad (3)$$

Кінетична енергія досліджуваної оболонкової системи визначається як сума кінетичних енергій скінчених елементів оболонки, ребер і приєднаних тіл. Матрична форма співвідношення для визначення кінетичної енергії в даному випадку має вигляд:

$$T = \frac{1}{2} \rho \iiint_V \{q\}^T [N]^T [N] \{q\} dV = \frac{1}{2} \{q\}^T [M] \{q\}, \quad (4)$$

де $[B] = [D_\varepsilon] [N]$ – матриця градієнтів скінченного елемента;

$[D_\varepsilon]$, $[D_\sigma]$ – матриці диференціальних операторів та пружності;

$[N]$ – матриця функцій форми, що визначає положення вузлів елемента;

$\{q\}$ – вектор узагальнених вузлових переміщень скінченно-елементної

моделі;

V – об'єм скінченного елемента;

$[K]$, $[M]$ – матриці жорсткості та мас скінченно-елементної моделі;

ρ – густина матеріалу оболонки.

Напружено-деформований стан оболонки визначається вектором напруги $\{\sigma\} = \{\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}\}^T$ з урахуванням малих пружних деформацій (1):

$$\{\sigma\} = [D_\sigma] \{\varepsilon\}, \quad (5)$$

де $\{\varepsilon\} = [B] \{q\}$ – вектор деформацій оболонки.

У третьому розділі виконано постановку задач власних коливань конструктивно неоднорідних циліндричних оболонок з використанням методу скінчених елементів на основі класичної теорії в рамках гіпотез Кірхгофа-Лява. Розроблено математичні моделі їх динамічної поведінки з допомогою ізопараметричних чотирикутних скінчених елементів. Досліджено частоти та форми власних коливань конструкції.

На основі варіаційного принципу Лагранжа (2) при $F = 0$ з урахуванням (3), (4) отримуємо рівняння руху досліджуваної системи:

$$[M] \{\ddot{q}\} + [K] \{q\} = \{0\}, \quad (6)$$

Тобто передбачається, що зовнішні сили і демпфування дорівнюють нулю. Розв'язок системи лінійних рівнянь (6) шукаємо у вигляді:

$$\{q\} = \{q_0\}_i \cos(\omega_i t + \varphi_i), \quad (7)$$

де $\{q_0\}_i$ – i -ий власний вектор, що представляє амплітуду коливань на i -ій власній частоті (i -а форма коливань);
 ω_i, t – i -а власна кругова частота коливань та час;
 φ_i – зсув фаз для переміщень.

Рівняння (6) з урахуванням залежності (7) приводяться до виду:

$$\left(-\omega_i^2 [M] + [K]\right) \{q_0\}_i = \{0\} \quad (8)$$

Отримана задача (8) з допомогою розкладання Холецкого приводиться до стандартної проблеми власних чисел та векторів, яка розв'язується комбінованим методом Хаусхолдера-QR-зворотних ітерацій. Даний алгоритм підвищує точність результатів, економить час розрахунку і потреби в зовнішній та оперативній пам'яті ЕОМ.

Для обґрунтування вірогідності і точності одержаних результатів даний алгоритм розрахунку відпрацьовувався на тестових задачах і досліджувався на практичну збіжність. Отримані розрахункові результати порівнювалися з результатами розрахунку з використанням ліцензійного пакету розрахунково-прикладних програм ANSYS та отриманими експериментальними даними.

На конкретних прикладах виконано чисельний аналіз впливу геометричних параметрів оболонок, кількості та розташування підкріплюючих ребер, фізико-механічних властивостей матеріалу, маси приєднаних тіл, умов закріплення торців на частоти і форми власних коливань. На рис. 2 представлена залежність частотного параметра $\omega_* = \omega R \sqrt{\rho(1-\nu^2)}/E$, що характеризує нижчу частоту коливань, від хвильових чисел n та маси приєднаного тіла для жорстко закріпленої циліндричної оболонки з відносними геометричними параметрами $L/R=3$; $R/h=125$, $R=0,075$ м, де R, L, h – радіус, довжина і товщина оболонки. З зовнішньої сторони оболонка регулярно підкріплена рівномірно розподіленими стрингерами 4×1мм прямокутного профілю. Тверде тіло за допомогою жорсткої підвіски приєднане зовні до поверхні оболонки та розташоване посеред твірної. Крива 1 відповідає незавантаженій оболонці при $M_1/M_0=0$, а криві 2–4 – завантаженій з $M_1/M_0=0,1; 0,3; 0,5$ відповідно, де M_1 – маса приєднаного тіла, M_0 – маса незавантаженої оболонки. Дана залежність для нижчої частоти має характерні ділянки.

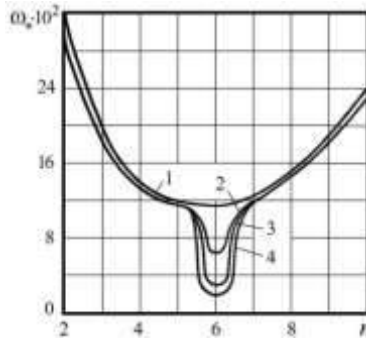


Рисунок 2 – Залежність частотного параметра ω_* від маси приєданого тіла.

Залежність частотного параметра ω_* від кількості шпангоутів N_2 з поперечним перерізом 6×1 мм наведена в табл. 1. Стовбці $C - C$, $S - S$, $C - F$ відповідають граничним умовам на торцях оболонки: жорстке, шарнірне та консольне закріплення контурів.

На основі отриманих результатів у кожному конкретному випадку дані рекомендації про вибір раціонального підкріплення несучої поверхні і зроблені висновки про вплив конструктивних і механічних характеристик ребер на основні характеристики коливань.

Таблиця 1 – Залежність частотного параметра ω_* від кількості зовнішніх шпангоутів

Частотний параметр $\omega_* \cdot 10^2$						
Граничні умови	$C - C$		$S - S$		$C - F$	
	$\omega_* \cdot 10^2$	n	$\omega_* \cdot 10^2$	n	$\omega_* \cdot 10^2$	n
$N_2 = 0$	11,32	6	8,84	5	4,62	4
1	17,58	5	15,07	4	6,91	3
2	20,16	4	16,76	3	8,19	3
3	20,27	3	16,93	3	8,29	3
4	20,35	3	17,06	3	8,37	3

Для різних граничних умов проведений аналіз та виявлені особливості і закономірності характеру впливу прямокутних та круглих отворів, що створюють локальну інерційну неоднорідність, та їхніх розмірів на частоти і форми коливань оболонкової системи. Досліджено випадки, коли контури отворів вільні або підкріплені пружними елементами. Наведено результати

розрахунків для оболонок з одним та декількома симетрично та асиметрично розташованими отворами з урахуванням жорсткості підкріплюючих елементів. Отримано чисельні результати розподілу переміщень і деформацій в області отворів.

У четвертому розділі представлений чисельний алгоритм розв'язування задач вимушених гармонічних коливань підкріплених циліндричних оболонок з конструктивними неоднорідностями з урахуванням дискретності розміщення ребер. Диференціальні рівняння для гармонічного аналізу оболонкових конструкцій отримані з використанням варіаційного принципу Лагранжа:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F\}, \quad (9)$$

де $\{q\}$ – вектор узагальнених вузлових переміщень;

$\{\ddot{q}\}$, $\{\dot{q}\}$ – вектори прискорень і швидкостей у вузлах оболонки;

$[K]$, $[C]$, $[M]$ – матриці жорсткості, демпфування і мас;

$\{F\}$ – вектор прикладених вузлових зовнішніх збурюючих сил.

Опис динамічної поведінки оболонок проводиться шляхом їх дискретизації скінченними елементами, що використовувалися у модальному аналізі. Обчислення амплітуд вібропереміщень виконуються методом розкладання переміщень за власними формами коливань. Розроблена уточнена математична модель на основі методу суперпозиції мод з урахуванням демпфування оболонкової системи.

Розв'язок системи диференціальних рівнянь шукається у вигляді:

$$\{q\} = \{q_0(\cos \varphi + i \sin \varphi)\} e^{i\Omega t}, \quad (10)$$

де q_0 – амплітуда переміщень;

i – неявна одиниця;

Ω – кругова частота зовнішніх сил;

φ – зсув фаз для переміщень.

Для періодичного зовнішнього навантаження, що збурює коливання, вектор динамічних сил представлений у вигляді суми членів тригонометричного ряду Фур'є, аналогічно вектору переміщень:

$$\{F\} = \{F_0 e^{i\psi}\} e^{i\Omega t} = \{F_0(\cos \psi + i \sin \psi)\} e^{i\Omega t}, \quad (11)$$

де F_0 – амплітуда сил;

ψ – зсув фаз для сил.

Підставляючи (10), (11) в (9), одержимо:

$$\left([K] - \Omega^2 [M] + \Omega [C] \right) (\{q_1\} + i \{q_2\}) = (\{F_1\} + i \{F_2\}), \quad (11)$$

де $\{q_1\} = \{q_0 \cos \varphi\}$ – дійсна частина вектора переміщень;

$\{q_2\} = \{q_0 \sin \varphi\}$ – невяна частина вектора переміщень;

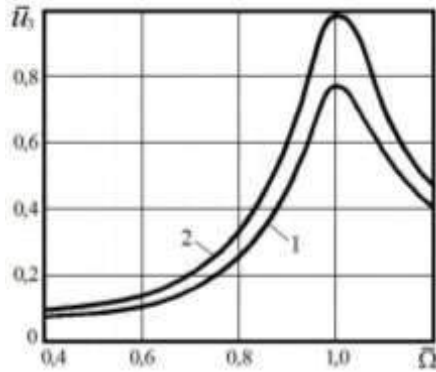
$\{F_1\} = \{F_0 \cos \psi\}$ – дійсна частина вектора сил;

$\{F_2\} = \{F_0 \sin \psi\}$ – невяна частина вектора сил.

Задача (11) з визначення амплітуд і силових характеристик вимушених гармонічних коливань вирішена на основі розкладання переміщень за власними формами коливань методом суперпозиції мод. В цьому випадку рівняння рівноваги приводяться до більш ефективної для інтегрування форми. На основі даного методу розроблено методику розрахунку амплітуд вимушених коливань оболонкової системи. Напружено-деформований стан оболонки визначається згідно залежності (5).

З використанням розробленої розрахункової методики виконано розрахунки амплітуд коливань і НДС конструктивно неоднорідних циліндричних оболонок. Досліджено вплив поздовжньо-поперечного підкріплення на амплітуди коливань і динамічні напруги оболонок при стаціонарному динамічному навантаженні. Отримано нові чисельні результати залежностей амплітудно-частотних характеристик коливань і напружено-деформованого стану оболонкових систем від параметрів конструктивних особливостей. Визначено величини максимальних динамічних напружень в оболонці, варіюючи її механічні та геометричні параметри. Виконано порівняння отриманих рішень з результатами розрахунку з використанням пакета ANSYS.

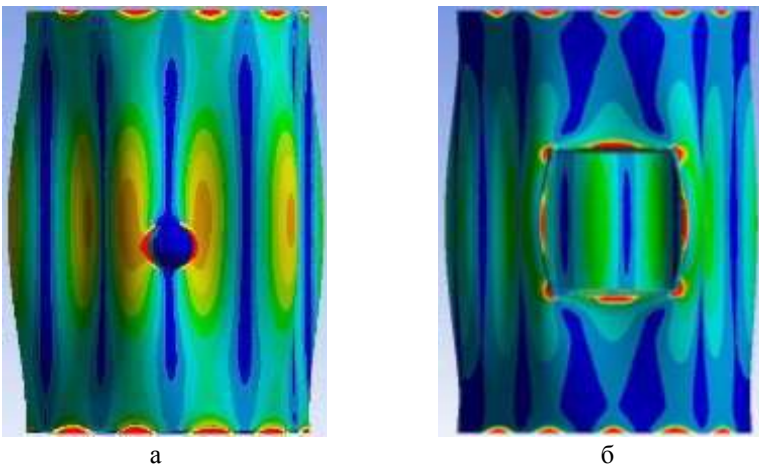
Проведено аналіз впливу отворів і приєднаних твердих тіл на НДС оболонок при дії збуджуючого радіального динамічного навантаження, розподіленого за гармонійним законом. На рис. 3 наведено амплітудно-частотні залежності вимушених коливань жорстко закріпленої оболонки ($L/R=2,5$; $R/h=125$) з приєднаним твердим тілом з урахуванням різних коефіцієнтів демпфування. Оболонка здійснює коливання на основній частоті. Тут: $\bar{u}_3 = u_{3\xi} / u_{3\max}$ – відносна величина радіальних переміщень u_3 ; $u_{3\xi}$ – радіальні переміщення з заданим коефіцієнтом демпфування; $u_{3\max}$ – максимальна величина радіальних переміщень; $\bar{\Omega} = \Omega_i / \omega_0$ – відносний частотний параметр; Ω_i – частота вимушених коливань; ω_0 – резонансна частота коливань.



1 – коливання з коефіцієнтом загасання $\eta = 0,05$; 2 – коливання з коефіцієнтом $\eta = 0,03$;

Рисунок 3 – Амплітудно-частотні характеристики вимушених коливань жорстко закріпленої оболонки з приєднаним твердим тілом при демпфуванні.

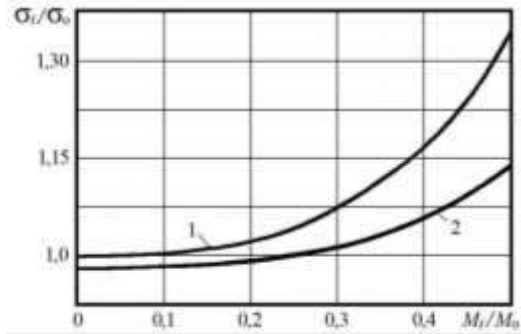
На рис. 4 для першої моди коливань оболонки представлені найбільш інтенсивні зони полів концентрації динамічних напружень в області розташування приєданого тіла та кутах отвору оболонки.



а – оболонка з приєднаним тілом; б – оболонка з квадратним підкріпленим отвором;

Рисунок 4 – Найбільш інтенсивні зони полів концентрації напружень для першої моди коливань оболонки з отвором і приєднаним твердим тілом.

Вплив величини маси приєднаного тіла на динамічні напруги з урахуванням коефіцієнта демпфування для розглянутої оболонки представлено на рис. 5. Тут σ_i – максимальні динамічні напруження, що виникають в конструкції з приєднаним тілом при динамічному навантаженні; σ_0 – максимальні динамічні напруження в оболонці без приєднаних тіл. З наведених результатів видно, що із зростанням маси приєднаних тіл величина максимальних динамічних напружень зростає.



1 – залежність при $\eta = 0,01$; 2 – залежність при $\eta = 0,05$;

Рисунок 5 – Розрахункові залежності максимальних динамічних напружень в оболонці від величини маси приєднаного тіла та коефіцієнта загасання η .

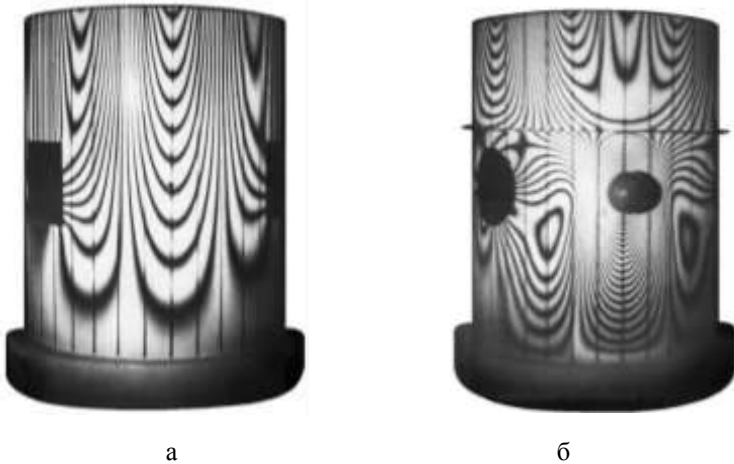
У п'ятому розділі відображено експериментальне дослідження резонансних коливань циліндричних пружних оболонок з конструктивними неоднорідностями. Розроблено технологію виготовлення тонкостінних оболонкових моделей, конструкцію спеціального затискного пристосування та методику експериментальних досліджень власних коливань і напружено-деформованого стану. Вдосконалено електрооптичну схему вібростенда. Експерименти виконуються з використанням методу усереднення у часі та методу стробоголографічної інтерферометрії, які дозволяють досліджувати з високою точністю в широкому діапазоні спектру частот резонансні коливання пружних конструкцій довільної форми з різними неоднорідностями і отримувати наочні достовірні високоінформативні результати, що характеризують особливості процесу коливань і полів амплітуд вібропереміщень.

Отримано амплітудно-частотні характеристики для нижнього і середнього спектрів частот резонансних коливань серії тонких пружних кругових циліндричних оболонок з конструктивними неоднорідностями при

динамічному навантаженні, що змінюється у часі за гармонійним законом. Досліджено вплив граничних умов, дискретного розміщення підкріплюють ребер, отворів різної форми і приєднаних твердих тіл на частоти і форми вільних коливань. Виявлено характерні особливості напружено-деформованого стану.

Одержані дані підтверджують висновки про значне зниження основної частоти коливань оболонки при наявності приєднаних твердих тіл і отворів та про її збільшення при підкріпленні шпангоутами. Даний ефект якісно і кількісно узгоджується з чисельними результатами, отриманими з використанням розроблених розрахункових методик.

Напружено-деформований стан оболонки визначається по знайденим компонентам вектора переміщень. Приклади інтерферограм характерних основних резонансних форм коливань підкріплених циліндричних оболонок з отворами і приєднаними тілами наведені на рис. 6.



а – оболонка з квадратним підкріпленим отвором; б – оболонка з круглим отвором, приєднаним тілом та шпангоутом;

Рисунок 6 – Інтерферограми нижчих форми коливань пружних циліндричних оболонок з отворами.

Виконане порівняння експериментальних і чисельних результатів свідчить про їх добру узгодженість. Найбільша розбіжність отриманих характеристик не перевищує 10%, що свідчить про адекватність запропонованих математичних моделей динамічної поведінки оболонок і розрахункових методик. В результаті проведених досліджень отримані нові наукові та практичні результати, які можуть служити надійною основою для

розробки та верифікації сучасних математичних моделей і розрахункових методик при проектуванні, визначенні динамічних властивостей і діагностиці складних тонкостінних оболонкових елементів нових інженерних споруд і машин.

Встановлені залежності коливань циліндричних оболонок від характеру підкріплень поверхні дають можливість керувати спектром частот вільних коливань оболонкових конструкцій для уникнення резонансного режиму за рахунок зміни товщини оболонки та ребер.

За результатами експериментального дослідження і чисельного моделювання було визначено оптимальне підкріплення оболонок.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання – розвинута методика дослідження амплітудно-частотних характеристик та напружено-деформованого стану тонкостінних оболонок з конструктивними недосконаlostями. При цьому отримані такі результати:

1. Сформульовано завдання для аналізу АЧХ та НДС тонких пружних оболонок з отворами, приєднаними твердими тілами, підкріплюючими ребрами при різних граничних умовах в рамках лінійної теорії дискретно підкріплених оболонок згідно гіпотез Кірхгофа-Лява, варіаційного принципу Лагранжа та з використанням МСЕ.

2. Розроблено математичні моделі напружено-деформованого стану та коливань пружних оболонок, які враховують їх конструктивні особливості. Розвинуто чисельні методи, розроблено алгоритми та програми розрахунку з використанням скінченних елементів. Амплітудно-частотні характеристики визначаються комбінованим методом Хаусхолдера-QR-обернених ітерацій з застосуванням розкладу Холецкого та процесу ортогоналізації Грама-Шмідта, що підвищує точність результатів, економить час розрахунку і зменшує потреби в зовнішній та оперативній пам'яті ЕОМ.

3. На підставі запропонованих розрахункових методик отримано нові чисельні результати розподілу АЧХ і полів динамічних напружень конструктивно неоднорідних циліндричних оболонок, які характеризуються наявністю отворів, приєднаних тіл, підкріплюючих ребер, їх кількістю, розташуванням, нерівномірністю розподілу інерційних та жорсткісних характеристик при різних геометричних параметрах та граничних умовах. Чисельно досліджено достовірність розроблених математичних моделей та практичну збіжність одержаних рішень. Виконано порівняння результатів чисельного експерименту з даними розрахунку тестових задач.

4. Використовуючи новий підхід до експериментального дослідження, пов'язаний із застосуванням методів строболографічної інтерферометрії та

голографічної інтерферометрії усереднення в часі, одержано нові результати динамічної поведінки оболонок. До нових результатів відносяться виявлені механічні ефекти, які визначають незалежний та спільний вплив отворів, приєднаних твердих тіл, поздовжньо-поперечних підкріплюючих ребер на АЧХ та НДС досліджуваних конструкцій. Виявлено добру узгодженість чисельних та експериментальних результатів, що підтверджує достовірність та адекватність розроблених розрахункових методик.

5. Розроблено практичні рекомендації для поліпшення вібродинамічних характеристик пружних оболонок з конструктивними неоднорідностями, зокрема за характером розташування отворів і ребер, взаємодії приєднаних мас тіл, що покращить їх працездатність та надійність.

6. Результати дисертації впроваджені на підприємствах ДП НВКГ «Зоря»–«Машпроект», ВАТ «УкрНДІ ТСМ» та ДП «Суднобудівний завод ім. 61 Комунара» для аналізу НДС та АЧХ на стадії проектування оболоноквих елементів газотурбінних двигунів і спеціальних судових конструкцій при наявності отворів та приєднаних приладів, для прогнозування їх віброміцності та несучої здатності. Методики розрахунку та експериментальні дані використані при виконанні держбюджетних тем та в навчальному процесі в Національному університеті кораблебудування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Каиров В.А. Влияние подкрепляющих ребер на собственные колебания цилиндрических оболочек / В.А. Каиров // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Ліра. – 2015. – Вип. 24. – С. 114-122.

2. Каиров В.А. Напряженно-деформированное состояние подкрепленных оболочек с присоединенными твердыми телами при вынужденных колебаниях / В.А. Каиров, В.П. Шевченко, С.А. Моргунов // Вісник Дніпропетровського університету: Науковий журнал. Серія: Механіка. – Дніпропетровськ: ДНУ. – 2015. – Вип. 19, том 2. – С. 56-64.

3. Каиров В.А. Влияние отверстий на собственные колебания конструктивно неоднородных цилиндрических оболочек / В.А. Каиров, С.А. Моргунов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 57 (1166). – С. 49-53.

4. Каиров А.С. Экспериментальное исследование свободных колебаний подкрепленных цилиндрических оболочек с присоединенными твердыми телами / А.С. Каиров, Л.А. Латанская, В.А. Каиров // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: ІМА-прес. – 2009. – Вип 13. – С. 107-113.

5. Латанская Л.А. Математическое моделирование динамики вынужденных колебаний конструктивно неоднородных трехслойных оболочек вращения / Л.А. Латанская, В.А. Каиров // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Ліра, 2012. – Вип. 19. – С. 205-211.

6. Шевченко В.П. Экспериментальное исследование собственных колебаний конструктивно неоднородных цилиндрических оболочек / В.П. Шевченко, О.И. Власов, В.А. Каиров // Вісник Національного технічного університету України «КПІ»: зб. наук. праць. Серія: Машинобудування. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2013. – № 2 (68). – С. 122-127.

7. Каиров А.С. Численное исследование свободных колебаний конструктивно неоднородных подкрепленных оболочек с присоединенными твердыми телами / А.С. Каиров, В.А. Каиров // Вісник Донецького університету: Науковий журнал. – Донецьк: ДонНУ. – 2008. – Вип. 1. – С. 170-174.

8. Каиров А.С. Математическое моделирование и исследование свободных колебаний конструктивно неоднородных оболочек / А.С. Каиров, В.А. Каиров, М.В. Кулинич // Суднова енергетика: стан та проблеми. Матеріали III Міжнародної наук.-техн. конференції, 18-19 жовтня 2007 р. – Миколаїв: НУК. – 2007. – С. 126-128.

9. Каиров В.О. Математичне моделювання динамічного деформування тришарових композитних циліндричних оболонок при імпульсному навантаженні / В.О. Каиров // Актуальні проблеми інженерної механіки: Матеріали I Міжнародної наук.-техн. конференції, 25-26 жовтня 2011 р. – Миколаїв: НУК. – 2011. – С.37-39.

10. Шевченко В.П. Оптимизация подкрепленных цилиндрических оболочек при динамическом нагружении / В.П. Шевченко, В.А. Каиров // Актуальні проблеми інженерної механіки: Матеріали II Міжнародної наук.-техн. конференції, 22-24 жовтня 2012 р. – Миколаїв: НУК. – 2012. – С. 4-6.

11. Шевченко В.П. Экспериментальное исследование собственных колебаний конструктивно неоднородных цилиндрических оболочек / В.П. Шевченко, О.И. Власов, В.А. Каиров // Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: Матеріали XIV Міжнародної наук.-техн. конференції, 25-28 червня 2013 р. – Київ-Севастополь: НТУУ «КПІ». – 2013, Ч.1. – С. 14-16.

12. Каиров В.А. Численное исследование свободных колебаний подкрепленных ребрами цилиндрических оболочек вращения / В.А. Каиров // Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: Матеріали XVI Міжнародної наук.-техн. конференції, 22-25 червня 2015 р. – Київ-Одеса: НТУУ «КПІ». – 2015. – С. 27-28.

13. Шевченко В.П. Собственные колебания конструктивно неоднородных цилиндрических оболочек, ослабленных круглыми отверстиями / В.П. Шевченко, В.А. Каиров // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем: Матеріали I Всеукраїнської наук.-техн. конференції, 3-5 листопада 2015 р. – Дніпропетровськ: УДХТУ. – 2015. – С.81-82.

14. Каиров В.А. Вынужденные колебания подкрепленных цилиндрических оболочек с отверстиями и присоединенными телами / В.А. Каиров, В.П. Шевченко // Математичні проблеми технічної механіки – 2016: Матеріали XVI Міжнародної наук.-техн. конференції, 18-21 квітня 2016 р. – Дніпродзержинськ-Дніпропетровськ-Київ: ДДТУ. – 2016. – С. 9.

АНОТАЦІЯ

Каиров В.О. Напряжено-деформований стан підкріплених конструктивно неоднорідних оболонок з отворами та приєднаними твердими тілами при динамічному навантаженні. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Запорізький національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, Запоріжжя, 2016.

Роботу присвячено дослідженню власних коливань та напряжено-деформованого стану тонких пружних циліндричних оболонок обертання з отворами, підкріплюючими ребрами та приєднаними твердими тілами.

З допомогою удосконаленої методики виконано аналіз впливу конструктивних неоднорідностей, геометричних та механічних параметрів на частоти та форми коливань і напряжено-деформований стан досліджуваних оболонок. Чисельне розв'язання здійснюється методом скінченних елементів.

Достовірність отриманих результатів підтверджується порівнянням з результатами проведеного експерименту та відомими рішеннями.

Ключові слова: тонкостінні циліндричні оболонки, частоти коливань, напряжено-деформований стан, конструктивна неоднорідність, підкріплюючі ребра, отвори, приєднані тверді тіла, метод скінченних елементів.

АННОТАЦИЯ

Каиров В.А. Напряженно-деформированное состояние подкрепленных конструктивно неоднородных оболочек с отверстиями и присоединенными твердыми телами при динамическом нагружении. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела. –

Запорожский национальный технический университет Министерства образования и науки Украины, Запорожье, 2016.

Диссертационная работа посвящена решению актуальных научных задач механики деформируемого твердого тела, которые заключаются в теоретическом и экспериментальном исследовании собственных колебаний и напряженно-деформированного состояния тонких упругих цилиндрических оболочек вращения с конструктивными неоднородностями в виде отверстий, подкрепляющих ребер, присоединенных твердых тел.

Разработаны уточненные математические модели свободных и вынужденных колебаний, а также напряженно-деформированного состояния, позволяющие адекватно описывать динамическое поведение конструктивно неоднородных оболочек. В основу исходных математических моделей динамического поведения оболочечных конструкций и численных алгоритмов решения рассматриваемых задач положена теория дискретно подкрепленных оболочек в линейной постановке. Численное решение для различных видов граничных условий осуществляется методом конечных элементов. Уравнения движения оболочечной системы получены на основе вариационного принципа Лагранжа.

С использованием разработанной методики расчета получены амплитудно-частотные характеристики для тонкостенных упругих конструктивно неоднородных цилиндрических оболочек вращения. Проведен анализ полученных результатов для широкого диапазона изменения их конструктивных, геометрических и физико-механических параметров. Выявлены особенности и закономерности характера влияния подкрепляющих ребер, отверстий, присоединенных твердых тел, неравномерности распределения их инерционных, жесткостных и геометрических характеристик, вида граничных условий, физико-механических свойств материала на частоты и формы колебаний и напряженно-деформированное состояние исследуемой оболочечной системы.

Экспериментальные исследования частот и форм колебаний неоднородных оболочечных конструкций выполнены методом голографической интерферометрии.

Достоверность полученных результатов и адекватность разработанных математических моделей подтверждается сопоставлением с известными решениями, описанными в литературе, и данными проведенных экспериментальных исследований.

Ключевые слова: тонкостенные цилиндрические оболочки, частоты колебаний, напряженно-деформированное состояние, конструктивная неоднородность, подкрепляющие ребра, отверстия, присоединенные твердые тела, метод конечных элементов.

SUMMARY

Kairov V. O. Strain-deformed state of the attached constructional non-homogeneous shells with holes and solid detached bodies under dynamic loading. – Manuscript.

Thesis for a candidate Degree in Engineering Sciences by the specialty 01.02.04. – Mechanics of Deformable Solids. – Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, 2016.

Dissertation is concerned with theoretic and experimental investigation of thin elastic constructional non-homogeneous shells with holes, solid attached bodies and ribs free oscillation and stress-strained state.

The numerical solution is developed by the finite elements method.

The influence of holes, reinforcing ribs and attached solid bodies, physical and mechanical characteristics of material and shells' geometry on their free oscillation frequencies and stress-strained state are given too.

The results of the research and developed mathematical models adequacy have been adopted by the obtained results comparison with the well-known solutions and experimental data.

Key words: thin cylindrical shells, frequencies oscillation, stress-strained state, constructional inhomogeneity, reinforced ribs, holes, attached solid bodies, finite elements methods.

Підписано до друку 25.10.2016 р.

Формат 60x84/16. Папір офсетний. Гарнітура Таймс.

Ум.-друк. арк. 0,8.

Наклад 100 прим. Зам. № 5147

Надруковано в КП «Миколаївська обласна друкарня»

54010, м. Миколаїв, вул. Паризької Комуни, 3.

Свідоцтво про внесення до державного реєстру

ДК № 1339 від 24.04.2003р.