

БОЙОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ ОВТ

УДК 614.841

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.27.2022.53-59>Т.Я. Глова¹, Б.М. Глова², А.В. Баранов¹, О.В. Корольова¹¹ Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів² Львівський національний аграрний університет, Дубляни

Article history: Received 19 September 2022; Revised 28 September 2022; Accepted 25 October 2022

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТІНКИ ТА ДНИЩА ЦИЛІНДРИЧНИХ ЄМНОСТЕЙ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН

Досліджено напружено-деформований стан вертикального сталевго резервуара (РВС) для зберігання вибухонебезпечних і токсичних речовин. Проведений аналіз поля температурних напружень внаслідок перепаду температур, що є причиною втрати цілісності резервуара. Показано, що найбільші за величиною осьові та кільцеві температурні напруження виникають на поверхні спряження днища з боковою оболонкою. Радіальні та кільцеві температурні напруження в днищі резервуара рівні між собою та є постійними. Досліджено зміну температурних напружень внаслідок зміни різниці температур стінки та днища резервуара. Результати аналітичних досліджень представлені графічно.

Ключові слова: резервуар, температура, кільцеві та осьові напруження, втрата цілісності резервуара, деформація.

Постановка проблеми

Пально-мастильні матеріали та токсичні речовини, які зберігаються на базах, арсеналах та складах відіграють провідну роль у Збройних Силах України. Так як стан живучості вибухонебезпечних речовин суттєво впливає на їх військове використання та боєздатність, тому дослідження міцності та надійності резервуарів на даний час залишаються актуальними. В умовах російсько-української війни зберігання пально-мастильних матеріалів та наявного боєзапасу набуло дуже важливого значення.

В основному для зберігання вибухонебезпечних речовин використовують ємності спеціального призначення, а саме серед яких найбільш розповсюдженими є сталеві вертикальні резервуари (РВС).

У випадку диверсії або пошкодження резервуарів можливий витік токсичних речовин. Утворені парогазові хмари можуть спричинити вибух та завдати шкоди особовому складу або зараження приліглої території чи військової техніки, що не дає можливості проводити бойові дії протягом тривалого часу.

Тепловий потік, який характеризується вибухом резервуарів, досить з великою швидкістю та інтенсивністю може впливати на військові частини із значною кількістю боєприпасів, так як це було на

нафтобазі 8 червня 2015 року у селі Крячки Київської області “БРСМ-Нафта”. Цю аварію ліквідували понад 8 днів, де було залучено 939 чоловік та 117 одиниць техніки. Подібні аварії виникали на нафтобазі у Киргизії 10 травня 2019 року у місті Джалал-Абад, а також Дір-Парку штату Техас 17 травня 2019 року та Філадельфії США 21 червня 2019 року. Внаслідок цих аварій відбувся викид токсичних хімічних речовин у повітря та травмування особового складу. Тому для запобігання подібних аварій висуваються досить високі вимоги до ємностей спеціального призначення для зберігання токсичних та вибухонебезпечних речовин.

Згідно з матеріалами експертиз, аварії РВС відбуваються, в основному, внаслідок руйнації найбільш навантаженого конструктивного елемента – вузла з’єднання стінки та днища циліндричної оболонки резервуара. Однією з причин цього руйнування є температурні напруження, які виникають внаслідок різниці температур цих поверхонь. Тому, саме такі задачі і є предметом досліджень у цій роботі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Механізм втрати цілісності РВС внаслідок силових та температурних напружень досить складний та

на жаль ще мало вивчений. Згідно з матеріалами експертиз, аварії РВС відбуваються, в основному, внаслідок руйнації найбільш навантаженого конструктивного елемента – вузла з'єднання стінки та днища циліндричної оболонки резервуара. У праці [1] вказано, що найчастіше втрата цілісності резервуара відбувається через відрив днища і причин поки що цьому невідомо. Вплив силових напружень на стінки та днища резервуара досліджено у працях [2, 3, 6]. У статті [2] було показано, що максимальна величина силових напружень виникає у вузлі з'єднання стінки та днища циліндричної оболонки. Також було встановлено, що найбільші радіальні відхилення були на відстані 0,3 м від днища. У вищезгаданих працях не було досліджено напружено-деформований стан стінки та днища резервуара, враховуючи різниці їх температур. Внаслідок відомих результатів силових та температурних напружень буде відома причина руйнування та відриву днища резервуара. Так як за останні роки кількість аварій інженерних споруд збільшується внаслідок силових та температурних впливів, тому дослідження напружено-деформованого стану стінки та днища резервуара при їх різниці температур є актуальними.

Формулювання мети статті

Математичне моделювання та дослідження напружено-деформованого стану конструктивного вузла з'єднання циліндричної оболонки з днищем РВС при зміні їх температури.

Виклад основного матеріалу

Змоделюємо резервуар як циліндричну оболонку, яка з'єднана на торці з днищем методом електродугового зварювання рис. 1.

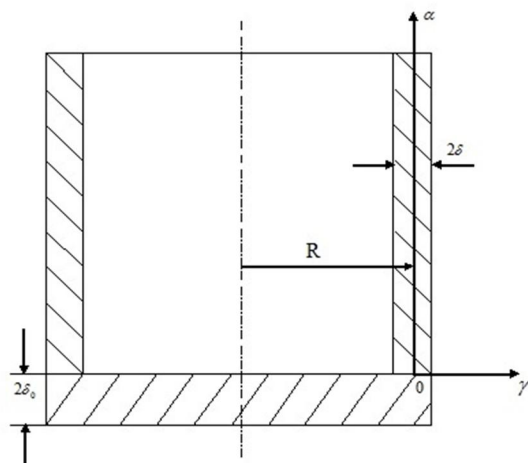


Рис. 1. Осьовий переріз резервуара

Радіус середньої поверхні циліндричної оболонки рівний R , а товщина її стінки $2d$. Товщина днища $2d_0$.

Внаслідок пожежі або диверсії оболонка резервуара інтенсивно нагрівається. Так як товщина днища більша від бічної стінки циліндричної оболонки, то виникає різниця температур, внаслідок чого і виникають температурні напруження. При виникненні вибуху у РВС дуже часто відбувається відрив днища і бокова поверхня резервуара відлітає на висоту більше 100 м, розливаючи пально-мастильні речовини на сусідні ємності. Площа горіння та ураження території внаслідок цього інтенсивно збільшується.

Отже, основними причинами втрати цілісності резервуара є температурні та силові напруження, внаслідок яких відбувається відрив днища. І ці напруження зростають внаслідок збільшення різниці температур стінки та днища, а також збільшення тиску відповідно.

Величини силових та температурних напружень додаються і внаслідок досягнення критичної величини відбувається втрата цілісності.

Дослідження впливу тиску на цілісність резервуара досліджено у [2, 5-8]. Тому досить актуальним є дослідження температурних напружень, що дасть змогу визначити загальні напруження.

Для визначення напружено-деформованого стану РВС при дії температури, використаємо систему рівнянь [1]

$$\frac{d^4 w}{da^4} + 4w^4 w = 4w^4 a_t R t(a), \quad (1)$$

де $w^4 = \frac{3(1-n^2)}{4d^2 R^2}$, E – модуль Юнга і n – коефіцієнт Пуассона матеріалу оболонки; $t(a)$ – зміна температури оболонки по висоті, $^{\circ}\text{C}$.

Нормальні кільцеві зусилля N_2 , моменти M_1 і M_2 , а також переміщення u вздовж осі резервуара визначаються за формулами:

$$N_2 = 2Ed \frac{w}{R}, \quad M_1 = - \frac{Ed}{2w^4 R^2} \frac{d^2 w}{da^2},$$

$$M_2 = M_1 n = - \frac{Edn}{2w^4 R^2} \frac{d^2 w}{da^2}, \quad (2)$$

$$u = \frac{1}{R} d[(1+n)a_t R t(a) - nw] da.$$

де a_t – температурний коефіцієнт лінійного розширення $\frac{1}{K}$.

Осьові s_{aa} та кільцеві s_{bb} напруження знаходимо за формулами:

$$s_{aa} = \frac{3M_1}{2d^3} g, \quad s_{bb} = \frac{1}{2d} \frac{N_2}{e} + 3M_2 \frac{g}{d^2} \frac{\ddot{\phi}}{\phi}, \quad (3)$$

де координата g відраховується від серединної поверхні по її зовнішній нормалі (див. рисунок 1). У випадку, коли температура постійна, рівняння записується у вигляді

$$\frac{d^4 w}{da^4} + 4w^4 w = 4w^4 a_t R t_1. \quad (4)$$

Днища РВС є подвійними по товщині і мають велику жорсткість на згин. В цьому випадку кут повороту нормалі до серединної поверхні оболонки є досить малим, тому крайові умови на лінії спряження днища і бокової поверхні РВС мають вигляд

$$w|_{a=0} = u|_{r=R}, \quad \frac{dw}{da}|_{a=0} = 0, \quad s_{rr}|_{r=R} = \frac{Q_1}{2d_0}, \quad (5)$$

де u – переміщення точок днища вздовж радіуса r , m ; s_{rr} – радіальні силові напруження в днищі резервуара, $Q|_{a=0} = Q_1$ – зусилля взаємодії між боковою циліндричною поверхнею РВС і його днищем, яке припадає на одиницю довжини.

Напружено-деформований стан днища РВС

Напружено-деформований стан осесиметричної циліндричної оболонки (РВС), яка вільна відносно осевих переміщень по напрямку координати a , що знаходиться під дією різниці температур у конструктивному вузлі з'єднання стінки та днищі резервуара, визначається прогином w стінки оболонки в напрямку координати g , внаслідок чого і відбувається руйнація резервуара.

Розглянемо напружено-деформований стан днища РВС. Згідно з розв'язком плоскої задачі теорії пружності радіальні переміщення u круглого днища, нормальні радіальні напруження s_{rr} і кільцеві напруження s_{jj} записуються у вигляді:

$$u = A_0 r + \frac{1+n_0}{2} a_t^{(0)} t_0 r; \quad (6)$$

$$s_{rr} = \frac{E_0}{1-n_0} \frac{e \dot{u}}{e \dot{r}} + n_0 \frac{u}{r} - a_t^{(0)} (1+n_0) t_0 \dot{u}; \quad (7)$$

$$s_{jj} = \frac{E_0}{1-n_0} \frac{e \dot{u}}{e \dot{r}} + n_0 \frac{du}{dr} - a_t^{(0)} (1+n_0) t_0 \dot{u}; \quad (8)$$

де A_0 – постійна інтегрування; E_0 , n_0 , $a_t^{(0)}$ – відповідно модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу днища, t_0 – температура днища, $^{\circ}C$.

Частковий розв'язок диференціального рівняння (4) має наступний вид

$$w(a) = e^{-wa} (C_1 \cos wa + C_2 \sin wa) + a_t R t_1.$$

Використовуючи першу та другу умови (5), отримаємо

$$C_1 = A_0 R + \frac{1+n_0}{2} a_t^{(0)} t_0 R - a_t R t_1 \quad \text{та} \quad C_1 = C_2$$

відповідно.

З третьої умови (5) знаходимо

$$A_0 = \frac{1-n_0}{2E_0 d_0} Q_1 + \frac{1-n_0}{2} a_t^{(0)} t_0.$$

Тоді розв'язок рівняння (4) має вигляд

$$w(a) = a_t R t_1 - \frac{RDl}{1+k_0} e^{-wa} (\cos wa + \sin wa), \quad (9)$$

$$\text{де } Dl = a_t t_1 - a_t^{(0)} t_0 \quad \text{і} \quad k_0 = \frac{Ed(1-n_0)}{E_0 d_0 w R}.$$

Використовуючи, що $Q_1 = \left. \frac{dM_1}{da} \right|_{a=0}$ і другу

умову (2), зусилля взаємодії запишуться виразом

$$Q_1 = \frac{2Ed}{wR} \frac{Dl}{1+k_0}. \quad (10)$$

Тоді співвідношення (6) запишеться

$$u(r) = \frac{k_0 Dl}{1+k_0} r + a_t^{(0)} t_0 r. \quad (11)$$

Підставивши вираз (11) у (8), знаходимо температурні напруження в днищі

$$s_{rr} = s_{jj} = \frac{k_0 E_0 Dl}{(1-n_0)(1+k_0)}. \quad (12)$$

Аналіз виразу (12) показує, що напруження в днищі є постійними і не залежать від радіуса.

Напружено-деформований стан стінки РВС

Враховуючи співвідношення (9), а також (2) і (3) для температурних напружень в циліндричній стінці РВС запишемо такі вирази:

$$s_{aa}(a, g) = - \frac{3EDl g y(wa)}{(1+k_0) d \sqrt{3(1-n^2)}}, \quad (13)$$

$$s_{bb} = - \frac{EDl}{1+k_0} \frac{e \dot{u}}{e \dot{r}}(wa) + \frac{3ng}{d \sqrt{3(1-n^2)}} y(wa) \dot{u}, \quad (14)$$

де $j(wa) = e^{-wa} (\cos wa + \sin wa)$,

$y(wa) = e^{-wa} (\cos wa - \sin wa)$.

Для напружень s_{bb} на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки резервуара $g = \pm d$ маємо:

$$s_{bb}^+(a) = - \frac{EDl}{1+k_0} \frac{e \dot{u}}{e \dot{r}}(wa) + \frac{3n}{\sqrt{3(1-n^2)}} y(wa) \dot{u}, \quad (15)$$

$$s_{bb}^-(a) = - \frac{EDl}{1+k_0} \frac{e \dot{u}}{e \dot{r}}(wa) - \frac{3n}{\sqrt{3(1-n^2)}} y(wa) \dot{u}. \quad (16)$$

Одержані вище формули використані для дослідження силових напружень в боковій стінці РВС.

Розрахунки проводились за формулами (9–16) для РВС – 900 при таких параметрах: $R = 5.2$ м; $d = 0.005$ м; $d_0 = 0.01$ м; $n = 0.33$; $n_0 = 0.28$; $E = 2.1 \times 10^{11}$ Па; $E_0 = 2 \times 10^{11}$ Па; $t_0 = 20$ $^{\circ}C$;

$$a_t = 14 \times 10^{-6} \frac{1}{K}; a_t^{(0)} = 12 \times 10^{-6} \frac{1}{K}.$$

Використовуючи (10), отримаємо $Q_1 = 22.75 \frac{\kappa H}{m}$

при $Dt = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ і $Q_1 = 62.57 \frac{\kappa H}{m}$ при $Dt = 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Напруження в днищі резервуара розраховані за виразом (12) $s_{rr} = s_{jj} = 1.138 \text{ МПа}$ при $Dt = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ і $s_{rr} = s_{jj} = 3.128 \text{ МПа}$ при $Dt = 60 \text{ }^\circ\text{C}$. Залежність радіальних напружень в днищі резервуара від температури бокової стінки резервуара наведено на рис. 2

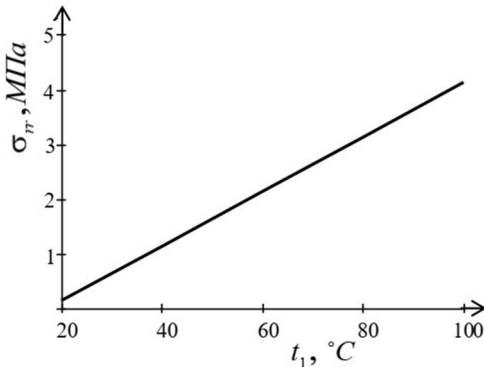


Рис. 2. Залежність радіальних напружень від температури оболонки

На рис. 2 показано, що радіальні напруження змінюються за лінійною залежністю при зміні температури та за абсолютною величиною є незначними.

Зміна осевих і кільцевих напружень в залежності від різниці температур стінки резервуара та його днища показано на рис. 3 і рис. 4

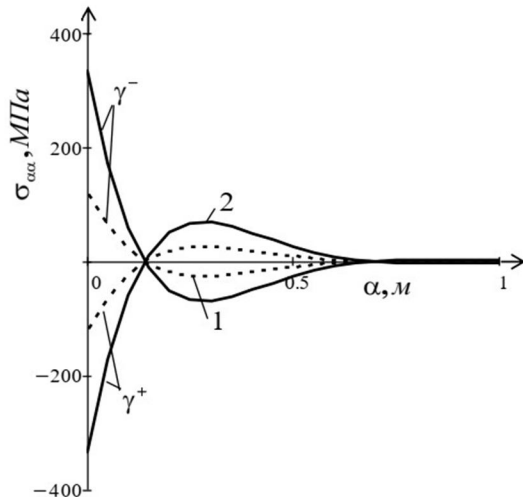


Рис. 3. Зміна осевих напружень вздовж координати a в залежності від різниці температур стінки та основи резервуара: 1- $Dt = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, 2- $Dt = 60 \text{ }^\circ\text{C}$

Аналіз графічних залежностей рис. 3 показує, що напруження s_{aa} приймають максимальні значення на поверхні $a = 0$ і s_{aa} значно залежить від різниці температур бічної стінки та основи резервуара. На зовнішній поверхні $g = +d$ вони є стискуючими,

а на поверхні $g = -d$ — розтягуючими. По абсолютній величині вони рівні між собою. Їх величина при $Dt = 20$ рівна 121.7 МПа, а при $Dt = 60$ рівна 334.7 МПа.

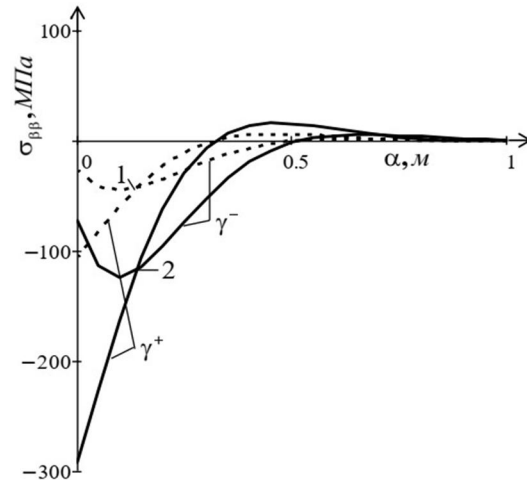


Рис. 4. Зміна кільцевих напружень вздовж координати a в залежності від різниці температур стінки та основи резервуара: 1- $Dt = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, 2- $Dt = 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Аналіз графічних залежностей рис. 4 показує, що кільцеві напруження s_{bb} досягають свого максимального значення на поверхні $a = 0$ і діють на стиск при $g = \pm d$. За величиною кільцеві напруження на зовнішній поверхні $g = +d$ дорівнюють 106.5 МПа і 292.9 МПа відповідно. Максимальне значення напруження s_{bb}^- приймають на висоті 0.2 м від днища і величини рівні 45 МПа і 114.8 МПа відповідно.

Так, як аналіз залежностей рис. 3 і рис. 4 показує, що осеві та кільцеві напруження досягають свого максимального абсолютного значення на поверхні $a = 0$ і залежать від температури, тому дослідимо їх зміну при різних температурах поверхні оболонки на рис. 5 і рис. 6.

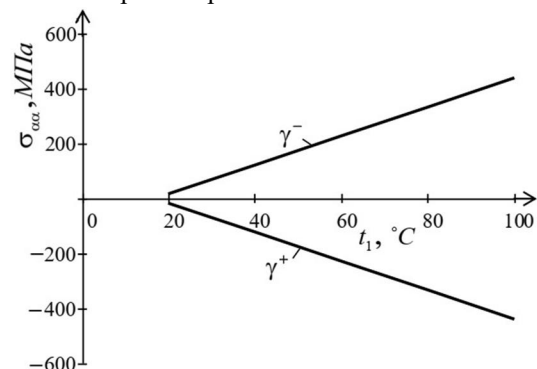


Рис. 5. Зміна осевих напружень від температури оболонки при $a = 0$

На рис. 5 показано залежність осевих напружень від зміни температури оболонки резервуара на поверхні $a = 0$. Аналіз залежностей показує, що величина осевих напружень різко збільшується при

збільшенні температури. Враховуючи аналіз рис. 5, можна визначити, при якій температурі осьові напруження досягнуть свого критичного значення, щоб запобігти втраті цілісності резервуара.

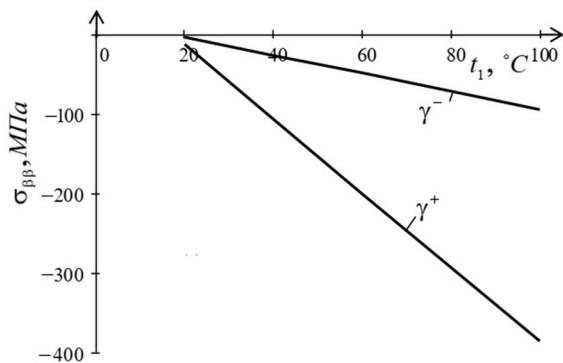


Рис. 6. Зміна кільцевих напружень від температури оболонки при $a = 0$

Аналіз графічних залежностей рис. 6 показує, що кільцеві напруження при зміні температури бічної поверхні резервуара досягають свого максимального значення на зовнішній поверхні $g = +d$ при $a = 0$ і діють на стиск. Слід зауважити, що осьові та кільцеві напруження при заданих температурах дуже близькі до критичних значень, що може призвести до руйнації конструктивного елемента – вузла з'єднання стінки та днища резервуара.

Висновки

Цілісність резервуарів для зберігання пально-мастильних матеріалів та токсичних речовин, які розташовані на базах, арсеналах та складах відіграють провідну роль у Збройних Силах України.

Внаслідок диверсії або пошкодження ємностей, можливий витік вибухонебезпечних та токсичних речовин. Утворені парогазові хмари можуть спричинити вибух та завдати шкоди особовому складу або зараження прилеглої території чи військової техніки, що не дає можливості проводити бойові дії протягом тривалого часу.

Використовуючи основні співвідношення теорії пружності тонкостінних оболонок, досліджено температурні напруження у циліндричному резервуарі за умов різниці температур стінки та днища, враховуючи фізико-механічні та геометричні його розміри.

Показано, що найбільша величина осьових та кільцевих напружень досягається у конструктивному елементі – вузлі з'єднання стінки та днища резервуара ($a = 0$). Осьові напруження на зовнішній поверхні $g = +d$ є стискуючими, а на поверхні $g = -d$ – розтягуючими. По абсолютній величині вони рівні між собою. Кільцеві напруження діють на стиск при $g = \pm d$. Максимальне значення напруження

s_{bb}^- приймають на висоті 0.2 м від днища, а s_{bb}^+ – на поверхні $a = 0$, які є значно більші від s_{bb}^- .

Аналіз графічних залежностей показав, що величина осьових та кільцевих напружень змінюється лінійно та різко збільшується при збільшенні різниці температур стінки та днища резервуара. Це дає нам змогу визначити, за яких умов температурні напруження досягнуть критичної величини та може відбутися втрата цілісності резервуара.

Отримані дослідження доцільно використовувати при розробці пропозицій щодо підвищення міцності циліндричних оболонок для зберігання вибухонебезпечних та токсичних речовин.

Список літератури

1. Тимошенко С. П., Гудер Дж. Теория упругости. М.: Наука. 1975. 576 с.
2. Глова Т.Я., Семерак М.М., Глова Б.М., Михайлишин М.Р. Вплив зміни тиску на цілісність резервуарів зберігання нафтопродуктів і токсичних речовин. *Військово-технічний збірник*. 2021. № 24. С. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.24.2021.31-36> (дата звернення 10.08.2022).
3. Семерак М.М., Глова Т.Я., Глова Б.М., Петрченко О.С. Дослідження параметрів витікання токсичних та вибухонебезпечних речовин і газів при дії високого тиску з ємностей спеціального призначення при їх зберіганні. *Військово-технічний збірник*. 2021. № 25. С. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.25.2021.49-53> (дата звернення 03.01.2022).
4. Fernanda da Silva Santos, Alexandre Landesmann Thermal performance-based analysis of minimum distances between fuel storage tanks exposed of fire. *Fire Safety Journal*. 2014. V. 69. pp. 57-68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.08.010> (дата звернення 07.12.2021).
5. Глова Т.Я., Семерак М.М., Глова Б.М., Корольова О.В. Дослідження напружено-деформованого стану ємностей спеціального призначення для зберігання вибухонебезпечних і токсичних речовин при їх нагріві. *Військово-технічний збірник*. 2022. № 26, С. 28–32. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.26.2022.28-32>. (дата звернення 30.08.2022).
6. Moshashaei P., Alizadeh S.S., Khazini L. et al. Investigate the Causes of fires and Explosions at External Floating Roof Tanks: A Comprehensive Literature Review. *J Fail. Anal. and Preven.* 2017. № 17. pp. 1044-1052. <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0333-0> (дата звернення 19.07.2022).
7. Daphne Pantousa, Konstantinos Tzaros, Maria-Alexandra Kefaki Thermal buckling behaviour of unstiffened and stiffened fixed-roof tanks under non-uniform heating. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018. V. 143. pp. 162-179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.12.018> (дата звернення 11.07.2022).
8. Aleksandrova, Nelli N. Effect of thermal gradients on stress/strain distributions in a thin circular symmetric plate. *Structural Engineering and Mechanics*. 2016. № 58 (4). pp. 627–639. DOI: <https://doi.org/10.12989/SEM.2016.58.4.627> (дата звернення 19.06.2022).

9. Semerak, F.V., Glek, R.R. The thermally stressed state of a round plate heated by an annular heat source. *J Math Sci*. 1993. № 64, pp. 944–946. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01140322> (дата звернення 15.05.2022).
10. Dafni Pantousa, Luis A. Godoy On the mechanics of thermal buckling of oil storage tanks. *Thin-walled structures*. 2019. № 145, pp. 10-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106432> (дата звернення 15.05.2022).
11. Розенштейн И. М. Аварии и надежность стальных резервуаров. М.: Недра, 1995. С. 44-172.
12. Волков О.М. Версия “домино” на пожаре группы РВС-20000 на линейной производственно-диспетчерской станции “Конда”. Интернет-журнал “Технологии безопасной безопасности”. 2013. () выпуск №3 (49). URL: <http://academygps.ru/ttb> (дата звернення 10.02.2021).

References

1. Tymoshenko S.P. and Gudier Dzh. (1975), “Teoriya pryhosti” [The theory of elasticity]. М.: Science. 1975. 576 p. [in Russian].
2. Hlova T., Semerak M., Hlova B., and Mykhailyshyn M. (2021). “Vplyv zminu tysku na cilisnist rezervuariv zberihannya naftoproductiv i toksichnyh rehovyn” [The influence of pressure changes on the integrity of tanks for storage of petroleum products and toxic substances]. *Military Technical Collection*, № 24, pp. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.24.2021.31-36> (Accessed 10.08.2022). [in Ukrainian].
3. Semerak M.M., Hlova T.Ya., Hlova B.M. and Petruchenko O.S. (2021), “Doslidzhennya parametriv vutikannya toksichnyh ta vybuhonebezpechnykh rehovyn I haziv pru dii vusokoho tysku z emnostei specialnoho pryznachennya pru ih zberihanni” [Investigation of parameters of leakage of toxic and explosive substances and gases under the action of high pressure from tanks of the special purpose during their storage]. *Military Technical Collection*, № 25, 49–53. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.25.2021.49-53> (Accessed 03.01.2022). [in Ukrainian].
4. Fernanda da Silva Santos and Alexandre Landesmann Thermal performance-based analysis of minimum distances between fuel storage tanks exposed of fire. *Fire Safety Journal*. 2014. V. 69. pp. 57-68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.08.010> (Accessed 07.12.2021). [in English].
5. Hlova T., Semerak M., Hlova B., and Korolova O. (2022), “Doslidzhennya napruzhenno-deformovanoho stany

yemnostey specialnoho pryznachennya dlya zberihannya vybuhonebezpechnykh I toksichnyh rehovyn pru ih nahrivi” [The investigation of the stress-strain state of special purpose capacities for storage of explosion and toxic substances under their heating]. *Military Technical Collection*, № 26, pp. 28–32. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.26.2022.28-32> (Accessed 30.08.2022) [in Ukrainian].

6. Moshashaei P., Alizadeh S.S. and Khazini L. et al. (2017), Investigate the Causes of fires and Explosions at External Floating Roof Tanks: A Comprehensive Literature Review. *J Fail. Anal. and Preven.* № 17, pp. 1044-1052. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0333-0> (Accessed 19.07.2022). [in English].
7. Daphne Pantousa, Konstantinos Tzaros and Maria-Alexandra Kefaki. (2018), Thermal buckling behaviour of unstiffened and stiffened fixed-roof tanks under non-uniform heating. *Journal of Constructional Steel Research*. V. 143. pp. 162-179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.12.018> (Accessed 11.07.2022). [in English].
8. Aleksandrova N. (2016), Effect of thermal gradients on stress/strain distributions in a thin circular symmetric plate. *Structural Engineering and Mechanics*. № 58 (4). pp. 627–639. <https://doi.org/10.12989/SEM.2016.58.4.627> (Accessed 19.06.2022). [in English].
9. Semerak, F.V. and Glek, R.R. (1993), The thermally stressed state of a round plate heated by an annular heat source. *J. Math. Sci.* № 64, pp. 944–946. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01140322> (Accessed 15.05.2022). [in English].
10. Dafni Pantousa and Luis A. Godoy. (2019), On the mechanics of thermal buckling of oil storage tanks. *Thin-walled structures*. № 145, pp. 10-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106432> (Accessed 15.05.2022). [in English].
11. Rozenshtein I. M. (1995), “Avarii i nadezhnost stal’nyh rezervuariv” [Accidents and reliability of steel tanks]: М.: Nedra. pp. 44-172. [in Russian].
12. O.M. Volkov (2013), Versiya “Domino” na pozhare grupy RVS-20000 na lineynoy proizvodstvenno-dyspetcherskoy stancii “Konnda” [Version “Domino” on the fire of group of vertical steel tanks on the linear production-management station “Konnda”]. Internet-magazine “Technosphere safety technologies” Issue № 3 (49), URL: <http://academygps.ru/ttb> (Accessed 10.02.2021). [in Russian].

INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE WALL AND BOTTOM OF CYLINDRICAL TANKS FOR THE STORAGE OF EXPLOSIVE SUBSTANCES

T. Hlova, B. Hlova, A. Baranov, O. Korolova

Using the method of mathematical modeling, as well as the laws of thermodynamics, analytical dependences were obtained to study the stress-strain state of spherical tanks depending on the different surface temperatures of this structure. The calculations performed showed that the radial stresses are insignificant compared to the tangential ones, which act on tension. The greatest absolute value of tangential stresses is taken on the inner surface of the spherical structure, acting in tension and on the outer surface – compression. The investigation results are presented graphically.

Explosive and toxic substances are a major component of military bases stored in special-purposes tanks, namely spherical tanks, which are one of the most common. As a result of sabotage or arson of these tanks, there is a leak of toxic substances and the formation of steam and gas clouds which can lead to an explosion, significant thermal radiation, and the possibility of infection of military equipment, territory, and various objects in the vicinity of the accident, including personnel, which makes it impossible to conduct hostilities for a long time.

Analyzing the experience of accidents at similar facilities, several types of accidents of spherical gasholders during their depressurization are possible, namely: explosion, flare, fireball, fire of toxic substances and the presence of a saturated explosive

cloud. Analyzing the extraordinary accidents in the places of storage of toxic, explosive substances and fuels and lubricants, which are related to the violation of their storage and exploitation, allows us to conclude that this is a global problem of today. Therefore, to prevent explosion and fire hazards, the strength of engineering structures that contain toxic and explosive substances are quite high requirements.

One of the main tasks in the general problem of explosion and fire safety is the ability to timely warn or prevent accidental explosions on building, military or explosion-proof structures, as well as personnel nearby. Therefore, the impact of temperature on special-purpose tanks due to sabotage, natural factors and abnormal cases on the strength characteristics of engineering structures of this type are important, both theoretically and practically.

Keywords: tank, temperature, annular and axial stresses, loss of tank integrity, deformation.

УДК 623.546

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.27.2022.59-64>

П.П. Ткачук, Л.Д. Величко, М.І. Войтович, М.І. Сорокатий

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

Article history: Received 22 September 2022; Revised 20 October 2022; Accepted 25 October 2022

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ МАСИ СНАРЯДА НА ЙОГО ДИНАМІКУ

У результаті полігонних досліджень отримана дискретна залежність між кутами прицілювання і горизонтальними дальностями лету снаряда для певного типу зброї. Поєднуючи використання цієї залежності та метод оберненої задачі механіки, визначається функціональна залежність сили лобового опору повітря від швидкості снаряда, детермінованих і недетермінованих чинників. На основі другого закону динаміки отримується система диференціальних рівнянь, яка описує рух снаряда під дією сили лобового опору, ваги снаряда та Кориолісової сили. В якості прикладу розглядається динаміка руху снаряда ОФ-462Ж, випущеного з 122-мм гаубиці Д-30, заряд зменшений. Його початкова швидкість надзвукова і дорівнює $V_0 = 565 \frac{M}{c}$. У цьому випадку, в залежності від кута прицілювання, під час лету снаряда його швидкість може змінюватися від надзвукової до підзвукової або навіть до дозвукової.

Оскільки маса снаряда, переважно, відрізняється від номінальної, то в роботі досліджується вплив зміни маси снаряда на дальність лету снаряда і кінематичні параметри руху. Встановлено, що при малих кутах прицілювання зменшення маси снаряда сприяє дальності лету снаряда. Проте зі збільшенням величини кута прицілювання сприяння зменшується і дальність лету снаряда стає меншою від дальності лету снаряда з номінальною масою. Якщо маса снаряда більша від номінальної, то при малих кутах прицілювання дальність лету снаряда є меншою від дальності лету снаряда з номінальною масою. Однак зі збільшенням кута прицілювання спостерігається поступове збільшення дальності лету снаряда, величина якої буде більша від дальності лету снаряда з номінальною масою.

Ключові слова: зовнішня балістика, сила лобового опору повітря, маса снаряда, балістичні поправки

Постановка проблеми

Окрім головної задачі зовнішньої балістики щодо встановлення залежності між кутом прицілювання та місцем розташування цілі при нормальних умовах, виникає ряд задач, пов'язаних з потребою визначення поправок, які обумовлені нестандартними умовами. Останні поділяються на детерміновані (форма і маса снаряда, густина і температура повітря, атмосферний тиск, деривація), недетерміновані (початкова швидкість снаряда, величина і напрямок швидкості вітру)

та інші чинники. У таблицях стрільб для кожного типу зброї та відповідного заряду вказані дискретні залежності між кутом прицілювання і горизонтальною дальністю лету снаряда та величини поправок обумовлених нестандартними умовами стрільби. Величини поправок, визначали чисельними методами і наближено.

Оскільки в реальних умовах стрільба, переважно, ведеться при різних значеннях детермінованих і недетермінованих чинників, тому вплив величин поправок