

УДК 004.942:539.3:624.04

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ОБОЛОНКОВИХ СТРУКТУР З ГЕОМЕТРИЧНИМИ НЕДОСКОНАЛОСТЯМИ**С.А. Єгоров¹,**

д-р техн. наук, професор

О.С. Кучеренко²,

канд. техн. наук, науковий співробітник

¹*Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпро*²*Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Дніпро*

DOI: 10.32347/2410-2547.2023.111.205-213

Розглядається задача моделювання тонкостінної оболонкової структури, яка знаходиться під дією зовнішнього радіального тиску. Моделюються геометричні недосконалості поверхні та досліджується напружено-деформований стан. Визначаються значення критичних навантажень та характер поведінки оболонок з геометричними недосконалостями за результатами лінійного та нелінійного скінченно-елементного аналізу. Наводяться порівняння одержаних результатів з класичною теорією та з розрахунками за формулами норм проектування.

Ключові слова: моделювання, оболонка, недосконалість, стійкість, радіальний тиск, скінченний елемент, нелінійний аналіз, ANSYS.

Вступ. Тонкостінні оболонкові структури широко застосовуються у різних галузях промислової, цивільної та військової інженерії. Це резервуари, газгольдери, купола та подібні споруди, які за своїми геометричними параметрами можуть бути віднесені до великогабаритних оболонкових структур. Сталеві оболонки таких структур мають характеристичне співвідношення радіуса кривизни R до товщини t в межах 750-1500, що вказує на їх супертонкостінність. Загально визнаним атрибутом всіх тонкостінних конструкцій є наявність тих чи інших відхилень їхньої поверхні від ідеальної – проектною – геометрії. Як свідчить досвід експлуатації таких споруд, це може суттєво впливати на тримальну здатність, зокрема на місцеву та загальну стійкість. Теоретичні засади до розв'язання таких задач ретельно опрацьовані [1-4], проте застосування тих чи інших методів для аналізу поведінки реального об'єкта потребує детальніших досліджень [5].

Так, у [6] наведено огляд різноманітних підходів до моделювання недосконалостей в тонкостінних структурах. Автор зазначає, що процес розвитку недосконалостей в подібних об'єктах зазвичай важко передбачити, і це може мати катастрофічні наслідки. В [7, 8] розглядаються рішення, які базуються на застосуванні ймовірнісних методів при аналізі надійності і моделюванні оболонок з недосконалостями.

Для великогабаритних оболонкових конструкцій проблема ускладнюється тим, що завдяки своїм характерним розмірам вони важко піддаються ретельному контролю геометрії і це унеможливує побудову точної аналітичної моделі їхньої поверхні. Койтер [9] при аналізі стійкості тонкостінних оболонок приймає припущення, що ймовірність виникнення дефекту є вищою у зонах потенційної втрати форми, що реалізує ідею принципу «від найгіршого». Такий підхід може бути застосований в декількох варіантах, але в будь-якому разі дослідження поведінки тонкостінних оболонкових структур з недосконалостями під дією зовнішніх навантажень потребує ефективного скінченно-елементного моделювання їхньої поверхні.

1. Постановка задачі. В статті, як приклад, розглядається задача моделювання циліндричної оболонкової структури, яка знаходиться під дією зовнішнього радіального тиску. Досліджується напружено-деформований стан та моделюються потенційні геометричні недосконалості. Конфігурація загальної картини недосконалостей

приймається резонансною до першої форми втрати стійкості, що відповідає зазначеному вище принципу «від найгіршого». Визначаються критичні значення та характер поведінки оболонки під зовнішнім тиском за результатами лінійного та нелінійного аналізу. Наводяться порівняння одержаних результатів з класичною теорією та з розрахунковими формулами норм проектування подібних споруд.

2. Геометрія оболонкової структури та краєві умови. Прийнята до дослідження оболонка має довжину 11920 мм, діаметр 10430 мм та товщину стінки 4 мм. Матеріал оболонки – сталь з модулем Юнга $2 \cdot 10^{11}$ Па, межею плинності 245 МПа та щільністю 7850 кг/м^3 . Нижній край оболонки закріплено по периметру. Верхній край оболонки з'єднаний шарнірно з жорстким диском (кругла жорстка пластина - модель покриття). Зазначена конфігурація відповідає характеру роботи циліндричної стінки у складі сталевого вертикального циліндричного резервуара місткістю 1000 м^3 .

3. Стійкість ідеальної циліндричної оболонки при дії зовнішнього тиску. Розглянемо оболонку (рис. 1) радіуса R і довжиною H , для якої, використовуючи відношення теорії пружності та функцію зусиль Φ , можна записати наступну систему диференціальних рівнянь [3, 4]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + D \nabla^2 \nabla^2 w &= p_z, \\ \frac{1}{Et} \nabla^2 \nabla^2 \Phi - \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де w – переміщення у радіальному напрямку; p_z – інтенсивність зовнішнього навантаження у відповідному напрямку; t – товщина стінки; $D = \frac{Et^2}{12(1-\nu^2)}$; ν – коефіцієнт Пуассона; $\nabla^2(*) = \frac{\partial^2(*)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(*)}{R^2 \partial \varphi^2}$.

Зважаючи на те, що у докритичному стані осьові нормальні зусилля та зусилля зсуву дорівнюють нулю, зовнішнє навантаження можна визначити наступним чином:

$$p_z = -\frac{p}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2}, \quad (2)$$

де p – зовнішній тиск. Використовуючи (2), перепишемо систему (1) у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + D \nabla^2 \nabla^2 w + \frac{p}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} &= 0, \\ \frac{1}{Et} \nabla^2 \nabla^2 \Phi - \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Якщо при $x = 0$ та $x = H$ покласти, що $w = 0$, $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$, $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = 0$, $\Phi = 0$, то для оболонок середньої довжини за умови $0.3\sqrt{R/t} > H/R > \sqrt{t/R}$ спрощений розв'язок (3) веде до формули Папковича [3]:

$$p_{cr} = \frac{\pi\sqrt{6}}{9(1-\nu^2)^{3/4}} E \frac{R}{H} \left(\frac{t}{R}\right)^{5/2}, \quad (4)$$

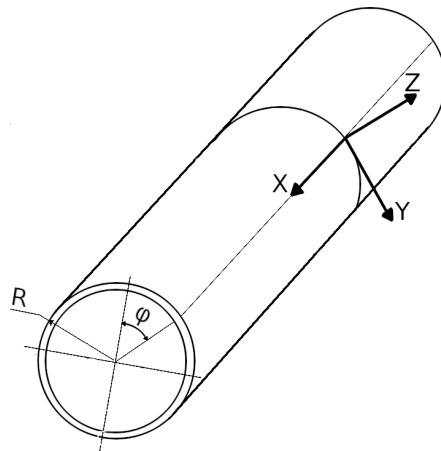


Рис. 1. Циліндрична оболонка з координатною системою

або при $\nu = 0.3$

$$p_{cr} = 0.92 \cdot E \cdot \frac{R}{H} \left(\frac{t}{R} \right)^{5/2}, \quad (5)$$

яка визначає значення критичного тиску, при якому закріплена оболонка втрачає стійкість. Для оболонки з прийнятими в статті параметрами критичне значення тиску за (4) дорівнює $p_{cr} = 1308$ Па. В статті цей розв'язок буде вважатися базовим.

Формула (4) прийнята за базову і в діючих нормативних документах [10], але там вона набуває наступного вигляду:

$$\sigma_{cr} = 0.55 \cdot E \cdot \frac{R}{H} \left(\frac{t}{R} \right)^{3/2}, \quad (6)$$

що відносно тиску перетворюється на

$$p_{cr}^n = 0.598 \cdot 0.92 \cdot E \cdot \frac{R}{H} \cdot \left(\frac{t}{R} \right)^{5/2}. \quad (7)$$

Рівняння (7) свідчить про те, що в нормах проектування використовується та ж формула Папковича, але з понижувальним коефіцієнтом $C_n = 0.598$, введення якого обумовлюється врахуванням можливих недосконалостей поверхні циліндричної оболонки. Обчислення критичного тиску за формулою (7) для оболонки з прийнятими параметрами дає $p_{cr}^n = 784$ Па. Це значення можна приймати як нормативне значення граничного радіального тиску для оболонки з недоскональностями.

Різниця між p_{cr} і p_{cr}^n виявляється суттєвою, тому постає питання щодо достатньої обґрунтованості формули (7). В статті відповідь на це питання шукається шляхом комп'ютерного моделювання поведінки оболонки за межами її тримальної здатності.

4. Скінченно-елементний аналіз стійкості оболонкової структури. Моделювання виконується в тривимірній постановці із застосуванням програмного комплексу ANSYS. При цьому використовуються скінченні елементи типу SHELL281 з 8 вузлами, в основі яких лежить теорія пластин Міндліна–Рейснера [11]. Отже, за зазначених вище умов скінченно-елементна модель матиме вигляд як на рис. 2.

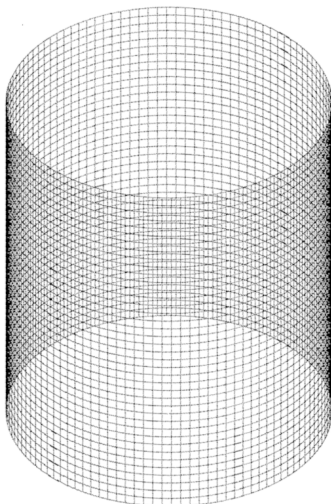


Рис. 2. Скінченно-елементна модель оболонкової структури

Лінійний аналіз на стійкість передбачає визначення власних значень дотичної матриці жорсткості конструкції, яка у загальному випадку є сумою матеріальної та геометричної матриць жорсткості. Керуюче рівняння, яке розв'язується для скінченно-елементної моделі оболонкової структури, має наступний вигляд:

$$(K + \lambda_i K_g) \psi_i = 0, \quad (8)$$

де K – матеріальна матриця жорсткості; K_g – геометрична матриця жорсткості; ψ_i – власний вектор, характерний для певної форми втрати стійкості; λ_i – відповідне власне значення. Останнє з погляду теорії стабільності систем можна трактувати як запас за стійкістю або фактор навантаження.

Аналіз виконується для оболонки з ідеально правильною початковою геометрією. При моделюванні оболонки у системі ANSYS критичний тиск для першої форми втрати стійкості дорівнював $p_{cr1} = 1634.6$ Па. На рис. 3 зображена оболонка після втрати стійкості за першою формою. Це головна форма, яка

має вигляд регулярних гармонічних відхилень з кількістю хвиль по периметру $n_{cr1} = 12$ і відповідає мінімальному значенню p_{cr1} . Для форм вищого порядку значення p_{cr1} можуть суттєво зростати (рис. 4), але реалізація таких форм вкрай малоімовірна.

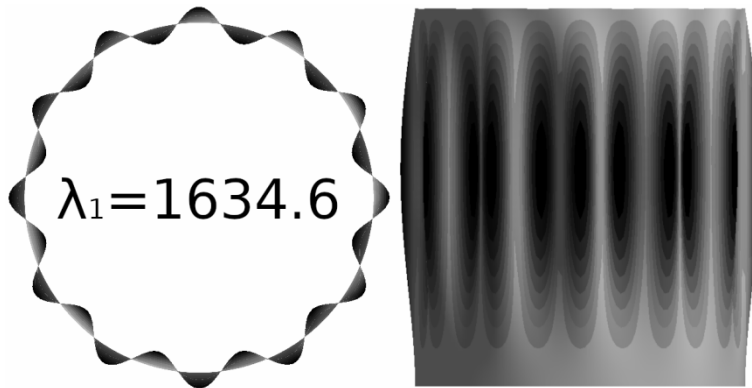


Рис. 3. Перша форма втрати стійкості при лінійному аналізі

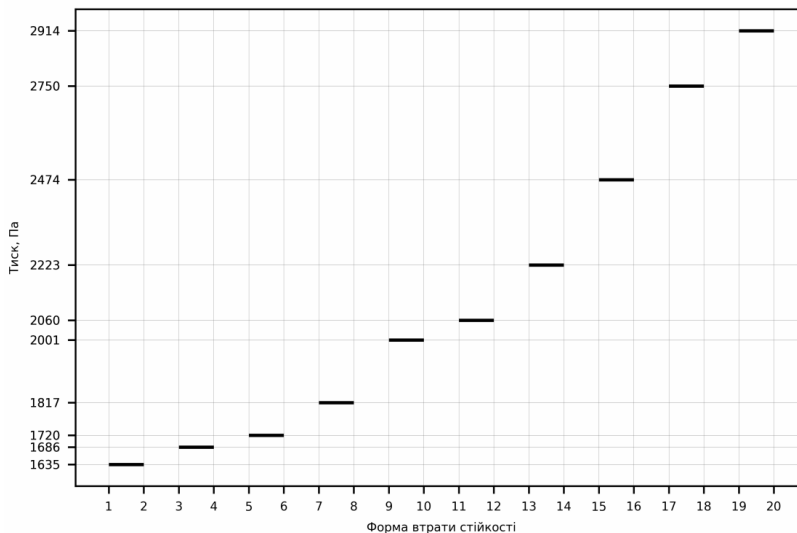


Рис. 4. Критичний тиск, визначений при лінійному аналізі

З наведеного випливає, що саме виникнення першої форми втрати стійкості є найбільш несприятливою ситуацією при навантаженні правильної оболонки зовнішнім тиском. Варто зазначити, що критичний тиск, визначений з використанням лінійного аналізу ($p_{cr1} = 1634.6$ Па), виявився помітно більшим критичної величини тиску ($p_{cr} = 1308$ Па) за формулою (4). Це можна пояснити прийнятими закріпленнями оболонки та тим фактом, що лінійний аналіз надає неконсервативну оцінку стійкості споруди.

Для оболонок з початковими недосконаlostями більш точне значення критичного тиску можна отримати за допомогою нелінійного аналізу, який передбачає пошук значення граничного навантаження в ітераційному режимі за допомогою модифікованого метода Рікса [12], який, на відміну від метода Ньютона-Рафсона [13], дозволяє визначити поведінку структури у закритичній зоні та прогнозувати нелінійний колапс конструкції.

Узагальнений алгоритм моделювання оболонки з початковими недосконаlostями наведено на рис. 5.

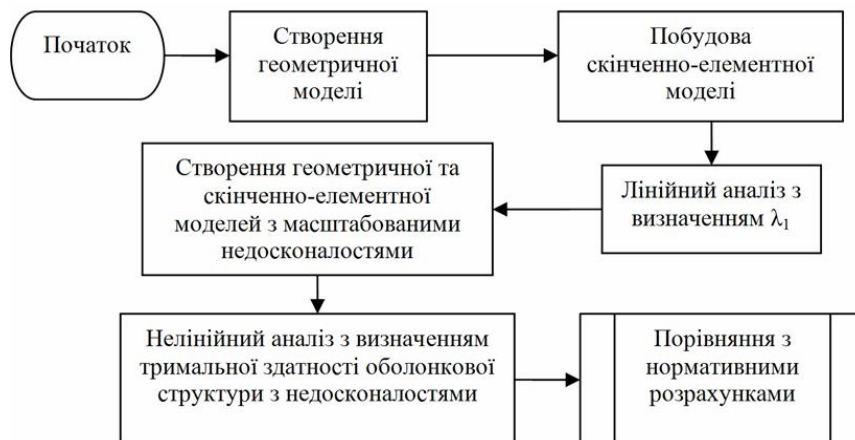


Рис. 5. Узагальнений алгоритм моделювання оболонки з початковими недосконалотями

Для оболонки, що досліджується, загальна форма початкових недосконалотей приймається подібною до першої форми втрати стійкості, яка була одержана при лінійному аналізі. Виходячи з теоретичних міркувань, саме така форма початкових недосконалотей буде найнесприятливішою, і саме тому така форма недосконалотей буде вважатися критичною. На рис. 6 наведено залежності відносної величини максимальних радіальних переміщень w/t поверхні оболонки з початковими критичними недосконалотями від відносної величини зовнішнього тиску p/p_{cr} . Графіки побудовані для різних відносних амплітуд початкових недосконалотей.

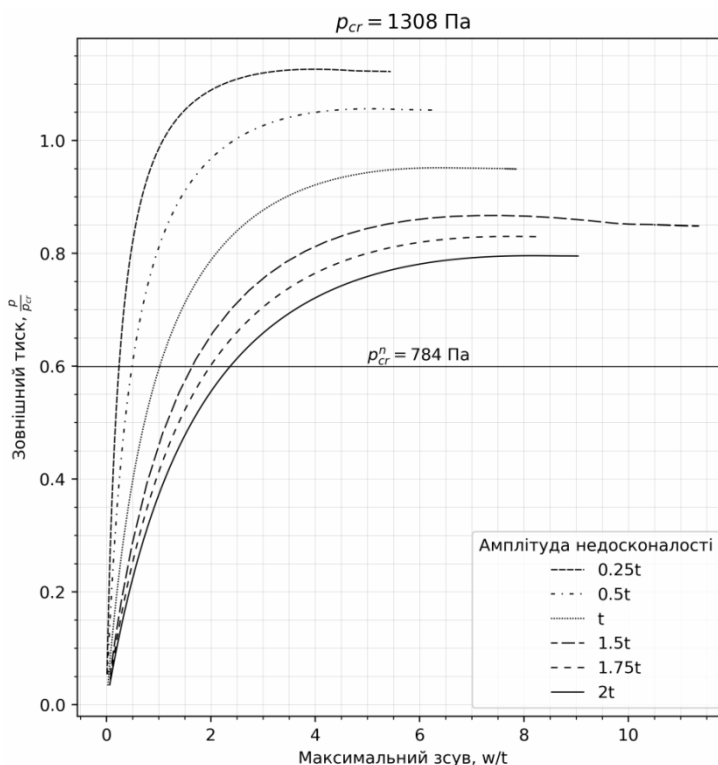


Рис. 6. Залежність максимальних радіальних переміщень поверхні оболонки з початковими критичними недосконалотями від зовнішнього тиску

Графіки показують, що граничні (максимальні, які витримує оболонка) величини тиску для оболонки з початковими недосконаlostями поступово зменшуються в порівнянні з критичним значенням тиску, що його визначено лінійним аналізом, і таке зменшення зростає при збільшенні амплітуди недосконаlostей. В той же час всі одержані значення граничного тиску суттєво перевищують нормативне значення $p_{cr}^n = 784$ Па.

Вище розглядалася найнесприятливіша періодична форма початкових відхилень оболонки. В дійсності геометричні недосконаlostі поверхні тонкостінних оболонок мають стохастичний характер. Результати натурних обстежень поверхні сталевих резервуарів дозволяють вважати [14, 15], що якісно картина недосконаlostей будь-якої тонкостінної поверхні може бути представлена у вигляді того чи іншого набору довго- і короткохвильових гармонічних відхилень, причому зі збільшенням довжини хвиль збільшується і амплітуда відхилення. При необхідності картина недосконаlostей поверхні якогось конкретного об'єкту може бути представлена у вигляді рядів Фур'є на основі результатів натурних обмірів його геометрії. У статті в рамках відомої статистики щодо відхилень поверхні сталевих резервуарів [14] моделювалася поверхня оболонки у вигляді комбінації синусоїдальних відхилень з різними амплітудами та кількістю хвиль n вздовж периметру, а саме: 1) короткохвильові відхилення з $n = 12$ (амплітуда a_0 по черзі приймалася рівною $0.25t, 0.5t, t, 1.5t, 1.75t, 2t$); 2) середньохвильові відхилення з $n = 4$ і амплітудою $a_0 = 10, t = 40$ мм та з $n = 6$ і амплітудою $a_0 = 2, t = 8$ мм; 3) довгохвильові відхилення з $n = 2$ і амплітудою $a_0 = 15t = 60$ мм. Тобто короткохвильові відхилення за першою формою втрати стійкості оболонки накладалися на можливі відхилення з довшою хвилею. Параметричне рівняння комбінованих таким чином початкових відхилень поверхні оболонки представлялося у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} x &= (R + a_0 \sin(12\theta) + 60 \sin(2\theta) + 40 \sin(4\theta) + 8 \sin(6\theta)) \cos(\theta), \\ y &= (R + a_0 \sin(12\theta) + 60 \sin(2\theta) + 40 \sin(4\theta) + 8 \sin(6\theta)) \sin(\theta), \end{aligned} \quad (9)$$

де $R = 5215$, $a_0 \in [0.25t, 0.5t, t, 1.5t, 1.75t, 2t]$, $\theta \in 0..2\pi$.

Максимальні радіальні переміщення поверхні оболонки з комбінованими початковими недосконаlostями, заданими у формі (9), при дії зовнішнього тиску наведені на рис. 7.

З графіків випливає, що наявність довгохвильових недосконаlostей чинить мінімальний вплив на величини граничного тиску, але дещо змінює поведінку оболонки за межами граничного тиску, уповільнюючи процес поступового зниження тримальної здатності оболонки. На переміщеннях $(15 \div 20) \cdot w/t$, найімовірніше, має місце перебудова форми поверхні оболонки, на що вказує виникнення петлеподібних ділянок на графіках залежності w/t від p/p_{cr} . Всі ці процеси відбуваються при значно вищих величинах зовнішнього тиску в порівнянні з його нормативною величиною $p_{cr}^n = 784$ Па.

Висновки

1. Прийнятий в статті підхід до комп'ютерного моделювання циліндричної оболонки з початковими недосконаlostями дозволив одержати результати, які якісно добре узгоджуються з відомими теоретичними уявленнями щодо поведінки подібних оболонок в до- та закритичних станах.
2. Кількісні результати нелінійного аналізу з використанням комп'ютерного моделювання показали, що для циліндричної оболонки з заданими в статті параметрами геометрії форми та початковими недосконаlostями дійсне значення граничного зовнішнього тиску на 30-45% вище його нормативного значення, а закритичне зниження тиску відбувається повільно, не загрожуючи загальним змінам геометрії оболонки. Все це дає підстави для оцінювання тримальної здатності наведеної оболонки за дещо збільшеним значенням розрахункової величини зовнішнього тиску. Понижувальний коефіцієнт $C_n = 0.598$ у формулі (7) в певних випадках можна підвищити до 0.75 - 0.85.
3. Визначення розрахункової величини зовнішнього тиску для тонкостінних структур з початковими місцевими недосконаlostями форми найбільш ефективно виконувати за їх

дійсними параметрами на основі використання комп'ютерного моделювання. Це може суттєво скорегувати оцінку загальної тримальної здатності структури чи споруди в цілому.

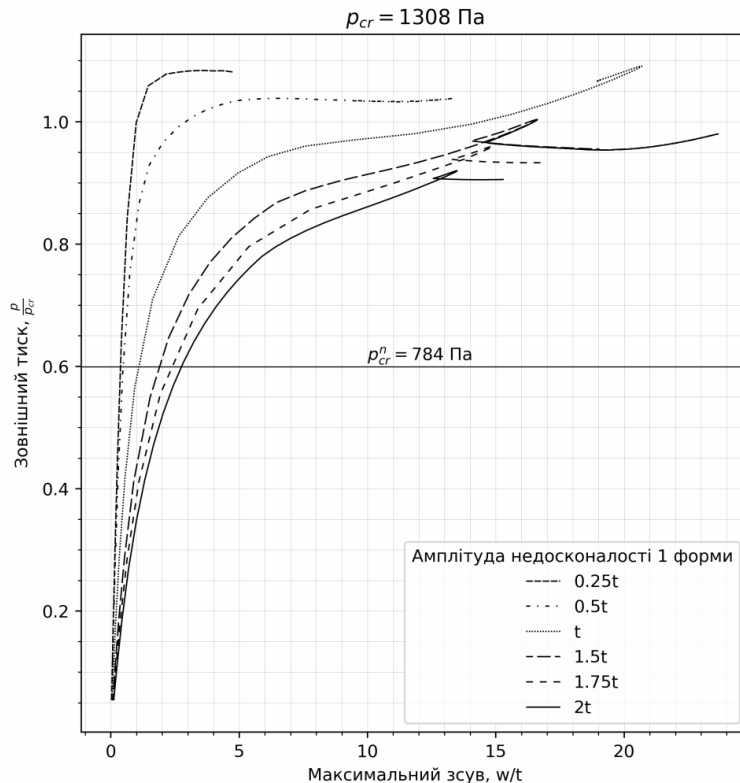


Рис. 7. Залежність максимальних радіальних переміщень поверхні оболонки від зовнішнього тиску при комбінованих початкових недосконалостях

Моделювання виконувалося у системі ANSYS ACADEMIC. Графіки будувалися за допомогою пакету matplotlib [16] для мови Python.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Timoshenko S., Woinowsky-Kreiger S. Theory of plates and shells. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc. - 1959.
2. Timoshenko S., Gere J. Theory of elastic stability. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc. - 1961.
3. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. - М.: Машиностроение, 1961. - 312 с.
4. Колкунов Н.В. Основы расчета упругих оболочек. - М.: Высш. школа, 1972. - 296 с.
5. Yegorov Y., Kucherenko O., Repryntsev O. Finite element modelling of the contact between shell structure and foundation // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. - K.: KNUBA. - 2023. - Issue 110. - P. 421-429.
6. Calladine C. Understanding imperfection-sensitivity in the buckling of thin-walled shells // Thin-Walled Structures. - 1995. - Vol. 23. - Issue 1. - P. 215-235.
7. Bazhenov V.A., Luk'yanchenko O.O., Kostina O.O., Gerashchenko O.V. Probabilistic Approach to Determination of Reliability of an Imperfect Supporting Shell // Strength of Materials. - 2014. - Vol. 46. - Issue 4. - P. 567-574.
8. Fina M., Weber P., Wagner W. Polymorphic uncertainty modelling for the simulation of geometric imperfections in probabilistic design of cylindrical shells // Structural Safety. - 2020. - Vol. 82. - P. 1 - 20.
9. Koiter W. On the stability of elastic equilibrium. Washington: National Aeronautics and Space Administration. - 1967.
10. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. - К.: Мінрегіон України, 2014. - 199 с.
11. Mindlin R. Influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropic, elastic plates // ASME Journal of Applied Mechanics. - 1951. - Vol. 18. - P. 31 - 38.
12. Riks E. An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems // International Journal of Solids and Structures. - 1979. - Vol. 15. - Issue 7. - P. 524 - 551.

13. Ben-Israel A. A Newton-Raphson method for the solution of systems of equations // Journal of Mathematical Analysis and Applications. – 1966. – Vol. 15. – Issue 2. – P. 243-252.
14. Егоров Е. А. Исследование и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации: монография. – Днепропетровск: ПГАСА, 1996. – 99 с.
15. Гудрамович В.С., Деменков А.Ф., Егоров Е.А., Репринцев А.В. О влиянии технологии изготовления на несущую способность стальных резервуаров // Проблемы прочности. - 2006. – №4. – С. 125-131.
16. Hunter J. Matplotlib: A 2D graphics environment // Computing in Science & Engineering. – 2007. – Vol. 9. - №3. – P. 90-95.

REFERENCES

1. Timoshenko S., Woinowsky-Kreiger S. Theory of plates and shells. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc. - 1959.
2. Timoshenko S., Gere J. Theory of elastic stability. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc. - 1961.
3. Alfutov N.A. Osnovy rascheta na ustoichivost upruhikh system. (Fundamentals of elastic systems stability calculating). Moscow: Mashinostroenie. - 1961.
4. Kolkunov N.V. Osnovy rascheta upruhikh obolochek. (Fundamentals of elastic shells calculation). Moscow: Vysshaja shkola. - 1972.
5. Yegorov Y., Kucherenko O., Repryntsev O. Finite element modelling of the contact between shell structure and foundation // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA. - 2023. – Issue 110. – P. 421-429.
6. Calladine C. Understanding imperfection-sensitivity in the buckling of thin-walled shells // Thin-Walled Structures. – 1995. – Vol. 23. – Issue 1. - P. 215–235.
7. Bazhenov V.A., Luk'yanchenko O.O., Kostina O.O., Gerashchenko O.V. Probabilistic Approach to Determination of Reliability of an Imperfect Supporting Shell // Strength of Materials. – 2014. - Vol. 46. – Issue 4. - P. 567-574.
8. Fina M., Weber P., Wagner W. Polymorphic uncertainty modelling for the simulation of geometric imperfections in probabilistic design of cylindrical shells // Structural Safety. – 2020. – Vol. 82. - P. 1 – 20.
9. Koiter W. On the stability of elastic equilibrium. Washington: National Aeronautics and Space Administration. – 1967.
10. DBN B.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia. (Steel structures. Design standards). Kyiv: Ministry of Regions of Ukraine, 2014.
11. Mindlin R. Influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropic, elastic plates // ASME Journal of Applied Mechanics. – 1951. – Vol. 18. - P. 31 – 38.
12. Riks E. An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems // International Journal of Solids and Structures. – 1979. – Vol. 15. – Issue 7. – P. 524 – 551.
13. Ben-Israel A. A Newton-Raphson method for the solution of systems of equations // Journal of Mathematical Analysis and Applications. – 1966. – Vol. 15. – Issue 2. – P. 243-252.
14. Yegorov Y. A. Issledovanie i metody raschetnoi otsenki prochnosti, ustoichivosti i ostatochnoho resursa stalnykh rezervuarov, nakhodiashchysia v ekspluatatsii: monohrafiya. (Research and methods for calculating the strength, stability and residual life of steel tanks in operation: monograph). Dnepropetrovsk: PGASA. - 1996.
15. Hudramovych V.S., Demenkov A.F., Egorov E.A., Repryntsev A.V. O vlianii tehnologii izgotovleniia na nesushchiu sposobnost stalnykh rezervuarov. (On the influence of the technology of manufacturing on the load-carrying capacity of steel tanks) // Problemy prochnosti. - 2006. – №4. – P. 125-131.
16. Hunter J. Matplotlib: A 2D graphics environment // Computing in Science & Engineering. – 2007. – Vol. 9. - №3. – P. 90-95.

Стаття надійшла 12.09.2023

Егоров Е.А., Кучеренко О.С.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ОБОЛОНКОВИХ СТРУКТУР З ГЕОМЕТРИЧНИМИ НЕДОСКОНАЛОСТЯМИ

В статті розглядається задача моделювання тонкостінних циліндричних оболонкових структур з початковими недоскональностями під дією зовнішнього радіального тиску. Критичний тиск, визначений для ідеальної оболонки з використанням лінійного аналізу, виявився помітно більшим критичного тиску, який обчислено за формулою Папковича, що пояснюється прийнятими закріпленнями оболонки та тим фактом, що лінійний аналіз надає неконсервативну оцінку стійкості. Для оболонки, що досліджується, загальна форма початкових недоскональностей приймалася подібною до першої форми втрати стійкості зі змінною амплітудою, причому граничні величини тиску, які визначені в ітераційному режимі за допомогою модифікованого метода Рікса, менші за критичне значення тиску, яке отримано при лінійному аналізі. В той же час всі одержані значення граничного тиску суттєво перевищують нормативне значення. Також моделювалася поверхня оболонки у вигляді комбінації синусоїдальних відхилень з різними амплітудами та кількістю хвиль вздовж периметру. Короткохвильові відхилення за першою формою втрати стійкості оболонки накладалися на можливі відхилення з довгою хвилею. Наявність довгохвильових недоскональностей чинить мінімальний вплив на величини граничного тиску, але помітно змінює поведінку оболонки за межами граничного тиску, що відображено на відповідних графіках у вигляді петель. Ці процеси відбуваються при значно вищих величинах

зовнішнього тиску в порівнянні з його нормативною величиною. Результати моделювання добре узгоджуються з відомими теоретичними уявленнями щодо поведінки подібних оболонок в до- та закритичних станах. Нелінійний аналіз показав, що для циліндричної оболонки з заданими в статті параметрами дійсне значення граничного зовнішнього тиску на 30-45% вище його нормативного значення, а закритичне зниження тиску відбувається дуже повільно, не загрожуючи загальним змінам геометрії оболонки. Це дає підстави для більш точного оцінювання тримальної здатності зазначених оболонкових структур.

Ключові слова: моделювання, оболонка, недосконалість, стійкість, радіальний тиск, скінченний елемент, нелінійний аналіз, ANSYS.

Yegorov Y.A., Kucherenko O.Y.

COMPUTER MODELLING OF THIN-WALLED SHELL STRUCTURES WITH GEOMETRIC IMPERFECTIONS

The study presented in the article focuses on modelling of thin-walled cylindrical shell structures with initial geometrical imperfections under external radial pressure. The critical pressure of the perfect shell obtained using linear analysis significantly exceeded that calculated by the Papkovich formula. This discrepancy can be attributed to the shell displacement constraints and the fact that linear analysis provides non-conservative estimates. Initially, the geometric imperfections were assumed to follow an eigenmode-affine pattern with varying amplitudes. Critical pressure values iteratively determined using the modified Ricks method were found to be lower than the critical pressure of the first buckling mode. Importantly, all these values remained notably higher than the normative value. Subsequently, the initial imperfections were modelled as combinations of sinusoidal deviations with different amplitudes and varying numbers of waves along the perimeter. Short-wavelength eigenmode-affine imperfections were superimposed on longer-wavelength deviations. The research indicated that while the long-wavelength imperfections had a marginal impact on the critical pressure values, they notably altered the post-buckling behaviour of the shell, as depicted in load-deflection figures in the form of loops. These processes occurred at pressure levels considerably higher than the normative value. The simulation results are in good agreement with established theories regarding the pre- and post-buckling behaviour of thin-walled shells. Nonlinear analysis revealed that the actual critical pressure values exceeded the normative value by 30-45%, and the post-buckling pressure values exhibited a gradual decrease without posing a threat to abrupt changes in the geometry of the shells. This outcome provides a basis for a more accurate estimation of the load-carrying capacity of the shell structures.

Keywords: modelling, shell, imperfection, buckling, radial pressure, finite element, nonlinear analysis, ANSYS.

УДК 004.942:539.3:624.04

Єгоров Є.А., Кучеренко О.Є. Комп'ютерне моделювання тонкостінних оболонкових структур з геометричними недосконалістями // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 111. – С. 205-213.

Розглядається задача моделювання тонкостінних оболонкових структур з геометричними недосконалістями, визначаються значення критичного тиску за допомогою лінійного аналізу та модифікованого метода Рікса.
Іл. 7. Бібліогр. 16 назв.

UDC 004.942:539.3:624.04

Yegorov Y.A., Kucherenko O.Y. Computer modelling of thin-walled shell structures with geometric imperfections // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles- K.: KNUBA, 2023. – Issue 111. - P. 205-213.

The study focuses on modelling of thin-walled cylindrical shell structures with initial geometrical imperfections, the values of critical pressure are determined using linear analysis and the modified Riks method.

Fig. 7. Ref. 16.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металевих конструкцій ЄГОРОВ Євгеній Аркадійович.

Адреса робоча: 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а, ДВНЗ "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", ЄГОРОВ Євгеній Аркадійович.

E-mail: evg_egorov@ukr.net

Мобільний тел.: +380679451816

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2993-0570>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук (PhD), науковий співробітник КУЧЕРЕНКО Олександр Євгенович.

Адреса робоча: 49005, м. Дніпро, вул.Лешко-Попеля, 15, Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, КУЧЕРЕНКО Олександр Євгенович.

E-mail: akch7@cryptolab.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0008-6534-8178>