

УДК 539.3

**НЕЛІНІЙНИЙ ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ОБОЛОНКИ РЕЗЕРВУАРА
ЗІ ЗМОДЕЛЬОВАНИМИ НЕДОСКОНАЛОСТЯМИ ФОРМИ****О.О. Лук'яченко,**
д-р техн. наук**О.В. Герашенко,**
канд. техн. наук**О.М. Палій,**
канд. техн. наук*Київський національний університет будівництва і архітектури,
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ. 03680*

DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.129-140

Виконано нелінійний динамічний аналіз недосконалої оболонки резервуару зі змінною товщиною стінки при дії поверхневого тиску. Недосконалість форми оболонки змодельовано у вигляді нижчої форми втрати статичної стійкості. Досліджено вплив амплітуди змодельованих недосконалостей на напружено-деформований стан оболонки в різних діапазонах часу дії збурення, умовно критичні значення динамічного навантаження та відповідні форми деформування оболонки.

Ключові слова: оболонка резервуара, модель недосконалості форми, метод скінченних елементів, нелінійний динамічний аналіз.

Вступ. Проблема надійності оболонкових конструкцій потребує розвитку та створення нових ефективних підходів з використанням обчислювальних комплексів, які би дозволили забезпечити безаварійну експлуатацію оболонок. Відомо, що значну роль у проблемі безаварійної експлуатації реальних оболонок відіграють початкові недосконалості [1-23].

У сучасних дослідженнях широко застосовуються програмні комплекси скінченно-елементного аналізу LIRA, SCAD, ANSYS, NASTRAN [4-6, 12, 24], обчислювальні процедури яких базуються на методах математичної фізики, будівельної механіки та механіки твердого деформованого тіла. Обчислювальні комплекси мають розвинені сервісні можливості, які дозволяють реальні або змодельовані початкові недосконалості оболонок вводити безпосередньо в геометричні параметри їх серединної поверхні та виконувати складні обчислювальні розрахунки з достатньою точністю. Але залишається невирішеним питання – яка модель геометричних недосконалостей оболонок є найнебезпечнішою при дії динамічних навантажень.

Попередні дослідження пружних оболонок зі змодельованими геометричними недосконалостями форми авторами виконані за допомогою програмного комплексу NASTRAN [13, 15, 21]. Доведено, що при статичних навантаженнях вибір найнебезпечнішої моделі недосконалості форми залежить від геометричних параметрів оболонки та виду навантаження. Вона може бути у вигляді нижчої форми втрати

стійкості, форми деформування в граничному докритичному стані або при дії експлуатаційного навантаження. Питання виявлення найнебезпечнішої моделі недосконалості форми є важливим для забезпечення безаварійної експлуатації оболонкових конструкцій різного призначення. Наприклад, проектна надійність оболонки, яка визначається за допомогою ймовірнісного підходу Болотіна, вимагає оцінити вплив амплітуди моделі початкової недосконалості оболонки на критичні значення навантаження, тобто на її стійкість [12, 15].

Огляд літератури показав, що в даний час динамічна поведінка тонких оболонок зі змодельованими недосконалостями форми досліджена недостатньо. Залишається невирішеною проблема в області побудови динамічних математичних моделей пружних оболонкових систем з недосконалостями форми. Відсутня порівняльна оцінка впливу різних моделей та амплітуд геометричних недосконалостей на динамічні характеристики і напружено-деформований стан оболонок. Недостатньо досліджена реакція і стійкість оболонкових конструкцій з недосконалостями форми від дії динамічних навантажень з використанням теорії і методів нелінійної динаміки, які реалізовано в сучасних обчислювальних комплексах.

1. Моделювання недосконалостей форми оболонки резервуара при дії поверхневого тиску. У статті розглянута циліндрична оболонка нафтоналивного резервуара зі середнім радіусом $R=19,978$ м, висотою $H=17,88$ м, товщиною стінки, яка змінюється через кожні 1,49 м по висоті $h = [15,98; 14,75; 13,83; 11,66; 10,53; 9,33; 9,06; 7,86; 7,7; 7,83; 7,63; 7,83]$ мм. Стінка оболонки виготовлена зі сталі з механічними характеристиками: $E=2,06 \cdot 10^{11}$ Па, $\mu=0,3$ і $\rho=7800$ кг/м³. Накладені обмеження на радіальні і тангенціальні переміщення вузлів верхньої кромки оболонки, вузли нижньої кромки жорстко закріплені.

Скінченно-елементна модель оболонки побудована в програмному комплексі NASTRAN [24]. Стінка оболонки представлена у вигляді сукупності трикутних плоских скінченних елементів з шістьма ступенями вільності у вузлі. Модель оболонки містить 4200 вузлів та 8064 елементів (рис. 1 (а)).

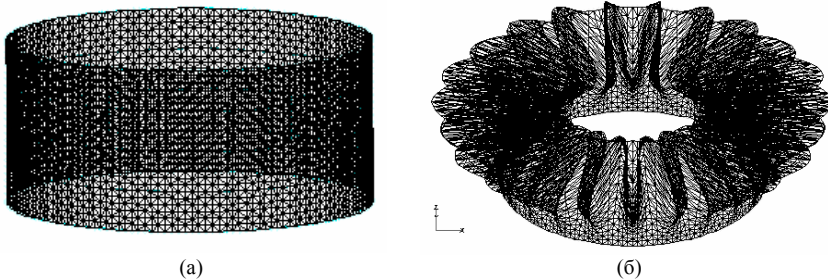


Рис. 1. Скінченно-елементна модель оболонки з ідеальною поверхнею (а) і моделювання недосконалості форми її стінки (б)

У попередніх дослідженнях власних коливань циліндричних оболонок авторами, за модель недосконалості форми, приймалася у вигляді нижчої форми їх власних коливань. Але не доведено, що вплив такої моделі недосконалості на динамічні характеристики і поведінку оболонок зі змінною товщиною є найбільш небезпечний. Тому, для порівняння, автори недосконалість стінки оболонки резервуара представили у вигляді нижчої форми втрати стійкості оболонки від статичної дії поверхневого тиску (рис. 1 (б)). Вона отримана методом Ланцоша в лінійній постановці (*Buckling*).

У коловому напрямку спостерігаються 23 півхвилі та одна півхвиля – вздовж твірної оболонки. Критичне значення поверхневого тиску складо $q_{cr}^{st} = 1257,4$ Па.

За допомогою спеціально розробленої авторами програми, яка адаптована до програмного комплексу NASTRAN [24], компоненти вектора форми втрати стійкості (рис. 1 (б)) із заданою амплітудою додавалися до відповідних координат серединної поверхні досконалої оболонки (рис. 1 (а)). Амплітуда недосконалості форми оболонки задана рівню $\delta = [0, 1; 0,4; 1; 1,5; 2] h$, де $h = 7,63$ мм – мінімальна товщина стінки.

2. Вплив змодельованих недосконалостей форми оболонки на частоти і форми власних коливань. Частоти і форми власних коливань оболонки резервуару отримано за допомогою розв'язання задачі на власні значення (*Normal Modes*) за методом Ланцоша. У табл. 1 наведено значення частот (Гц) і відповідна кількість півхвиль у радіальному напрямку за відповідними формами власних коливань оболонки без і з недосконалостями форми різної амплітуди.

Таблиця 1

Частоти власних коливань оболонки резервуара без і зі змодельованими недосконалостями форми

Номер частоти	Амплітуда недосконалості форми δ/h ($h = 7,63$ мм – мінімальна товщина стінки оболонки)					
	0	0,1	0,4	1	1,5	2
1	<u>3,115695</u>	<u>3,115136</u> 19	<u>3,112902</u> 19*	<u>3,099910</u> 19*	<u>3,080148</u> 19*	<u>3,068971</u> 19*
2	19	<u>3,115161</u> 19	<u>3,112934</u> 19*	<u>3,100034</u> 19*	<u>3,080284</u> 19*	<u>3,069259</u> 19*
3	<u>3,138359</u>	<u>3,137818</u> 20	<u>3,135654</u> 20*	<u>3,122968</u> 20*	<u>3,103423</u> 20*	<u>3,092417</u> 20*
4	20	<u>3,137869</u> 20	<u>3,135688</u> 20*	<u>3,123015</u> 20*	<u>3,103522</u> 20*	<u>3,092451</u> 20*
5	<u>3,146885</u>	<u>3,146294</u> 18	<u>3,143932</u> 18*	<u>3,130142</u> 18*	<u>3,109226</u> 18*	<u>3,097505</u> 18*

Частота власних коливань оболонки, Гц
Кількість півхвиль в радіальному напрямку,
* – Хвилі різної амплітуди.

З табл. 1 видно, що змодельовані недосконалості форми оболонки мало впливають на частоти власних коливань і зменшують їх значення максимально на 1,6 %. Форми власних коливань досконалої та недосконалої оболонки мають регулярні деформації у коловому напрямку і однакову кількість півхвиль (табл. 1, рис. 2). Але в оболонці з ідеальною поверхнею та зі змодельованими недосконалостями амплітудою $\delta=0,1h$, кожна форма власних коливань має хвилі однакової амплітуди, в інших випадках, коли $\delta=[0,4; 1; 1,5; 2]h$, кожна форма має неоднакові амплітуди хвиль (рис. 2). Вздовж твірної форми власних коливань оболонки з ідеальною поверхнею і зі змодельованими недосконалостями у всіх випадках спостерігається одна півхвиля.

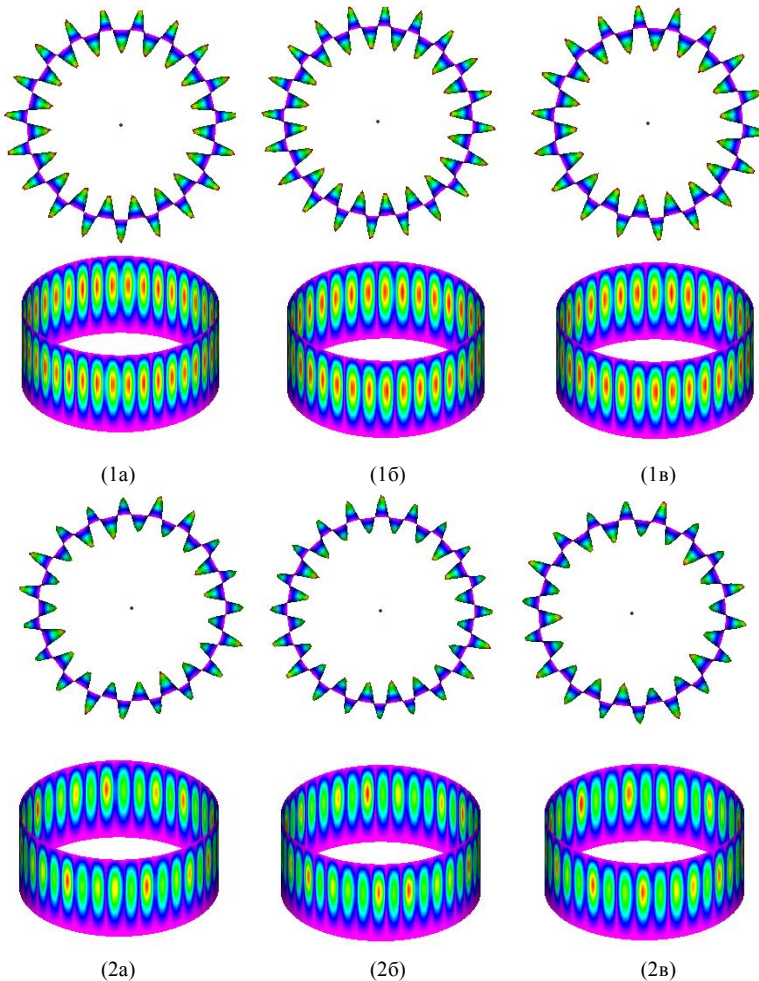


Рис. 2. Перша (а), третя (б), п'ята (в) форми власних коливань оболонки з недосконалостями форми: $\delta=0,1h$ (1) і $\delta=2h$ (2)

3. Динамічний аналіз напружено-деформованого стану оболонки резервуару зі змодельованими недосконаlostями форми при дії поверхневого тиску. Виконано нелінійний динамічний аналіз оболонки резервуара з недосконаlostями форми від дії поверхневого тиску за допомогою методу Н'юмарка (*Nonlinear Direct Transient*), який реалізовано в програмному комплексі NASTRAN [24]. Збурення задано у вигляді поверхневого тиску, який діє на всі елементи стінки оболонки впродовж заданого часу $q(t) = q_0 t$ (Па). Амплітуда збурення

$q_0 = q_{cr}^{st} = 1257,4$ Па, тривалість дії збурення від $t=0$ до $t=2$ с, крок інтегрування $\Delta t = 0,01$ с, коефіцієнт конструкційного демпфірування $G = 0,01$ задано однаковими для всіх постановок нелінійної задачі динаміки з урахуванням малих деформацій.

Результати дослідження впливу збурення, значення якого залежить від часу його дії на сумарні вузлові переміщення моделі оболонки (*Total Translation*) з різною амплітудою недосконаlostі δ , представлено на рис. 3. Розглядався вузол, у якому спостерігалися максимальні значення сумарних переміщень.

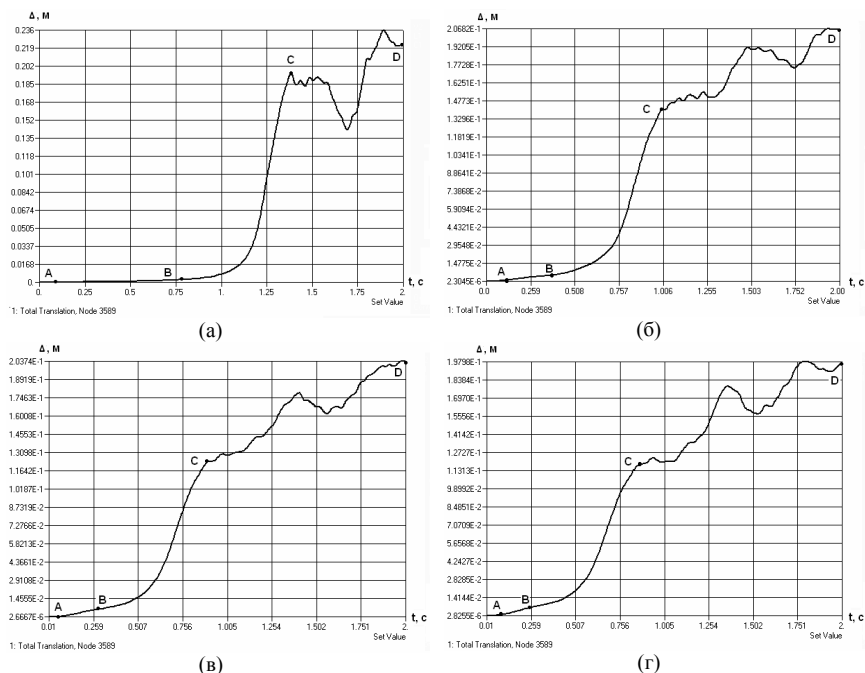


Рис. 3. Залежність сумарних переміщень оболонки зі змодельованими недосконаlostями: $\delta=[0,1(a); 1(б); 1,5(в); 2(r)]h$ від часу дії збурення

Як приклад, на рис. 4 представлено форми деформування оболонки з амплітудою недосконалості $\delta=2h$ у трьох діапазонах часу дії збурення.

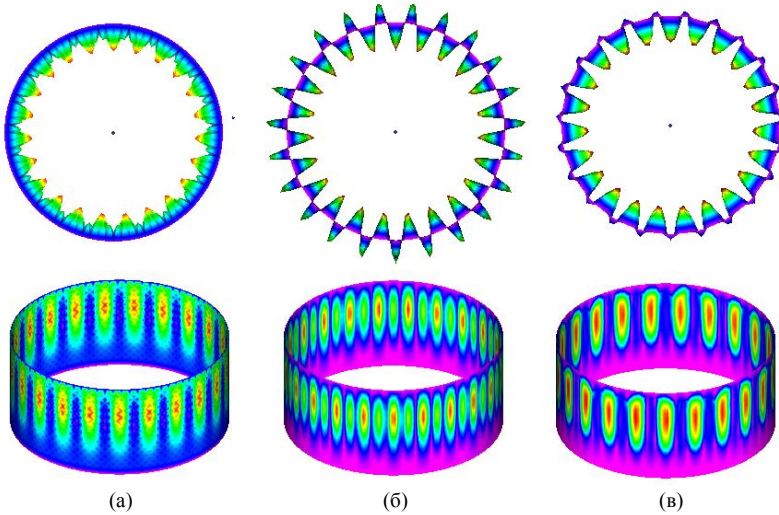


Рис. 4. Форми деформування недосконалої оболонки в різних діапазонах часу дії збурення: 0A(a); AB(б); CD(в)

Результати дослідження показали, що форми деформування оболонки резервуара мають 23 піки в коловому напрямку, не залежать від значення амплітуди недосконалості δ , а залежать від того, в якому часовому діапазоні діє збурення (рис. 4). В діапазоні часу дії збурення АВ (рис. 3) спостерігаються регулярні півхвилі, що мають місце при втраті статичної стійкості досконалої оболонки (*Buckling*), форма якої прийнята в якості моделі недосконалості (рис.1 (б)). В діапазоні ВС форма деформування оболонки змінюється від виду оболонки, наведеного на рис. 4 (б) до виду – на рис. 4 (в). В діапазоні часу дії збурення CD форма деформування оболонки співпадає з формою деформування даної оболонки в граничному стані, яка отримана за допомогою розв'язання нелінійної задачі статички (*Nonlinear Static*).

Досліджено вплив амплітуди недосконалості оболонки резервуара δ на час дії збурення в точках В і С (рис. 2), відповідні максимальні сумарні вузлові переміщення (*Total Translation*) та максимальні еквівалентні напруження (*Plate Top VonMises Stress*) в елементах моделі недосконалої оболонки. Результати досліджень наведено в табл. 2.

Значення збурення $q(t)$ в моменти часу його дії t_B і t_C визначаються за формулами

$$q_B(t) = q_0 t_B, \quad q_C(t) = q_0 t_C, \quad \text{де } q_0 = q_{cr}^{st} = 1257,4 \text{ Па.}$$

На рис. 5 представлена залежність збурення $q(t)$ (Па) в діапазоні різкої зміни сумарних вузлових переміщень оболонки (ВС) від відносної

амплітуди недосконалості її форми δ/h , де $h=7,63$ мм – мінімальна товщина стінки.

Таблиця 2

Вплив недосконалості форми на характеристики, що описують динамічний стан оболонки.

Характеристики динамічного стану оболонки	Максимальна амплітуда недосконалості форми δ/h ($h = 7,63$ мм – мінімальна товщина стінки оболонки)				
	0,1	0,4	1	1,5	2
Діапазон збурення $[t_B/t_C]$, с	<u>0,7638</u> 1,3762	<u>0,4813</u> 1,2113	<u>0,3860</u> 1,0012	<u>0,2651</u> 0,9053	<u>0,2475</u> 0,7971
Амплітуда коливань $[\Delta_B/\Delta_C]$, м	<u>0,0023</u> 0,1939	<u>0,0029</u> 0,1736	<u>0,0052</u> 0,1426	<u>0,0054</u> 0,1267	<u>0,0063</u> 0,1082
Екв. напруження $[\sigma_B/\sigma_C]$, МПа	<u>4,1832</u> 218,51	<u>4,3744</u> 189,83	<u>5,5264</u> 156,99	<u>6,0002</u> 119,41	<u>6,4355</u> 96,961

Видно, що зі збільшенням амплітуди недосконалості оболонки значення збурення в точках В і С зменшується. Динамічне навантаження в точці С, яке прийнято за умовно критичне значення, при $\delta/h=2$ зменшується на 42%.

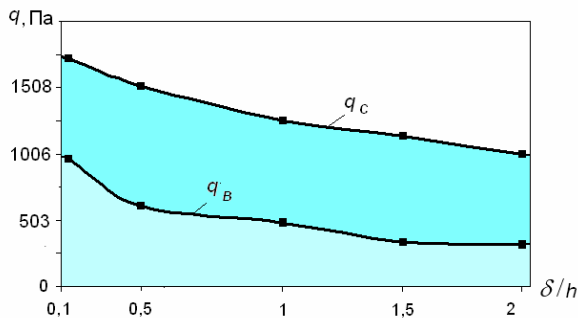


Рис. 5. Вплив відносної амплітуди недосконалості форми оболонки δ/h на значення збурення $q(t)$ (Па) в діапазоні різкої зміни сумарних вузлових переміщень оболонки (BC)

Висновок. Дослідження показали, що модель недосконалості форми оболонки резервуара зі змінною товщиною у вигляді першої форми втрати статичної стійкості від дії поверхневого тиску є ефективною в дослідженнях коливань оболонок від даного виду динамічного навантаження. Спостерігався значний вплив амплітуди недосконалості форми на умовно критичні значення динамічного навантаження (42%) і відповідний напружено-деформований стан оболонки. Слід зазначити, що представлена модель недосконалості форми оболонки в задачах власних коливань не є ефективною. Вплив амплітуди недосконалості на власну частоту оболонки незначний (<1,6%), при цьому відповідні форми власних коливань мають однакову кількість півхвиль у коловому

напрямку і незначно зменшені амплітуди півхвиль. Вважаємо, що представлену модель недосконалості оболонки у вигляді форми втрати статичної стійкості можна застосувати для модального аналізу оболонки з урахуванням попередньо напружено-деформованого стану від статичної дії поверхневого тиску. Також, представлена модель недосконалості форми оболонки може бути застосована для оцінки її проектної надійності із застосуванням ймовірнісного підходу Болотіна при дії динамічних навантажень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Yao J.C.* Dynamic stability of cylindrical shells under static and periodic axial and radial loads, *AIAA Journal*, 1963. – Vol. 1. – P. 2316-2320.
2. *Гейзенблазен Р.Е.* Некоторые вопросы устойчивости и колебаний цилиндрических оболочек с начальной погибью. Труды Днепроп. ин-та ж.-д. трансп., 1966. – Вып. 64. – С. 62-78.
3. *Hunt G.M.* Imperfection and near-coincidence for symmetric bifurcations // *New York Academy of Sciences. Bifurcation theory and applications in scientific disciplines. Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 1977. – Vol. 316. – P. 572-589.
4. *Гоцуляк Е.А., Гуляев В.И., Дехтярюк Е.С., Киричук А.А.* Численное исследование устойчивости нелинейных вынужденных колебаний тонких упругих оболочек. Прикладные проблемы прочности и пластичности, 1981. – Т. 19. – С. 51-60.
5. *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.
6. *Рикардс Р.Б.* Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. – Рига: Зинатне, 1988. – 284 с.
7. *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.
8. *Григолок Е.И., Кабанов В.В.* Устойчивость оболочек. – М.: Наука, 1978. – 359 с.
9. *Гудрамович В.С.* Особенности нелинейного деформирования и критические состояния оболочечных систем с геометрическими несовершенствами // *Прикладная механика*, 2006. – Т. 42, № 12. – С. 32-47.
10. *Гавриленко Г.Д.* Несущая способность несовершенных оболочек. Моногр. Ин-т механики им. С.П.Тимошенко НАН Украины, 2007. – 294с.
11. *Nguyen Dinh Duc, Hoang Thi Thiem.* Dynamic Analysis of Imperfect FGM Circular Cylindrical Shells Reinforced by Stiffener System Using Third Order Shear Deformation Theory in Term of Displacement Components // *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2017, Vol. 14. –P. 2534-2570.
12. *Лук'яненко О.О.* Розв'язання проблеми надійності і безпеки оболонкових структур з недосконалостями форми методами обчислювальної механіки. – Київ: Вид-во „Каравела”, 2019. – 197 с.
13. *Bazhenov V.A., Lukianchenko O.A., Kostina E.V., Geraschenko O.V.* Probabilistic Approach to Determination of Reliability of an Imperfect Supporting Shell // *Strength of Materials*, 2014. – Vol. 46, №4. – P. 567-574.
14. *Bazhenov V.A., Lukianchenko O.A., Vorona Yu.V., Kostina E.V.* Stability of the parametric vibrations of a shell in the form of a hyperbolic paraboloid // *Internat. Appl. Mech.*, 2018. – Vol. 54, №3. – P. 274-286.
15. *Bazhenov V.A., Lukyanchenko O.O., Kostina O.V.* Definition of the failure region of the oil tank with wall imperfections in combined loading // *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2018. – Вып. 100, С. 27-39.
16. *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. – Вып. 101, С. 45-59.

17. *Lukianchenko O., Kostina O.* The finite Element Method in Problems of the Thin Shells Theory, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 134 p.
18. *Лук'янченко О.О., Ворона Ю.В., О.В.Костіна, М.О. Вабищевич, О.М. Палій* Надійність тонких оболонок з реальними недосконалотями форми // Вісник КПІ. Серія Приладобудування, 2019. – Вип. 58(2). – С. 34-40.
19. *Палій О.М., Лук'янченко 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.
20. *Lukianchenko O.O.* Application of stiffness rings for improving of operating reliability of the tank with shape imperfections // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientificand-technical collected articles. – К.: KNUBA, 2020. – Issue 104. – P. 244-256.
21. *Bazhenov V.A., Lukianchenko O.A., Vorona Yu.V., Vabyshcheych* The influence of shape imperfections on the stability of thin spherical shells // Strength of Materials, 2021. – Vol. 53, №6. – P. 842-850.
22. *Лук'янченко О.О., Бурау Н.І., Геращенко О.В., Костіна О.В.* Частоти і форми власних коливань захисної смності резервуара з дефектами зварних швів при статичній дії осового навантаження // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2021. – Вип. 107. – С. 103-119.
23. *Лук'янченко О.О., Костіна О.В., Палій О.М.* Періодичні коливання оболонки резервуара з реальними недосконалотями форми від дії поверхневого тиску // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2022. – Вип. 108. – С. 255-266.
24. *Рудаков К.Н.* FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. – К.: НТТУ КПИ, 2011. – 317 с.

REFERENCES

1. *Yao J.C.* Dynamic stability of cylindrical shells under static and periodic axial and radial loads, AIAA Journal, 1963. – Vol. 1. – P. 2316-2320.
2. *Geyzenblazen R.E.* Nekotorye voprosy ustojchivosti i kolebanij czilindricheskikh obolochek s nachal'noy pogibju [Some questions of stability and vibrations of cylindrical shells with initial imperfection]. Trudy Dneprop. ins-ra sz.-d. transp., 1966. – Vyp. 64. – S. 62-78.(rus).
3. *Hunt G.M.* Imperfection and near-coincidence for symmetric bifurcations // New York Academy of Sciences. Bifurcation theory and applications in scientific disciplines. Ann. N. Y. Acad. Sci., 1977. – Vol. 316. – P. 572-589.
4. *Gotsulyak E.A., Guliaev V.I., Dekhtyaruk E.S., Kirychuk A.A.* Chislennoe issledovanie ustujchivosti nelinejnykh vynoszdenykh kolebanij tonkikh uprugikh obolochek [Numerical research of stability of the nonlinear forced vibrations of thin elastic shells]. Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti, 1981. – T. 19. – S. 51-60.(rus).
5. *Guliaev V.I., Bazhenov V.A., Gotsulyak E.A., Dekhtyaruk E.S., Lizunov P.P.* Ustojchivost periodicheskikh processov v nelinejnykh mekhanicheskikh sistemah [Stability of periodic processes in the nonlinear mechanical systems]. Lviv, Vyschia shkola, 1983. – 287 s.(rus).
6. *Rikards R.B.* Metod konechnykh elementov v teoryy obolochek y plastyn [The Finite Element Method in the theory of shells and plates]. – Ryha: Zynatne, 1988. – 284 s.(rus).
7. *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)] // Prykladnaia mekhanyka, 1991. – T. 27, №10. – S. 3-23 s.(rus).
8. *Grigolyuk E.L., Kabanov V.V.* Ustojchivostobolochek [Shellstability]. – M.: Nauka, 1978. – 359 s.
9. *Gudramovych V.S.* Osobennosty nelyneinoho deformyrovanyia y krytycheskye sostoianya obolochechnykh system s heometrycheskymy nesovershenstvamy [Features of nonlinear deformation and critical conditions of the оболочечных systems with geometrical imperfections] // Prykladnaia mekhanyka, 2006. – T. 42, № 12. – S. 32-47(rus).
10. *Gavrilenko H.D.* Nesushchaia sposobnost nesovershennykh obolochek [Bearing strength of imperfect shells]. Monohr. Yn-t mekhanyky ym. S.P.Tymoshenko NAN Ukrainy, 2007. – 294s.(rus).
11. *Nguyen Dinh Duc, Hoang Thi Thiem.* Dynamic Analisys of Imperfect FGM Circular Cylindrical Shells Reinforced by Stiffener System Using Third Order Shear Deformation

Theory in Term of Displacement Components // Latin American Journal of Solids and Structures, 2017, Vol. 14. –P. 2534-2570.

12. *Lukianchenko O.O.* Rozv'iazannia problemy nadiinosti i bezpeky obolonkovykhstruktur znedoskonalostiami formy metodami obchysluvalnoi mekhaniky [Decision of problem of reliability and safety of shell structures with shape imperfections by the methods of calculable mechanics]. – Kyiv: Vyd-vo „Karavela”, 2019. – 197 s (ukr).
13. *Bazhenov V.A., Lukianchenko O.A., Kostina E.V., Geraschenko O.V.* Probabilistic Approach to Determination of Reliability of an Imperfect Supporting Shell // Strength of Materials, 2014. – Vol. 46, №4. – P. 567-574.
14. *Bazhenov V.A., Lukianchenko O.A., Vorona Yu.V., Kostina E.V.* Stability of the parametric vibrations of a shell in the form of a hyperbolic paraboloid // Internat. Appl. Mech., 2018. – Vol. 54, №3. – P. 274-286.
15. *Bazhenov V.A., Lukianchenko O.O., Kostina O.V.* Definition of the failure region of the oil tank with wall imperfections in combined loading // Strength of Materials and Theory of Structures, 2018. – Issue 100, S. 27-39.
16. *Lukianchenko O.O., Paliy O.M.* Chyselne modeliuвання stikosti parametrychnykh kolyvan tonkostinnoi obolonky vidliemnoi hausovoi kryvyznyi [Numerical design of vibrations stability of the thin-walled shell with negative гаусовой curvature] // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн., К.: КНУБА, 2018. – Vyp. 101, S. 45-59 (ukr).
17. *Lukianchenko O., Kostina O.* The finite Element Method in Problems of the Thin Shells Theory, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 134 p.(ukr).
18. *Lukianchenko O.O., Vorona Yu.V., Kostina O.V., Vabyshchevych M.O., Paliy O.M.* Nadiinist tonkykh obolonok z realnymy nedoskonalostiami formy [Reliability of thin shells with real shape imperfections] // Visnyk KPI. Seriya Pryladobuduvannya, 2019. – Vyp. 58(2). – S. 34-40 (ukr).
19. *Paliy O.M., Lukianchenko O.O.* Chastotnyi analiz vidhuku hiperbolichnogo paraboloida na periodychno povzdovzhnie navantazhennia [Frequency analysis of response of hyperbolic paraboloid on the periodic longitudinal loading] // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2019. – Vyp. 102, S. 199-206 (ukr).
20. *Lukianchenko O.O.* Application of stiffness rings for improving of operating reliability of the tank with shape imperfections // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientificand-technical collected articles. – К.: КНУБА, 2020. – Issue 104. – P. 244-256.
21. *Bazhenov V.A., Lukianchenko O.O., Vorona Yu.V., Vabyshchevych M.O.* The influence of shape imperfections on the stability of thin spherical shells // Strength of Materials, 2021. – Vol. 53, №6. – P. 842-850.
22. *Lukianchenko O.O., Bourau N.I., Geraschenko O.V., Kostina O.V.* Chastoty i formy vlasnykh kolyvan zakhysnoi yemnosti rezervuara z defektamy zvarnykh shviv pry statychnii dii osovoho navantazhennia [Natural frequencies and forms of protective capacity of reservoir with the weld defects under the static action of axial loading] // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2021. – Vyp. 107. – S. 103-119 (ukr).
23. *Lukianchenko O.O., Kostina O.V., Paliy O.M.* Periodychni kolyvania obolonky rezervuaru z realnymy nedoskonalostiami formy vid dii poverhnevogo tysku [Periodic vibrations of reservoir shell with the real shape imperfections under pressure] // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2022. – Vyp. 108, S. 255-266.(ukr).
24. *Rudakov K.N.* FEMAP 10.2.0. Neometrycheskoe y konechno-elementnoe modelyrovanye konstruktseyi [Geometrical and finite-element design of constructions]. – К: NTTU KPY, 2011. – 317 s.(rus).

Стаття надійшла 21.10.2022

Лук'яненко О.О., Геращенко О.В., Палій О.М.

НЕЛІНІЙНИЙ ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ОБОЛОНКИ РЕЗЕРВУАРА ЗІ ЗМОДЕЛЬОВАНИМИ НЕДОСКОНАЛОСТЯМИ ФОРМИ

Виконано нелінійний динамічний аналіз недосконалої оболонки резервуару зі змінною товщиною стінки при дії поверхневого тиску. Скінченно-елементна модель оболонки в формі циліндричної оболонки побудована в програмному комплексі NASTRAN. Стінка оболонки представлена у вигляді сукупності трикутних плоских скінченних елементів з шістьма ступенями вільності у вузлі. Недосконалість стінки змодельована у вигляді нижчої

форми втрати стійкості досконалої оболонки від статичній дії поверхневого тиску, яка отримана методом Ланцоша в лінійній постановці (*Buckling*). Амплітуда недосконалості змінювалася пропорційно до мінімальної товщини стінки оболонки. Накладено обмеження на радіальні і тангенціальні переміщення вузлів верхньої кромки оболонки, вузли нижньої кромки жорстко закріплено. Збурення задано у вигляді зовнішнього поверхневого тиску, яке лінійно залежить від часу і рівномірно розподілено на всі елементи моделі оболонки. Виконано модальний аналіз оболонки зі змодельованими недосконалостями форми за допомогою розв'язання задачі на власні значення (*Normal Modes*) за методом Ланцоша. За допомогою методу Н'юмарка виконано нелінійний динамічний аналіз (*Nonlinear Direct Transient*) недосконалої оболонки резервуара від дії поверхневого тиску. Досліджено вплив амплітуди змодельованих недосконалостей на напружено-деформований стан оболонки в різних діапазонах часу дії збурення, умовно критичні значення динамічного навантаження та відповідні форми деформування оболонки.

Дослідження показали, що модель недосконалості форми оболонки резервуара зі змінною товщиною у вигляді першої форми втрати статичної стійкості від дії поверхневого тиску є ефективною дослідженням коливаль оболонки від динамічної дії такого виду навантаження. Спостерігався значний вплив амплітуди недосконалості форми на умовно критичні значення динамічного навантаження і відповідний напружено-деформований стан оболонки. В дослідженнях власних коливань оболонки дана модель недосконалості форми не є ефективною. Збільшення амплітуди недосконалості оболонки призвело до незначного зменшення частот і амплітуд форм власних коливань, при цьому кількість півхвиль у коловому напрямку не змінилася у відповідних формах. Вважаємо, що дана модель недосконалості може бути ефективною в модальному аналізі попередньо напруженої оболонки від статичної дії поверхневого тиску і для оцінки проектною надійності оболонки резервуару із застосуванням ймовірнісного підходу Болотіна при дії динамічних навантажень.

Ключові слова: оболонка резервуара, модель недосконалості форми, метод скінченних елементів, нелінійний динамічний аналіз.

Lukianchenko O.O., Gerashchenko O.V., Paliy O.M.

NONLINEAR DYNAMIC ANALYSIS OF RESERVOIR SHELL WITH MODELLED SHAPE IMPERFECTIONS

The nonlinear dynamic analysis of imperfect reservoir shell with a variable thickness of wall under pressure was executed. The finite-element model of reservoir in the form of a cylindrical shell in the software NASTRAN was built. The shell wall in the form of the three-cornered finite-element net was presented. Shape imperfection as a lower buckling form of perfect shell (*Buckling*) was modelled. Value of amplitude of imperfection was set proportionally to a minimum thickness of shell wall. The limits on the radial and tangential displacements of top edge nodes were entered, the nodes of lower edge were fastened. Excitation as external pressure, which linearly depended on time and uniform distributed on all shell elements was presented. The modal analysis of shell with modelled shape imperfections by using computational procedure of task on natural vibrations (*Normal Modes*) by the Lanczos method was executed. The nonlinear dynamic analysis (*Nonlinear Direct Transient*) of imperfect reservoir shell under pressure by N'yumark method was executed. Influence of amplitude of modelled imperfection on the shell stress-strain for different time intervals of excitation, the conditionally critical values of dynamic loading and corresponding of shell deformation forms were investigated.

It was discovered that a modelled shell shape imperfection as a lower buckling form of perfect shell under static pressure in the dynamic analysis of shell under the same type of the loading was effective. Influence of modelled shape imperfections amplitude on the stress-strain state of shell for different time interval of excitation, the conditionally critical values of dynamic loading and appropriate forms of shell deformation was considerable. Presented imperfection model in the modal analysis of shell was not effective. The increase of amplitude of shell imperfection led to insignificant decrease of natural frequencies and amplitudes of appropriate natural forms with the same amount of the semiwaves in the circular direction. In our opinion presented model of shell shape imperfection can be effective in the modal analysis of shell with the stress-strain state from the previous action of static pressure and for the estimation of design reliability of reservoir shell in the case of the dynamic loadings using the Bolotin probabilistic approach.

Keywords: reservoir shell, shape imperfections, finite-element method, nonlinear dynamic analysis.

УДК 539.3

Лук'янченко О.О., Геращенко О.В., Палій О.М. **Нелінійний динамічний аналіз оболонки резервуара зі змодельованими недосконалотями форми** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2022. – Вип. 109. – С. 129-140.

Виконано нелінійний динамічний аналіз недосконалої оболонки резервуару зі змінною товщиною стінки при дії поверхневого тиску. Недосконалість форми оболонки змодельовано у вигляді нижчої форми втрати статичної стійкості. Досліджено вплив амплітуди змодельованих недосконалотей на напружено-деформований стан оболонки в різних діапазонах часу дії збурення, умовно критичні значення динамічного навантаження та відповідні форми деформування оболонки.

Табл. 2. Іл. 5. Бібліогр. 24 назв.

UDC539.3

Lukianchenko O.O., Gerashchenko O.V., Paliy O.M. **Nonlinear dynamic analysis of reservoir shell with modelled shape imperfections** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2022. – Issue 109. – P. 129-140.

The nonlinear dynamic analysis of imperfect reservoir shell with a variable thickness of wall under pressure was executed. The shell shape imperfection was modelled as a lower buckling form of shell under action of static pressure. Influence of modelled shape imperfections amplitude on the stress-strain state of shell for different time interval of excitation, the conditionally critical values of dynamic loading and appropriate forms of shell deformation were investigated.

Tab. 2. Fig. 5. References 24 items.

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

Роб. тел.: +38(044) 241-54-20

Моб. тел.: +38(095) 727-18-25

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

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

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, старший науковий співробітник НДІ будівельної механіки КНУБА, ГЕРАЩЕНКО Олег Валерійович.

Адреса робоча: 03680, Київ, Повітрофлотський пр. 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ГЕРАЩЕНКУ Олегу Валерійовичу

Роб. тел.: +38(044)241-54-20

Моб. тел.: +38(095)661-6052

E-mail: olg_guera@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1951-4805>

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

Роб. тел.: +38(044) 241-55-72

Моб. тел.: +38(067) 236-39-85

E-mail: paliy.oxana@gmail.com

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