

УДК 539.3

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ І КОНІЧНОЇ ОБОЛОНОК ПРИ ПЕРІОДИЧНОМУ ОСЬОВОМУ СТИСНЕННІ

О.М. Палій,
канд. техн. наук

О.О. Лук'яченко,
д-р техн. наук

А.А. Козак,
канд. техн. наук

*Київський національний університет будівництва і архітектури
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ. 03680*

DOI: 10.32347/2410-2547.2023.110.344-352

Представлено порівняльний аналіз динамічної стійкості циліндричної і конічної оболонок з однаковими геометричними та механічними характеристиками при дії періодичного рівномірно розподіленого осьового стиснення. Дослідження стійкості усталених періодичних коливань тонких пружних оболонок базувалося на спільному використанні методу криволінійних сіток, проєкційного методу і методу продовження розв'язку по параметру в поєднанні з методом Ньютона–Канторовича. Геометрично нелінійні співвідношення теорії тонких пружних оболонок сформульовані на основі векторної апроксимації функції переміщень в загальній криволінійній системі координат в тензорній формі і задовольняли гіпотезам Кірхгофа-Лява. Дискретизація диференціальних рівнянь усталених вимушених коливань в напрямку твірних оболонок здійснена за допомогою модифікованого кінцево-різницевого метода криволінійних сіток. В круговому напрямку компоненти векторів переміщень елементів серединної поверхні оболонок апроксимовані тригонометричними рядами. Зменшення кількості узагальнених координат дискретної динамічної моделі усталених вимушених коливань оболонок виконано методом редукції базису Бубнова-Гальоркіна. Здійснено перехід від векторних звичайних диференціальних співвідношень до нелінійної системи алгебраїчних рівнянь. Побудова математичної моделі динамічної стійкості усталених вимушених нелінійних коливань тонких пружних оболонок виконана згідно теорії Флоке за допомогою проєкційного методу. За критерій втрати стійкості прийнята рівність нулю визначника матриці лінеаризованих рівнянь усталених вимушених нелінійних коливань оболонок згідно теореми Ляпунова. Порівняно частоти і форми власних коливань циліндричної і конічної оболонок з однаковими геометричними і механічними характеристиками та граничними умовами, критичні значення динамічного навантаження і відповідні форми втрати стійкості оболонок в діапазоні нижчих частот їх власних коливань.

Ключові слова: циліндрична і конічна оболонки, періодичне осьове стиснення, динамічна стійкість, метод криволінійних сіток, метод продовження розв'язку за параметром, метод Ньютона–Канторовича.

Вступ. Необхідність забезпечити міцність і стійкість тонких оболонкових конструкцій на стадії проектування є актуальною проблемою будівельної механіки. Якісне проектування оболонок в значній мірі залежить від можливостей їх точного розрахунку, дослідження їх поведінки при різних видах навантажень і перевірки достовірності результатів розрахунку[1-3]. Вирішенням проблем розв'язку задач міцності, стійкості та коливань оболонок чисельними методами займаються вчені кафедр будівельної і теоретичної механіки

Київського національного університету будівництва і архітектури [3, 5-11]. Одним з таких методів є модифікований метод кінцевих різниць – метод криволінійних сіток, який реалізовано у вигляді програмного обчислювального комплексу РЕДБАЗ [5]. Метод криволінійних сіток, який характеризується швидкою збіжністю за рахунок повного виключення похибки апроксимації коваріантної похідної від функції жорстких зміщень, дає можливість ефективно розв'язувати задачі будівельної механіки, в тому числі задачі динамічної стійкості оболонок в геометрично нелінійній постановці [6-8].

Метою даної статті є порівняльний аналіз нелінійних усталених коливань циліндричної і конічної оболонок з однаковими геометричними і механічними характеристиками від дії періодичного осьового стиснення; визначення критичних значень динамічного навантаження і відповідних форм втрати стійкості оболонок в діапазоні нижчих частот їх власних коливань.

1. Побудова кінцево-різницевої моделі усталених вимушених нелінійних коливань оболонок

Формування системи розрахункових рівнянь усталених вимушених нелінійних коливань циліндричної і конічної оболонок із застосуванням геометрично нелінійних співвідношень теорії тонких пружних оболонок виконано на основі векторної апроксимації функції переміщень в загальній криволінійній системі координат, які сформульовані в тензорній формі і задовольняють гіпотезам Кірхгофа-Лява. Дискретизація диференціальних рівнянь усталених вимушених коливань в напрямку твірної оболонки здійснено за допомогою модифікованого кінцево-різницевого метода криволінійних сіток. В круговому напрямку компоненти вектора переміщень елемента серединної поверхні оболонки апроксимовані тригонометричними рядами. Зменшення кількості узагальнених координат дискретної динамічної моделі усталених вимушених коливань оболонок виконано методом редукції базису Бубнова-Гальоркіна. Такий підхід дозволив здійснити перехід від векторних звичайних диференціальних співвідношень до нелінійної системи алгебраїчних рівнянь [5].

В статті розглянуто тонкі пружні циліндрична і конічна оболонки з однаковою висотою $L = 0,48$ м, радіусом $R = 0,2$ м і товщиною стінки $h = 0,002$ м. Для конічної оболонки малий радіус прийнято рівним $r = 0,15$ м. Механічні характеристики сталевих оболонок приймалися такими: модуль пружності – $2,06 \cdot 10^{11}$ Па, модуль зсуву – $0,79 \cdot 10^{11}$ Па, коефіцієнт поперечної деформації – $0,3$ і густина – 7800 кг/м³.

Серединна поверхня циліндричної оболонки описана в параметричному вигляді рівняннями

$$x = R \cos x^1, \quad y = R \sin x^1, \quad z = x^2, \quad (1)$$

де x^1, x^2 – колова і орієнтована в напрямку твірної координати відповідно (рис. 1 (а)).

Рівняння середньої поверхні кінчної оболонки представлено в параметричному вигляді

$$x = (R - x^2 \cos \alpha) \cos x^1, \quad y = (R - x^2 \cos \alpha) \sin x^1, \quad z = x^2 \sin \alpha, \quad (2)$$

де x^1, x^2 – відповідно колова і орієнтована в напрямку твірної координати (рис. 1 (б)).

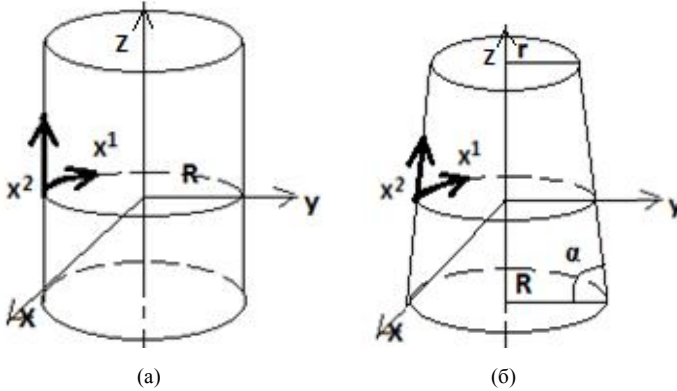


Рис. 1. Кінцево-різницевої моделі оболонок: циліндричної (а), конічної (б)

Кількість вузлів кінцево-різницевої сітки вздовж твірних приймалась рівною 45 для двох оболонок. Задано такі граничні умови: на вузли верхнього краю оболонок накладено ковзне кріплення вздовж твірних, вузли іншого краю – жорстко закріплено.

До вузлів верхніх кромки оболонок прикладено періодичне рівномірно розподілене поздовжнє стиснення, інтенсивність якого змінювалось за законом

$$q = q_0 \cos \omega t, \quad (3)$$

де q_0, ω – амплітуда і частота періодичного навантаження відповідно.

Система алгебраїчних рівнянь, які описують усталені вимушені нелінійні періодичні коливання тонких пружних оболонок має вид системи, наведених в статті [6].

2. Дослідження стійкості усталених коливань оболонок

Якісна оцінка поведінки тонких оболонок при дії динамічних навантажень вимагає знання їх основних динамічних характеристик, а саме спектра частот і відповідних форм власних коливань. Тому на першому етапі досліджено власні коливання циліндричної і конічної оболонок із заданими геометричними і механічними параметрами за допомогою чисельного підходу, який реалізовано в програмному обчислювальному комплексі [5].

На рис. 2 і 3 представлено нижчі форми і частоти власних коливань циліндричної і конічної оболонок відповідно, які порівняно з результатами отриманими методом Ланцоша в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу NASTRAN і їх виявлено співпадіння.

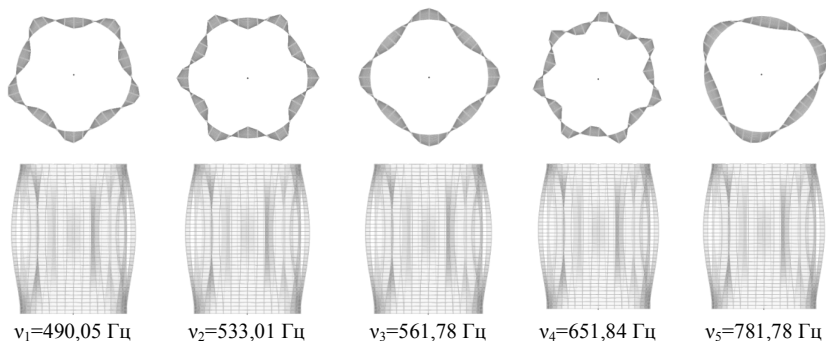


Рис. 2. Форми і частоти власних коливань циліндричної оболонки

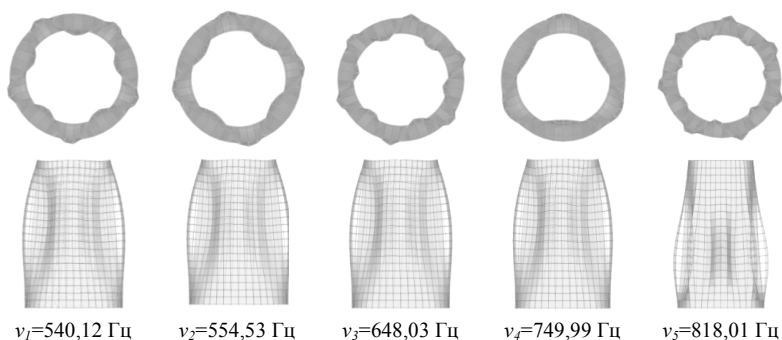


Рис. 3. Форми і частоти власних коливань конічної оболонки

На наступному етапі досліджено стійкість вимушених усталених коливань циліндричної і конічної оболонок за допомогою чисельного підходу, який реалізовано в зазначеному програмному комплексі РЕДБАЗ [5]. Побудова математичної моделі динамічної стійкості усталених вимушених нелінійних коливань тонких пружних оболонок виконано згідно теорії Флоке за допомогою проєкційного методу. За допомогою методу продовження розв'язку за параметром в поєднанні з методом Ньютона-Канторовича отримано реалізації вимушених усталених коливань оболонок в діапазоні частоти періодичного збурення ω , який включає перші три частоти власних коливань оболонок. Критерієм втрати стійкості є рівність нулю визначника матриці лінеаризованих рівнянь усталених вимушених нелінійних коливань оболонки згідно теореми Ляпунова [5]. Граничне значення параметру інтенсивності збудження, при якому визначник змінює знак, характеризує верхню критичну точку або точку біфуркації.

В дослідженнях не враховано вплив демпфірування на динамічну стійкість оболонок у зв'язку з малим значенням параметра затухання для сталевих пружних тонких оболонок. В табл. 1 наведено критичні значення періодичного повздовжнього навантаження $q_{кр}$ на відповідних частотах

періодичного збурення ω та кількість півхвиль в коловому напрямку n циліндричної і конічної оболонок при втраті їх динамічної стійкості.

Таблиця 1

Критичні значення навантаження $q_{кр}$ (кН/м)
при відповідних частотах збурення ω (с⁻¹)

Циліндрична оболонка											
ω	n	$q_{кр}$	ω	n	$q_{кр}$	ω	n	$q_{кр}$	ω	n	$q_{кр}$
0	8	2800,05	2500	5	2350,05	3090	6	1800,05	3360	4	1700,05
100	8	2800,05	2800	5	1700,05	3100	6	1800,05	3370	4	1650,05
300	8	2800,05	3000	5	950,05	3150	6	1600,05	3390	4	1550,05
500	8	2800,05	3010	5	900,05	3160	6	1600,05	3400	4	1500,05
700	8	2850,05	3030	5	750,05	3180	6	1500,05	3450	4	1150,05
1000	8	2850,05	3050	5	600,05	3200	6	1400,05	3500	4	700,05
1400	8	2800,05	3060	5	500,05	3330	6	500,05	3520	4	400,05
1700	8	2750,05	3070	5	350,05	3340	6	350,05	3528	4	0,05
2000	8,9	2750,05	3080	5	100,05	3347	6	100,05	3550	7	2550,05
2300	5	2600,05	3081	5	0,05	3348	6	0,05	3600	7	2500,05
Конічна оболонка											
ω	n	$q_{кр}$	ω	n	$q_{кр}$	ω	n	$q_{кр}$	ω	n	$q_{кр}$
0	9	3650,05	2500	8,9	3555,05	3450	4	1350,05	3800	6	2925,04
500	9	3650,05	3000	5	2700,05	3500	4	945,05	4000	6	1800,04
700	9	3645,05	3100	5	2385,05	3510	4	810,05	4080	6	810,04
1000	9	3645,05	3200	5	2025,05	3520	4	675,05	4090	6	540,04
1400	9	3645,05	3400	5	855,05	3545	4	0,05	4099	6	0,05
1700	9	3600,05	3410	5	720,05	3600	6	3375,05			
2300	9	3555,05	3438	5	0,05	3650	6	330,05			

3. Порівняльний аналіз динамічної стійкості циліндричної і конічної оболонок

В статті виконано порівняння вище наведених результати розрахунку власних коливань і динамічної стійкості вимушених періодичних коливань циліндричної і конічної оболонок, які мають однакові геометричні і механічні характеристики. На рис. 4 порівняно нижчі частоти і кількість півхвиль в коловому напрямку відповідних форм власних коливань циліндричної і конічної оболонок.

Бачимо, що нижчі частоти власних коливань циліндричної оболонки менші за відповідні значення конічної (рис. 4 (а)). Кількість півхвиль в коловому напрямку відповідних форм власних коливань оболонок (рис. 4 (б)) збігається для першої частоти, для інших пар частот (2 і 3; 4 і 5) спостерігається чередування однакової різниці кількості півхвиль в коловому напрямку оболонок.

Результати дослідження динамічної стійкості усталених вимушених періодичних коливань циліндричної і конічної оболонок відображено на рис. 5. Наведено залежності значень критичного динамічного навантаження $q_{кр}$ від частоти періодичного збурення ω і кількість півхвиль в коловому напрямку оболонок при втраті динамічної стійкості.

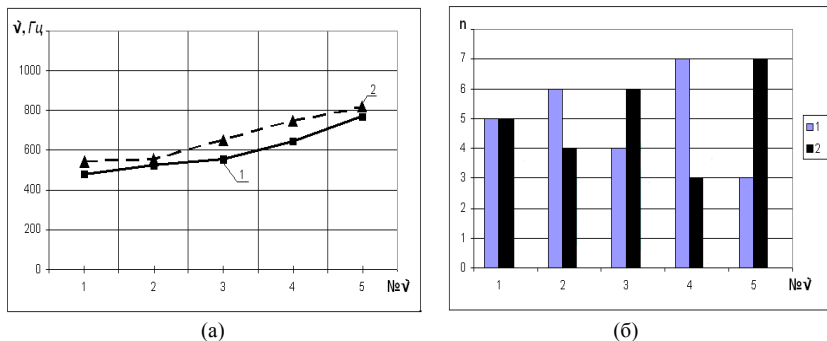


Рис. 4. Власні коливання циліндричної (1) та конічної (2) оболонки: п'ять нижчих частот (а) і кількість півхвиль в коловому напрямку відповідної форми (б)

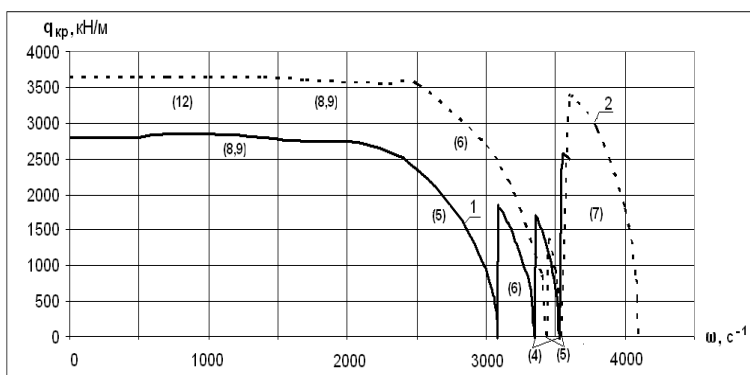


Рис. 5. Залежність критичних значень динамічного навантаження циліндричної (1), конічної (2) оболонки від частоти збурення

Втрата динамічної стійкості циліндричної оболонки (крива 1) відбувається спочатку по шостій, потім по десятій формі власних коливань оболонки з відповідною кількістю півхвиль в коловому напрямку (вісім та дев'ять) і двома півхвилями вздовж твірної. При подальшому збільшенні частоти збурення до перетину кривою 1 осі частот на значенні, яке відповідає першій частоті власних коливань оболонки (резонансний характер втрати стійкості), форма втрати стійкості співпадає з першою формою власних коливань оболонки. На частотах збурення, які лежать між резонансними втратами стійкості, оболонка деформується по другій та третій формах власних коливань (рис. 2). Втрата стійкості конічної оболонки (крива 2) набуває резонансного характеру при перетині осі частот кривими на значеннях, які відповідають частотам власних коливань, форми втрати стійкості співпадають з формами власних коливань конічної оболонки (рис. 3).

Отримані результати показали, що критичні значення динамічного навантаження для конічної оболонки більші за значенням ніж для

циліндричної. Спостерігається співпадіння кількості півхвиль в коловому і твірному напрямках форм втрати динамічної стійкості на деяких діапазонах частот коливань (рис. 4).

Висновок. Чисельна методика, яка базується на спільному використанні модифікованого кінцево-різницевого метода – метода криволінійних сіток, проєкційного методу і методу продовження розв'язку за параметром в поєднанні з методом Ньютона-Канторовича дозволила ефективно дослідити стійкість усталених вимушених періодичних коливань тонких пружних оболонок. Порівняльний аналіз динамічних характеристик циліндричної і конічної оболонок з однаковими геометричними та механічними параметрами від дії періодичного рівномірно розподіленого повздовжнього стиснення показав, що конічна оболонка є більш стійкою в заданому діапазоні частоти збурення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Вольмир А.С.* Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
2. *Григолоу Е.И., Кабанов В.В.* Устойчивость оболочек. – М.: Наука, 1978. – 359 с.
3. *Гуляев В.И., Баженов В.А., Гоцуляк Е.А., Дехтярюк Е.С., Лизунов П.П.* Устойчивость периодических процессов в нелинейных механических системах. Львів, Вища школа, 1983. – 287 с.
4. *Григоренко Я.М., Гуляев В.И.* Нелинейные задачи теории оболочек и методы их решения (обзор) // Прикладная механика, 1991. – Т. 27, №10. – С. 3-23 с.
5. *Гоцуляк Е.А., Заблоцкий С.В., Кондаков Г.С. и др.* Комплекс программ для расчета устойчивости и колебаний оболочек сложной формы (РЕДБАЗ). – Киев: КНУБА, 1988.
6. *Гайдайчук В.В., Киричук О.А., Палій О.М.* Динаміка повздовжніх коливань тонкої циліндричної оболонки // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2007. – Вип. 81. – С. 51-56.
7. *Киричук О.А., Палій О.М.* Вплив геометричних характеристик на стійкість усталених коливань циліндричних оболонок // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2008. – Вип. 82. – С. 102-110.
8. *Киричук О.А., Палій О.М.* Математична модель параметричних нелінійних коливань тонких оболонок // Вістник ХНТУ. – Херсон: ХНТУ, 2008. – Вип. 2(31). – С. 230-234.
9. *Лук'яненко О.О., Палій О.М.* Чисельне моделювання стійкості параметричних коливань тонкостінної оболонки від'ємної гаусової кривизни // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн., К.: КНУБА, 2018. – Вип. 101. – С. 45-59.
10. *Палій О.М., Лук'яненко О.О.* Частотний аналіз відгуку гіперболічного параболоїда на періодичне повздовжнє навантаження // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2019. – Вип. 102. – С. 199-206.
11. *Лук'яненко О.О., Костіна О.В., Палій О.М.* Періодичні коливання оболонки резервуару з реальними недосконалотями форми від дії поверхневого тиску // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2022. – Вип. 108. – С. 255-266.

REFERENCES

1. *Volmir A.S.* Ustojchivost deformirovanykh sistem [Stability of deformable systems]. – М.: Nauka, 1967, 984 s.
2. *Grigolyuk E.I., Kabanov V.V.* Ustoichivost obolochek [Shell stability]. – М.: Nauka, 1978, 359 s.
3. *Guliaev V.I., Bazhenov V.A., Gotsulyak E.A., Dekhtyaruk E.S., Lizunov P.P.* Ustojchivost periodicheskikh procesov v nelinejnykh mekhanicheskikh sistemah [Stability of periodic processes in the nonlinear mechanical systems]. Lviv, Vyschia shkola, 1983, 287 s.(rus).
4. *Grigorenko Ya.M., Guliaev V.I.* Nelyneinye zadachy teoryy obolochek y metody ykh resheniya (obzor) [Nonlinear tasks of theory of shells and methods of their decision (review)] // Pryingadnaia mekhanyka, 1991. – Т. 27, №10, S. 3-23 s.(rus).

5. *Gotsulyak E.A., Zablotsky S.V., Kondakov G.S. and other.* Kompleks programm dlya rascheta ustoychivosti i kolebaniy obolochek slozhnoy formy (REDBAZ) [Software for calculating the stability and vibrations of shells of complex shape] (REDBAZ). – Kyiv: KNUBA, 1988.(rus).
6. *Gaydaychuk V.V., Kirichuk A.A., Paliy O.M.* Dynamika povzdovzhnikh kolyvan' tonkoyi tsylindrychnoyi obolonky [Dynamics of longitudinal vibrations of a thin cylindrical shell] // *Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekh. zbirn.* – K.: KNUBA, 2007. – Vyp. 81, S. 51-56 (ukr).
7. *Kirichuk A.A., Paliy O.M.* Vplyv heometrychnykh kharakterystyk na stiykist' ustalenykh kolyvan' tsylindrychnykh obolonok [Influence of geometric characteristics on the stability of steady vibrations of cylindrical shells] // *Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekh. zbirn.* – K.: KNUBA, 2008. – Vyp. 82, S. 102-110 (ukr).
8. *Kirichuk A.A., Paliy O.M.* Matematychna model' parametrychnykh nelineynykh kolyvan' tonkykh obolonok [Mathematical model of parametric nonlinear vibrations of thin shells] // *Vistnyk HNTU.* – Herson: HNTU, 2008. – Vyp. 2(31), S. 230-234. (ukr).
9. *Lukianchenko O.O., Paliy O.M.* Chyselne modeliuвання stiikosti parametrychnykh kolyvan' tonkostinnoi obolonky vidiemnoi hausovoi kryvyznyi [Numerical design of vibrations stability of the thin-walled shell with negative Gaussian curvature] // *Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekh. zbirn.*, K.: KNUBA, 2018. – Vyp. 101, S. 45-59 (ukr).
10. *Paliy O.M., Lukianchenko O.O.* Chastotnyi analiz vidhuku hiperbolichnoho paraboloida na periodychno povzdovzhnie navantazhennia [Frequency analysis of response of hyperbolic paraboloid on the periodic longitudinal loading] // *Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekh. zbirn.* – K.: KNUBA, 2019. – Vyp. 102, S. 199-206 (ukr).
11. *Lukianchenko O.O., Kostina O.V., Paliy O.M.* Periodichni kolyvan'nia obolonky rezervuaru z realnymy nedoskonalostiamy formy vid dii poverhnevoho tysku [Periodic vibrations of reservoir shell with the real shape imperfections under pressure] // *Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekh. zbirn.* – K.: KNUBA, 2022. – Vyp. 108, S. 255-266.(ukr).

Стаття надійшла 30.03.2023

Paliy O.M., Lukianchenko O.O., Kozak A.A.

COMPARATIVE ANALYSIS OF DYNAMIC STABILITY OF CYLINDRICAL AND CONICAL SHELLS UNDER PERIODIC AXIAL COMPRESSION

A comparative analysis of the dynamic stability of cylindrical and conical shells with the same geometric and mechanical characteristics under periodic uniformly distributed axial compression was presented. The study of the stability of steady periodic vibrations of thin elastic shells was based on the joint use of the method of curvilinear grids, the projection method and the parameter continuation method combined with the Newton–Kantorovich method. Geometrically nonlinear relations of the thin elastic shells theory are formulated on the basis of the vector approximation of the displacements function in the general curvilinear coordinate system in tensor form and satisfy the Kirchhoff-Love hypothesis. The discretization of the differential equations of the steady forced vibrations in the direction of the generating shells using the method of curvilinear grids was carried out. The components of the elements displacement vectors of the shells middle surface in the circular direction are approximated by trigonometric series. Reduction of the number of generalized coordinates of the discrete dynamic model of shells steady forced vibrations was performed by the Bubnov-Galerkin basis reduction method. A transition from vector ordinary differential equations to a nonlinear system of algebraic equations was made. The construction of a mathematical model of the dynamic stability of steady forced nonlinear vibrations of thin elastic shells was performed according to Floquet's theory using the projection method. The criterion for the loss of stability was the equality to zero of the determinant of the matrix of linearized equations of steady forced nonlinear vibrations of shells according to the Lyapunov theorem. A comparative analysis of frequencies and modes of natural vibrations of cylindrical and conical shells with the same geometric and mechanical characteristics and boundary conditions was performed. Nonlinear steady vibrations of the shells due to periodic axial compression were studied. The critical values of the dynamic load and the corresponding forms of loss of shell stability in the range of lower frequencies of their natural vibrations were obtained.

Keywords: cylindrical and conical shell, periodic axial compression, dynamic stability, method of curvilinear grids, parameter continuation method, Newton–Kantorovich method.

УДК 539.3

Палій О.М., Лук'яненко О.О., Козак А.А. Порівняльний аналіз динамічної стійкості циліндричної і конічної оболонок при періодичному осьовому стисненні // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 110. – С. 344-352.

Досліджена стійкість усталених вимушених періодичних коливань тонких пружних оболонок за допомогою модифікованого кінцево-різницевого методу криволінійних сіток, проекційного методу і методу продовження розв'язку за параметром в поєднанні з методом Ньютона–Канторовича. Виконано порівняльний аналіз динамічної стійкості циліндричної і конічної оболонок з однаковими геометричними та механічними параметрами від дії періодичного рівномірно розподіленого осьового стиснення.

Табл. 1. Іл. 5. Бібліогр. 11 назв.

УДК 539.3

Palii O.M., Lukianchenko O.O., Kozak A.A. Comparative analysis of dynamic stability of cylindrical and conical shells under periodic axial compression // Strength of Materials and Theory of Structures: Science-and-technical collected articles. – Kyiv: KNUBA, 2023. – Issue 110. – P. 344-352.

The stability of steady forced periodic vibrations of thin elastic shells was researched by the method of curvilinear grids, the projection method and the method of parameter continuation in combination with the Newton–Kantorovich method. A comparative analysis of the dynamic stability of cylindrical and conical shells with the same geometric and mechanical parameters under the action of periodic axial compression was executed.

Tab. 1. Fig. 5. References 11 items.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної механіки КНУБА, ПАЛІЙ Оксана Миколаївна.

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ПАЛІЙ Оксані Миколаївні.

Робочий тел.: +38(044) 241-55-72

Мобільний тел.: +38(067) 236-39-85

E-mail: palii.om@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5958-4862>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник НДІ будівельної механіки КНУБА, професор кафедри теоретичної механіки КНУБА, ЛУК'ЯНЧЕНКО Ольга Олександрівна.

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ЛУК'ЯНЧЕНКО Ользі Олександрівні.

Робочий тел.: +38(044) 241-54-20

Мобільний тел.: +38(095) 727-18-25

E-mail: lukianchenko.oo@knuba.edu.ua, lukianch0907@meta.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1794-6030>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельної механіки КНУБА, КОЗАК Андрій Анатолійович.

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури КОЗАКУ Андрію Анатолійовичу.

Робочий тел.: +38(044)248-3237

Мобільний тел.: +38(066) 1997036

E-mail: kozak.aa@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3192-1430>