

Дослідження статичних та динамічних характеристик складної тонкостінної оболонкової конструкції з тріщинами

О. О. Лук'янченко^а, О. В. Костіна^{а,1}, Н. І. Бурау^б, О. В. Кузько^в

^а Науково-дослідний інститут будівельної механіки Київського національного університету будівництва та архітектури, Київ, Україна

^б Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", Київ, Україна

^в Національний антарктичний науковий центр, Київ, Україна

¹ kl0867@meta.ua

Запропоновано чисельний підхід до дослідження статичних та динамічних характеристик паливного резервуара і захисної ємності з тріщинами в зварних швах їх стінок. Виконано математичне моделювання нелінійної поведінки складної оболонкової конструкції при дії статичного вертикального навантаження із застосуванням обчислювального комплексу скінченно-елементного аналізу. Побудовано моделі тріщин різної довжини у вертикальних та горизонтальних зварних швах стінок оболонок. Досліджено вплив тріщин на напружено-деформований стан і стійкість паливного резервуара та захисної ємності. Визначено динамічні характеристики конструкції й оцінено вплив тріщин на частоти та форми її власних коливань.

Ключові слова: метод скінченних елементів, нелінійна стійкість, тонкостінна оболонкова конструкція, тріщина, зварний шов, власні коливання.

Вступ. Національним антарктичним науковим центром України разом із Національним технічним університетом України "Київський політехнічний інститут" у рамках оцінювання технічного стану інфраструктури антарктичної станції "Академік Вернадський" з урахуванням важливості забезпечення її життєдіяльності й екологічної безпеки в Антарктиці [1] в лютому 2011 р. був проведений моніторинг резервуара з дизельним паливом та захисної циліндричної ємності, які з'єднані між собою технологічним обладнанням [2]. Для безпечної експлуатації складної оболонкової конструкції запропоновано розробити автоматизовану систему раннього попередження можливості витіку палива [3]. На першому етапі це передбачає дослідження резервуара і захисної ємності як об'єкта діагностики. Отримані результати будуть використані для розробки діагностичної моделі конструкції.

Із метою запобігання аварій на антарктичній станції і оцінки конструкційної безпеки паливного резервуара виконано математичне моделювання його поведінки в системі із захисною ємністю при дії різних видів статичних та динамічних навантажень [4]. Також проведено дослідження впливу корозії металу внаслідок агресивної дії палива на несучу здатність резервуара і надано рекомендації щодо його подальшої експлуатації [5]. Для забезпечення безаварійної експлуатації складної оболонкової конструкції та розробки її діагностичної моделі важливим є аналіз дефектів зварних швів стінок оболонок.

Нижче запропоновано чисельний підхід до дослідження статичних та динамічних характеристик системи двох з'єднаних циліндричних оболонок із тріщинами в зварних швах їх стінок. Математичне моделювання нелінійної поведінки конструкції при дії статичного вертикального навантаження виконано із застосуванням програмного комплексу NASTRAN [6]. Побудовано також моделі тріщин різної довжини у вертикальних та горизонтальних зварних швах стінок оболонок. Досліджено вплив тріщин на напружено-деформований стан і стійкість складної оболонкової конструкції.

ції. Для цього застосовано процедури розв'язання нелінійної задачі статички (nonlinear static) за допомогою модифікованого методу покрокового навантаження Ньютон–Рафсона та лінійної задачі стійкості (buckling). Динамічні характеристики оболонкової конструкції визначено за допомогою методу Ланцоша при розв'язанні задачі на власні значення та оцінено вплив тріщин на частоти та форми власних коливань.

Побудова математичної моделі складної тонкостінної оболонкової конструкції з урахуванням тріщин. Паливний резервуар разом із захисною ємністю являє собою складну тонкостінну оболонкову конструкцію. Резервуар для дизельного палива – це металевий циліндр висотою 5,96 м і діаметром 6,63 м, який знаходиться в середині захисної металевої циліндричної оболонки висотою 6,58 м і діаметром 6,96 м. Стінки оболонок є зварними з листів прокату товщиною 5 мм. Оболонки з'єднані патрубками (довжина 0,16 м, діаметр 76,2 мм) для закачування та відбору палива. Для математичного моделювання нелінійної поведінки конструкції використано програмний комплекс скінченноелементного аналізу [6], який базується на сучасних методах будівельної механіки, математичної фізики, механіки твердих та деформівних тіл [7–9]. У багатьох дослідженнях зварні оболонкові конструкції з недосконалотями форми або дефектами моделюються суцільними тілами [10–16]. Це спрощує розрахунок, але не дає змоги врахувати вплив зварних швів і тріщин у них на поведінку конструкції.

Розрахункова модель резервуара із захисною ємністю формується як система двох з'єднаних циліндричних оболонок з урахуванням припущення про зварні шви згідно з рекомендаціями розробників програмного комплексу NASTRAN. Стінки оболонок моделюються у вигляді поясів, що складаються з поверхонь (тіл), розміри яких відповідають листовому прокату (рис. 1,а,б). Кожна поверхня моделюється сукупністю чотирикутних плоских скінченних елементів із шістьма ступенями вільності у вузлі типу Plate (рис. 1,в). У місцях кріплення патрубків чотирикутні плоскі скінченні елементи замінено трикутними. Кількість двовимірних плоских скінченних елементів всієї моделі сягає 3548, кількість вузлів – 3392. Патрубки для закачування та відбору палива моделюються двома стрижневими елементами типу Tube.

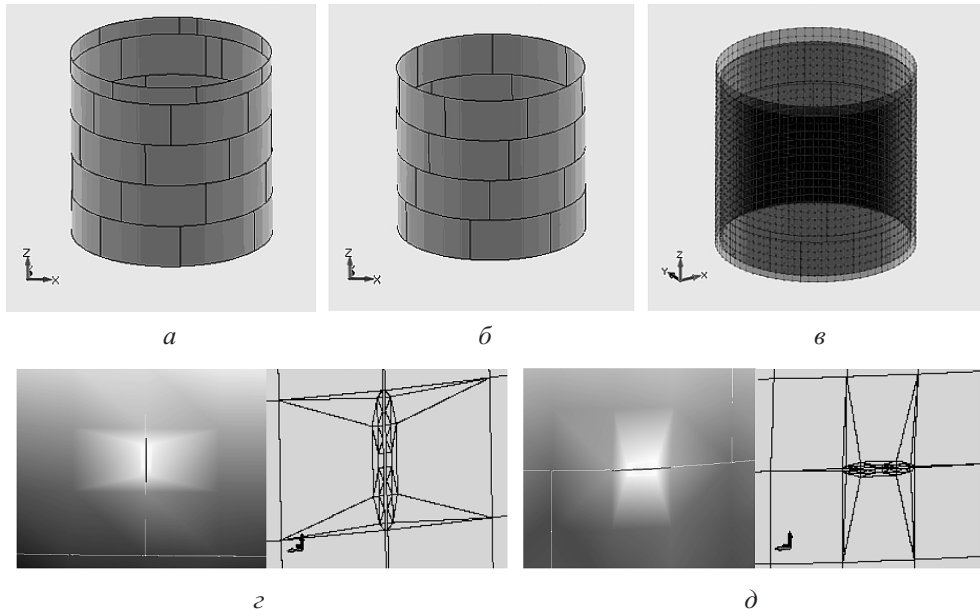


Рис. 1. Розрахункова модель конструкції: а – захисна ємність; б – паливний резервуар; в – скінченноелементна модель; г, д – модель вертикальної і горизонтальної тріщин відповідно.

Дефекти стінок захисної ємності та паливного резервуара мають вигляд тріщин у зварних швах між листовим прокатом поблизу патрубка для відбору палива (рис. 1, з, д). Для обох оболонок вертикальна тріщина розташовується в другому поясі, горизонтальна – між першим та другим. Тріщини в зварних швах моделюються за допомогою сукупності три- і чотирикутних плоских скінченних елементів. Ширина розкриття тріщин 5 мм відповідає діаметру зварного шва між прокатними листами стінок оболонок. Довжина тріщин приймається відносно до довжини вертикального зварного шва 1,5 м, значення якої змінюється від 30 (2%) до 210 мм (14%). Фізичні характеристики сталі Ст. 3пс2, з якої виготовлено стінки оболонок, задаються згідно з даними табл. 1 [2]. Граничні умови приймаються відповідно до [3]: у вузлах нижньої кромки резервуара поступальні переміщення обмежено вздовж радіуса, обертальні – вздовж радіуса і дотичної. Вузли нижньої кромки захисної ємності жорстко закріплені. На вузли верхніх крамок двох оболонок введено обмеження вздовж радіуса та твірної.

Аналіз впливу тріщин на статичну поведінку конструкції при дії вертикальних навантажень. Напружено-деформований стан конструкції досліджено при дії вертикальних навантажень на стінки оболонок від ваги покрівель й огорожі. Граничні розрахункові значення навантаження визначено згідно з [17]. На один вузол верхньої кромки зовнішньої ємності та резервуара вертикальне навантаження відповідно складає 897,78 і 624,86 Н. Нелінійну задачу статички розв'язано за допомогою модифікованого методу Ньютона–Рафсона. На рис. 2 представлено ізополя еквівалентних напружень (Па) в елементах стінок захисної ємності та паливного резервуара без і з урахуванням тріщин у зварних швах.

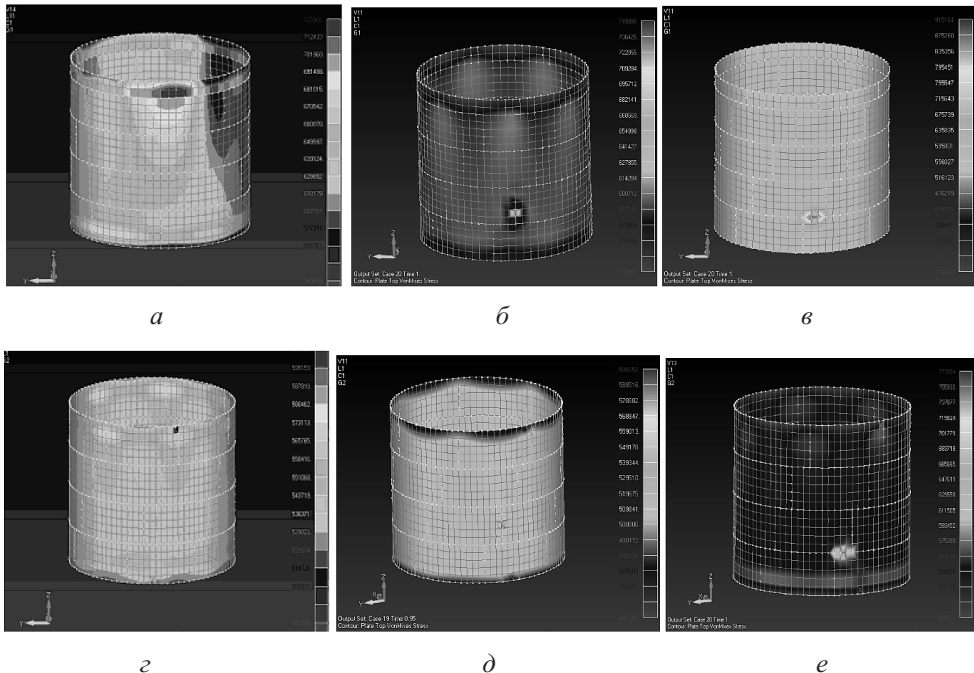


Рис. 2. Напружений стан захисної ємності (а–в) та паливного резервуара (з–е): а, з – без тріщин; б, д – із вертикальною тріщиною; в, е – із горизонтальною тріщиною.

Максимальні напруження (Па) в стінках двох оболонок з урахуванням тріщин наведено в табл. 1.

Т а б л и ц я 1

Коефіцієнти запасу стійкості захисної ємності з тріщиною

Вид тріщини	Відносна довжина тріщини Δ/l , %							
	0	2	4	6	8	10	12	14
Вертикальна	$\frac{722905}{602507}$	$\frac{729542}{670251}$	$\frac{730867}{679110}$	$\frac{748450}{689375}$	$\frac{788045}{690412}$	$\frac{800327}{698249}$	$\frac{809046}{705048}$	$\frac{818042}{715569}$
	$\frac{722905}{602507}$	$\frac{940370,8}{773983,6}$	$\frac{1091934}{1037414}$	$\frac{1154875}{1113827}$	$\frac{1611494}{1425917}$	$\frac{1684593}{1496028}$	$\frac{1944478}{1735023}$	$\frac{2055958}{1816125}$

Примітка. Над рискою наведено дані для захисної ємності, під рискою – для резервуара.

У стінці захисної ємності без тріщин при дії граничного розрахункового навантаження максимальні еквівалентне напруження 0,723 МПа та переміщення 0,018 мм спостерігалися в місці розташування верхнього патрубку для закачування палива (рис. 2,а). Вертикальна тріщина в зварному шві стінки ємності призводить до збільшення максимальних напружень на 9...13,2%, горизонтальна – на 11,9...184,4%. При дослідженні напружено-деформованого стану резервуара без тріщин максимальне еквівалентне напруження 0,603 МПа і максимальне переміщення 0,016 мм також спостерігалися в місці розташування верхнього патрубку для закачування палива (рис. 2,б). Дослідження показують, що через тріщини в зварних швах стінки резервуара максимальні напруження збільшуються: на 11,2...18,8 (вертикальні), 28,4...201,4% (горизонтальні). Концентрація напружень відмічається в елементах захисної ємності і резервуара, що моделюють тріщину (рис. 2,б,в,д,е). Із ростом довжини тріщин максимальні переміщення в стінках захисної ємності та резервуара збільшуються менш ніж на 0,18 та 0,2% відповідно.

Дослідження стійкості конструкції з тріщинами. Стійкість паливного резервуара та захисної ємності без і з урахуванням тріщин при дії граничних розрахункових значень вертикальних навантажень від ваги покрівлі й огорожі досліджувалася в лінійній і нелінійній постановках. При розв'язанні лінійної задачі статичної стійкості з використанням методу Ланцоша [6] отримано форми втрати стійкості конструкції і відповідні критичні значення навантаження (рис. 3). Також досліджено напружено-деформований стан конструкції з визначенням граничного значення навантаження при розв'язанні нелінійної задачі статичної за допомогою модифікованого методу Ньютона–Рафсона (рис. 4).

При лінійному розрахунку перші форми втрати стійкості захисної ємності і паливного резервуара без тріщин мають однаковий вигляд: вздовж твірної спостерігається дев'ять півхвиль, вздовж кола – збільшення діаметрів оболонок (рис. 3,а,д). Перші критичні значення вертикального навантаження на кожен вузол верхньої кромки захисної ємності і резервуара без тріщин відповідно становили: 289,697 і 236,06 кПа. Перша форма втрати стійкості обох оболонок із вертикальною тріщиною в зварному шві залежить від її довжини. При відносній довжині тріщини в стінці захисної ємності $\Delta/l = 2...12\%$ (рис. 3,б) і резервуара $\Delta/l = 2...10\%$ (рис. 3,е) перші форми втрати стійкості збігаються з відповідними формами оболонок без тріщин. При довжині тріщин у стінці ємності $\Delta/l = 14\%$ (рис. 3,в) і паливного резервуара $\Delta/l = 12...14\%$ (рис. 3,ж) перші форми є локальними формами втрати стійкості оболонок. Якщо в зварних швах стінок захисної ємності або резервуара є горизонтальні тріщини довжиною $\Delta/l = 2...14\%$, то перші форми втрати стійкості оболонок мають однаковий вигляд і збігаються з відповідними формами втрати стійкості оболонок без тріщин. Обчислено коефіцієнти запасу стійкості $K_{ст}$ захисної ємності (табл. 2) та паливного резервуара (табл. 3), які показують, у скільки разів критичне

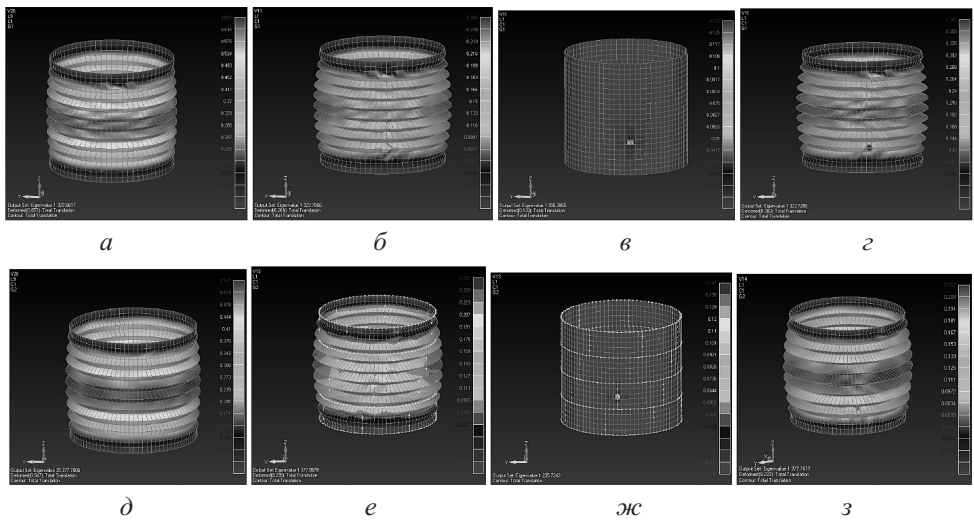


Рис. 3. Перші форми втрати стійкості захисної ємності (а-г) та паливного резервуара (д-з): а, д – без тріщин; б, в, е, ж – з вертикальною тріщиною; г, з – з горизонтальною тріщиною.

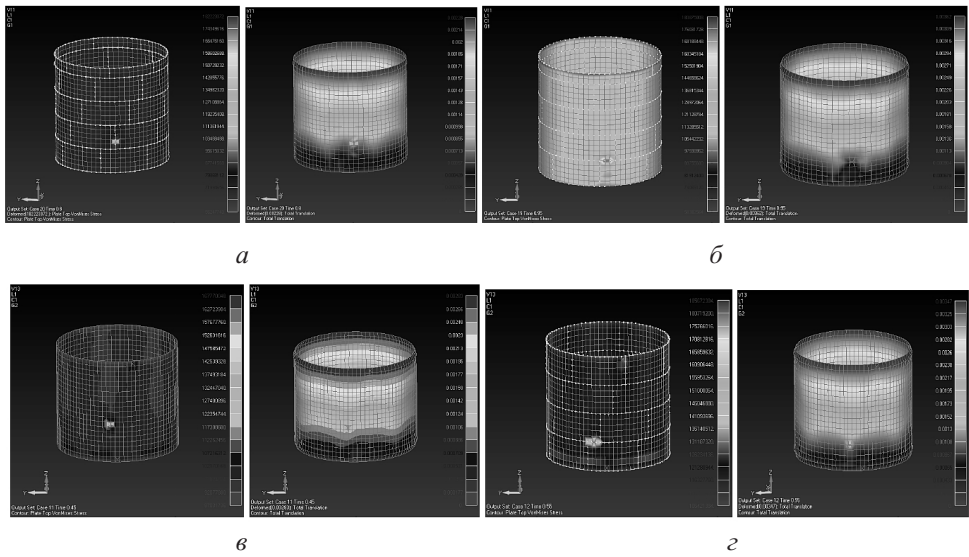


Рис. 4. Граничний напружено-деформований стан захисної ємності (а, б) та паливного резервуара (в, г) з вертикальною (а, в) і горизонтальною (б, г) тріщинами при $\Delta l/l = 14\%$.

навантаження перевищує або менше за значення граничного розрахункового навантаження.

Досліджено вплив наявності тріщин у зварних швах стінок двох з'єднаних оболонок на їх стійкість при дії граничного розрахункового навантаження із застосуванням нелінійного розрахунку. Отримано граничні значення вертикального навантаження на кожен вузол верхніх кромek оболонок з обов'язковою перевіркою умови забезпечення міцності їх стінок: максимальні напруження в елементах оболонок не повинні перевищувати допустимого напруження 187 МПа [2]. Граничний напружено-деформований стан захисної ємності та паливного резервуара з вертикальною і горизонтальною тріщинами довжиною $\Delta l/l = 14\%$ представлено на рис. 4. Видно, що

Т а б л и ц я 2

Коефіцієнти запасу стійкості захисної ємності з тріщиною

Вид тріщини	Відносна довжина тріщини Δ/l , %							
	0	2	4	6	8	10	12	14
Вертикальна	322,814	322,787	322,786	322,785	322,785	322,784	322,782	316,387
	225,467	223,222	217,096	215,553	202,343	201,404	186,888	135,01
Горизонтальна	322,814	322,729	322,727	322,726	322,723	322,720	322,711	322,699
	225,467	186,811	173,741	166,231	114,613	110,032	95,145	89,727

Примітка. Тут і в табл. 3: над ризикою наведено дані, отримані при лінійному розрахунку, під ризикою – при нелінійному.

Т а б л и ц я 3

Коефіцієнти запасу стійкості паливного резервуара з тріщиною

Вид тріщини	Відносна довжина тріщини Δ/l , %							
	0	2	4	6	8	10	12	14
Вертикальна	377,981	377,968	377,967	377,966	377,964	377,963	373,127	331,917
	270,010	259,574	251,381	246,529	237,348	226,322	209,135	190,167
Горизонтальна	377,981	377,844	377,842	377,841	377,837	377,834	377,826	377,816
	270,010	220,388	181,168	169,175	129,954	116,041	107,132	102,188

при втраті стійкості максимальні напруження відмічаються в місцезнаходженні тріщин, максимальні переміщення – у вузлах верхньої кромки оболонок і місцезнаходженні тріщин.

Коефіцієнти запасу стійкості захисної ємності і паливного резервуара без тріщин, які визначено при нелінійному розрахунку, відповідно дорівнюють 225,47 і 270,01. Коефіцієнти запасу стійкості захисної ємності і паливного резервуара з урахуванням тріщин різної довжини наведено відповідно в табл. 2 і 3.

При нелінійному розрахунку значення коефіцієнтів запасу стійкості захисної ємності менші, ніж отримані при лінійному розрахунку. При розв'язанні лінійної задачі вплив вертикальної тріщини на значення коефіцієнта запасу стійкості захисної ємності незначний і сягає менше 0,02%, горизонтальної тріщини – 0,0003%. При нелінійному розрахунку наявність вертикальної тріщини зумовила зменшення коефіцієнта запасу стійкості захисної ємності в 1,67 раза, горизонтальної – в 2,51 раза.

Вертикальна тріщина в зварному шві стінки паливного резервуара при дії граничного розрахункового вертикального навантаження максимально зменшила коефіцієнт запасу стійкості при нелінійному розрахунку в 1,42 раза, горизонтальна – в 2,64 раза. При розв'язанні задачі на власні значення вплив вертикальної тріщини на коефіцієнт запасу стійкості складає менше ніж 0,12%, горизонтальної – 0,0005%. Результати дослідження показують, що для оцінки несучої здатності конструкції з тріщиною необхідно проводити нелінійний розрахунок її покрокового навантаження. На рис. 5 представлено залежність максимального напруження і коефіцієнта запасу стійкості захисної ємності та паливного резервуара від відносної довжини вертикальної й горизонтальної тріщин у зварних швах їх стінок. Видно, що горизонтальна тріщина, на відміну від вертикальної, більше впливає на напружено-деформований стан та стійкість обох оболонок при дії вертикального статичного навантаження.

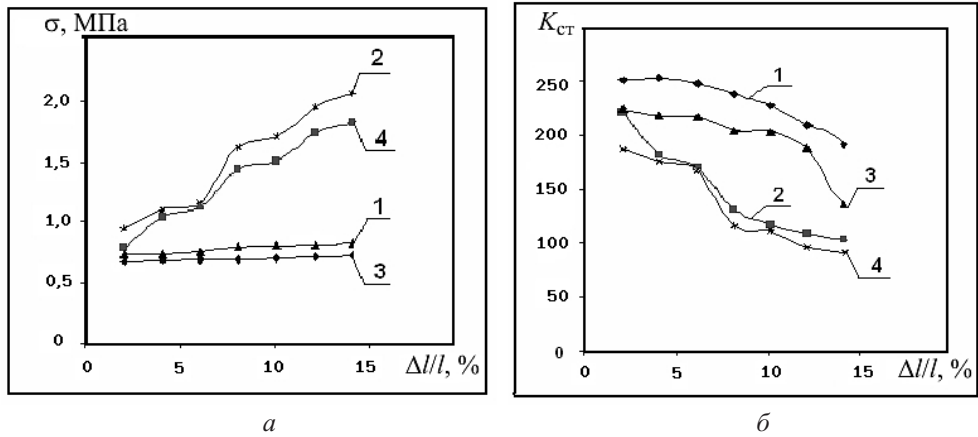


Рис. 5. Вплив тріщин на напружений стан (а) і стійкість (б) оболонок: 1, 2 – вертикальна і горизонтальна тріщини в стінках захисної ємності; 3, 4 – те ж у паливному резервуарі.

Динамічний аналіз власних коливань конструкції з урахуванням тріщин.
 Паливний резервуар і захисна ємність технологічно з'єднані трубопроводами для закачування і відбору палива, що зумовлює збільшення динамічного механічного навантаження на зварні шви стінок оболонок. При динамічному розрахунку конструкції проведемо модальний аналіз за допомогою методу Ланцоша [6]. Форми власних коливань конструкції представлено на рис. 6.

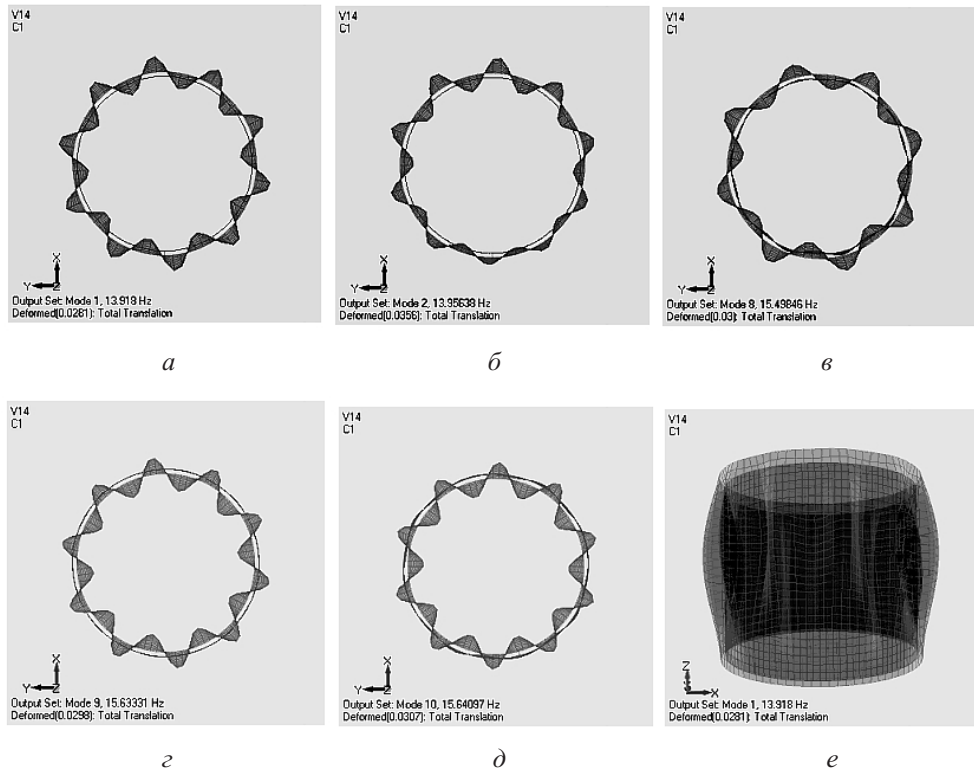


Рис. 6. Форми власних коливань конструкції без тріщин уздовж кіл та твірних: а, е – 1-а форма; б, в, з, д – 2-, 8-, 9- і 10-а форми відповідно.

У системі двох з'єднаних циліндричних оболонок без тріщин на різних частотах коливань стінки захисної ємності і паливного резервуара деформуються окремо або одночасно. Спостерігаються як регулярні (циклічні) – рис. 6,а,в-д, так і нерегулярні (рис. 6,б,е) деформації стінок. У місцях знаходження патрубків відмічається локальна деформація стінок. Вздовж твірних оболонок видно одну півхвилю при всіх формах власних коливань конструкції (рис. 6,е).

Проаналізовано вплив тріщин різної довжини ($\Delta/l = 2...14\%$) на частоту власних коливань конструкції. Десять перших форм власних коливань конструкції без і з урахуванням тріщини у зварних швах стінок захисної ємності та паливного резервуара представлено відповідно в табл. 4 і 5.

Т а б л и ц я 4

Частоти власних коливань конструкції, Гц

№ частоти коливань	Відносна довжина тріщини в захисній ємності $\Delta/l, \%$							
	0	2	4	6	8	10	12	14
1	<u>13,918</u>	<u>13,1774</u>	<u>13,91773</u>	<u>13,91771</u>	<u>13,91768</u>	<u>13,91765</u>	<u>13,91761</u>	<u>13,91715</u>
	13,918	13,91781	13,918	13,918	13,918	13,918	13,9180	13,9180
2	<u>13,9564</u>	<u>13,95655</u>	<u>13,95653</u>	<u>13,9565</u>	<u>13,95649</u>	<u>13,95646</u>	<u>13,95640</u>	<u>13,91715</u>
	13,9564	13,95596	13,95564	13,95596	13,95595	13,95594	13,95593	13,95592
3	<u>14,0757</u>	<u>14,07527</u>	<u>14,07525</u>	<u>14,07522</u>	<u>14,07517</u>	<u>14,07513</u>	<u>14,07506</u>	<u>14,07500</u>
	14,0757	14,7526	14,07525	14,07522	14,07520	14,07518	14,07517	14,07515
4	<u>14,1471</u>	<u>14,14751</u>	<u>14,14749</u>	<u>14,14746</u>	<u>14,14742</u>	<u>14,14700</u>	<u>14,14710</u>	<u>14,14715</u>
	14,1471	14,14494	14,14491	14,14487	14,14481	14,14474	14,14465	14,14456
5	<u>14,7174</u>	<u>14,71737</u>	<u>14,71736</u>	<u>14,71735</u>	<u>14,71733</u>	<u>14,71732</u>	<u>14,71728</u>	<u>14,71726</u>
	14,7174	14,71739	14,71735	14,71727	14,71724	14,71716	14,71716	14,71715
6	<u>14,7779</u>	<u>14,77845</u>	<u>14,77839</u>	<u>14,77832</u>	<u>14,77822</u>	<u>14,77809</u>	<u>14,77786</u>	<u>14,77761</u>
	14,7779	14,77680	14,77679	14,77678	14,77676	14,77674	14,77671	14,77665
7	<u>15,4427</u>	<u>15,44211</u>	<u>15,44207</u>	<u>15,44202</u>	<u>15,44195</u>	<u>15,44187</u>	<u>15,44177</u>	<u>15,44167</u>
	15,4427	15,44181	15,44180	15,44177	15,44174	15,44172	15,44168	15,44163
8	<u>15,4985</u>	<u>15,49882</u>	<u>15,49882</u>	<u>15,49881</u>	<u>15,49879</u>	<u>15,49877</u>	<u>15,49871</u>	<u>15,49865</u>
	15,4985	15,49622	15,49618	15,49611	15,49608	15,49592	15,49577	15,49563
9	<u>15,4985</u>	<u>15,6333</u>	<u>15,6333</u>	<u>15,6333</u>	<u>15,6333</u>	<u>15,6333</u>	<u>15,6333</u>	<u>15,6333</u>
	15,6333	15,6333	15,6333	15,6333	15,6333	15,6333	15,6333	15,6333
10	<u>15,6410</u>	<u>15,6410</u>	<u>15,6410</u>	<u>15,6410</u>	<u>15,6410</u>	<u>15,6410</u>	<u>15,6410</u>	<u>15,6410</u>
	15,6410	15,6410	15,6410	15,6410	15,6410	15,6410	15,6410	15,6410

Примітка. Тут і в табл. 5: над рискою наведено дані, отримані з урахуванням вертикальної тріщини, під рискою – з урахуванням горизонтальної тріщини.

Значення зміни частоти власних коливань конструкції внаслідок наявності тріщин у зварному шві стінки захисної ємності і паливного резервуара наведено в табл. 6.

Аналіз частот власних коливань конструкції показує, що наявність тріщини у зварному шві стінки захисної ємності або паливного резервуара призводить до зміни лише тих частот, на яких оболонки коливаються. Має місце вплив тріщин у паливному резервуарі на 8-у частоту власних коливань конструкції, на якій спостерігаються регулярні коливання захисної ємності і незначні деформації резервуара (рис. 6,б). Максимальне зменшення частоти власних коливань конструкції сягає 0,00287 Гц

Т а б л и ц я 5

Частоти власних коливань конструкції, Гц

№ частоти коливань	Відносна довжина тріщини в паливному резервуарі Δ/l , %							
	0	2	4	6	8	10	12	14
1	$\frac{13,918}{13,918}$	$\frac{13,918}{13,918}$	$\frac{13,918}{13,918}$	$\frac{13,918}{13,918}$	$\frac{13,918}{13,918}$	$\frac{13,918}{13,918}$	$\frac{13,9180}{13,9180}$	$\frac{13,9180}{13,9180}$
2	$\frac{13,9564}{13,9564}$	$\frac{13,9564}{13,9564}$	$\frac{13,9564}{13,9564}$	$\frac{13,9564}{13,9564}$	$\frac{13,9564}{13,9564}$	$\frac{13,9564}{13,9564}$	$\frac{13,9564}{13,9564}$	$\frac{13,9564}{13,9564}$
3	$\frac{14,0757}{14,0757}$	$\frac{14,0757}{14,0757}$	$\frac{14,0757}{14,0757}$	$\frac{14,0757}{14,0757}$	$\frac{14,0757}{14,0757}$	$\frac{14,0757}{14,0757}$	$\frac{14,0757}{14,0757}$	$\frac{13,0757}{13,0757}$
4	$\frac{14,1471}{14,1471}$	$\frac{14,1471}{14,1471}$	$\frac{14,1471}{14,1471}$	$\frac{14,1471}{14,1471}$	$\frac{14,1471}{14,1471}$	$\frac{14,1471}{14,1471}$	$\frac{14,1471}{14,1471}$	$\frac{14,1471}{14,1471}$
5	$\frac{14,7174}{14,7174}$	$\frac{14,7174}{14,7174}$	$\frac{14,7174}{14,7174}$	$\frac{14,7174}{14,7174}$	$\frac{14,7174}{14,7174}$	$\frac{14,7174}{14,7174}$	$\frac{14,7174}{14,7174}$	$\frac{14,7174}{14,7174}$
6	$\frac{14,7779}{14,7779}$	$\frac{14,7779}{14,7779}$	$\frac{14,7779}{14,7779}$	$\frac{14,7779}{14,7779}$	$\frac{14,7779}{14,7779}$	$\frac{14,7779}{14,7779}$	$\frac{14,7779}{14,7779}$	$\frac{14,7779}{14,7779}$
7	$\frac{15,4427}{15,4427}$	$\frac{15,4427}{15,4427}$	$\frac{15,4427}{15,4427}$	$\frac{15,4427}{15,4427}$	$\frac{15,4427}{15,4427}$	$\frac{15,4427}{15,4427}$	$\frac{15,4427}{15,4427}$	$\frac{15,4427}{15,4427}$
8	$\frac{15,4985}{15,4985}$	$\frac{15,49849}{15,49843}$	$\frac{15,49848}{15,49843}$	$\frac{15,49848}{15,49843}$	$\frac{15,49848}{15,49843}$	$\frac{15,49847}{15,49843}$	$\frac{15,49846}{15,49843}$	$\frac{15,49845}{15,49843}$
9	$\frac{15,6333}{15,6333}$	$\frac{15,63368}{15,63330}$	$\frac{15,63364}{15,63327}$	$\frac{15,63358}{15,63322}$	$\frac{15,63350}{15,63319}$	$\frac{15,63339}{15,63315}$	$\frac{15,63323}{15,63315}$	$\frac{15,63302}{15,63314}$
10	$\frac{15,6410}{15,6410}$	$\frac{15,64139}{15,64021}$	$\frac{15,64135}{15,64020}$	$\frac{15,64129}{15,64018}$	$\frac{15,64121}{15,64017}$	$\frac{15,64111}{15,64015}$	$\frac{15,64095}{15,64012}$	$\frac{15,64077}{15,64009}$

Т а б л и ц я 6

Зміна частоти власних коливань конструкції внаслідок наявності тріщин, Гц

№ частоти коливань	Тріщина в захисній ємності		Тріщина в паливному резервуарі	
	вертикальна	горизонтальна	вертикальна	горизонтальна
1	-0,00085	-0,00033	0	0
2	-0,00006	-0,00048	0	0
3	-0,00070	-0,00055	0	0
4	+0,00005	-0,00254	0	0
5	-0,00014	-0,00025	0	0
6	-0,00029	-0,00125	0	0
7	-0,00103	-0,00107	0	0
8	+0,00015	-0,00287	-0,00005	-0,00007
9	0	0	-0,00028	-0,00016
10	0	0	-0,00023	-0,00091

Примітка. “-” – зменшення значення частоти, “+” – його збільшення.

(0,019%). Результати досліджень також свідчать, що форми власних коливань збігаються з формами коливань конструкції без тріщин. Кількість хвиль у радіальному й твірному напрямках не змінюється, лише відмічається локальна деформація стінки в місцезнаходженні тріщини. Різницю між максимальними узагальненими переміщеннями вузлів моделі конструкції без і з тріщинами наведено в табл. 7.

Т а б л и ц я 7

Максимальні узагальнені переміщення вузлів моделі конструкції

№ форми коливань	Модель конструкції		Різниця переміщення
	без тріщин	із тріщинами	
4	0,0326403	0,0324819	-0,0001584
6	0,0310144	0,0309202	-0,0000942
7	0,0274330	0,0273226	-0,0001104
8	0,0296150	0,0299160	+0,0003010
9	0,0410415	0,0303063	+0,0107352
10	0,0316672	0,0304748	-0,0011924

Видно, що максимальний вплив тріщин на узагальнені переміщення вузлів моделі спостерігається на 9-й формі власних коливань конструкції: переміщення збільшилися на 26%.

Висновки

1. Аналіз напружено-деформованого стану і стійкості паливного резервуара в системі із захисною ємністю при дії статичного вертикального навантаження показав, що наявність тріщин у зварних швах їх стінок зменшує несучу здатність конструкції.

2. При дії вертикального статичного навантаження на стінки оболонок наявність горизонтальної тріщини порівняно з вертикальною має більш суттєвий вплив на її напружено-деформований стан і стійкість.

3. Розв'язання задачі на власні значення при дослідженні стійкості конструкції з тріщинами завищує критичне навантаження та коефіцієнт запасу стійкості і не враховує реальною нелінійну поведінку конструкції.

4. Модальний аналіз ненавантаженої конструкції показав, що тріщини у зварних швах стінок оболонок незначно впливають на частоти власних коливань, тому необхідно досліджувати відхилення оболонок у твірному напрямку від вертикалі і порівнювати їх із формами коливань оболонок без тріщин.

Резюме

Предложен численный подход к исследованию статических и динамических характеристик топливного резервуара и защитной емкости с трещинами в сварных швах их стенок. Выполнено математическое моделирование нелинейного поведения сложной оболочечной конструкции при действии статической вертикальной нагрузки с помощью вычислительного комплекса конечноэлементного анализа. Построены модели трещин разной длины в вертикальных и горизонтальных сварных швах стенок оболочек. Исследовано влияние трещин на напряженно-деформированное состояние и устойчивость топливного резервуара и защитной емкости. Определены динамические характеристики конструкции и оценено влияние трещин на частоты и формы ее собственных колебаний.

1. *Протокол* про охорону навколишнього середовища до Договору про Антарктику // Закон України № 2284–III від 22. 02. 2001 р.
2. *ВБН В.2.2-58.2-94*. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93.3 кПа. – Чинний з 10. 01.1994.
3. *Bougraou N., Lukianchenko O., Tsybulnik S., and Shevchuk D.* Vibration condition monitoring of the vertical steel tanks // *J. Vibr. Phys. Syst.* – 2016. – 27. – P. 53–60.
4. *Киричук О. А., Лук'янченко О. О., Кузько О. В.* Несуча спроможність паливного резервуара в системі з захисною ємністю // *Опір матеріалів і теорія споруд.* – 2013. – Вип. 91. – С. 76–83.
5. *Lukyanchenko O. O., Vorona Y. V., Kostina O. V., et al.* Impact assessment of metal corrosion on fuel reservoir carrying capacity // *Ukr. Antarctic J.* – 2015. – No. 14. – P. 246–255.
6. *Шимкович Д. Г.* Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М.: ДМК “Пресс”, 2001. – 448 с.
7. *Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С.* Пластинки и оболочки. – М.: Наука, 1966. – 636 с.
8. *Вольмир А. С.* Устойчивость деформируемых систем. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
9. *Баженов В. А., Кривенко О. П., Соловей М. О.* Нелінійне деформування та стійкість пружних оболонок неоднорідної структури. – Київ: ЗАТ “Віпол”, 2010. – 316 с.
10. *Гоцуляк Е. А., Лук'янченко О. А., Шах В. В.* Об устойчивости цилиндрических оболочек переменной толщины с начальными несовершенствами // *Прикл. механика.* – 2009. – № 4. – С. 103–108.
11. *Лук'янченко О. О., Костіна О. В., Гаран І. Г.* Моделювання початкових недосконалостей циліндричної оболонки при дослідженні її стійкості при дії комбінованого навантаження // *Опір матеріалів і теорія споруд.* – 2009. – Вип. 84. – С. 97–103.
12. *Гоцуляк Є. О., Лук'янченко О. О., Костіна О. В., Гаран І. Г.* Побудова геометрично нелінійних МСЕ моделей для тонких оболонок довільної форми та методи їх розрахунку // *Theoret. Found. Civil Eng.* – 2010. – 18. – С. 107–114.
13. *Дехтярюк Є. С., Лук'янченко О. О., Шах В. В.* Оцінка рівня конструкційної безпеки нафтоналивного резервуара // *Опір матеріалів і теорія споруд.* – 2010. – Вип. 86. – С. 22–29.
14. *Гоцуляк Е. А., Лук'янченко О. А., Костіна Е. В., Гаран И. Г.* Построение геометрически нелинейных конечноэлементных моделей для тонких оболочек с несовершенствами форм // *Прикл. механика.* – 2011. – 47, № 3. – С. 89–101.
15. *Гоцуляк Є. О., Лук'янченко О. О., Костіна О. В., Гаран І. Г.* Стійкість циліндричної оболонки-опори з недосконалостями форми при комбінованому навантаженні // *Пробл. прочності.* – 2012. – № 5. – С. 127–134.
16. *Баженов В. А., Лук'янченко О. О., Костіна О. В., Геращенко О. В.* Імовірнісний підхід до визначення надійності недосконалої оболонки-опори // *Там же.* – 2014. – № 4. – С. 152–161.
17. *ДБН В.1.2-2-2006.* Навантаження і впливи, 2006. – 75 с.

Поступила 24. 02. 2016