

НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ

УДК 593.3

НАДІЙНІСТЬ ТОНКИХ ОБОЛОНОК З РЕАЛЬНИМИ НЕДОСКОНАЛОСТЯМИ ФОРМИ

Лук'янченко О. О., Ворона Ю. В., Костіна О. В., Вабіщевич М. О., Палій О. М.
 Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна
 E-mail: lukianchenko.oo@knuba.edu.ua

Для забезпечення безаварійної експлуатації тонких оболонок важливою є оцінка впливу виявлених дефектів на їх надійність. Метою роботи є оцінка експлуатаційної надійності резервуара з реальними недосконалостями форми його стінки. Методи: запропоновано ймовірнісний підхід визначення експлуатаційної надійності за стійкістю тонких оболонок з недосконалостями форми із застосуванням процедур програмного комплексу скінченно-елементного аналізу. Результатом роботи є комп'ютерне моделювання нелінійної статичної поведінки резервуара з недосконалостями форми його стінки при дії поверхневого тиску. Визначені критичні значення навантаження за допомогою розв'язання геометрично нелінійної крайової задачі статички модифікованим методом покрокового навантаження Ньютона-Рафсона. Побудована крива критичних значень навантаження, функція рівномірного розподілу щільності ймовірності недосконалостей та кривої (проектної) надійності для оболонки з недосконалостями у вигляді першої форми втрати стійкості різної амплітуди. Отримано допустиме значення поверхневого тиску для заданого значення необхідної (проектної) надійності. Визначена ймовірність відмови паливного резервуара за рахунок наявності реальних недосконалостей форми. Оцінена експлуатаційна надійність за стійкістю резервуара та підтверджено його безпечний стан. Висновки: надійність, яка є якісною характеристикою резервуара протягом часу, буде надалі зменшуватися за рахунок усіх існуючих загроз: недосконалостей форми, дефектів зварних швів, корозії металу та інших. Тому важливо для подальшої безаварійної експлуатації паливного резервуара виконувати всі вимоги нормативних документів за регламентом обстеження, обслуговування і ремонту. Для цього можна застосовувати неруйнівні методи обстеження резервуара, постійний моніторинг його реального стану засобами технічної діагностики або комп'ютерного моделювання у вигляді діагностичної ймовірнісної моделі.

Ключові слова: ймовірність; надійність; недосконалість форми; резервуар; стійкість.

Вступ

На теперішній час між високим теоретичним і обчислювальним рівнем, на якому розв'язуються задачі міцності та стійкості оболонкових конструкцій, і рівнем обґрунтованості висновків про їх надійність і довговічність є значний розрив [1 - 4]. Розрахунок на міцність та стійкість конструкцій ведеться зазвичай у припущенні, що входні параметри, які характеризують умови функціонування конструкцій, є детермінованими. Детермінований підхід неминує веде до збільшення витрат матеріалу внаслідок необґрунтованого вибору коефіцієнтів запасу. Тому важливо враховувати випадкові чинники при дослідженні поведінки оболонкових конструкцій. Цим питанням займаються статистична механіка і теорія надійності, які є розділами будівельної механіки, що тісно пов'язані між собою. При вирішенні кожної конкретної задачі методи статистичної механіки і теорії надійності зазвичай застосовуються послідовно. Границя проходить приблизно там, де від визначення напружень, деформацій і т.п. переходять до встановлен-

ня небезпечних станів і до обчислення ймовірностей їх виникнення.

В одних випадках перший етап не містить будь-яких істотних труднощів і розв'язання задачі по суті зводиться до розрахунку надійності. В інших випадках, навпаки, знаходження ймовірнісних характеристик напружено-деформованого стану вимагає тонких математичних розрахунків, в той час, як власне розрахунок на надійність є елементарним.

Вперше питання теорії надійності були поставлені саме в будівельній механіці [2]. Ідея про застосування статистичних методів до розрахунків на міцність була висунута вперше в роботах М. Майера і Н. Хоціалова, що відносяться до 1926 - 1929 рр. Видатна роль у справі впровадження статистичних методів у будівельну механіку належить М. С. Стрелецькому, який, починаючи з 1935 р. опублікував низку робіт на тему статистичної концепції надійності споруд, яка в неявній формі знайшла відображення в методиці розрахунку конструкцій за граничними станами. До періоду 40-х років ХХ ст. відносяться роботи О. Р. Ржани-

цина, А. Фрейденталя, А. Іонсона та ін. Починаючи з 40-х років, започатковано впровадження імовірнісних методів у машинобудуванні, суднобудуванні та інших галузях техніки. Далі, у міру більш глибокого розуміння принципів надійності, відбувається перехід від елементарних методів теорії ймовірностей до методів випадкових функцій. В. В. Болотін [4] перший узагальнив теорію надійності будівельних конструкцій з позицій теорії випадкових процесів і вирішив багато задач теорії надійності будівельних конструкцій.

За останні роки імовірнісні та статистичні методи оцінки надійності конструкцій знаходять широке застосування в будівельній механіці та будівельному проектуванні і є основою багатьох останніх редакцій норм проектування будівельних конструкцій різних країн [1, 5].

Матеріали і методи

Для забезпечення безаварійної експлуатації та подальшої модернізації інфраструктури української антарктичної станції „Академік Вернадський” (УАС) важливим є моніторинг технічного стану будівельних об'єктів та визначення їх експлуатаційної надійності.

Особливою є проблема безаварійного функціонування таких відповідальних об'єктів як резервуари для зберігання екологічно-небезпечних речовин. Державною установою Національним антарктичним науковим центром МОН України (ДУ НАНЦ) разом з Київським Політехнічним Інститутом (КПІ ім. Ігоря Сікорського) у лютому 2011 року проведено обстеження паливного резервуара та захисної ємності. Вченими КПІ ім. Ігоря Сікорського під керівництвом Н. І. Бурау розроблена автоматизована система раннього попередження можливості витоку палива [6]. Виконані дослідження резервуару та захисної ємності як об'єктів діагностики, результати яких в подальшому були використані для розробки та дослідження діагностичної моделі конструкції. В той же час залишалась актуальною задача оцінки конструкційної безпеки складної оболонкової конструкції з урахуванням існуючих дефектів. Автори разом з вченими КПІ ім. Ігоря Сікорського приймали участь в дослідженнях, які стосувалися оцінки та прогнозування несучої спроможності паливного резервуару РВС-200 УАС в системі з захисною ємністю [7 - 11]. У 2016 році спеціалістами Інституту електрозварювання імені Є.Патона НАНУ [12] в результаті технічного діагностування резервуару РВС-200 на УАС було зроблено висновок про його працездатний стан згідно вимогам нормативних документів [5] і ступеня його придатності до експлуатації. Але для подальшої безпечної експлуатації паливного резервуара залишається важливим визначити і попередити загрози від інших виявлених дефектів, наприклад, недосконалостей форми стінки резервуара.

В статті наведено імовірнісний підхід до визначення експлуатаційної надійності за стійкістю тонких оболонок з урахуванням недосконалостей форми [13, 14]. Запропонований підхід базується на методах будівельної механіки, математичної фізики, механіки твердого деформованого тіла та основних положеннях імовірнісного підходу В. В. Болотіна [4], який містить припущення про існування функціональної залежності критичного навантаження від початкової недосконалості форми. Знаючи щільність повної ймовірності вектора початкової недосконалості, можна визначити щільність ймовірності критичного навантаження як випадкової скалярної величини.

Згідно представленого підходу надійність за стійкістю недосконалої оболонки при дії поверхневого тиску визначена за формулою

$$R(\alpha) = \text{Prob}(\alpha_{cr} > \alpha) = \text{Prob}(X < \xi). \quad (1)$$

Тут $R(\alpha)$ є надійність оболонки при заданому безрозмірному навантаженні α ; α_{cr} – випадкове безрозмірне критичне навантаження; X – випадкова безрозмірна величина недосконалості; ξ – максимально допустима безрозмірна величина недосконалості.

Якщо задати щільність ймовірності початкової недосконалості, то можна визначити щільність ймовірності критичного навантаження. Водночас, надійність за стійкістю недосконалої оболонки можна подати у вигляді

$$R(\alpha) = \begin{cases} 0, & (\alpha > 1) \\ f_X(u), & (\alpha_{cr} < \alpha < 1), \\ 1, & (\alpha \leq \alpha_{cr}) \end{cases} \quad (2)$$

де $u = \delta/t$ – безрозмірна величина початкової недосконалості, $f_X(u)$ – функція щільності ймовірності початкової недосконалості, α_{cr} – безрозмірне критичне навантаження, яке відповідає максимально допустимій за нормами [5] безрозмірній величині початкової недосконалості оболонки ξ .

При $u = \xi$ має місце рівність

$$\text{Prob}(X < \xi) = \int_0^{\xi} f_X(u) dx = 1. \quad (3)$$

Для побудови кривої проектної надійності досліджена стійкість оболонки зі змодельованими недосконалостями форми, амплітуда яких не перевищувала максимально допустиму величину ξ . У статті модель недосконалості прийнята у вигляді першої форми втрати стійкості оболонки з ідеальною поверхнею при дії поверхневого тиску, оскільки вона є більш небезпечною. Крива проектної надійності дала змогу визначити допустиме значення поверхневого тиску α_d , яке відповідало

заданому значенню проектної надійності резервуара РВС-200 $r = 0,99999$.

Імовірність відмови резервуара через наявність реальних недосконалостей форми в статті визначена за формулою

$$Prob(\alpha_{cr} < \alpha) = R(q_{cr}^{nes} / q_{cr}^n). \quad (4)$$

Тут q_{cr}^{nes} та q_{cr}^n – критичні значення поверхневого тиску для резервуара з реальними недосконалостями форми та з ідеальною поверхнею відповідно.

Імовірність безвідмовної роботи, яка є експлуатаційною надійністю за стійкістю резервуара з реальними недосконалостями форми, визначена згідно виразу

$$R^{nes} = r - R(q_{cr}^{nes} / q_{cr}^n). \quad (5)$$

Імовірнісний підхід реалізовано з використанням обчислювальних процедур сучасного програмного комплексу скінченно-елементного аналізу NASTRAN [15] та спеціально розроблених про-

грам. Стійкість резервуара досліджена в лінійній постановці за допомогою розв'язання задачі на власні значення методом Ланцоша та в нелінійній постановці при розв'язанні геометрично нелінійної крайової задачі статички модифікованим методом покрового навантаження Ньютона-Рафсона.

Результати та обговорення

Паливний резервуар представляє собою тонку циліндричну оболонку висотою 5,96 м і діаметром 6,63 м. Стінка резервуару зварена з листів прокату товщиною 0,005 м. Листи виготовлені з сталі СтЗпс2 з відповідними механічними характеристиками: щільність прокату – 7850 кг/м^3 ; модуль пружності – $2,06 \times 10^{11} \text{ Па}$, модуль зсуву – $0,79 \times 10^{11} \text{ Па}$; коефіцієнт поперечної деформації – 0,3.

На рис. 1 представлені реальні недосконалості стінки резервуару у вигляді відхилень від вертикалі, які отримано в результаті його технічного діагностування у 2016 році [12].

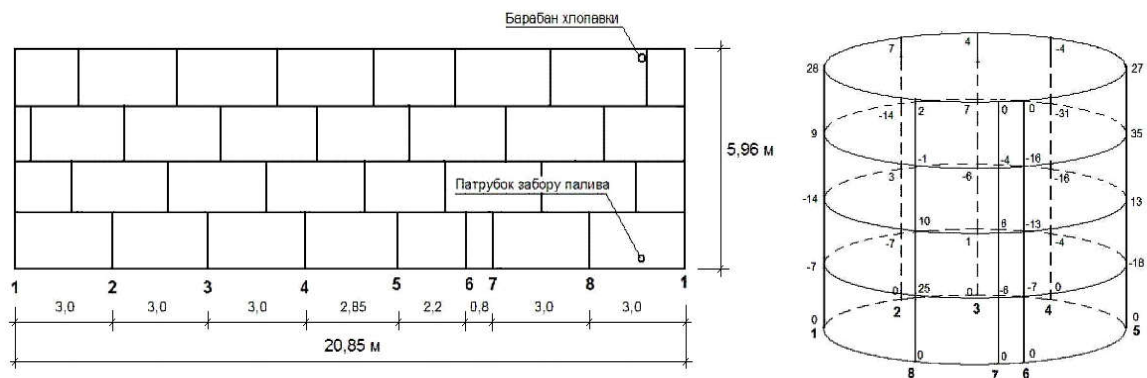


Рис. 1. Стінка резервуара з реальними відхиленнями від вертикалі

В статті наведено результати побудованих двох комп'ютерних скінченно-елементних моделей резервуара: з ідеальною поверхнею та реальними недосконалостями форми.

Стінка резервуару представлена суцільною у вигляді сукупності 1400 плоских оболонкових чотирикутних скінченних елементів з шістьма степенями вільності у вузлі.

Реальні недосконалості змодельовані за допомогою сплайн-кривих програмного комплексу. Накладено обмеження на радіальні й тангенціальні переміщення у вузлах верхньої кромки оболонки, вузли нижньої кромки жорстко закріплені. Навантаження подано у вигляді рівномірного поверхневого тиску на елементи стінки оболонки.

Стійкість оболонки з ідеальною поверхнею досліджена в лінійній та нелінійній постановках. При розв'язанні задачі на власні значення (Buckling) методом Ланцоша отримана перша форма втрати стійкості оболонки з ідеальною повер-

хнею (рис. 2, а). Вона має одинадцять півхвиль в радіальному напрямку та одну вздовж твірної.

Критичне значення поверхневого тиску складо $q_{cr}^l = 12,971 \text{ кПа}$.

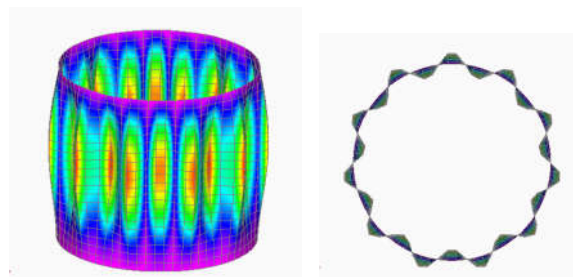
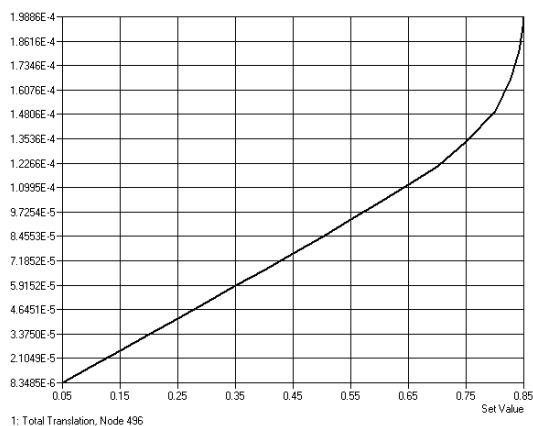


Рис. 2. Перша форма втрати стійкості ідеальної оболонки в двох проекціях

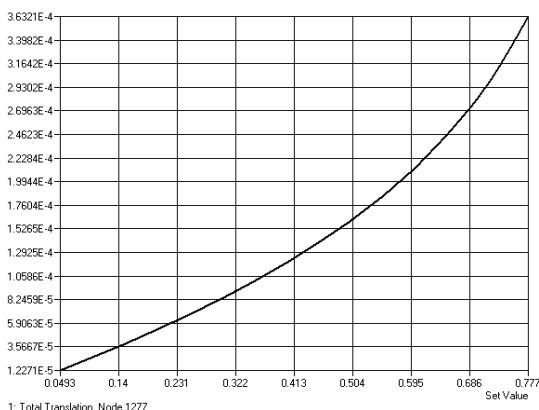
Розв'язано нелінійну задачу статички методом Ньютона-Рафсона оболонки з ідеальною поверхнею і реальними недосконалостями при дії повер-

хневого тиску $q = \beta q_0 = [0 \div 1] q_0$, де $q_0 = 15$ кПа, β параметр покровокового навантаження.

На рис. 3 представлені криві навантаження оболонки з ідеальною поверхнею та реальними недоскональностями для вузлів, в яких спостерігаються максимальні сумарні переміщення (горизонтальна вісь – безрозмірний коефіцієнт навантаження β , вертикальна вісь – сумарні переміщення (поступальні та обертальні), м).



а



б

Рис. 3. Криві навантаження поверхневим тиском оболонки з ідеальною поверхнею (а) та реальними недоскональностями (б)

Втрата стійкості оболонки з ідеальною поверхнею відбулася при критичному (граничному) значенні навантаження $q_{cr}^n = 0,85q_0 = 12,750$ кПа, з реальними недоскональностями форми при $q_{cr}^{nes} = 0,777q_0 = 11,655$ кПа. Стан оболонки під час всіх кроків навантаження внаслідок наявності реальних недосконалостей форми стінки змінився. Максимальні еквівалентні напруження, згідно критерію Мізеса, для оболонки без і з реальними недоскональностями відповідно становили 8,863 МПа та 9,075 МПа, максимальні вузлові переміщення 0,0002 м та 0,00036 м. Форма деформу-

вання оболонки з реальними недоскональностями форми при втраті стійкості представлена на рис. 4.

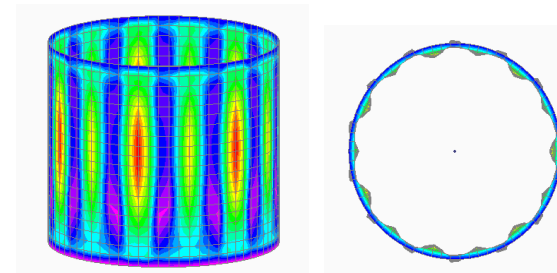


Рис. 4. Форма деформування оболонки з реальними недоскональностями форми при втраті стійкості

Згідно представленого імовірнісного підходу [13] для визначення експлуатаційної надійності резервуара з реальними недоскональностями форми потрібно оцінити проектну надійність оболонки зі змодельованими початковими недоскональностями різної амплітуди.

В статті як модель недосконалості прийнята перша форма втрати стійкості ідеальної оболонки (рис. 2), яка є більш небезпечною при дії поверхневого тиску. В розрахунках максимальна амплітуда недосконалостей приймалася пропорційною до товщини стінки оболонки $t = 0,005$ м в діапазоні $\delta/t = (0,1 \div 1,6)$. Стійкість недосконалої оболонки досліджена в нелінійній постановці (*Nonlinear Static*). Критичні значення поверхневого тиску q_{cr}^{nes} , максимальні напруження та деформації при втраті стійкості оболонки зі змодельованими недоскональностями різної амплітуди зведено в табл. 1.

Бачимо, що зі збільшенням амплітуди недосконалості зменшуються критичні значення поверхневого тиску та збільшуються відповідні максимальні еквівалентні напруження і деформації в стінці оболонки.

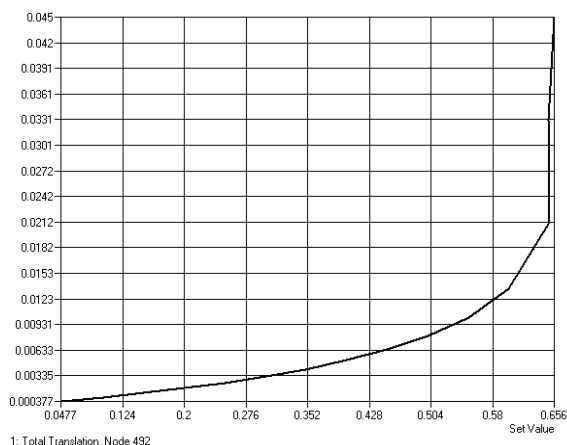
На рис. 5, як приклад, представлені крива навантаження та форма деформування оболонки при втраті стійкості зі змодельованими недоскональностями стінки, максимальна амплітуда яких дорівнювала $\delta=1,4t$.

У радіальному напрямку оболонка мала одинадцять півхвиль, вздовж твірної одну. Кількість півхвиль залишалася однаковою для всіх амплітуд недосконалостей.

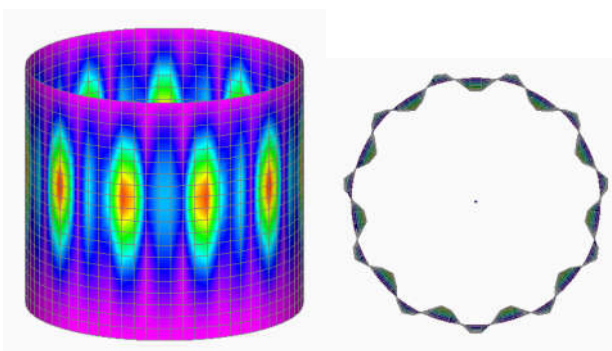
Область стійкості оболонки зі змодельованими недоскональностями форми представлена на рис. 6, а. Вона обмежена кривою критичних значень навантаження q_{cr}^{nes}/q_{cr}^n та осями координат (вертикальна вісь безрозмірне значення поверхневого тиску q/q_{cr}^n , горизонтальна вісь безрозмірне значення початкової недосконалості δ/t).

Таблиця 1. Статичні характеристики оболонки з модельованими недосконаlostями при втраті стійкості

Максимальна амплітуда змодельованих недосконаlostей, δ/t								
0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
Критичні значення поверхневого тиску \tilde{q}_{cr}^{nes} , кПа								
11,783	11,365	10,596	9,805	8,763	8,026	7,105	6,563	6,35
Максимальні напруження в елементах моделі, МПа								
31,41	55,15	82,97	82,47	100,90	102,63	107,97	160,05	206,97
Максимальні вузлові переміщення моделі, м								
0,005	0,009	0,016	0,018	0,020	0,021	0,022	0,045	0,053



а)



б)

Рис. 5. Крива навантаження (а) та форма деформування (б) оболонки зі змодельованими недосконаlostями стінки $\delta=1,4t$ при втраті стійкості

Щільність імовірності недосконаlostі форми задана у вигляді рівномірного розподілу (рис. 6, в), функція якого $f_X(\delta/t)$ обчислена за формулою

$$f_X(u) = \int_0^u \xi^{-1} dx \cdot \quad (6)$$

Крива проектної надійності за стійкість оболонки зі змодельованими недосконаlostями стінки представлена на рис. 6, б.

Максимально можливий безрозмірній величині початкової недосконаlostі оболонки $\xi = \delta/t = 1,6$, яка прийнята з урахуванням допустимого напруження сталі 210 МПа, відповідає надійності $R(\alpha_{cr}) = R(0,498) = 1$. Необхідному значенню проектної надійності оболонки $r = 0,99999$ відповідає безрозмірне допустиме значення поверхневого тиску $\alpha_d = 0,49800014$.

Експлуатаційна надійність за стійкість резервуара з реальними недосконаlostями форми визначена з урахуванням відносної величини критичного навантаження

$$q_{cr}^{nes} / q_{cr}^n = 11,655 / 12,750 = 0,914.$$

Стійкість резервуара незабезпечена при випадковому навантаженні $\alpha \geq 0,914$. Імовірність відмови

за стійкість оболонки з реальними недосконаlostями форми (4) дорівнює

$$Prob(\alpha_{cr} < \alpha) = R(q_{cr}^{nes} / q_{cr}^n) = 0,099.$$

Експлуатаційна надійність за стійкість резервуара (5) дорівнює

$R^{nes} = r - R(0,914) = 0,90091$ і є ймовірністю його безвідмовної за стійкість роботи.

Стан резервуара є безпечним за стійкість $R^{nes} > 0,7$ [5].

Висновки

Імовірнісний підхід дозволив оцінити експлуатаційну надійність та підтвердити безпечний за стійкість стан резервуара. Але надійність, яка є якісною характеристикою резервуара протягом часу, буде надалі зменшуватися за рахунок усіх існуючих загроз: недосконаlostей форми, дефектів зварних швів, корозії металу та інших.

Тому важливо для подальшої безаварійної експлуатації паливного резервуара виконувати всі вимоги нормативних документів за регламентом обстеження, обслуговування і ремонту. Для цього можна застосовувати неруйнівні методи обстеження резервуара, постійний моніторинг його ре-

льного стану засобами технічної діагностики або комп'ютерне моделювання у вигляді діагностичної

імовірнісної моделі.

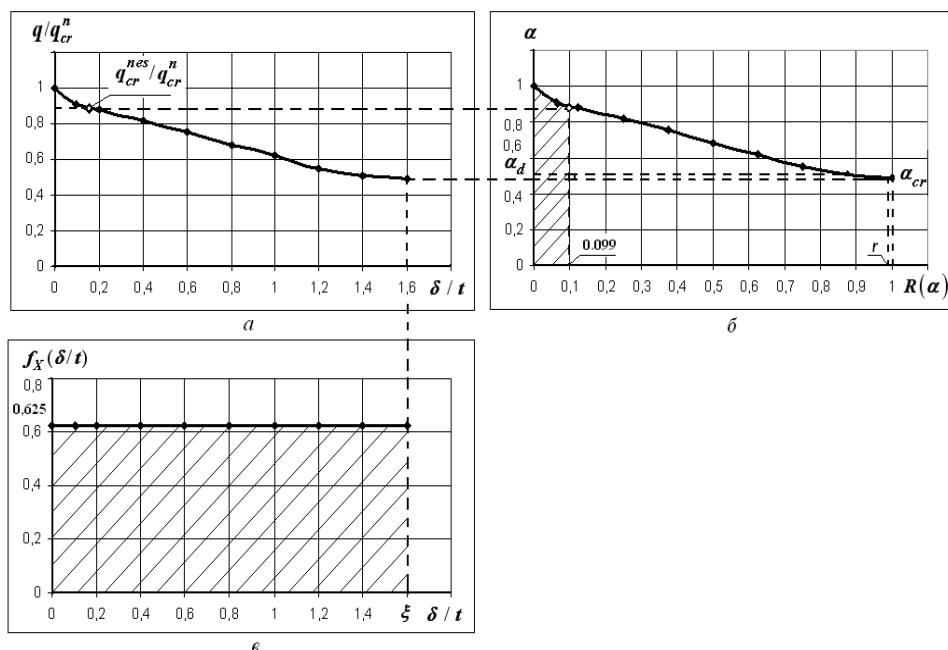


Рис. 6. Крива критичних значень навантажень (а), крива проектної надійності (б), функція розподілу щільності імовірності змодельованої недосконалої стінки оболонки (в)

Література

- [1] Г. Августі, А. Баратта, Ф. Кашианти, *Вероятностные методы в строительном проектировании*. Москва, СССР: Стройиздат, 1988.
- [2] А. В. Перельмутер, *Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций*. Москва, РФ: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2007.
- [3] О. О. Lukianchenko, O. V. Kostina, *The finite Element Method in Problems of the Thin Shells Theory*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019.
- [4] В. В. Болотин, *Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений*. Москва, СССР: Стройиздат, 1971.
- [5] ДБН В.1.2-14-2009. Общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий, сооружений, строительных конструкций и оснований. Киев: Укрархбудинформ, 2009.
- [6] N. I. Bouraou, S. A. Tsybulnik, D. V. Shevchuk and other, "Information-diagnostic complex for monitoring and forecasting of the technical condition of civil engineering structures", UA Patent 73310 Ukraine, IPC G01M 7/00, Filed 30.12.2011, Pub. Date 25.09.2012.
- [7] О. О. Luk'yanchenko, Y. V. Vorona, O. V. Kostina, O. V. Kuzko, "Evaluation of metal corrosion impact on load bearing capacity of the fuel reservoir", *Ukrainian Antarctic Journal*, № 14, pp. 246–255, 2015.
- [8] N. I. Bouraou, O. O. Luk'yanchenko, S. A. Tsybulnik, D. V. Shevchuk, "Vibration Condition Monitoring of the Vertical Steel Tanks", *Vibrations in Physical Systems*, Vol. 27, pp. 53-60, 2016. http://vibsys.put.poznan.pl/_journal/2016-27/articles/vibsys_2016-ch06.pdf
- [9] О. О. Luk'yanchenko, O. V. Kostina, N. I. Bouraou, O. V. Kuz'ko, "Investigation of Static and Dynamic Characteristics of Complex Thin-Walled Shell Structure with Cracks", *Strength of Materials*, № 48(3), pp. 401–410, 2016. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11223-016-9778-8>.
- [10] N. I. Bouraou, S. S. Rupich, O. O. Lukianchenko, O. V. Kostina, "Monitoring of the Crack Propagation in Welded Joint of the Tank Using Multi-Class Recognition", *Vibrations in Physical Systems*, № 29 (2018013), 2018.
- [11] О. О. Лук'янченко, О. В. Кузько, М. О. Вабищевич, "Проблема „живучості“ споруд і сучасні методи її розв'язання" на IX Міжнар. антаркт. конф. IX МАК 2019, Київ, 2019.
- [12] Ю. М. Посипайко, "Технічне діагностування резервуара в Антарктиці", *Інформаційний бюлетень українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики*, № 3(71), с. 23–27, 2016.
- [13] V. A. Bazhenov, O. O. Luk'yanchenko, O. O. Kostina, O. V. Gerachenko, "Probabilistic Approach to Determination of Reliability of an

Imperfect Supporting Shell”, *Strength of Materials*, № 46(4), pp. 567–574, 2014. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11223-014-9584-0>

[14] V. A. Bazhenov, O. O. Lukianchenko, O. V. Kostina, “Definition of the failure region of the oil

tank with wall imperfections in combined loading”, *Strength of Materials and Theory of Structures*, № 100, pp. 27–39, 2018.

[15] Д. Г. Шимкович, *Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows*. Москва, РФ: ДМК Пресс, 2001.

УДК 593.3

О. А. Лукьянченко, Ю. В. Ворона, Е. В. Костина, М. О. Вабищевич, О. М. Палий

Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна

НАДЕЖНОСТЬ ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК С РЕАЛЬНЫМИ НЕСОВЕРШЕНСТВАМИ ФОРМЫ

Для обеспечения безаварийной эксплуатации тонких оболочек важной является оценка влияния обнаруженных дефектов на их надежность. Целью работы является оценка эксплуатационной надежности резервуара с реальными несовершенствами формы его стенки. Методы: предложен вероятностный подход оценки надежности по устойчивости тонких оболочек с несовершенствами формы с применением процедур программного комплекса конечно-элементного анализа.

Результатом работы является компьютерное моделирование нелинейного статического поведения резервуара с несовершенствами его стенки при действии поверхностного давления. Определены критические значения нагрузки с помощью решения геометрически нелинейной краевой задачи статики модифицированным методом пошагового нагружения Ньютона-Рафсона. Построены кривая критических значений нагрузки, функция равномерного распределения плотности вероятности несовершенств и кривая (проектной) надежности оболочки с несовершенствами в виде первой формы потери устойчивости разной амплитуды. Найдено допустимое значение поверхностного давления для заданного значения необходимой (проектной) надежности. Определена вероятность отказа топливного резервуара за счет наличия реальных несовершенств. Оценена эксплуатационная надежность по устойчивости резервуара и подтверждено его безопасное состояние. Выводы: надежность, которая является качественной характеристикой резервуара в течение времени, будет в дальнейшем уменьшаться за счет всех существующих угроз: несовершенства формы, дефектов сварных швов, коррозии металла и других.

Поэтому важно для последующей безаварийной эксплуатации топливного резервуара выполнять все требования нормативных документов по регламенту обследования, обслуживания и ремонта. Для этого применять неразрушающие методы обследования резервуара, постоянный мониторинг его реального состояния средствами технической диагностики или компьютерного моделирования в виде диагностической вероятностной модели.

Ключевые слова: вероятность; надежность; несовершенство формы; резервуар; устойчивость.

O. O. Lukianchenko, Yu. V. Vorona, O. V. Kostina, M. O. Vabishevich, O. M. Paliy

Kyiv National University of building and architecture, Kyiv, Ukraine

RELIABILITY OF THIN SHELLS WITH REAL SHAPE IMPERFECTIONS

Importantly for providing of safe exploitation of thin shells is an estimation of influence discovered defects on the shells reliability. The purpose of this work is to evaluate the reliability of the tank with the real shape imperfections. The methods: a probabilistic approach for estimating the reliability of thin shells with initial shape imperfections using the software of the finite element analysis was proposed. The result is a computer simulation of nonlinear static behavior of a tank with shape imperfections under surface pressure. Solving the geometric nonlinear static boundary-value problem by the modified Newton-Rafson step-by-step method the critical load values were determined. The curve of critical load values, the function of the probability distribution density of imperfections and the curve of (design) reliability for the shell with the modeled imperfections in the form of the first form of stability loss were builded. The allowable value of surface pressure for the set value of the required (design) reliability was obtained. The failure probability of the fuel tank due to the presence of real imperfections had been determined. The tank reliability had been evaluated and its working state had been confirmed. Conclusions: reliability which is quality description of reservoir in future will be diminished during time from all of existent threats: defects of form, defects of the weld, corrosions of metal et al. It is therefore important for subsequent safe exploitation of fuel reservoir to execute all of requirements of normative documents on the regulation rules of inspection, service and repair. For this purpose it is necessary to apply the non-destructive methods of inspection of tank, permanent monitoring of his real state by technical diagnostics facilities or computer design in the view of a diagnostic probabilistic model.

Keywords: probability; reliability; shape imperfections; tank; stability.

*Надійшла до редакції
21 жовтня 2019 року*

*Рецензовано
10 листопада 2019 року*