

УДК 539.3

МОДАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗАХИСНОЇ ЄМНОСТІ РЕЗЕРВУАРА З УРАХУВАННЯМ ПОСЛІДОВНОГО ВИНИКНЕННЯ ДЕФЕКТІВ У ЗВАРНИХ ШВАХ СТІНКИ

О.О. Лук'янченко¹,
канд. техн. наук

Н.І. Бурау²,
доктор техн. наук

О.В. Костіна¹,
канд. техн. наук

О.В. Герашенко¹,
канд. техн. наук

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

²Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, Київ

DOI: 10.32347/2410-2547.2019.102.159-170

Модальний аналіз захисної ємності паливного резервуара з урахуванням дефектів зварних швів стінки виконано за допомогою комп'ютерного моделювання та обчислювальних процедур програмного комплексу скінченноелементного аналізу. Дефекти зварних швів представлені у вигляді кризних тріщин одної вертикальної та двох горизонтальних, які розташовані в різних поясах оболонки. Проблема прогнозування розповсюдження дефектів вирішена за рахунок моделювання їх послідовного виникнення, збільшення їх довжин і урахування статичного вертикального навантаження. Застосовано модифікований метод Ньютона-Рафсона до розв'язання нелінійної задачі статичної та метод Ланцоша до модального аналізу оболонки. Урахування статичного вертикального навантаження в дослідженнях власних частот і форм коливань ємності дозволяє виявляти дефекти зварних швів мінімальної довжини.

Ключові слова: модальний аналіз, метод скінченних елементів, вільні коливання, нелінійна поведінка, тонкостінна циліндрична оболонка, дефект зварного шва.

Вступ. На українській антарктичній станції Академік Вернадський розташовані паливний резервуар з захисною ємністю, які експлуатуються в складних критичних умовах [1]. Проблема забезпечення надійної та безаварійної їх експлуатації є актуальною, бо аварії на них важко заздалегідь попередити і вчасно усунути. Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут” розробив автоматизовану систему раннього попередження можливості витоку палива [2]. Для вібраційного моніторингу технічного стану складної оболонкової конструкції виконано її комп'ютерне і фізичне моделювання. Дана оцінка конструкційної безпеки резервуару і захисної ємності при дії експлуатаційних навантажень виконана з рекомендаціями до їх подальшої експлуатації. Авторами досліджено напружено-деформований стан захисної ємності з дефектами зварних швів у вигляді кризних тріщин при дії вертикального статичного навантаження. [3-6]. Для моніторингу розповсюдження тріщин в зварних швах стінок оболонок на теперішній час розробляється діагностична модель з використанням класифікатора багатокласового розпізнавання на основі імовірнісних нейронних мереж.

Прогнозування зміни власних частот і форм коливань захисної ємності за рахунок виникнення дефектів зварних швів стінки, зміни їх кількості та місця розташування залишається актуальною задачею. Особливо, це важливо для проведення моніторингу розповсюдження тріщин в стінці захисної ємності з урахуванням експлуатаційних навантажень.

Побудова скінченноелементної моделі захисної ємності з дефектами зварних швів стінки. Захисна ємність є тонкостінною циліндричною оболонкою діаметром 6,96 м і висотою 6,58 м. Стінка оболонки зварена з листів прокату товщиною 5 мм, які виготовлено зі сталі СтЗпс2 (ГОСТ 14637) з відповідними механічними характеристиками: густина 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. За допомогою обчислювального комплексу NASTRAN [7] побудована скінченноелементна модель ємності. Стінку оболонки представлено у вигляді поясів, що складаються з поверхонь (тіл), розміри яких відповідають листам прокату. При цьому враховано рекомендації розробників NASTRAN до моделювання зварних швів „встик”. Кожна поверхня змодельована у вигляді сукупності чотирьохкутних плоских скінченних елементів з шістьма степенями вільності у вузлі типу Plate (рис. 1). Дефекти зварних швів стінки ємності представлені у вигляді однієї вертикальної крізної тріщини в першому поясі (d1) та двох горизонтальних крізних тріщин: між першим і другим поясами (d2), між другим і третім поясами ємності (d3).

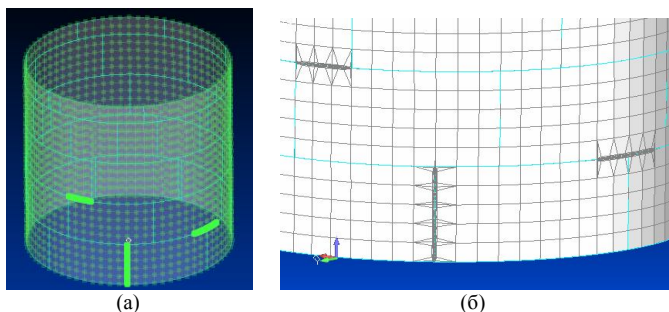


Рис. 1. Модель захисної ємності з дефектами зварних швів стінки

Тріщини в зварних швах з’являються послідовно: d1, d2 та d3. Ширина розкриття тріщин дорівнює 5 мм, що відповідає діаметру зварного шва між прокатними листами стінки оболонки. Довжина тріщин є змінною і прийнята відносною до довжини вертикального зварного шва ($l_1=1,5 \text{ м}$). Моделі крізних тріщини містять трикутні і чотирьохкутні плоскі скінченні елементи з шістьма степенями вільності у вузлі типу Plate (рис. 1 (б)).

Граничні умови приймаються згідно [2]: вузли нижньої кромки ємності жорстко закріплені, на вузли верхньої кромки введені обмеження вздовж радіусу та твірної оболонки. Загальна кількість двомірних плоских скінченних елементів моделі складає 5003, кількість вузлів – 4027. Вертикальне навантаження від ваги покрівлі захисної ємності та огорожі моделюється у вигляді зосереджених сил, які прикладаються до вузлів

верхньої кромки оболонки з граничним розрахунковим значенням $P_{gr} = 897,78$ Н на один вузол моделі [8].

Модальний аналіз захисної ємності з урахуванням послідовного виникнення дефектів у зварних швах стінки. Модальний аналіз оболонки виконано за допомогою розв'язання задачі на власні значення методом Ланцоша (Normal Modes), яке реалізовано в комплексі NASTRAN. Визначено динамічні характеристики захисної ємності без дефектів: перші п'ять власних частот коливань мають значення [13,9196; 13,9231; 14,0741; 14,0778; 14,7183] Гц; відносні максимальні переміщення, які відповідають першим п'яти власним формам коливань ємності без дефектів, мають значення [0,02897; 0,02963; 0,02860; 0,02875; 0,02833]. Значення перших п'яти власних частот і відповідні максимальні відносні переміщення вузлів по власних формах коливань ємності при послідовному виникненні кризних тріщин довжиною $\Delta l/l_1 = [0,1; 0,2; 0,5]$ представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Власні частоти і форми коливань ємності з дефектами зварних швів

	№ форми	d1	d1+d2	d1+d2+d3	
		Відносна довжина тріщини $\Delta l/l_1 = 0,1$			
Власні частоти коливань (Гц)	1	13,9159	13,9157	13,9147	
	2	13,9175	13,9174	13,9166	
	3	14,0711	14,0710	14,0693	
	4	14,0725	14,0722	14,0717	
	5	14,7150	14,7149	14,7134	
	Відносна довжина тріщини $\Delta l/l_1 = 0,2$				
	1	13,9155	13,9146	13,9085	
	2	13,9172	13,9169	13,9154	
	3	14,0703	14,0699	14,0617	
	4	14,0723	14,0712	14,0707	
	5	14,7146	14,7142	14,7083	
	Відносна довжина тріщини $\Delta l/l_1 = 0,5$				
	1	13,9064	13,8963	13,8085	
	2	13,9159	13,9104	13,9009	
	3	14,0583	14,0537	14,0056	
4	14,0711	14,0561	14,0459		
5	14,7128	14,7117	14,6786		
Відносна довжина тріщини $\Delta l/l_1 = 0,1$					
Максимальні відносні переміщення вузлів моделі по власних формах	1	0,02920	0,02916	0,02913	
	2	0,02894	0,02892	0,02893	
	3	0,02845	0,02823	0,02816	
	4	0,02857	0,02842	0,02814	
	5	0,02817	0,02817	0,02816	
	Відносна довжина тріщини $\Delta l/l_1 = 0,2$				
	1	0,02927	0,02946	0,02960	
	2	0,02894	0,02898	0,02930	
	3	0,02866	0,02907	0,02809	
	4	0,02830	0,02890	0,02758	
	5	0,02818	0,02818	0,02813	
	Відносна довжина тріщини $\Delta l/l_1 = 0,5$				
	1	0,03068	0,03197	0,04527	
	2	0,02886	0,03079	0,03201	
	3	0,03029	0,02972	0,03505	
4	0,02892	0,03147	0,03037		
5	0,02835	0,02918	0,03096		

Видно, що в захисній ємності при послідовному виникненні тріщин збільшення їх довжин мало впливає на значення власних частот коливань, а максимальні відносні переміщення вузлів моделі значно зростають у випадку наявності одразу двох $d1+d2$ і трьох тріщин $d1+d2+d3$ довжиною $\Delta/l_1=0,5$. Як приклад, на рис. 2 представлена перша форма власних коливань оболонки при послідовному виникненню крізних тріщин довжиною $\Delta/l_1=0,5$. В радіальному напрямку мають місце регулярні (циклічні) деформації у вигляді 10 півхвиль в усіх випадках, крім наявності трьох тріщин $d1+d2+d3$ довжиною $\Delta/l_1=0,5$, коли спостерігається нерегулярна деформація стінки оболонки (рис. 2 (1в)). По першій формі коливань в меридіанному напрямку у всіх випадках спостерігається одна півхвиля.

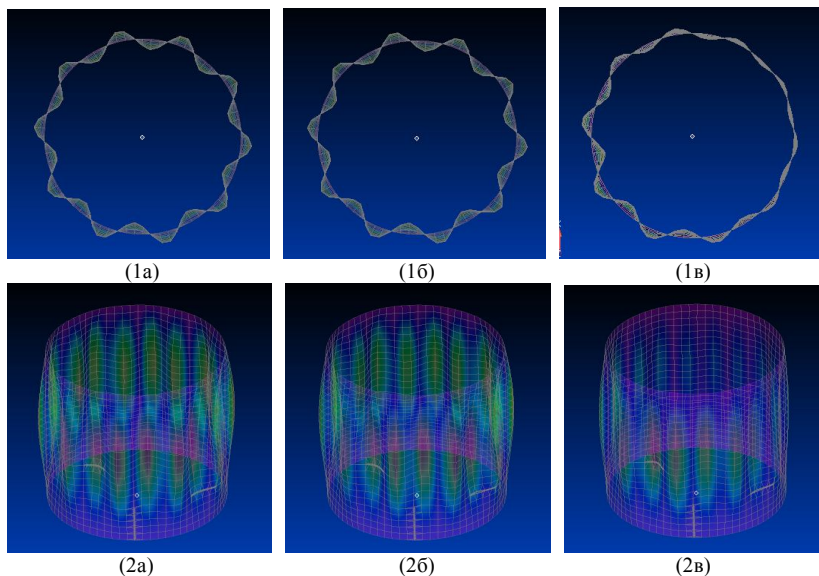


Рис. 2. Перша власна форма коливань ємності в радіальному (1) та меридіанному (2) напрямках при послідовному виникненні тріщин $d1$ (а), $d1+d2$ (б), $d1+d2+d3$ (в) довжиною $\Delta/l_1= 0,5$

Вплив статичної дії вертикального навантаження на власні частоти і форми коливань ємності з дефектами зварних швів. Для визначення власних частот і форм коливань захисної ємності при дії вертикального стискаючого навантаження від ваги покрівлі та огорожі $P=P_{gr}$ розв'язана нелінійна задача статички (Nonlinear Static). Застосовано модифікований метод Ньютона-Рафсона. Враховано послідовне виникнення трьох тріщин довжиною $\Delta/l_1=[0,1;0,2;0,5]$. Задача на власні значення навантаженої ємності (Param Modes) розв'язана за допомогою метода Ланцоша. В табл. 2 представлені перші п'ять власних частот коливань і максимальні відносні переміщення вузлів моделі по відповідним власним формам коливань ємності з дефектами зварних швів різної довжини з урахуванням навантаження від ваги покрівлі з огорожею.

Таблиця 2

Власні частоти і форми коливань навантаженої ємності з дефектами зварних швів

№ форми	d1	d1+d2	d1+d2+d3	
	Відносна довжина тріщини $\Delta/l_1=0,1$			
Власні частоти коливань (Гц)	1	14,8116	14,8114	14,8095
	2	14,8153	14,8149	14,8147
	3	14,8304	14,8304	14,8290
	4	14,8312	14,8311	14,8310
	5	15,8871	15,8870	15,8858
	Відносна довжина тріщини $\Delta/l_1=0,2$			
	1	14,8107	14,8090	14,7979
	2	14,8148	14,8139	14,8136
	3	14,8301	14,8300	14,8255
	4	14,8310	14,8309	14,8305
	5	15,8865	15,8862	15,8801
	Відносна довжина тріщини $\Delta/l_1=0,5$			
	1	14,7911	14,7769	14,6440
	2	14,8128	14,7911	14,7710
	3	14,8283	14,8274	14,8203
4	14,8300	14,8297	14,8240	
5	15,8833	15,8773	15,8245	
Відносна довжина тріщини $\Delta/l_1=0,1$				
Максимальні відносні переміщення вузлів моделі по власних формах коливань	1	0,03915	0,03949	0,03935
	2	0,03724	0,03760	0,03798
	3	0,03717	0,03731	0,03756
	4	0,03899	0,03904	0,03910
	5	0,03101	0,03102	0,03091
	Відносна довжина тріщини $\Delta/l_1=0,2$			
	1	0,03882	0,03988	0,03969
	2	0,03707	0,03815	0,03823
	3	0,03706	0,03733	0,03862
	4	0,03935	0,03956	0,03957
	5	0,03097	0,03106	0,03091
	Відносна довжина тріщини $\Delta/l_1=0,5$			
	1	0,04150	0,04163	0,04198
	2	0,03791	0,04003	0,04066
	3	0,03853	0,04029	0,03863
4	0,03957	0,03957	0,04056	
5	0,03149	0,03265	0,03990	

Видно, що при послідовному виникненні тріщин спостерігається незначна зміна значень власних частот коливань, але вона є більшою, ніж без урахування навантаження (табл. 1). Максимальні відносні переміщення вузлів моделі по власних формах коливань зростають у всіх випадках наявності тріщин довжиною, особливо при $\Delta/l_1=0,5$. Як приклад, на рис. 3 представлена перша власна форма коливань захисної ємності при дії вертикального навантаження від ваги покрівлі з огорожею при послідовному виникненні тріщин довжиною $\Delta/l_1=0,5$.

Бачимо, що вертикальне навантаження змінює власні форми коливань ємності, які отримано без урахування навантаження (рис. 2). При послідовному виникненні тріщин в навантаженій оболонці по першій формі власних коливань у всіх випадках спостерігаються нерегулярні

деформації стінки в радіальному напрямку. Одна півхвиля має місце в меридіанному напрямку.

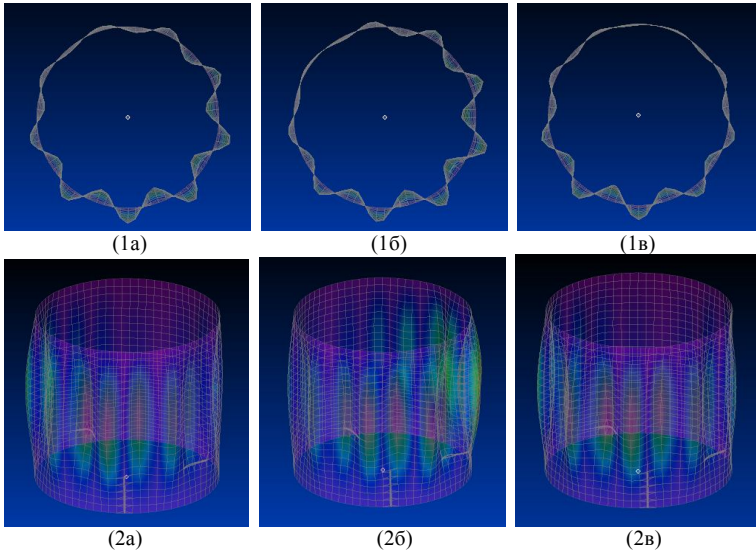


Рис. 3. Перша власна форма коливань ємності в радіальному (1) та меридіанному (2) напрямках при послідовному виникненні тріщин d1(а), d1+d2(б), d1+d2+d3(в) довжиною $\Delta/l_1=0,5$ при дії вертикального навантаження P_{gr}

Оцінка впливу послідовного виникнення дефектів зварних швів без і з урахуванням навантаження в дослідженні власних частот і форм коливань ємності. Значення зміни (%) власних частот коливань та максимальних відносних вузлових переміщень, які відповідають власним формам коливань ненавантаженої ємності без дефектів, за рахунок послідовного виникнення крізних тріщин d1, d2, d3 довжиною $\Delta/l_1=[0,1;0,2;0,5]$ та дії вертикального навантаження від ваги покрівлі та дії вертикального навантаження $P=P_{gr}$ відповідно представлено в табл. 3, 4 і на рис. 4, 5.

Таблиця 3

Зміна власних частот коливань ємності за рахунок послідовного виникнення дефектів зварних швів стінки та дії навантаження (%)

	№ форми	d1	d1+d2	d1+d2+d3	
		Відносна довжина тріщини $\Delta/l_1=0,1$			
Без урахування вертикального навантаження	1	-0,027	-0,028	-0,035	
	2	-0,040	-0,041	-0,047	
	3	-0,021	-0,022	-0,034	
	4	-0,038	-0,040	-0,043	
	5	-0,022	-0,023	-0,033	
	Відносна довжина тріщини $\Delta/l_1=0,2$				
	1	-0,029	-0,036	-0,080	
	2	-0,042	-0,045	-0,055	
	3	-0,027	-0,030	-0,088	
	4	-0,039	-0,047	-0,050	
5	-0,025	-0,028	-0,068		

		Відносна довжина тріщини $\Delta l/l_1=0,5$			
1		-0,095	-0,167	-0,798	
2		-0,052	-0,091	-0,159	
3		-0,112	-0,145	-0,487	
4		-0,048	-0,154	-0,227	
5		-0,037	-0,045	-0,270	
		Відносна довжина тріщини $\Delta l/l_1=0,1$			
3 ураховуванням вертикального навантаження $P=P_{gr}$	1	6,408	6,407	6,393	
	2	6,408	6,405	6,404	
	3	5,374	5,374	5,364	
	4	5,352	5,351	5,350	
	5	7,941	7,940	7,932	
			Відносна довжина тріщини $\Delta l/l_1=0,2$		
	1	6,402	6,390	6,310	
	2	6,404	6,398	6,396	
	3	5,372	5,371	5,339	
	4	5,350	5,350	5,347	
	5	7,937	7,935	7,894	
			Відносна довжина тріщини $\Delta l/l_1=0,5$		
	1	6,261	6,159	5,204	
	2	6,390	6,234	6,090	
	3	5,359	5,352	5,302	
4	5,343	5,341	5,301		
5	7,915	7,875	7,516		

„+” збільшення значення, „-” зменшення значення

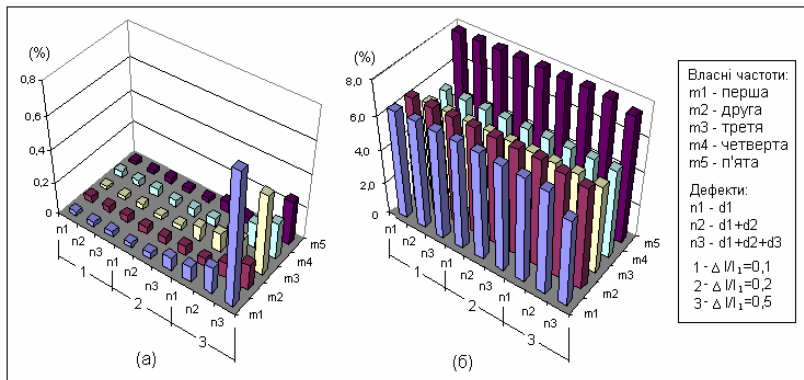


Рис. 4. Зміна перших п'яти власних частот коливань ємності за рахунок послідовного виникнення дефектів у зварних швах стінки: (а) $P=0$, (б) $P=P_{gr}$

На рис. 4 (а) бачимо, що вплив послідовного виникнення дефектів у зварних швах стінки ненавантаженої ємності на значення власних частот коливань є максимальним при довжині дефектів $\Delta l/l_1=0,5$, але незначним (1%). Чутливими є перша, третя та п'ята частоти коливань. Дія статичного вертикального навантаження від ваги покрівлі та огорожі (рис. 4 (б)) збільшує значення власних частот коливань ємності (<8%). Але збільшення кількості крізних тріщин у зварних швах та їх довжин зменшує значення власних частот коливань ємності (>1%). Максимальний вплив спостерігається на значення першої, другої та п'ятої власної частоти коливань оболонки.

Таблиця 4

Зміна максимальних відносних переміщень по власних формах коливань ємності за рахунок послідовного виникнення дефектів та дії навантаження (%)

№ форми	d1	d1+d2	d1+d2+d3
	Відносна довжина тріщини $\Delta/l_1=0,1$		
1	-0,794	0,656	0,552
2	-2,329	-2,396	-2,419
3	-0,524	-1,294	-1,538
4	-0,626	-1,148	-2,122
5	-0,565	-0,565	-0,600
Відносна довжина тріщини $\Delta/l_1=0,2$			
1	1,036	1,691	2,175
2	-2,386	-2,247	-1,140
3	0,210	1,643	-1,783
4	-1,565	0,522	-4,070
5	-0,529	-0,529	-0,706
Відносна довжина тріщини $\Delta/l_1=0,5$			
1	5,903	10,356	56,265
2	-2,657	3,959	8,247
3	5,909	3,916	22,552
4	0,591	9,461	5,635
5	0,071	3,000	9,283
Відносна довжина тріщини $\Delta/l_1=0,1$			
1	35,140	36,313	35,830
2	30,073	31,331	32,658
3	29,965	30,455	31,329
4	35,617	35,791	36,000
5	9,460	9,495	9,107
Відносна довжина тріщини $\Delta/l_1=0,2$			
1	34,001	37,660	37,004
2	29,480	33,252	33,531
3	29,580	30,524	35,035
4	36,870	37,600	37,635
5	9,319	9,636	9,107
Відносна довжина тріщини $\Delta/l_1=0,5$			
1	43,252	43,700	44,909
2	32,414	39,818	42,019
3	34,720	40,874	35,070
4	37,635	37,635	41,078
5	11,154	15,249	40,840

„+“ збільшення значення, „-“ зменшення значення

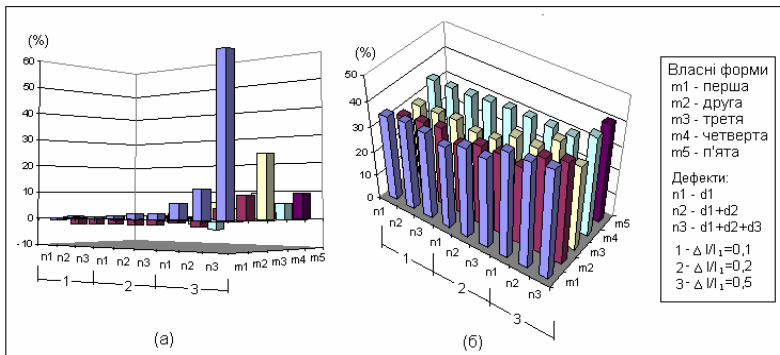


Рис. 5. Зміна максимальних відносних переміщень по перших п'ятих власних формах коливань ємності за рахунок послідовного виникнення дефектів у зварних швах стінки: (a) $P=0$, (б) $P=P_{gr}$

Порівняльний аналіз засвідчив, що максимальні відносні вузлові переміщення по відповідних власних формах коливань за рахунок появи дефектів у зварних швах стінці ненавантаженої ємності (рис. 5 (а)) зменшуються (<5%) і значно збільшуються лише при наявності трьох дефектів $d1+d2+d3$ довжиною $\Delta/l_1=0,5$ (<57%). Особливо, цей вплив спостерігається на першу, третю та п'яту форми власних коливань. При дії статичного вертикального навантаження (рис. 5 (б)) значне збільшення максимальних вузлових переміщень по власних формах коливань простежується для всіх довжин і кількостей дефектів зварних швів (<45%), що важливо для їх виявлення.

Висновок. Комп'ютерне моделювання захисної ємності та обчислювальні процедури програмного комплексу скінченноелементного аналізу дало змогу виконати модальний аналіз оболонки з урахуванням дефектів зварних швів. Проблема прогнозування розповсюдження дефектів зварних швів в стінці ємності може бути вирішена за рахунок моделювання послідовного виникнення крізних тріщин, збільшення їх кількості та довжин. Урахування дії вертикального навантаження при дослідженні власних частот і форм коливань ємності дає змогу виявляти дефекти зварних швів одразу при їх виникненні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Протокол про охорону навколишнього середовища до Договору про Антарктику (Мадрид, 4 жовтня 1991р.) Закон України №2284 – III від 22.02.2001р.
2. Розробка автоматизованої системи раннього попередження можливості витоку палива на українській Антарктичній станції Академик Вернадський// Звіт про науково-дослідну роботу КПІ. – 2011. – 79 с.
3. *Баженов В.А., Лук'яченко О.О., Костіна О.В., Геращенко О.В.* Probabilistic Approach to Determination of Reliability of an Imperfect Supporting Shell//Strength of Materials: Volume 46, Issue 4 (2014), Page 567-574.
4. *Luk'yanchenko O.O., Kostina O.V., Bouraou 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.
5. *Bouraou 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.
6. *N. Bouraou, S. Rupich, O. Lukianchenko, O. Kostina* Monitoring of the Crack Propagation in Welded Joint of the Tank Using Multi-Class Recognition // Vibrations in Physical Systems (02.2018).
7. *Рудаков К.Н.* FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечноэлементное моделирование конструкций. – К.: КПИ (2011), 317 с.
8. ДБН В.1.2-2-2006 „Навантаження і впливи” (2006), 75 с.

REFERENCES

1. Protokol pro okhoronu navkolyshnoho seredovyshcha do Dohovoru pro Antarktyku (Madryd, 4 zhovtnia 1991r.) Zakon Ukrainy №2284 – III vid 22.02.2001r.
2. Rozrobka avtomatyzovanoi systemy rannoho poperedzhennia mozhyvosti vytoku palyva na ukrainskii Antarktychnii stantsii Akademik Vernadskiy// Zvit pro naukovo-doslidnu robotu KPI. (2011), 79 s.
3. *Bazhenov V.A., Luk'yanchenko O.O., Kostina O.V., Geraschenko O.V.* Probabilistic Approach to Determination of Reliability of an Imperfect Supporting Shell//Strength of Materials: Volume 46, Issue 4 (2014), pp. 567-574.

4. Luk'yanchenko O.O., Kostina O.V., Bouraou 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.
5. Bouraou 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.
6. N. Bouraou, S. Rupich, O. Lukianchenko, O. Kostina Monitoring of the Crack Propagation in Welded Joint of the Tank Using Multi-Class Recognition // Vibrations in Physical Systems (02.2018).
7. Rudakov K.N. FEMAP 10.2.0. Heometrycheskoe y konechnoэлементnoe modelyrovanye konstruksyi. – K.: KPY (2011), 317 s.
8. DBN V.1.2-2-2006 „Navantazhennia i vplyvy”(2006), 75 s.

Стаття надійшла до редакції 18.03.2019 р.

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

MODAL ANALYSIS OF THE PROTECTIVE SHELL OF THE TANK TAKING INTO ACCOUNT THE SEQUENTIAL OCCURRENCE OF DEFECTS IN THE WELDED SEAMS OF THE WALL

The natural frequencies and vibration modes of the protective shell of the fuel tank with defects in the welded seams of the wall were investigated. With the help of a computer finite element program a model of the protective container in the form of a cylindrical thin-walled shell was constructed. The wall of the shell was presented in the form of belts and surfaces that consist of the rolled sheets. Each surface was represented as a set of flat quadrangular finite elements with six degrees of freedom in each node. Defects of the welds were presented in the form of one vertical and two horizontal through cracks located in different belts of the shell. To simulate the defects at their locations flat quadrangular and triangular finite elements were used. The modal analysis of the protective shell was performed by solving the eigenvalue problem using Lanczos method. The effect of constant static vertical weight load of the roof and fencing, which is dangerous for the overall stability of the thin wall of the shell, is estimated. Determination of natural frequencies and vibration modes of the protective shell under the action of a vertical load was performed in two stages. At the first stage, the nonlinear statics problem was formulated as a modified Lagrange approach and solved using the Newton-Raphson stepwise loading method. At the second stage, the eigenfrequencies and vibration modes of the protective shell were determined using the Lanczos method. The problem of predicting the propagation of defects is solved by simulating their sequential occurrence as well as increasing their length and number.

Keywords: modal analysis, finite element method, free vibrations, nonlinear behavior, thin-walled cylindrical shell, weld defect.

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

МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАЩИТНОЙ ЕМКОСТИ РЕЗЕРВУАРА С УЧЕТОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В СВАРНЫХ ШВАХ СТЕНКИ

Модальный анализ защитной емкости топливного резервуара с учетом дефектов сварных швов стенки выполнен с помощью компьютерного моделирования и вычислительных процедур программного комплекса конечноэлементного анализа. Дефекты сварных швов представлены в виде сквозных трещин одной вертикальной и двух горизонтальных, расположенных в разных поясах оболочки. Проблема прогнозирования распространения дефектов решена за счет моделирования их последовательного возникновения, увеличения их длины и учета статической вертикальной нагрузки. Применен модифицированный метод Ньютона-Рафсона к решению нелинейной задачи статики и метод Ланцоша к модальному анализу оболочки. Учет статической вертикальной нагрузки в исследованиях собственных частот и форм колебаний емкости позволяет выявлять дефекты сварных швов минимальной длины.

Ключевые слова: модальный анализ, метод конечных элементов, свободные колебания, нелинейное поведение, тонкостенная цилиндрическая оболочка, дефект сварного шва.

УДК 539.3

Лук'янченко О.О., Бурау Н.І., Костіна О.В., Геращенко О.В. **Модальний аналіз захисної смності резервуара з урахуванням послідовного виникнення дефектів у зварних швах стінки** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2019. – Вип. 102. – С. 159-170.

Виконано модальний аналіз захисної смності паливного резервуара з урахуванням дефектів зварних швів стінки за допомогою комп'ютерного моделювання та обчислювальних процедур програмного комплексу скінченноелементного аналізу. Проблема прогнозування розповсюдження дефектів у зварних швах стінки смності вирішена за рахунок послідовного виникнення дефектів у вигляді крізних тріщин, збільшення їх довжини і урахування статичної дії вертикального навантаження.

Табл. 4. Іл. 5. Бібліогр. 8 назв.

UDC 539.3

Lukianchenko O.O., Bouraou N.I., Kostina O.V., Gerashchenko O.V. **Modal analysis of the protective shell of the tank taking into account the sequential occurrence of defects in the welded seams of the wall** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles. - Kyiv: KNUBA, 2019. – Issue. 102. – P. 159-170.

A modal analysis of the protective shell of the fuel tank was carried out taking into account defects of the wall welded seams using computer simulation and computational procedures of the finite element analysis software package. The problem of predicting the propagation of defects in welded seams of the shell wall has been solved by the sequential occurrence of defects in the form of through cracks, increasing their length and taking into account the static effect of the vertical load.

Tab. 4. Fig. 5. Ref. 8.

УДК 539.3

Лук'янченко О.А., Бурау Н.І., Костіна Е.В., Геращенко О.В. **Модальний аналіз захисної смності резервуара з урахуванням послідовного виникнення дефектів в зварних швах стінки** // Сопротивление материалов и теория сооружений: науч.-тех. сборн. – К.: КНУСА, 2019. – Вип. 102. – С. 159-170. – Укр.

Выполнен модальный анализ защитной смности топливного резервуара с учетом дефектов сварных швов стенки с помощью компьютерного моделирования и вычислительных процедур программного комплекса конечноэлементного анализа. Проблема прогнозирования распространения дефектов в сварных швах стенки смности решена за счет последовательного возникновения дефектов в виде сквозных трещин, увеличения их длины и учета статического действия вертикальной нагрузки.

Табл. 4. Ил. 5. Библиогр. 8 назв.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, старший 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, 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: nburau@ukr.net

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

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

Робочий тел.: +38(044) 241-54-20.

Мобільний тел.: +38(098) 275-19-93.

E-mail: kl0867@meta.ua

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

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>