

БОЙОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ ОБТ

УДК 614.841

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.26.2022.28-32>Т.Я. Глова¹, М.М. Семерак², Б.М. Глова³, О.В. Корольова¹¹ Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів² Національний університет "Львівська Політехніка", Львів³ Львівський національний аграрний університет, Дубляни*Article history:* Received 14 February 2022; Revised 28 February 2022; Accepted 2 May 2022**ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЄМНОСТЕЙ
СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ І
ТОКСИЧНИХ РЕЧОВИН ПРИ ЇХ НАГРІВІ**

У роботі, використовуючи метод математичного моделювання, а також закони термодинаміки, одержано аналітичні залежності для дослідження напружено-деформованого стану сферичних резервуарів в залежності від різних температур поверхні цієї конструкції. Проведені розрахунки показали, що радіальні напруження є незначними у порівнянні з тангенціальними, які діють на розтяг. Найбільше абсолютне значення тангенціальні напруження приймають на внутрішній поверхні сферичної конструкції, які діють на розтяг та на зовнішній – стиск. Результати досліджень представлені графічно.

Ключові слова: температура, температурні напруження, деформація, переміщення, сфера.

Постановка проблеми

Вибухонебезпечні речовини, які знаходяться на арсеналах, базах та складах озброєння, ракет і боеприпасів відіграють важливу роль у Збройних Силах (ЗС) України, так як стан їх живучості значно впливає на їх боєздатність. В умовах збройної агресії з боку Російської Федерації збереження вибухонебезпечних речовин та наявного боезапасу ЗС України набуло важливого значення. Саме такі ситуації засвідчили необхідність запровадження на державному рівні додаткових організаційних заходів щодо захисту об'єктів зберігання токсичних та вибухонебезпечних речовин ЗС України.

Вибухонебезпечні та токсичні речовини є основною складовою на військових базах, які зберігаються у ємностях спеціального призначення, а саме у сферичних резервуарах, які є одні з найбільш розповсюджених.

Внаслідок диверсій або підпалу цих ємностей відбувається витік токсичних речовин та утворення парогазових хмар, які можуть призвести до вибуху, значної теплової радіації, а також можливість спричинити зараження військової техніки, території та різних об'єктів, що знаходяться в околі аварії, в тому числі, особового складу, що унеможливило проводити бойові дії протягом тривалого часу.

Аналізуючи досвід аварій на аналогічних об'єктах, можливі декілька типів аварій сферичних газгольдерів при їх розгерметизації, а саме: вибух, факельне горіння, вогненна куля, пожежа розливу токсичних речовин та наявність насиченої вибухонебезпечної хмари.

Надзвичайні ситуації на таких об'єктах характеризуються високою швидкістю руйнування будівельних конструкцій та впливу теплового потоку на військові частини із значною кількістю боеприпасів, які знаходяться поряд, так як це було біля села Крячки Васильківського району Київської області на нафтобазі "БРСМ-Нафта". Загальна маса пального на цій нафтобазі становила близько 15000 тонн, що є еквівалентним 12 бомбам за вивільненою енергією, скинутих на Хіросіму.

Однією з найбільш резонансних аварій сферичних резервуарів була у Фейзені (Франція), яка відбулася 4 січня 1966 року. Внаслідок вибуху такої ємності з пропаном місткістю 1200 м³, утворилася вогненна куля, від якої загинули 17 осіб та отримали важкі травми 80 осіб, що знаходилися на віддалі до 300 м від місця аварії. Внаслідок цього вибухнули ще чотири ідентичні резервуари і загорілися інші ємності з бензином і нафтою.

Аналізуючи надзвичайні події (аварії) в місцях зберігання токсичних, вибухонебезпечних речовин

та пально-мастильних матеріалів, які пов'язані із порушенням їх зберігання та експлуатації, дозволяє дійти висновку, що це – глобальна проблема сучасності.

Тому для запобігання вибухів внаслідок пожежі, до міцності інженерних споруд, в яких містяться токсичні та вибухонебезпечні речовини, висуваються досить високі вимоги.

Одним із основних завдань у загальній проблемі безпеки внаслідок вибухів під час пожежі є вміння вчасно застерегти та запобігти аварійних вибухів на будівельні, військові чи вибухозахисні конструкції, а також на особовий склад, що знаходиться поряд.

Тому питання впливу температури на ємності спеціального призначення внаслідок диверсій, природних чинників та нештатних випадків на характеристики міцності інженерних споруд вказаного типу є важливими як із теоретичного, так і з практичного боку. Тому саме такі задачі і є предметом розгляду у цій роботі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Незважаючи на інтенсивні дослідження для розробки комплексу заходів з метою попередження вибухів внаслідок пожежі, залишається ряд відкритих питань. Механіка руйнування та вибуху сферичних резервуарів досить складна і, на жаль, ще дуже мало вивчена. Дослідження впливу тиску та температури на міцнісні характеристики циліндричних резервуарів було проведено у працях [2-6]. У роботах [4, 10] було досліджено безпечну відстань при дії ударної хвилі ємності для зберігання вибухонебезпечних речовин. Так як у вищесказаних роботах не було проведено дослідження напружено-деформованого стану сферичних резервуарів при дії температури на їх поверхню, то виникає потреба у цьому дослідженні. Актуальність досліджень міцнісних характеристик сферичних ємностей для зберігання вибухонебезпечних речовин підтверджується збільшенням в останні роки техногенних аварій, зокрема і в Збройних Силах України, які пов'язані із температурними та силовими впливами.

Формулювання мети статті

Математичне моделювання, визначення та аналіз напружено-деформованого стану сферичних ємностей спеціального призначення для зберігання вибухонебезпечних та токсичних речовин при дії теплового потоку на їх поверхню.

Виклад основного матеріалу

Розглянуто сферу радіуса $R_0 < r < R$, температура якої $T_0 = const$ на поверхні $r = R_0$. Починаючи з деякого часу, поверхня сфери $r = R$ нагрівається

тепловим потоком і приймає температуру $T_1 = const$.

При зміні температури виникають температурні переміщення і деформації, які призводять до появи температурних напружень. Ці напруження часто бувають причиною втрати цілісності інженерної конструкції.

Переміщення точок сфери вздовж радіуса $R_0 < r < R$ знайдемо з рівняння [1]

$$\frac{d^2u(r)}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{du(r)}{dr} - \frac{2u(r)}{r^2} = \frac{1+n}{1-n} a_t \frac{dT(r)}{dr}, \quad (1)$$

де $u(r)$ – переміщення точок сфери в напрямку радіуса r , м; a_t – коефіцієнт температурного лінійного розширення, $\frac{1}{K}$; n – коефіцієнт Пуассона.

Інтегрування рівняння (1) спрощується, якщо його представити наступним чином

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r^2} \frac{d(r^2 u(r))}{dr} \right) = \frac{1+n}{1-n} a_t \frac{dT(r)}{dr}. \quad (2)$$

Проінтегрувавши двічі рівняння (2), отримаємо розв'язок рівняння (1)

$$u(r) = \frac{1+n}{1-n} a_t \frac{1}{r^2} \int_{R_0}^r T(r) r^2 dr + C_1 r + \frac{C_2}{r^2}, \quad (3)$$

де C_1 і C_2 – сталі інтегрування, які визначимо в подальшому з крайових умов.

При відомому законі зміни переміщення $u(r)$ можна знайти радіальні s_r і тангенціальні s_q температурні напруження за виразом:

$$s_r(r) = \frac{E}{(1+n)(1-2n)} \left[(1-n) \frac{du(r)}{dr} + 2n \frac{u(r)}{r} - (1+n) a_t T(r) \right] \quad (4)$$

$$s_q(r) = \frac{E}{(1+n)(1-2n)} \left[\frac{du(r)}{r} + n \frac{du(r)}{dr} - (1+n) a_t T(r) \right]$$

де E – модуль Юнга, Па.

Підставивши (3) у співвідношення (4), отримаємо:

$$s_r(r) = - \frac{2a_t E}{1-n} \frac{1}{r^3} \int_{R_0}^r T(r) r^2 dr + \frac{EC_1}{1-2n} - \frac{2EC_2}{1+n} \frac{1}{r^3}, \quad (5)$$

$$s_q(r) = \frac{a_t E}{1-n} \frac{1}{r^3} \int_{R_0}^r \dot{\sigma} T(r) r^2 dr + \frac{EC_1}{1-2n} + \frac{EC_2}{1+n} \frac{1}{r^3} - \frac{a_t E T(r)}{1-n} \quad (6)$$

Розглянемо термонапружений стан сфери, обумовлений зміною температури з врахуванням граничних умов:

$$s_r(R_0) = 0, \quad s_r(R) = 0. \quad (7)$$

Враховуючи (5)-(7), отримаємо

$$s_r(r) = \frac{2a_t E}{1-n} \left[\frac{r^3 - R_0^3}{R^3 - R_0^3} \int_{R_0}^R \dot{\sigma} T(r) r^2 dr - \int_{R_0}^r \frac{1}{r^3} \dot{\sigma} T(r) r^2 dr \right] \quad (8)$$

$$s_q(r) = \frac{2a_t E}{1-n} \left[\frac{2r^3 + R_0^3}{R^3 - R_0^3} \int_{R_0}^R \dot{\sigma} T(r) r^2 dr + \int_{R_0}^r \frac{1}{2r^3} \dot{\sigma} T(r) r^2 dr - \frac{1}{2} T(r) \right] \quad (9)$$

Температурне поле для сферичних конструкцій визначається з диференціального рівняння теплопровідності

$$\frac{\nabla^2 T(r)}{r^2} + \frac{2}{r} \frac{\nabla T(r)}{r} = 0, \quad R_0 < r < R \quad (10)$$

та крайових умов

$$T(R_0) = T_0, \quad (11)$$

$$T(R) = T_1, \quad (12)$$

де T_0 – початкова температура на поверхні $r = R_0$, $^{\circ}C$,

а T_1 – температура на поверхні $r = R$, $^{\circ}C$.

Розв'язок рівняння (10) при крайових умовах (11)-(12) має вигляд

$$T(r) = T_0 - (T_0 - T_1) \frac{R}{R - R_0} \frac{\frac{R}{r} - \frac{R_0}{r}}{\frac{R}{r} - \frac{R_0}{R}} \quad (13)$$

За формулою (13) проведений розрахунок температурного розподілу сфери вздовж радіуса $R_0 < r < R$ при таких параметрах:

$$T_0 = 20 \text{ } ^{\circ}C; \quad R_0 = 8 \text{ м}; \quad R = 8.02 \text{ м}.$$

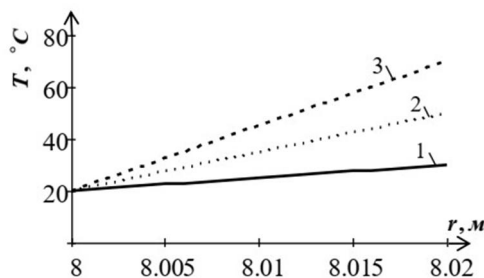


Рис. 1. Температурний розподіл по товщині сфери

1 - $T_1 = 30 \text{ } ^{\circ}C$; 2 - $T_1 = 50 \text{ } ^{\circ}C$; 3 - $T_1 = 70 \text{ } ^{\circ}C$

Аналіз графічної залежності рис. 1 показує зміну температурного розподілу та градієнта вздовж радіуса сфери $R_0 < r < R$ при заданих температурних режимах.

Розрахунки радіальних та тангенціальних напружень проводились за формулами (8)-(9) та (13) при таких параметрах:

$$a_t = 14 \times 10^{-6} \frac{1}{K}, \quad E = 2.1 \times 10^{11} \text{ Па}, \quad n = 0.33.$$

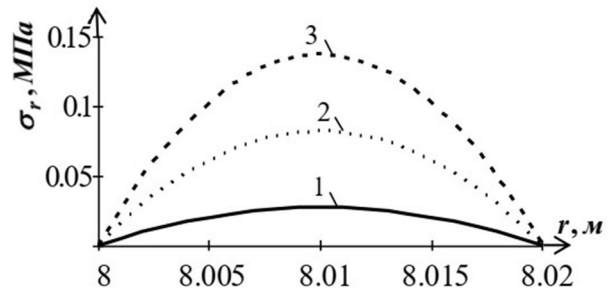


Рис. 2. Радіальні напруження при
1 - $T_1 = 30 \text{ } ^{\circ}C$; 2 - $T_1 = 50 \text{ } ^{\circ}C$; 3 - $T_1 = 70 \text{ } ^{\circ}C$

На рис. 2 показано, що на поверхнях $r = R_0$ та $r = R$ радіальні напруження рівні нулю при всіх значеннях температурних режимів. На середині товщини сферичної конструкції радіальні напруження є незначними і досягають свого абсолютного максимального значення в залежності від температурних режимів і ці напруження діють на розтяг.

Зміна тангенціальних напружень в залежності від температурних режимів, обчислена за формулою (9) і показана на рис. 3

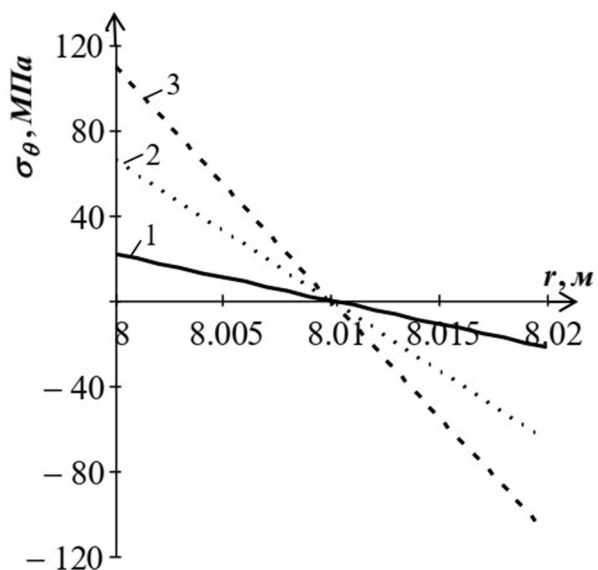


Рис. 3. Тангенціальні напруження при
1 - $T_1 = 30 \text{ } ^{\circ}C$; 2 - $T_1 = 50 \text{ } ^{\circ}C$; 3 - $T_1 = 70 \text{ } ^{\circ}C$

Аналіз графічної залежності показує, що тангенціальні напруження у порівнянні з радіальними на середині товщини сферичної конструкції рівні нулю, а найбільшого свого максимального значення досягають на внутрішній та зовнішній оболонках сфери. На внутрішній поверхні сфери тангенціальні напруження при температурі $T = 70^\circ \text{C}$ рівні 109,9 МПа і діють на розтяг, а на зовнішній поверхні $\sigma_q = -109,5$ МПа, що діють на стиск. Слід зауважити, що тангенціальні напруження при заданій температурі поверхні сферичної конструкції близькі до критичних значень, що може завдати руйнації даної оболонки.

Висновки

Вибухонебезпечні та токсичні речовини є основною складовою на військових базах, до зберігання яких відносяться з особливою обережністю. Вони зберігаються у ємностях спеціального призначення, а саме у сферичних резервуарах, які є одні з найбільш розповсюджених.

Внаслідок природних чинників, диверсій або підпалу цих ємностей відбувається витік токсичних речовин та утворення парогазових хмар, що може призвести до вибуху, значної теплової радіації, а також можливості спричинити зараження військової техніки, території та різних об'єктів, що знаходяться в околі аварії, в тому числі особового складу, що унеможливило проводити бойові дії протягом тривалого часу.

В роботі визначено температурний розподіл по товщині сферичної оболонки внаслідок різних температурних режимів, а також досліджено напружено-деформований стан сферичних резервуарів (газгольдерів). Показано, що радіальні напруження при заданих температурних режимах діють на розтяг і досягають свого максимального значення на середині товщини стінки сферичної оболонки. Тангенціальні напруження у порівнянні з радіальними є дуже великі і досягають свого максимального значення на внутрішній та зовнішній оболонках сферичної конструкції. А саме на внутрішній поверхні сфери тангенціальні напруження діють на розтяг, а на зовнішній – стиск.

Ці напруження при заданій температурі поверхні є близькі до критичних, що потрібно врахувати для запобігання руйнації конструкції, а як наслідок вибуху та надзвичайних ситуацій.

Тому досить важливим фактором вибухонебезпечності є її запобігання внаслідок визначення міцнісних характеристик при різних температурних режимах.

Список літератури

1. Тимошенко С. П., Гудер Дж. Теория упругости : учебник. Москва: 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 10.08.2021).
3. Семерак М. М., Глова Т. Я., Глова Б. М., Петрученко 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 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> (дата звернення 07.12.2021).
5. Глова Т. Я., Семерак М. М., Глова Б. М. Вплив зміни температури на цілісність резервуарів зберігання нафтопродуктів і токсичних речовин. *Військово-технічний збірник*. 2020. № 23. С. 34–39. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.23.2020.34-39> (дата звернення 10.02.2021).
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.* № 17, pp. 1044–1052 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0333-0> (дата звернення 10.07.2021).
7. Alexandrov S. and Alexandrova N. Thermal effects on the development of plastic zones in thin axisymmetric plates. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2001. № 36 (2). pp. 169–175. DOI: <https://doi.org/10.1243/0309324011512720> (дата звернення 1.06.2021).
8. Aleksandrova and 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. <https://doi.org/10.12989/SEM.2016.58.4.627> (дата звернення 10.02.2021).
9. Semerak F.V. and Glek R.R. The thermally stressed state of a round plate heated by an annular heat source. *J Math Sci* 64. 1993. pp. 944–946. <https://doi.org/10.1007/BF01140322> (дата звернення 10.02.2021).
10. Dafni Pantousa and Luis A. Godoy On the mechanics of thermal buckling of oil storage tanks. *Thin-walled structures*. 2019. № 145, p. 10–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106432> (дата звернення 10.02.2021).
11. Розенштейн И. М. Аварии и надежность стальных резервуаров : учебник. Москва: Недра, 1995. С. 44–172.

References

1. Tymoshenko S.P. and Gudier Dzh. (1975), "Teoriya upryhosti" [The theory of elasticity] : Tutorial. Moscow: 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 rechovin" [The influence of pressure changes on the integrity of tanks for storage of petroleum products and toxic substances]. *Military Technical Collection*, Lviv, 2021, № 24, pp. 31–36. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.24.2021.31-36> (Accessed 10.02.2021). [in Ukrainian].
3. Semerak M.M., Hlova T.Ya., Hlova B.M. and Petruchenko O.S. (2021), "Doslidzhennya parametriv vutikannya toksichnyh ta vybuhonebezpechnykh rechovin 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*, Lviv, 2021, № 25, p. 49–53. <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. T. Hlova, M. Semerak and B. Hlova (2020), "Vplyv zminu temperatury na cilisnist rezervuariv zberihannya naftoproductiv i toksichnyh rechovin" [The influence of temperature changes on the integrity of tanks for storage of petroleum products and toxic substances]. *Military Technical Collection*. Lviv, 2020. № 23. p. 34–39. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.23.2020.34-39> (Accessed 10.02.2021). [in Ukrainian].
6. Moshashaei, P., Alizadeh, S.S., 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 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0333-0> (Accessed 10.07.2021). [in English].
7. Alexandrov S. and Alexandrova N. (2001), Thermal effects on the development of plastic zones in thin axisymmetric plates. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2001. № 36 (2). pp. 169-175. DOI: <https://doi.org/10.1243/0309324011512720> (Accessed 1.06.2021). [in English].
8. Aleksandrova N. (2016), Effect of thermal gradients on stress/strain distributions in a thin circular symmetric plate. *Structural Engineering and Mechanics*. 2016. № 58 (4). pp. 627–639. <https://doi.org/10.12989/SEM.2016.58.4.627> (Accessed 10 February 2021). [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. 1993. <https://doi.org/10.1007/BF01140322> (Accessed 10 February 2021). [in English].
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> (Accessed 10 February 2021). [in English].
11. Rozenshtein I.M. (1995), "Avarii i nadezhnost stal'nyh rezervuariv" [Accidents and reliability of steel tanks] : Tutorial. Moscow: Nedra. 1995. pp. 44–172. [in Russian].

THE INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF SPECIAL PURPOSE CAPACITIES FOR STORAGE OF EXPLOSION AND TOXIC SUBSTANCES UNDER THEIR HEATING

T. Hlova, M. Semerak, B. Hlova, 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: temperature, temperature stresses, deformation, displacement, sphere.