

УДК 539.3

ЧАСТОТИ І ФОРМИ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ ЗАХИСНОЇ ЄМНОСТІ РЕЗЕРВУАРА З ДЕФЕКТАМИ ЗВАРНИХ ШВІВ ПРИ СТАТИЧНІЙ ДІЇ ОСЬОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

О.О. Лук'янченко¹,

д-р техн. наук

Н.І. Бурау²,

д-р техн. наук

О.В. Герашенко¹,

канд. техн. наук

О.В. Костіна¹,

канд. техн. наук

¹*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ*²*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", Київ*

DOI: 10.32347/2410-2547.2021.107.103-119

Визначено частоти і форми власних коливань захисної ємності резервуара при статичній дії осової стискаючого навантаження з метою побудови діагностичної моделі і моніторингу поширення тріщин в зварних швах її стінки. Комп'ютерне моделювання динамічної поведінки ємності виконано за допомогою обчислювального комплексу скінченноелементного аналізу NASTRAN. Розрахункова модель у вигляді циліндричної тонкостінної оболонки побудована з урахуванням поясів з листів прокату, зварених "встик". Дефекти зварних швів представлені у вигляді двох наскрізних горизонтальних тріщин, розташованих в зварних швах між першим і другим поясами. Ширина розкриття тріщин прийнята рівною діаметру зварного шва між прокатними листами стінки ємності. Для оцінки впливу поширення тріщин на динамічні характеристики ємності їх довжина приймалась однаковою і збільшувалася до утворення однієї суцільної тріщини. Модель дефектів у вигляді наскрізних тріщин дозволила узагальнити різні види дефектів зварних швів і прогнозувати стан оболонки в граничному критичному стані. Визначення частот і форм власних коливань захисної ємності при статичній дії осового навантаження виконано в два етапи. На першому етапі досліджено напружено-деформований стан ємності в нелінійній постановці і сформована сумарна матриця жорсткості (лінійна та геометрична). На другому етапі визначені частоти і форми власних коливань ємності з урахуванням її стану від статичної дії осового навантаження. Нелінійна задача статички сформульована у вигляді скінченноелементної апроксимації принципу можливих переміщень Лагранжа і вирішена за допомогою методу покрокового навантаження Ньютона-Рафсона (Nonlinear Static). частоти і форми власних коливань навантаженої ємності визначені при розв'язанні задачі на власні значення методом Ланцоша (Param Modes). Оцінено вплив дефектів зварних швів стінки і статичної дії осової стискаючого навантаження на динамічні характеристики захисної ємності. Результати дослідження показали, що наявність тріщин і збільшення їх довжини зменшують значення частот власних коливань ємності. Статична дія осового стискаючого навантаження на тонку оболонку може, як зменшити, так і збільшити її жорсткість, тим самим змінити частоту і форму власних коливань. На думку авторів, осьове навантаження повинно бути враховано в динамічних розрахунках тонких оболонок, особливо, при дії стохастичних навантажень (вітер, сейсміка і т.п.).

Ключові слова: тонка оболонка, дефект зварного шва, метод скінченних елементів, нелінійна поведінка, частота і форма власних коливань, осьове статичне навантаження.

Вступ

Забезпечення безаварійної експлуатації зварних резервуарів для зберігання екологічно небезпечних речовин є актуальною проблемою нафтогазової галузі та хімічної промисловості [1-6, 12, 15-18]. До основних ризиків виникнення аварії резервуарів відносять дефекти зварних швів стінок [6, 7, 10, 19]. Допустимі початкові дефекти, які в більшості випадків виникають в процесі виготовлення, транспортування і монтажу, при певних зовнішніх впливах можуть розвинути до критичного розміру і викликати раптове руйнування резервуара. Тому для забезпечення безпечної експлуатації зварних резервуарів необхідно здійснювати постійний контроль параметрів їх напружено-деформованого стану, динамічних характеристик і процесу руйнування зварних швів. Вирішення таких задач вимагає великих технічних, матеріальних і витрат часу. Розвиток теоретичних методів і нових чисельних підходів в дослідженнях континуального і дискретного руйнування деформованих тіл при дії як статичних, так і динамічних навантажень залишаються основними способами вирішення задач механіки руйнування [2, 3, 6, 8-10]. Намітилася тенденція вирішення задач "живучості" і руйнування конструкцій за допомогою побудови діагностичних моделей на основі імовірнісних нейромережових підходів [13, 14, 17, 19]. Однак, актуальною залишається задача прогнозування зміни динамічних характеристик тонких оболонок за рахунок поширення дефектів в зварних швах, збільшення їх кількості та місця розташування при дії експлуатаційних навантажень.

У статті виконано чисельний аналіз впливу поширення дефектів зварних швів на динамічні характеристики реальної конструкції: захисної ємності резервуара, розташованого на українській антарктичній станції "Академік Вернадський". Авторами розробляються діагностичні моделі резервуара і ємності для моніторингу поширення тріщин в зварних швах їх стінок. Моделювання дефектів у вигляді наскрізних тріщин виконано авторами в статтях [16-18]. Така модель дозволила узагальнити різні види дефектів зварних швів і прогнозувати стан оболонок в граничному критичному стані. Комп'ютерне моделювання ємності з дефектами зварних швів у вигляді тонкої оболонки з недосконалістю форми її стінки дозволила використовувати ефективні процедури (Nonlinear Static, Normal Modes, Param Modes) сучасного обчислювального комплексу скінченноелементного аналізу NASTRAN [11] для визначення частот і форм власних коливань ємності при статичній дії осового стискаючого навантаження.

1. Об'єкт дослідження та його скінченноелементна модель

Захисна ємність резервуара є тонкостінна циліндрична оболонка висотою 6,58 м і діаметром 6,96 м. Стінка ємності зварена «встик» з листів прокату товщиною 5 мм. Листи виготовлені зі сталі Ст3пс2 з такими механічними характеристиками: щільність прокату – 7850 кг/м^3 ; модуль пружності – $2,06 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$, модуль зсуву – $0,79 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$; коефіцієнт поперечної деформації – 0,3.

Скінченноелементна модель ємності побудована в циліндричній системі координат. Стінка оболонки, відповідно до рекомендацій розробників комплексу NASTRAN, представлена у вигляді поясів, які складаються з поверхонь (тіл), розміри яких відповідають листам прокату (рис. 1, а). Кожна поверхня подана у вигляді сукупності плоских оболонкових чотирикутних скінченних елементів з шістьма ступенями свободи у вузлі (Plate). Дефекти зварних швів представлені у вигляді двох наскрізних горизонтальних тріщин, розташованих в звареному шві між першим і другим поясами (рис. 1, б). Ширина тріщин постійна і прийнята рівною 5 мм, що відповідає діаметру зварного шва між прокатними листами стінки ємності. Довжина двох тріщин (Δl) одночасно збільшувалася до виникнення однієї суцільної тріщини ($l = 1,2$ м). Значення довжини тріщин задавалися відносними до довжини однієї суцільної тріщини: $\Delta l / l = [0,0625; 0,125; 0,25; 0,47; 0,5]$. У місцях розташування тріщин скінченноелементна сітка згущена. Використано як плоскі чотирикутні, так і трикутні оболонкові скінченні елементи з шістьма ступенями свободи у вузлі (Plate). Модель містить 3548 плоских двовимірних кінцевих елементів і 3392 вузлів.

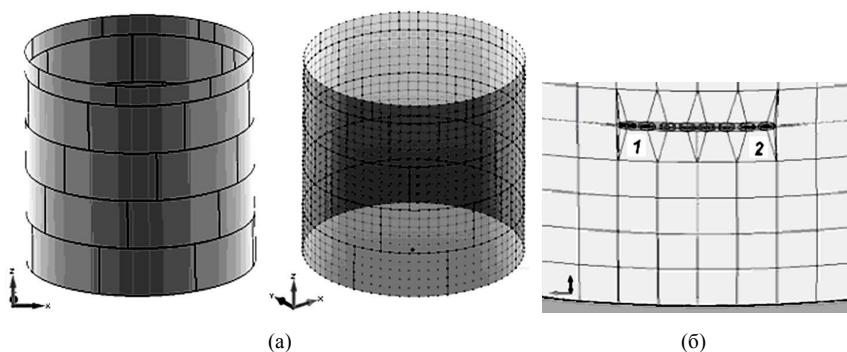


Рис. 1

Граничні умови для ємності прийняті відповідно реальним закріпленням: вузли нижнього краю моделі жорстко закріплені, в вузлах верхньої краю обмежені поступальні радіальні і дотичні переміщення. Осьове стискаюче рівномірно розподілене навантаження представлено у вигляді зосереджених сил, прикладених до вузлів верхнього краю оболонки.

2. Чисельні методи розв'язку задачі.

Дослідження частот і форм власних коливань ємності з дефектами зварних швів, навантаженої статичним осьовим стискаючим навантаженням, виконувалося в два етапи. На першому етапі вирішувалася геометрично нелінійна крайова задача статyki (Nonlinear Static). У комплексі NASTRAN [11] задача реалізована у вигляді скінченноелементної апроксимації принципу можливих переміщень

Лагранжа, що характеризує повну енергію оболонки на кожному кроці навантаження:

$$\delta\psi^n = \int_{\Omega_0^n} (\sigma^{ij})_0^n \delta\epsilon_{ij}^n (d\Omega)_0^n - \int_{\Omega_0^n} (Q^i)_0^n \delta U^i (d\Omega)_0^n - \int_{(S_P)_0^n} (P^m)_0^n \delta U^m (dS)_0^n = 0, \quad (2.1)$$

де $\delta\Pi^n = \int_{\Omega_0^n} (\sigma^{ij})_0^n \delta\epsilon_{ij}^n (d\Omega)_0^n$ – потенціальна енергія оболонки, що

характеризує роботу напружень σ на варіаціях деформацій $\delta\epsilon$ на n -му кроці навантаження; $\delta A^n = \int_{\Omega_0^n} (Q^i)_0^n \delta U^i (d\Omega)_0^n - \int_{(S_P)_0^n} (P^m)_0^n \delta U^m (dS)_0^n$ –

робота поверхневих P і об'ємних Q сил, відповідно на варіаціях переміщень δU ; $d\Omega$, dS – елементарний об'єм і площа оболонки відповідно.

Нелінійна задача статки вирішувалася за допомогою методу Ньютона-Рафсона. Рішення нелінійної системи рівнянь (2.1) на кожному кроці ітераційного процесу приймалося у вигляді

$$\{\psi\}^{k+1} \approx \{\psi\}^k + \left(\frac{\partial \{\psi\}}{\partial \{q\}} \right)^k \{dq\} \approx 0; \{q\}^{k+1} \approx \{q\}^k + \{dq\}, \quad (2.2)$$

де $\{\psi\}$ – вектор нев'язки, який є різницею лівої і правої частин системи (2.1); k – номер ітерації; $\{q\}$ – вектор-рішення.

У формулі (2.2)

$$-\left(\frac{\partial \{\psi\}}{\partial \{q\}} \right)^k \{dq\} = \left((K)^n + (K_G)^n \right)^k \{dq\}, \quad (2.3)$$

де K, K_G – матриці лінійної і геометричної жорсткості оболонки [19].

У статті визначалися значення членів сумарною матриці жорсткості $(K + K_G)$ ємності з тріщинами різної довжини при різних значеннях статичного осьового стискаючого докритичного навантаження.

На другому етапі визначалися власні частоти і форми коливань навантаженої ємності за допомогою розв'язку задачі на власні значення (Param Modes)

$$\left((K + K_G) - \tilde{\omega}_i^2 M \right) \tilde{\varphi}_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.4)$$

де M – матриця маси оболонки, $\tilde{\omega}_i$ і $\tilde{\varphi}_i$ – частота (рад/с) і вектор форм власних коливань оболонки з урахуванням дії осьового навантаження відповідно, m – кількість ступенів свободи оболонки, утриманих під час розрахунків.

В роботі також визначалися власні частоти і форми коливань ємності без навантаження ($P = 0$). Методом Ланцоша вирішувалася задача на власні значення (Normal Modes)

$$(K - \omega_i^2 M) \vec{\varphi}_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.5)$$

де ω_i і $\vec{\varphi}_i$ – відповідно частота (рад/с) і вектор форм власних коливань ємності без навантаження. Система векторів власних форм коливань ортогональна і нормована по матриці мас

$$\begin{aligned} \vec{\varphi}_j^T M \vec{\varphi}_i &= 0, \\ \vec{\varphi}_i^T M \vec{\varphi}_i &= a_i, \end{aligned} \quad (i \neq j, a_i = \text{const}). \quad (2.6)$$

Проблема власних значень (2.4) і (2.5) має n власних розв'язків $(\tilde{\omega}_1^2, \tilde{\varphi}_1), (\tilde{\omega}_2^2, \tilde{\varphi}_2), \dots, (\tilde{\omega}_n^2, \tilde{\varphi}_n)$ і $(\omega_1^2, \vec{\varphi}_1), (\omega_2^2, \vec{\varphi}_2), \dots, (\omega_n^2, \vec{\varphi}_n)$ відповідно.

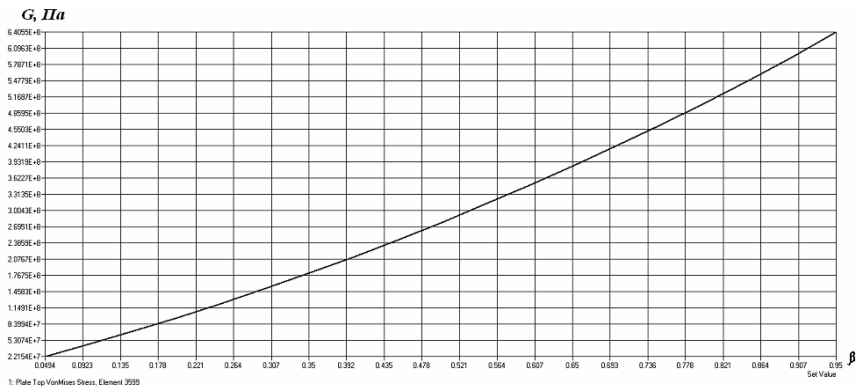
3. Чисельні результати

Перший етап досліджень. Методом Ньютона-Рафсона розв'язана геометрично нелінійна крайова задача статки (2.1). Досліджено напружено-деформований стан і стійкість оболонки з двома наскрізними тріщинами однакової довжини до появи однієї суцільної тріщини $\Delta l / l = [0,0625; 0,125; 0,25; 0,47; 0,5]$. Отримано сумарну матрицю жорсткості ємності $(K + K_G)$ на кожному кроці ітераційного процесу.

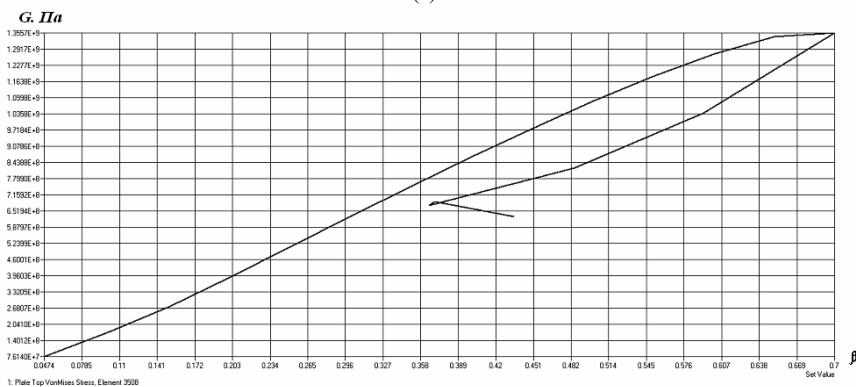
Осьове навантаження приймалося рівним $P = \beta P_{cr}$, де $\beta = [0 \div 1]$ – параметр критичного навантаження; $P_{cr} = 202422,45$ Н/вузол – значення критичної осьового навантаження для ємності без урахування дефектів зварних швів [18]. Критичні значення еквівалентних напружень більші допустимого напруження сталі 210 МПа. Тому в подальших розрахунках розглянуто докритичне стискаюче навантаження $P \leq 0,5 P_{cr}$.

На рис. 2 представлені криві залежностей еквівалентного напруження в елементах стінки оболонки від параметра критичного навантаження. Залежність еквівалентного напруження (Па) в елементах ємності з тріщинами довжиною $\Delta l / l = [0,25(a); 0,47(b); 0,5(в)]$ від параметра β .

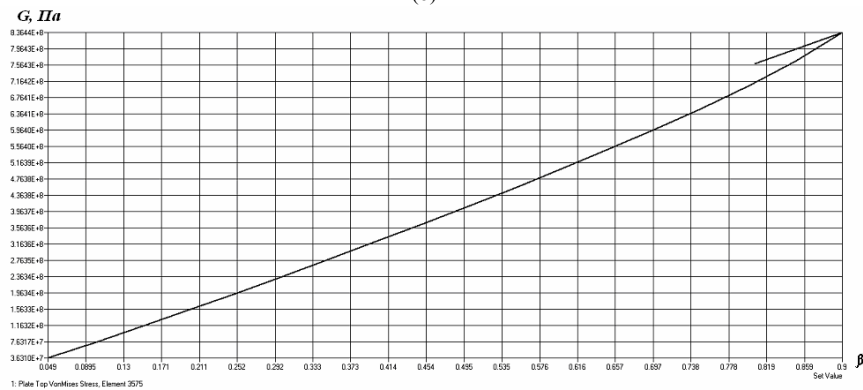
Видно, що статична поведінка ємності нелінійна. Оболонка з довжиною тріщин $\Delta l / l = [0,25; 0,47; 0,5]$ втрачає стійкість при параметрі граничного критичного навантаження $\beta = [0,95; 0,7; 0,9]$ відповідно. У разі $\Delta l / l < 0,25$ параметр $\beta > 0,95$. Як приклад, на рис. 3 представлено напружено-деформований стан ємності з тріщинами довжиною $\Delta l / l = [0,25(a); 0,47(b); 0,5(в)]$ при дії осьового стискаючого навантаження від ваги покрівлі і огорожі $P = 0,0044 P_{cr}$ [18].



(a)



(б)



(B)

Рис. 2

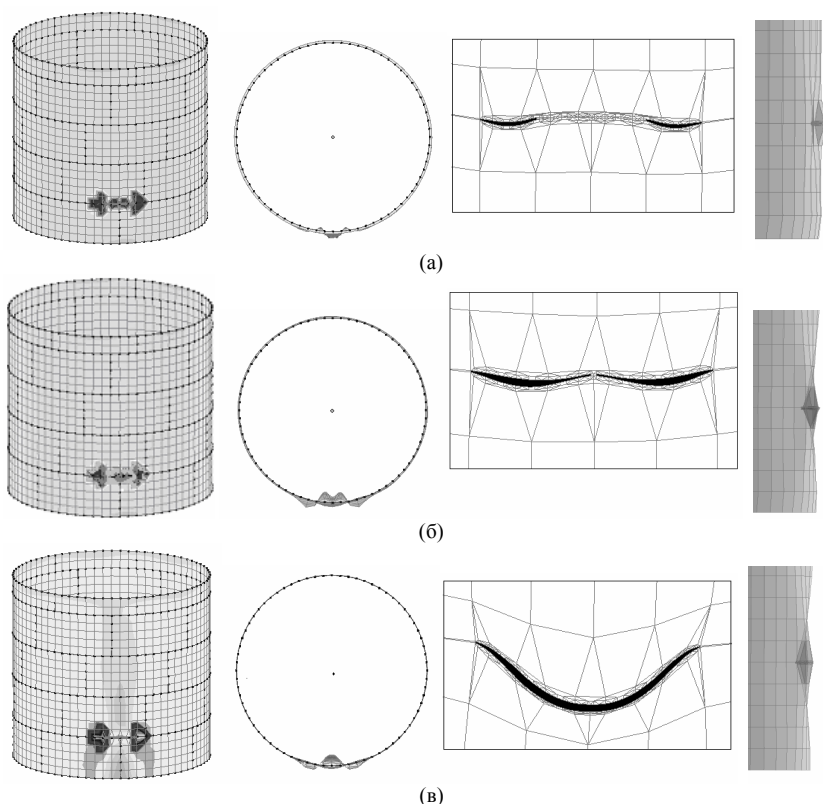


Рис. 3

Максимальні еквівалентні напруження спостерігалися в елементах стінки ємності, розташованих біля тріщин. Локальні деформації стінки у вигляді двох півхвиль в радіальному напрямку оболонки мали місце в місцях розташування тріщин. Максимальні вузлові переміщення уздовж твірної спостерігалися в вузлах верхнього поясу оболонки, розташованих над тріщинами. У табл. 1 представлені значення максимальних статичних характеристик ємності при статичній дії навантаження $P = 0,0044P_{cr}$.

Таблиця 1

Максимальні статичні характеристики	Відносна довжина тріщини, $\Delta l / l$					
	0	0,0625	0,125	0,25	0,47	0,5
Еквівалентні напруження, МПа	0,723	1,727	1,623	2,039	13,232	2,928
Вузлові переміщення: Радіальні (w) / вздовж твірної (z), мм	$\frac{0,00180}{0,00056}$	$\frac{0,00190}{0,00059}$	$\frac{0,00189}{0,00057}$	$\frac{0,00191}{0,00071}$	$\frac{0,00195}{0,00265}$	$\frac{0,00204}{0,00919}$

На рис. 4 у вигляді гістограм представлено вплив довжини двох наскрізних тріщин на еквівалентні напруження (а) і вузлові переміщення (б) (w – радіальні, z – уздовж твірної) при статичній дії навантаження $P = 0,0044P_{cr}$.

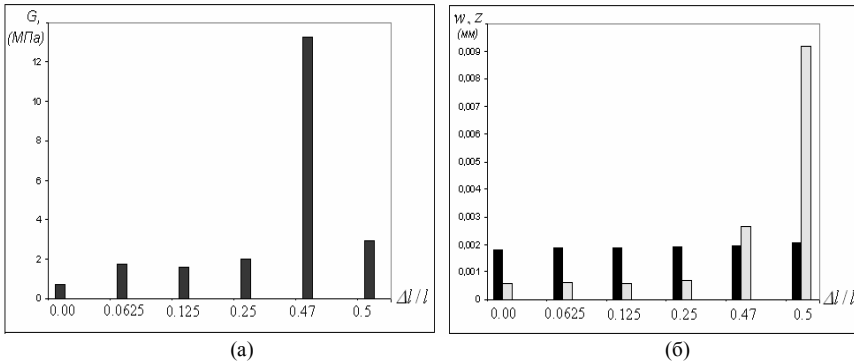


Рис. 4

Видно, що максимальне еквівалентне напруження в елементах моделі з ростом довжини тріщин збільшилося незначно ($< 3\%$), крім випадку мінімальної відстані (0,036 м) між двома тріщинами (13,2%). Збільшення довжини тріщин майже не вплинуло на максимальні значення вузлових радіальних переміщень (w). Уздовж твірної оболонки значення вузлових переміщень (z) значно збільшилися при довжині тріщин $\Delta l/l \geq 0,47$.

Другий етап досліджень. Розв'язано задачі на власні значення (2.4) і (2.5) методом Ланцоша. Визначено частоти і форми власних коливань ємності з урахуванням дефектів зварних швів різної довжини без і з урахуванням статичної дії осьового стискаючого докритичного навантаження $P = [0,0044; 0,5]P_{cr}$. П'ять нижчих частот власних коливань ємності (Гц) представлені в табл. 2.

Видно, що осьове стискаюче навантаження $P = 0,0044P_{cr}$ збільшує значення частот власних коливань, а дія навантаження $P = 0,5P_{cr}$ зменшує їх. Наявність тріщин і збільшення їх довжини у всіх постановках зменшує частоти власних коливань оболонки при конкретному значенні осьового навантаження.

У табл. 3 представлені максимальні відносні вузлові переміщення по відповідним формам власних коливань ємності з тріщинами різної довжини у вигляді дробу: в чисельнику – радіальні (w), в знаменнику – уздовж твірної (z).

Таблиця 2

№ частоти	Відносна довжина тріщини, $\Delta l / l$					
	0	0,0625	0,125	0,25	0,47	0,5
Без урахування навантаження $P = 0$						
1	13,91251	13,91242	13,91214	13,91110	13,90735	13,8021
2	13,91376	13,91373	13,91362	13,91341	13,90825	13,9016
3	14,06883	14,06877	14,06853	14,06738	14,06002	14,0045
4	14,07027	14,07018	14,06991	14,06897	14,06405	14,0573
5	14,70973	14,70968	14,70952	14,70893	14,70706	14,6849
При статичній дії осового навантаження $P = 0,0044P_{cr}$						
1	14,81299	14,81276	14,81205	14,80954	14,79596	14,62292
2	14,81405	14,81403	14,81387	14,81283	14,80202	14,78932
3	14,82872	14,82870	14,82865	14,82847	14,82789	14,82732
4	14,82917	14,82916	14,82913	14,82902	14,82860	14,82830
5	15,88430	15,88423	15,88402	15,88328	15,88086	15,81039
При статичній дії осового навантаження $P = 0,5P_{cr}$						
1	12,60079	12,60042	12,59910	12,59245	12,57492	12,31096
2	12,60461	12,60465	12,60506	12,60607	12,58525	12,57157
3	12,62862	12,62860	12,62835	12,62679	12,61617	12,59982
4	12,63017	12,63005	12,62972	12,62858	12,61902	12,60834
5	13,80560	13,80571	13,80507	13,80174	13,79161	13,72739

Таблиця 3

№ форми	Відносна довжина тріщини, $\Delta l / l$					
	0	0,0625	0,125	0,25	0,47	0,5
Без урахування навантаження $P = 0$						
1	<u>0,03840</u> 0,00056	<u>0,03812</u> 0,00056	<u>0,03819</u> 0,00055	<u>0,03948</u> 0,00057	<u>0,04037</u> 0,00059	<u>0,05061</u> 0,00099
2	<u>0,03848</u> 0,00054	<u>0,03818</u> 0,00055	<u>0,03805</u> 0,00055	<u>0,03833</u> 0,00056	<u>0,03957</u> 0,00057	<u>0,04214</u> 0,00061
3	<u>0,03812</u> 0,00064	<u>0,03932</u> 0,00065	<u>0,03868</u> 0,00065	<u>0,03882</u> 0,00064	<u>0,03940</u> 0,00066	<u>0,04666</u> 0,00080
4	<u>0,03861</u> 0,00065	<u>0,03889</u> 0,00065	<u>0,03926</u> 0,00065	<u>0,03818</u> 0,00064	<u>0,03922</u> 0,00066	<u>0,04075</u> 0,00069
5	<u>0,03862</u> 0,00046	<u>0,03862</u> 0,00046	<u>0,03862</u> 0,00046	<u>0,03869</u> 0,00046	<u>0,03869</u> 0,00047	<u>0,04063</u> 0,00055
При статичній дії осового навантаження $P = 0,0044P_{cr}$						
1	<u>0,03941</u> 0,00085	<u>0,03952</u> 0,00086	<u>0,03975</u> 0,00086	<u>0,04035</u> 0,00087	<u>0,04066</u> 0,00090	<u>0,04908</u> 0,00114
2	<u>0,03739</u> 0,00084	<u>0,03739</u> 0,00084	<u>0,03745</u> 0,00083	<u>0,03784</u> 0,00084	<u>0,04150</u> 0,00089	<u>0,04279</u> 0,00091
3	<u>0,03595</u> 0,00076	<u>0,03598</u> 0,00076	<u>0,03631</u> 0,00076	<u>0,03690</u> 0,00078	<u>0,03976</u> 0,00079	<u>0,03974</u> 0,00083

Продовження таблиці 3						
4	<u>0,03742</u> 0,00078	<u>0,03742</u> 0,00078	<u>0,03757</u> 0,00078	<u>0,03829</u> 0,00079	<u>0,03996</u> 0,00082	<u>0,03918</u> 0,00084
5	<u>0,03986</u> 0,00052	<u>0,02990</u> 0,00052	<u>0,02999</u> 0,00052	<u>0,03032</u> 0,00052	<u>0,03000</u> 0,00053	<u>0,03585</u> 0,00085
При статичній дії осового навантаження $P = 0,5P_{cr}$						
1	<u>0,03867</u> 0,00080	<u>0,03892</u> 0,00081	<u>0,03957</u> 0,00081	<u>0,04102</u> 0,00085	<u>0,04179</u> 0,00087	<u>0,04916</u> 0,00115
2	<u>0,03777</u> 0,00079	<u>0,03777</u> 0,00079	<u>0,03759</u> 0,00079	<u>0,03666</u> 0,00076	<u>0,04112</u> 0,00089	<u>0,03918</u> 0,00083
3	<u>0,03697</u> 0,00083	<u>0,03722</u> 0,00084	<u>0,03760</u> 0,00085	<u>0,03648</u> 0,00083	<u>0,03902</u> 0,00088	<u>0,04019</u> 0,00087
4	<u>0,03735</u> 0,00084	<u>0,03762</u> 0,00084	<u>0,03798</u> 0,00085	<u>0,03490</u> 0,00079	<u>0,03905</u> 0,00087	<u>0,03867</u> 0,00086
5	<u>0,03044</u> 0,00055	<u>0,03051</u> 0,00055	<u>0,03079</u> 0,00055	<u>0,03123</u> 0,00056	<u>0,03062</u> 0,00055	<u>0,03434</u> 0,00084

На рис. 5 представлена перша форма власних коливань ємності з тріщинами довжиною $\Delta l / l = [0,0625(\text{a}); 0,125(\text{б}); 0,25(\text{в}); 0,47(\text{г}); 0,59(\text{д})]$ при статичній дії осового стискаючого навантаження $P = [0(1); 0,0044(2); 0,5(3)]P_{cr}$.

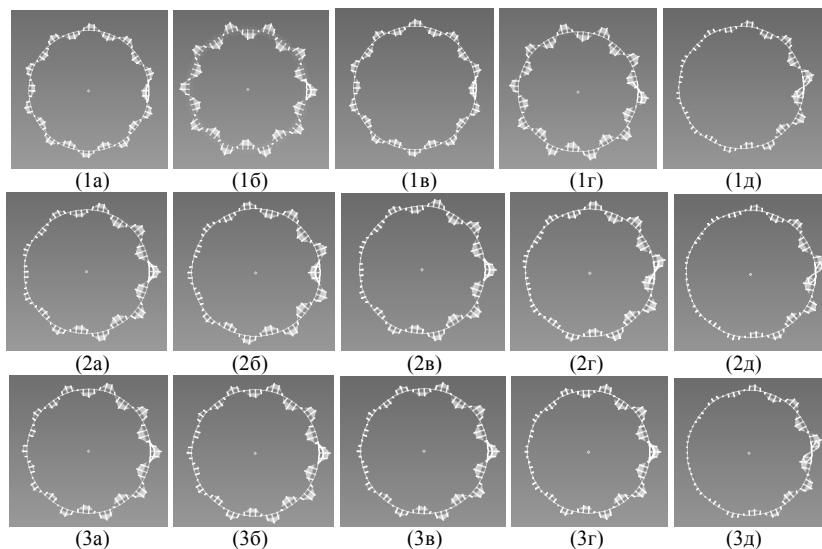


Рис. 5

Перша форма власна коливань ненавантаженої оболонки (рис. 5, (1)) з тріщинами довжиною $\Delta l / l \leq 0,47$ має десять півхвиль в радіальному

напрямку і збігається з випадком ємності без тріщин [18]. При утворенні однією суцільною тріщини ($\Delta l / l = 0,5$) для всіх випадків статичного осьового навантаження спостерігалася нерегулярне деформування стінки з локалізацією в місці розташування тріщини (рис. 5, д). В інших випадках статичного осьового навантаження і за всіх значень довжини тріщин в радіальному напрямку має місце нерегулярне деформування стінки. Уздовж твірної ємність деформувалася в вигляді однієї півхвилі. У місці розташування тріщин спостерігалися вм'ятини і випинання стінки, горизонтальний і незначний вертикальний зсув поверхонь стінки. Як приклад, на рис. 6 представлена деформація стінки ємності з тріщинами довжиною $\Delta l / l = [0,25(\text{а}); 0,47(\text{б}); 0,5(\text{в})]$ по першій формі власних коливань від статичного навантаження $P = 0,0044 P_{cr}$.

Зміна динамічних характеристик ємності ("+" збільшення, "-" зменшення) по першій формі власних коливань за рахунок збільшення довжини тріщин при фіксованому значенні осьового стискаючого навантаження представлено в табл. 4.

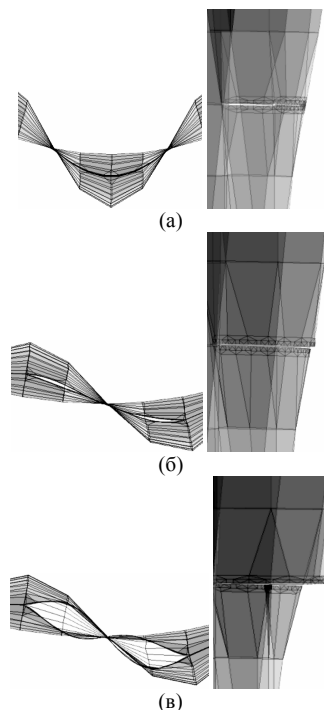


Рис. 6

Таблиця 4

Осьове навантаження	Відносна довжина тріщини $\Delta l / l$				
	0,0625	0,125	0,25	0,47	0,5
Перша частота власних коливань, %					
$P = 0$	-0,052	-0,054	-0,062	-0,0882	-0,845
$P = 0,0044 P_{cr}$	-0,002	-0,006	-0,023	-0,115	-1,283
$P = 0,5 P_{cr}$	-0,003	-0,013	-0,066	-0,205	-2,300
Максимальні відносні радіальні вузлові переміщення Δw , %					
$P = 0$	-0,729	-0,547	2,813	5,130	31,797
$P = 0,0044 P_{cr}$	2,630	2,917	3,516	5,078	5,8857
$P = 0,5 P_{cr}$	0,703	1,354	3,047	6,823	8,8287
Максимальні відносні переміщення вздовж твірної Δz , %					
$P = 0$	0	-1,786	1,786	5,357	76,786
$P = 0,0044 P_{cr}$	51,786	53,571	53,571	55,357	60,714
$P = 0,5 P_{cr}$	42,857	44,643	44,643	55,357	55,357

На рис. 7 представлені залежності першої частоти (а, б) власних коливань ємності і відповідних максимальних відносних вузлових переміщень (радіальних (в), уздовж твірної (г)) від збільшення довжини тріщин при статичній дії осьового стискаючого навантаження.

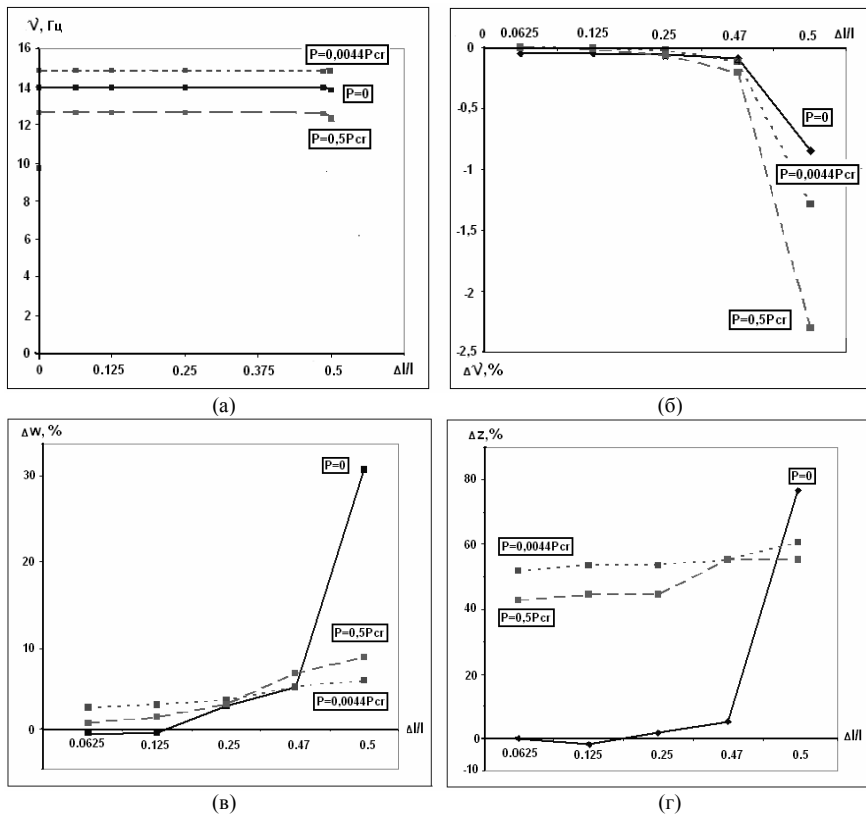


Рис. 7

Видно (рис. 7, а), що значення першої частоти власних коливань ємності при дії осьового стискаючого навантаження $P = 0,0044P_{cr}$ більше, ніж при дії навантаження $P = 0,5P_{cr}$ і відсутності навантаження ($P = 0$). Наявність тріщин і збільшення їх довжини у всіх постановках зменшує частоту власних коливань оболонки (рис. 7, б). Значення власної частоти оболонки з дефектами зварних швів довжиною $\Delta l / l \leq 0,47$ при всіх значеннях статичного осьового навантаження мало змінюються ($<0,21\%$), окрім випадку утворення однієї суцільної тріщини ($<2,3\%$). На рис. 7, в видно, що для ненавантаженої ємності ($P = 0$) зі збільшенням довжини тріщин ($\Delta l / l \leq 0,47$) радіальні відносні вузлові переміщення

по першій формі власних коливань збільшуються незначно, також як і переміщення уздовж твірної (рис. 7, г) ($< 6\%$). Але при утворенні однієї суцільної тріщини ($\Delta l / l = 0,5$) спостерігається значне ($< 80\%$) збільшення переміщень. Для навантаженої ємності ($P \leq 0,5P_{cr}$) по першій формі власних коливань значення радіальних вузлових переміщень збільшуються до 9% , переміщення уздовж твірної збільшуються значніше – до 61% .

Висновки

1. Комп'ютерне моделювання ємності в скінченноелементній постановці з урахуванням поясів з листів прокату, зварених "в стик", і розгляд дефектів зварних швів у вигляді наскрізних тріщин дозволило якісно оцінити їх вплив на статичну і динамічну поведінку оболонки.

2. Використання ефективних процедур сучасного програмного розрахункового комплексу дозволило проаналізувати вплив поширення дефектів зварних швів на такі важливі динамічні характеристики оболонки як частоти і форми власних коливань.

3. Результати дослідження показали, що наявність тріщин і збільшення їх довжини зменшують значення частот власних коливань ємності. Статична дія осевого стискаючого навантаження на тонку оболонку може, як зменшити, так і збільшити її жорсткість, тим самим змінити частоту і форму власних коливань. На думку авторів, урахування такого навантаження є доцільним в динамічних розрахунках тонких оболонок, особливо, при дії стохастичних навантажень (вітер, сейсміка і т.п.).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Афанасьев Н.Н. Статистическая теория усталостной прочности материалов. – Киев: Изд-во АН УССР, 1953. – 105 с.
2. Баженов В.А., Гуляр О.И., Пискунов С.О., Сахаров О.С. Напіваналітичний метод скінченних елементів в задачах руйнування просторових тіл: Монографія – К.: КНУБА, 2005. – 298 с.
3. Баженов В.А., Вабищевич М.О., Солодей И.И., Чепурная Е.А. О полуаналитическом методе конечных элементов в динамических задачах линейной механики разрушения//Прикладная механика. – 2018. – Т. 54, № 5. – С. 35-46.
4. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. – М.: Гостройиздат, 1961. – 202 с.
5. Григоренко А.Я., Борисенко М.Ю., Бойчук Е.В., Пригода А.П. Численное определение частот и форм свободных колебаний толстостенной цилиндрической оболочки //Прикладная механика. – 2018. – Т. 54, № 1. – С. 90-100.
6. Гузь А.Н. Неклассические проблемы механики разрушения: к 50-летию исследований (обзор). I. // Прикладная механика. – 2019. – 55, №2. – С. 8 - 72.
7. Куркин С.А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
8. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 328 с.
9. Орынкяк И. В. Прочность трубопроводов с дефектами. - К.: Наук. думка, 2012. – 445 с.
10. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках. АН УССР. Ин-т электросварки им. Э.О. Патона. Под ред. В.И. Труфякова.– Киев: Наукова думка, 1990.– 256 с.
11. Рудаков К.Н. FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. – К.: КПИ (2011), 317 с.
12. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. – М., 1963. – 636 с.

13. *Adams D.* Health Monitoring of Structural Materials and Components. Methods with Applications, John Wiley & Sons Ltd., 2007.
14. *Balageas D., Fritzen C.-P., Gemes A.* Structural Health Monitoring, John Wiley & Sons Ltd., 2006.
15. *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: Volume 46, Issue 4 (2014), Page 567-574.
16. *Bourao N.I., Luk'yanchenko O.O., Tsybulnik S.A., Shevchuk D.V.* Vibration Condition Monitoring of the Vertical Steel Tanks // Vibrations in Physical Systems Vol. 27 (2016), pp. 53-60.
17. *Bourao N., Rupich S., Lukianchenko O., Kostina O.* Monitoring of the Crack Propagation in Welded Joint of the Tank Using Multi-Class Recognition // Vibrations in Physical Systems (02.2018).
18. *Luk'yanchenko O.O., Kostina O.V., Bourao N.I., Kuz'ko O.V.* Investigation of Static and Dynamic Characteristics of Complex Thin-Walled Shell Structure with Cracks. – Strength of Materials: Volume 48, Issue 3 (2016), pp. 401-410.
19. *Shen T., Wan F., Song B., Wu Y.* Damage location and identification of the wing structure with Probabilistic Neural Network, Proc. of Prognostics and System Health Management Conf., IEEE Xplore Digital Library (2011).

REFERENCES

1. *Afanasiev N.N.* Statisticheskaya teoriya ustalostnoy prochnosti materialov (Statistical theory of fatigue strength of materials). - Kiev: Publishing house of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1953. – 105 p.
2. *Bazhenov V.A., Gulyar O.I., Piskunov S.O., Sakharov O.S.* Napivanaliticheskiy metod skinchennykh elementov v zadachakh ruinyannia prostorovykh til (The semi-analytical method of scanned elements in the problems of ruining spacious spaces): Monograph - Kiev: KNUBA, 2005. – 298 p.
3. *Bazhenov V.A., Vabishchevich M.O., Solodey I.I., Chepurnaya E.A.* O poluanaliticheskom metode konechnykh elementov v dinamicheskikh zadachakh lineynoy mehaniki razrusheniya (On the semi-analytical finite element method in dynamic problems of linear fracture mechanics) // Applied Mechanics. – 2018. – T. 54, No. 5. – S. 35-46.
4. *Bolotin V.V.* Statisticheskie metody v stroitel'noy mehanike (Statistical Methods in Structural Mechanics). – M.: Gostroyizdat, 1961. – 202 p.
5. *Grigorenko A.Ya., Borisenko M.Yu., Boychuk E.V., Prigoda A.P.* Chislennoe opredelenie chastot i form svobodnykh kolebaniy tolstostennoy tsilindricheskoy obolochki (Numerical determination of frequencies and forms of free vibrations of a thick-walled cylindrical shell) // Prikladnaya mehanika. – 2018. – T. 54, # 1. – S. 90-100.
6. *Guz A.N.* Neklassicheskie problemy mehaniki razrusheniya: k 50-letiyu issledovaniy (obzor). I. (Non-classical problems of fracture mechanics: to the 50th anniversary of research (review)) // Prikladnaya mehanika. – 2019. – 55, #2. – S. 8-72.
7. *Kurkin S.A.* Prochnost svarnykh tonkostennykh sosudov, rabotayuschiy pod davleniem. (Strength of welded thin-walled pressure vessels) – M.: Mashinostroenie, 1976. – 184 s.
8. *Matvienko Yu.G.* Modeli i kriterii mehaniki razrusheniya (Fracture Mechanics Models and Criteria). – M.: FIZMATLIT, 2006. – 328 s.
9. *Orynyak I. V.* Prochnost truboprovodov s defektami (Strength of pipelines with defects). – K.: Nauk. dumka, 2012. – 445 s.
10. Prochnost svarnykh soedineniy pri peremennykh nagruzkah. AN USSR. In-t elektrosvar'ki im. E.O. Patona. Pod red. V.I. Trufiyakova. (Strength of welded joints at variable loads. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Institute of Electric Welding named after E.O. Paton. Ed. V.I. Trufiyakova) – Kiev: Naukova dumka, 1990. – 256 s.
11. *Rudakov K.N.* FEMAP 10.2.0. Geometricheskoe i konechno-elementnoe modelirovanie konstruksiy. (Geometric and finite element modeling of structures) – K.: KPI (2011), 317 c.
12. *Timoshenko S.P., Voynovskiy-Kriger S.* Plastinki i obolochki (Plates and shells). – M., 1963. – 636 s.
13. *Adams D.* Health Monitoring of Structural Materials and Components. Methods with Applications, John Wiley & Sons Ltd., 2007.

14. *Balageas D., Fritzen C.-P., Gemes A.* Structural Health Monitoring, John Wiley & Sons Ltd., 2006.
15. *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: Volume 46, Issue 4 (2014), Page 567-574.
16. *Bourauou N.I., Luk'yanchenko O.O., Tsybulnik S.A., Shevchuk D.V.* Vibration Condition Monitoring of the Vertical Steel Tanks // Vibrations in Physical Systems Vol. 27 (2016), pp. 53-60.
17. *Bourauou N., Rupich S., Lukianchenko O., Kostina O.* Monitoring of the Crack Propagation in Welded Joint of the Tank Using Multi-Class Recognition // Vibrations in Physical Systems (02.2018).
18. *Luk'yanchenko O.O., Kostina O.V., Bourauou N.I., Kuz'ko O.V.* Investigation of Static and Dynamic Characteristics of Complex Thin-Walled Shell Structure with Cracks. – Strength of Materials: Volume 48, Issue 3 (2016), pp. 401-410.
19. *Shen T., Wan F., Song B., Wu Y.* Damage location and identification of the wing structure with Probabilistic Neural Network, Proc. of Prognostics and System Health Management Conf., IEEE Xplore Digital Library (2011).

Стаття надійшла 24.09.2021

Lukianchenko O.O., Bourauou N.I., Gerashchenko O.V., Kostina O.V.

NATURAL FREQUENCIES AND VIBRATION MODES OF TANK'S PROTECTIVE CAPACITANCE WITH WELD DEFECTS UNDER AXIAL STATIC LOAD

The natural frequencies and vibration modes of tank's protective capacitance with welded joints defects under axial static load are determined in order to construct a diagnostic model and monitor of the welded joints defects propagation. Computer simulation of capacitance dynamic behavior using the computer finite element analysis system NASTRAN was performed. The design model in the form of a cylindrical thin-walled shell with allowance for belts from weld rolled sheet was built. Weld defects as two through horizontal cracks located in the welds between the first and second shell belts were presented. The crack width was equaled to the rolled sheets diameter. For assessing the effect of crack propagation on the shell dynamic characteristics the crack length increased until a single continuous crack. The defects in the form of through cracks allowed to generalize different weld defects types and predict the shell critical state. Determination of capacitance natural frequencies and vibration modes under axial static load was performed in two stages. At the first stage, the capacitance stress-strain state in a nonlinear formulation was investigated and a total stiffness matrix (linear and geometric) was formed. The nonlinear static problem as a finite element approximation of the Lagrange possible displacements principle was formulated. The Newton-Raphson stepwise loading method (Nonlinear Static) was used. The natural frequencies and vibration modes were determined by the Lanczos method (Param Modes) on solving the eigenvalue problem. The effect of weld defects and axial static action on the capacitance dynamic characteristics was evaluated. The results showed that the presence of cracks and an their length increase reduced the values of the natural frequencies. The static action of an axial compressive load on a thin shell wall can both reduce and increase its rigidity, thereby changing its natural frequency and vibration modes. According to the authors, consideration of such a load should be present in the dynamic calculations of thin shells, especially under stochastic loads (wind, seismic, etc.).

Keywords: thin shell, weld defect, finite element method, nonlinear behavior, natural frequency and vibration modes, axial static load.

Лукьянченко О.А., Бурау Н.И., Геращенко О.В., Костина Е.В.

ЧАСТОТЫ И ФОРМЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЗАЩИТНОЙ ЕМКОСТИ РЕЗЕРВУАРА С ДЕФЕКТАМИ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ДЕЙСТВИИ ОСЕВОЙ НАГРУЗКИ

Определены частоты и формы собственных колебаний защитной емкости резервуара при статическом действии осевой сжимающей нагрузки с целью построения диагностической модели и мониторинга распространения трещин в сварных швах ее стенки. Компьютерное моделирование динамического поведения емкости выполнено с помощью вычислительного комплекса конечноэлементного анализа NASTRAN. Расчетная

модель в виде цилиндрической тонкостенной оболочки построена с учетом поясов из листов проката, сваренных "встык". Дефекты сварных швов представлены в виде двух сквозных горизонтальных трещин, расположенных в сварных швах между первым и вторым поясами. Ширина раскрытия трещин принята равной диаметру сварного шва между прокатными листами стенки емкости. Для оценки влияния распространения трещин на динамические характеристики емкости их длина принималась одинаковой и увеличивалась до образования одной сплошной трещины. Модель дефектов в виде сквозных трещин позволила обобщить разные виды дефектов сварных швов и прогнозировать состояние оболочки в предельном критическом состоянии. Определение частот и форм собственных колебаний защитной емкости при статическом действии осевой нагрузки выполнено в два этапа. На первом этапе исследовано напряженно-деформированное состояние емкости в нелинейной постановке и сформирована суммарная матрица жесткости (линейная и геометрическая). На втором этапе определены частоты и формы собственных колебаний емкости с учетом ее состояния от статического действия осевой нагрузки. Нелинейная задача статики сформулирована в виде конечноэлементной аппроксимации принципа возможных перемещений Лагранжа и решена с помощью метода пошагового нагружения Ньютона-Рафсона (Nonlinear Static). Частоты и формы собственных колебаний нагруженной емкости определены при решении задачи на собственные значения методом Ланцоша (Param Modes). Оценено влияние дефектов сварных швов стенки и статического действия осевой сжимающей нагрузки на динамические характеристики защитной емкости. Результаты исследования показали, что наличие трещин и увеличение их длины уменьшают значения частот собственных колебаний емкости. Статическое действие осевой сжимающей нагрузки на тонкую оболочку может, как уменьшить, так и увеличить ее жесткость, тем самым изменить частоту и форму собственных колебаний. По мнению авторов, учет такой нагрузки должен присутствовать в динамических расчетах тонких оболочек, особенно, при действии стохастических нагрузок (ветер, сейсмика и т.п.).

Ключевые слова: тонкая оболочка, дефект сварного шва, метод конечных элементов, нелинейное поведение, частота и форма собственных колебаний, осевая статическая нагрузка.

УДК 539.3

Лук'яненко О.О., Бурау Н.І., Геращенко О.В., Костіна О.В. Частоти і форми власних коливань захисної ємності 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.

Визначено частоти і форми власних коливань захисної ємності резервуара при статичній дії осової тискаючого навантаження з метою побудови діагностичної моделі і моніторингу поширення тріщин в зварних швах її стінки.

Табл. 4. Іл. 7. Бібліогр. 19 назв.

UDC 539.3

Lukianchenko O.O., Bouraou N.I., Gerashchenko O.V., Kostina O.V. Natural frequencies and vibration modes of tank's protective capacitance with weld defects under axial static load / Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA, 2021. – Issue 107. – P. 103-119.

The natural frequencies and vibration modes of tank's protective capacitance with welded joints defects under axial static load are determined in order to construct a diagnostic model and monitor of the welded joints defects propagation.

Табл. 4. Fig. 7. Ref. 19.

УДК 539.3

Лукьяненко О.А., Бурау Н.И., Геращенко О.В., Костина Е.В. Частоты и формы собственных колебаний защитной емкости резервуара с дефектами сварных швов при статическом действии осевой нагрузки / Соппротивление материалов и теория сооружений: науч.-тех. сборн. – К.: КНУСА, 2021. – Вип. 107. – С. 103-119.

Определены частоты и формы собственных колебаний защитной емкости резервуара при статическом действии осевой сжимающей нагрузки с целью построения диагностической модели и мониторинга распространения трещин в сварных швах ее стенки.

Табл. 4. Ил. 7. Библиогр. 19 назв.

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

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

Робочий тел.: +38(044) 241-54-20.

Мобільний тел.: +38(095) 727-18-25.

E-mail: lukianch0907@meta.ua

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

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, БУРАУ Надія Іванівна.

Адреса робоча: 03056 Україна, м. Київ, Перемоги 37, Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, БУРАУ Надії Іванівні.

Робочий тел.: +38(044) 204-85-02.

Мобільний тел.: +38(097) 332-42-47.

E-mail: nbureau@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6848-816X>

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

Робочий тел.: +38(044)241-54-20

Мобільний 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, старший науковий співробітник НДІ будівельної механіки КНУБА, КОСТІНА Олена Володимирівна.

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

Робочий тел.: +38(044) 241-54-20.

Мобільний тел.: +38(098) 275-19-93.

E-mail: kl0867@meta.ua

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