

УДК 539.3

ПЕРІОДИЧНІ КОЛИВАННЯ ОБОЛОНКИ РЕЗЕРВУАРУ З РЕАЛЬНИМИ НЕДОСКОНАЛОСТЯМИ ФОРМИ ВІД ДІЇ ПОВЕРХНЕВОГО ТИСКУ

О.О. Лук'яченко,

д-р техн. наук

О.В. Костіна,

канд. техн. наук

О.М. Палій,

канд. техн. наук

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

DOI: 10.32347/2410-2547.2022.108.255-266

Представлено чисельний підхід до оцінки впливу реальних недосконалостей форми на власні і вимушені періодичні коливання оболонки резервуару від дії поверхневого тиску. Підхід базується на теорії і методах будівельної механіки та обчислювальних процедурах програмного комплексу скінченно-елементного аналізу NASTRAN. Досліджено зварний сталевий резервуар зі змінною по висоті товщиною. На стадії виготовлення, транспортування та експлуатації в стінці резервуара виникли недосконалості форми. В результаті теодолітної зйомки отримано фактичні радіальні та кутові відхилення точок перетину твірних із горизонтальними границями поясів резервуару. Геометрія оболонки з реальними недосконалостями форми побудована за допомогою сплайн-кривих і сплайнових поверхонь з додаванням фактичних радіальних і кутових відхилень до відповідних координат точок твірних оболонки з ідеальною поверхнею. Комп'ютерна модель резервуару представлена у вигляді циліндричної оболонки з трикутною скінченно-елементною сіткою, яка містить плоскі оболонкові елементи. Накладено обмеження на радіальні та тангенціальні переміщення вузлів верхньої кромки оболонки, вузли нижньої кромки жорстко закріплено. Періодичне навантаження подано у вигляді зовнішнього поверхневого тиску. Виконано модальний аналіз оболонки з ідеальною поверхнею і реальними недосконалостями форми за допомогою розв'язання задачі на власні значення (Normal Modes) методом Ланцоша. Виявлено, що форми власних коливань оболонки з реальними недосконалостями мають локальні деформації в місцях максимальних радіальних відхилень від вертикалі на відміну від регулярних деформацій по всіх формах коливань ідеальної оболонки. Недосконалості форми зменшили і розщепили частоти власних коливань оболонки, при цьому не вплинули на щільність їх розподілу. Досліджено перехідний процес та усталений рух періодичних коливань оболонки від дії поверхневого тиску. За допомогою методу прямого інтегрування (Direct Transient) виконано аналіз перехідного процесу. Виявлено, що за рахунок наявності недосконалостей в стінці резервуара збільшились тривалість перехідного процесу та коефіцієнт динамічності. Виконано прямий частотний аналіз усталеного відгуку оболонки на періодичне збурення (Direct Frequency) з урахуванням відповідних перших десяти форм і частот власних коливань. Виявлено значний вплив недосконалостей форми на резонансні частоти вимушених періодичних коливань і відповідні форми деформування оболонки резервуара.

Ключові слова: резервуар, циліндрична оболонка, недосконалість форми, метод скінченних елементів, періодичні коливання.

Вступ

Тонкі пружні оболонки є елементами інженерних споруд, які широко використовуються в інженерних конструкціях нафто- і газовидобувної промисловості, судо-, ракетно-, авіобудування, які повинні задовольняти підвищеним вимогам міцності і стійкості. Проте реальні оболонкові конструкції мають неминучі відхилення від ідеальної форми, викликані дефектами виготовлення, транспортування, монтажу. Початкова недосконалість форми оболонок в процесі експлуатації змінюється і кількісно збільшується, що може призвести до катастрофічних наслідків: втрати міцності і стійкості конструкції, виникнення специфічних явищ в динамічній поведінці, особливо від дії інтенсивних навантажень.

На сьогоднішній момент існують як класичні аналітичні підходи до вирішення проблеми врахування недосконалостей форми в дослідженнях міцності і стійкості оболонок, так і їх комбінації з чисельними методами [1-6]. Застосування аналітичних методів значно звужує коло досліджень. Сучасні обчислювальні комплекси скінченно-елементного аналізу [7], використовуючи методи будівельної механіки, математичної фізики і механіки твердого деформованого тіла, дозволяють задавати недосконалості форми оболонок в довільній формі, виконувати складні обчислювальні розрахунки великих об'ємів з достатньою точністю.

Огляд літератури з даної тематики [4-6] і отримані авторами результати попередніх досліджень [8-18] підтвердили істотний вплив геометричних недосконалостей форми на статичні і динамічні характеристики тонких оболонок та виявили недостатньо вивченими питання впливу реальних і змодельованих геометричних недосконалостей тонких оболонок на їх динамічну поведінку в просторово-часовому і частотно-часовому просторах.

В статті на основі методу скінченних елементів та обчислювальних процедур, які реалізовано в програмному комплексі NASTRAN [19], досліджено вплив реальних недосконалостей форми на власні і вимушені періодичні коливання оболонки резервуара від дії поверхневого тиску.

1. Скінченно-елементне моделювання реальних недосконалостей форми оболонки резервуару

Розглянута оболонка резервуару радіусом $R_{cp}=19,966$ м, висотою $H=17,88$ м та змінною по висоті через кожні 1,49 м товщиною: 15,94, 14,54, 14,03, 11,63, 10,36, 9,30, 8,63, 7,36, 7,40, 7,53, 7,90, 7,80 (мм). Стінка оболонки виготовлена із сталі з механічними характеристиками: $E=2,06 \cdot 10^{11}$ Па, $\mu=0,3$ і $\rho=7800$ кг/м³. Обмеження радіальних та тангенціальних переміщень накладені на вузли верхньої кромки оболонки, вузли нижньої кромки жорстко закріплені.

На стадії виготовлення, транспортування та експлуатації резервуара протягом 10 років у стінці оболонки резервуара виникли геометричні недосконалості форми. В результаті теодолітної зйомки отримано фактичні радіальні (мм) та кутові відхилення (град) точок перетину твірних з горизонтальними границями поясів резервуару, які на рис. 1 подано у вигляді ізополів їх розподілу по поверхні стінки оболонки.

Геометрія оболонки з реальними недосконаlostями побудована в програмному комплексі NASTRAN [19] за допомогою сплайн-кривих і сплайн-поверхонь з додаванням відхилень твірних оболонки до відповідних координат оболонки з ідеальною поверхнею. На рис. 2 представлена модель оболонки у вигляді трикутної скінченно-елементної сітки з 4200 вузлами та 8064 скінченними плоскими оболонковими елементами, радіальні відхилення оболонки від вертикалі якої подано в масштабі 20:1.

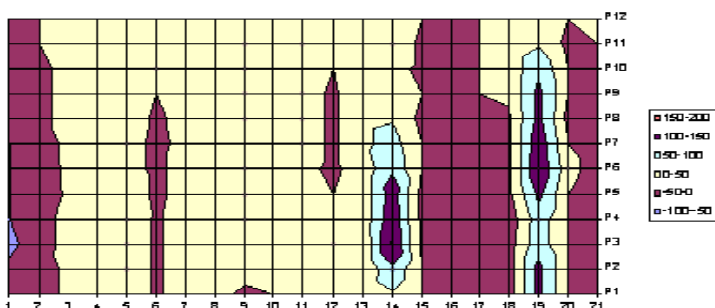


Рис. 1. Ізополя розподілу радіальних відхилень (мм) від вертикалі по поверхні стінки оболонки резервуару

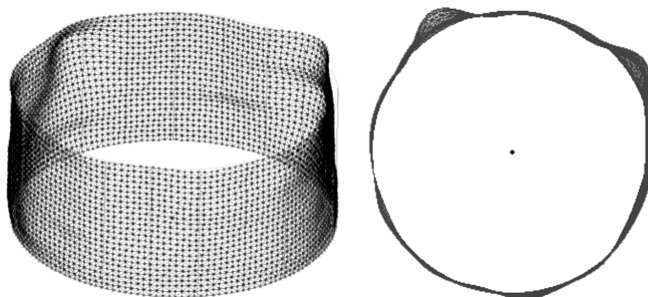


Рис. 2. Скінченно-елементна модель оболонки з візуалізацією реальних недосконалостей форми в масштабі 20:1

2. Оцінка впливу реальних геометричних недосконалостей оболонки на частоти і форми власних коливань

Частоти і форми власних коливань оболонки резервуару з ідеальною поверхнею і реальними недосконалостями форми визначено за допомогою розв'язання задачі на власні значення (*Normal Modes*) методом Ланцоша, яка реалізована в програмному комплексі NASTRAN.

В табл. 1 наведено значення частот (Гц) та відповідна кількість півхвиль в радіальному і повздожньому напрямках оболонки без і з реальними недосконалостями по кожній формі власних коливань.

Частоти власних коливань оболонки з реальними недосконалостями форми максимально відрізняються на 17% від відповідних частот оболонки з ідеальною поверхнею. Форми власних коливань ідеальної

оболонки мають регулярні деформації в радіальному напрямку з різною кількістю півхвиль (рис. 3(а)), з реальними недосконалостями – деформації з локалізацією в місцях максимальних реальних відхілень від вертикалі (рис. 3(б)). Вздовж твірної форми власних коливань оболонки з ідеальною поверхнею мають одну півхвилю, оболонка з реальними недосконалостями – локальні деформації.

Таблиця 1

Частоти власних коливань оболонки з ідеальною поверхнею та реальними недосконалостями форми

Номер частоти	Частоти власних коливань оболонки	
	з ідеальною поверхнею	з реальними недосконалостями
1	<u>3,113841</u>	<u>2,578259</u>
2	19/1	*
3	<u>3,135779</u>	<u>2,589879</u>
4	20/1	<u>2,816748</u>
5	<u>3,145172</u>	<u>2,928362</u>
6	18/1	<u>2,93715</u>
7	<u>3,202964</u>	<u>3,024551</u>
8	21/1	<u>3,028315</u>
9	<u>3,237710</u>	<u>3,034186</u>
10	17/1	<u>3,040748</u>

Частота власних коливань оболонки, Гц
Кількість півхвиль в радіальному / повздовжньому напрямках.
* – Локальні деформації.

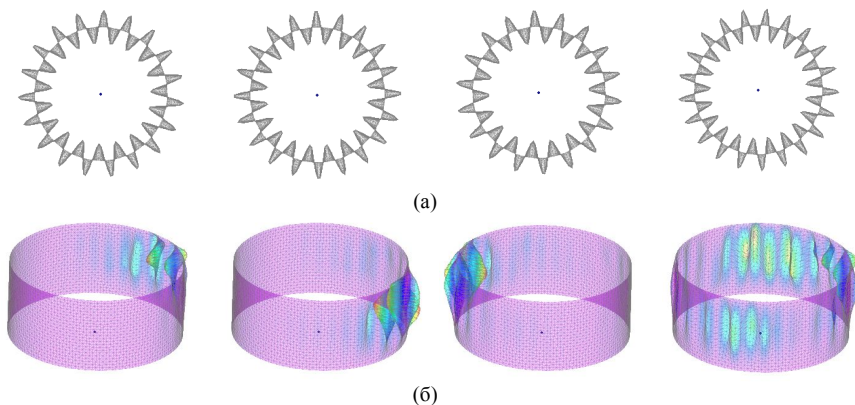


Рис. 3. Форми власних коливань оболонки (1, 3, 5, 8) з ідеальною поверхнею (а) і реальними недосконалостями форми (б)

3. Вплив недосконалостей форми на періодичні коливання оболонки від дії поверхневого тиску

Виконано два види динамічного аналізу вимушених періодичних коливань оболонки резервуара без і з недосконалостями форми від дії поверхневого тиску, які дозволили дослідити перехідний процес та усталений відгук оболонки (переміщень, напружень, прискорень та інш.) від частоти збурення. Аналіз перехідного процесу виконано за допомогою методу прямого інтегрування (*Direct Transient*), який реалізовано в програмному комплексі NASTRAN [19].

Для оболонки з ідеальною поверхнею періодичне збурення прийнято амплітудою $q_0 = 1200$ Па, яка наближена до значення критичного статичного поверхневого тиску $q_{cr} = 1219$ Па. Для оболонки з реальними недосконалостями амплітуда періодичного збурення прийнята $q_0^{imp} = 610$ Па, що складає $0,73 q_{cr}^{imp}$, де $q_{cr}^{imp} = 834$ Па є критичним значенням статичного навантаження. Збурення з амплітудою $0,73 q_{cr}^{imp} < q_0 \approx q_{cr}^{imp}$ викликає в оболонці нестійкий рух.

В дослідженнях перехідного процесу методом прямого інтегрування задано коефіцієнт конструкційного демпфірування $G = 0,04$. Початкова фаза коливань прийнята нульовою. Криві залежності максимальних сумарних переміщень (м) вузлів моделі оболонки з ідеальною поверхнею і реальними недосконалостями від часу (с), представлені відповідно на рис. 4(а) і рис. 4(б).

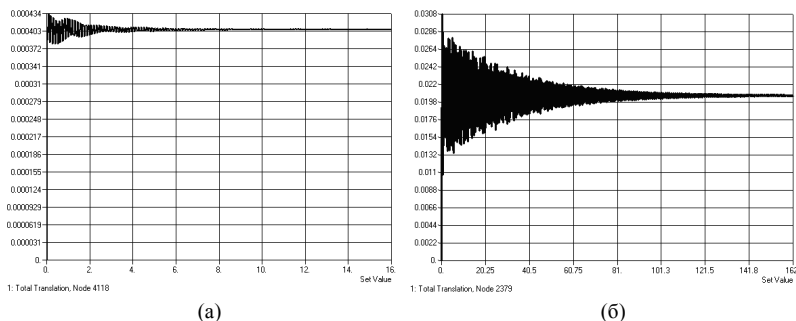


Рис. 4. Криві залежності максимальних сумарних переміщень (м) вузлів моделей оболонки з ідеальною поверхнею (а) і реальними недосконалостями форми (б) від часу

Аналіз отриманих результатів показав, що тривалість перехідного процесу оболонки з ідеальною поверхнею, яка склала $t_{trans} = 13$ с, значно менша за тривалість перехідного процесу оболонки з реальними недосконалостями $t_{trans}^{imp} = 151$ с. Максимальні сумарні переміщення вузлів моделей оболонки без і з реальними недосконалостями форми на початку перехідного процесу відповідно склали 0,43 мм і 30,8 мм.

Коефіцієнт динамічності, який обчислено за максимальними еквівалентними напруженнями (МПа) в елементах моделей оболонки наприкінці перехідного процесу і при статичній дії навантаження, склав

$$K_{\text{trans}} = \frac{\sigma_{\text{dyn}}}{\sigma_{\text{st}}} = \frac{3,336}{1,668} = 2,01 \text{ для оболонки з ідеальною поверхнею і}$$

$$K_{\text{trans}}^{\text{imp}} = \frac{\sigma_{\text{dyn}}}{\sigma_{\text{st}}} = \frac{18,959}{5,708} = 3,32 - \text{з реальними недосконаlostями.}$$

Форми деформування оболонки з реальними недосконаlostями в різний момент часу перехідного процесу представлено на рис. 5.

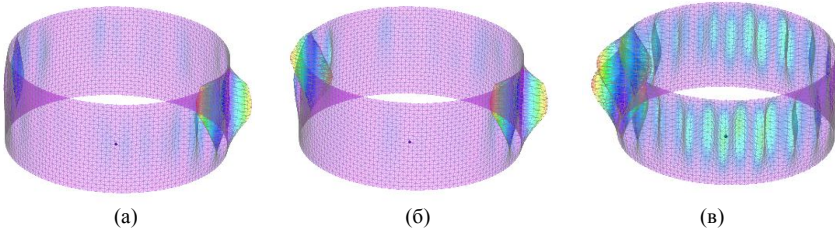


Рис. 5. Форми деформування оболонки з реальними недосконаlostями форми в момент часу: $t=[0,4$ (a); 16 (б); 151(в)]с

Прямий частотний аналіз усталеного відгуку на періодичне збурення (*Direct Frequency*) виконано з використанням отриманих в розрахунках перших десяти форм і частот власних коливань оболонки (табл. 1). В розрахунках враховано коефіцієнт конструкційного демфірування $G = 0,04$. На рис. 6(a) наведені криві залежності максимальних вузлових переміщень (м) від частоти (Гц) періодичного збурення для оболонки з ідеальною поверхнею, на рис. 6(б) – з реальними недосконаlostями.

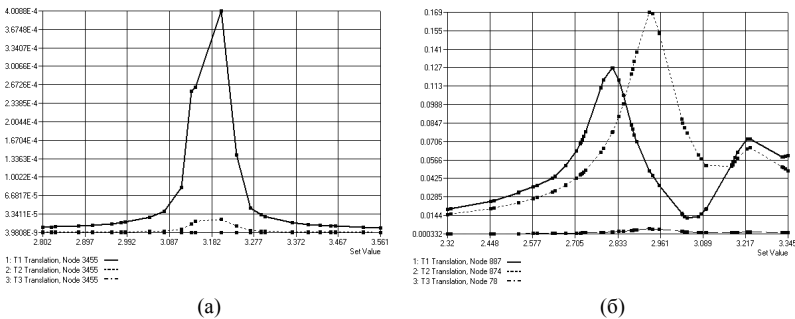


Рис. 5. Криві залежності максимальних радіальних переміщень(м) вузлів моделі оболонки без (а) і з реальними (б) недосконаlostями форми від частоти збурення (Гц)

В оболонці з ідеальною поверхнею максимальні радіальні вузлові переміщення спостерігалися на частотах збурення, які наближені до восьмої частоти власних коливань оболонки, відповідна власна форма якої має максимальну кількість півхвиль в радіальному напрямку (табл. 1). У

випадку наявності в оболонці реальних недосконалостей спостерігається різке зростання максимальних радіальних переміщень вузлів оболонки на частотах збурення, що наближені до четвертої та п'ятої частот власних коливань оболонки з локальними деформаціями в стінці.

Висновок. Формування скінченно-елементної моделі резервуару з урахуванням фактичних радіальних і кутових відхилень від ідеальної форми та представлений чисельний підхід дозволив дослідити динамічні характеристики періодичних коливань оболонки резервуару від дії поверхневого тиску, оцінити вплив реальних недосконалостей форми на частоти і форми власних коливань, перехідний процес та усталені вимушені коливання оболонки. Виявлено, що реальні геометричні недосконалості стінки резервуару зменшили частоти власних коливань на 17%, істотно змінили форми коливань оболонки, які набули вигляду локальних деформацій, збільшили тривалість перехідного процесу та коефіцієнт динамічності, змінили резонансні частоти і відповідні форми формування вимушених періодичних коливань.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *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.
2. *Рикардс Р.Б.* Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. – Рига: Зинатне, 1988. – 284 с.
3. *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.
4. *Гудрамович В.С.* Особенности нелинейного деформирования и критические состояния оболочечных систем с геометрическими несовершенствами // Прикладная механика, 2006. – Т. 42, № 12. – С. 32-47.
5. *Гавриленко Г.Д.* Несущая способность несовершенных оболочек. Моногр. Ин-т механики им. С.П.Тимошенко НАН Украины, 2007. – 294с.
6. *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.
7. *Лук'яненко О.О.* Розв'язання проблеми надійності і безпеки оболочкових структур з недосконалостями форми методами обчислювальної механіки. – Київ: Вид-во „Каравела”, 2019. – 197 с.
8. *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.
9. *Bazhenov V.A., Lukianchenko O.O., Kostina O.V.* Investigation of Static and Dynamic Characteristics of Complex Thin-Walled Shell Structure with Cracks // Strength of Materials, 2016. – Vol. 48, №3. – P. 401-410.
10. *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.
11. *Bazhenov V.A., Lukiyanchenko 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.

12. 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.
13. Lukianchenko O., Kostina O. The finite Element Method in Problems of the Thin Shells Theory, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 134 p.
14. Лук'яненко О.О., Ворона Ю.В., О.В.Костіна, М.О. Вабищевич, О.М.Палій Надійність тонких оболонок з реальними недосконаlostями форми // Вісник КПІ. Серія Приладобудування, 2019. – Вип. 58(2). – С. 34-40.
15. 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.
16. 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.
17. Bazhenov V.A., Lukianchenko O.A., Vorona Yu.V., Vabyshcheyvych The influence of shape imperfections on the stability of thin spherical shells // Strength of Materials, 2021. – Vol. 53, №6. – P. 842-850.
18. Лук'яненко О.О., Бурай Н.І., Геращенко О.В., Костіна О.В. Частоти і форми власних коливань захисної ємності резервуара з дефектами зварних швів при статичній дії осьового навантаження // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2021. – Вип. 107. – С. 103-119.
19. Рудаков К.Н. FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. – К: НТТУ КПИ, 2011. – 317 с.

REFERENCES

1. 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.
2. Rikards R.B. Metod konechnykh elementov v teoryu obolochek y plastyn [The Finite Element Method in the theory of shells and plates]. – Ryha: Zynatne, 1988. – 284 s.(rus).
3. 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).
4. Gudramovych V.S. Osobennosti nelyneinoho deformirovaniya y krytycheskye sostoiانيا 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).
5. 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).
6. Nguyen Dinh Duc, Hoang Thi Thiem. Dynamic Analisis 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.
7. Lukianchenko O.O. Rozviazannia problemy nadinosti i bezpeky obolonkovykh struktur z nedoskonalostiamy formy metodamy 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).
8. 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.
9. Bazhenov V.A., Lukianchenko O.O., Kostina O.V. Investigation of Static and Dynamic Characteristics of Complex Thin-Walled Shell Structure with Cracks // Strength of Materials, 2016. – Vol. 48, №3. – P. 401-410.

10. *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.
11. *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, C. 27-39.
12. *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 raycovoї curvature] // *Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірн.*, К.: KNUBA, 2018. – Вип. 101, S. 45-59 (ukr).
13. *Lukianchenko O., Kostina O.* The finite Element Method in Problems of the Thin Shells Theory, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 134 p.(ukr).
14. *Lukianchenko O.O., Vorona Yu.V., Kostina O.V., Vabyshecheych M.O., Paliy O.M.* Nadiinist tonkykh obolonok z realnykh nedoskonalostiamy formy [Reliability of thin shells with real shape imperfections] // *Visnyk KPI. Seriiia Pryladobuduvannya*, 2019. – Вип. 58(2). – S. 34-40 (ukr).
15. *Paliy O.M., Lukianchenko O.O.* Chastotnyi analiz vidhuku hiperbolichnoho paraboloida na periodychnne povzdovzhnie navantazhennia [Frequency analysis of response of hyperbolic paraboloid on the periodic longitudinal loading] // *Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірн.* – К.: KNUBA, 2019. – Вип. 102, S. 199-206 (ukr).
16. *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.
17. *Bazhenov V.A., Lukianchenko O.O., Vorona Yu.V., Vabyshecheych M.O.* The influence of shape imperfections on the stability of thin spherical shells // *Strength of Materials*, 2021. – Vol. 53, №6. – P. 842-850.
18. *Rudakov K.N.* FEMAP 10.2.0. Heometrycheskoe y konechno-elementnoe modelyrovanye konstruksiyi [Geometrical and finite-element design of constructions]. – К: NTTU KPY, 2011. – 317 s.(rus).
19. *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.-техн. збірн.* – К.: KNUBA, 2021. – Вип. 107. – S. 103-119 (ukr).

Стаття надійшла 18.05.2022

Lukianchenko O.O., Kostina O.V., Paliy O.M.

PERIODIC VIBRATIONS OF RESERVOIR SHELL WITH THE REAL SHAPE IMPERFECTIONS UNDER PRESSURE

The numeral approach to analysis of influence the real shape imperfections on natural and forced periodic vibrations of reservoir shell under pressure was presented. The approach was based on a theory and the methods of structural mechanics and calculable procedures of finite-element software complex NASTRAN. The welded steel reservoir with a variable thickness along its height was investigated. On the manufactured stage, transporting and exploiting the defects of wall shape were formed. The actual radial and angular deviations of the reservoir belts as a result measurements by theodolite were got. Geometry of shell with the real shape imperfections by spline curves and spline surfaces with adding of factual radial and angular rejections to the proper coordinates of points formative shells with an ideal surface was built. Model of reservoir in the form of a cylindrical shell with a three-cornered finite-element net was presented. The limits on the radial and tangential displacements of top edge nodes were entered, the nodes of lower edge were fastened. The periodic loading as external pressure was given. The modal analysis of shell without and with real shape imperfections by the decision of task on natural vibrations (Normal

Modes) by the Lanczos method was executed. It was discovered that the natural forms of shell with real shape imperfections had local deformations in the places of maximal radial deviations from a vertical line unlike regular deformations in all natural forms of ideal shell. Natural frequencies were decreased and were slit and there wasn't influence on its dense distribution due to the presence of shell shape imperfections. A transient and forced periodic vibrations of shell under pressure were investigated. Analysis of transient was executed by the method of direct integration (Direct Transient). The presence of shape imperfections in the shell wall influenced the increase of the transient duration and the dynamic coefficient. The direct frequency analysis of shell response on periodic loading (Direct Frequency) was executed taking into account the proper ten first forms and frequencies of natural vibrations. Significant influence of the shell shape imperfections on the resonant frequencies of the forced periodic vibrations and corresponding form of deformation was discovered.

Keywords: reservoir, cylinder shell, shape imperfections, finite-element method, periodic vibrations.

Лукьянченко О.А., Костина Е.В., Палий О.Н.

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ОБОЛОЧКИ РЕЗЕРВУАРА С РЕАЛЬНЫМИ НЕСОВЕРШЕНСТВАМИ ФОРМЫ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ДАВЛЕНИИ

Представлен численный подход к оценке влияния реальных недосконалостей формы оболочки резервуара на собственные и вынужденные периодические колебания от действия поверхностного давления. Подход базируется на теории и методах строительной механики и вычислительных процедурах программного комплекса конечно-элементного анализа NASTRAN. Исследован сварной стальной резервуар с переменной по высоте толщиной. На стадии изготовления, транспортировки и эксплуатации в стенке резервуара возникли несовершенства формы. В результате теодолитной съемки получены фактические радиальные и угловые отклонения точек пересечения образующих с горизонтальными границами поясов резервуара. Геометрия оболочки с реальными недосконалостями формы построена с помощью сплайновых кривых и сплайновых поверхностей с добавлением фактических радиальных и угловых отклонений к соответствующим координатам точек образующих оболочки с идеальной поверхностью. Компьютерная модель резервуара представлена в виде цилиндрической оболочки с треугольной конечно-элементной сеткой, которая содержит плоские оболочечные элементы. Введены ограничения на радиальные и тангенциальные перемещения узлов верхней кромки оболочки, узлы нижней кромки жестко закреплены. Периодическая нагрузка подана в виде внешнего поверхностного давления. Выполнен модальный анализ оболочки с идеальной поверхностью и реальными недосконалостями формы с помощью решения задачи на собственные значения (Normal Modes) методом Ланцоша. Обнаружено, что формы собственных колебаний оболочки с реальными недосконалостями имеют локальные деформации в местах максимальных радиальных отклонений от вертикали в отличие от регулярных деформаций по всем формам колебаний идеальной оболочки. Несовершенства формы уменьшили и расщепили частоты собственных колебаний оболочки, при этом не повлияли на плотность их распределения. Исследован переходный процесс и установившиеся периодические колебания оболочки от действия поверхностного давления. С помощью метода прямого интегрирования (Direct Transient) выполнен анализ переходного процесса. Обнаружено, что за счет наличия недосконалостей в стенке резервуара увеличилась длительность переходного процесса и коэффициент динамичности. Выполнен прямой частотный анализ установившихся отклика оболочки на периодическое возмущение (Direct Frequency) с учетом соответствующих первых десяти форм и частот собственных колебаний. Обнаружено значительное влияние реальных несовершенств на резонансные частоты вынужденных периодических колебаний и соответствующие формы деформирования оболочки.

Ключевые слова: резервуар, цилиндрическая оболочка, несовершенство формы, метод конечных элементов, периодические колебания.

УДК 539.3

Лук'янченко 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.

Досліджено вплив реальних геометричних недосконалотей стінки резервуару на частоти і форми власних коливань, перехідний процес та усталені періодичні коливання оболонки резервуару від дії поверхневого тиску.

Табл. 1. Ил. 5. Библиогр. 19 назв.

UDC 539.3

Lukianchenko O.O., Kostina O.V., Paliy O.M. Periodic vibrations of reservoir shell with the real shape imperfections under pressure // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-&Technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2022. – Issue 108. – P. 255-266.

Influence of the actual geometrical imperfections of reservoir wall on its frequencies and forms of the natural vibrations, transient and steady periodic vibrations of shell reservoir under pressure were investigated.

Tabl. 1. Fig. 5. Ref. 19.

УДК 539.3

Лук'янченко О.А., Костіна Е.В., Палій О.Н. Периодические колебания оболочки резервуара с реальными несовершенствами формы при поверхностном давлении // Сопротивление материалов и теория сооружений: науч.-тех. сборн. – К.: КНУСА, 2022. – Вып. 108. – С. 255-266. – Укр.

Исследовано влияние реальных геометрических несовершенств стенки резервуара на частоты и формы собственных колебаний, переходной процесс и установившиеся периодические колебания оболочки резервуара при действии поверхностного давления.

Табл. 1. Ил. 5. Библиогр. 19 назв.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доктор технічних наук, 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: <http://orcid.org/0000-0003-1794-6030>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки КНУБА, старший науковий співробітник НДІ будівельної механіки КНУБА, КОСТИНА Олена Володимирівна.

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, КОСТИНІЙ Олені Володимирівні.

Робочий тел.: +38(044) 241-54-20.

Мобільний тел.: +38(098) 275-19-93.

E-mail: kostina.ov@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6692-6231>

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: paliy.oxana@gmail.com

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