

УДК: 614.841

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.25.2021.49-53>М.М. Семерак¹, Т.Я. Глова², Б.М. Глова³, О.С. Петрученко²¹ Національний університет “Львівська Політехніка”, Львів² Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів³ Львівський національний аграрний університет, Дубляни

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИТІКАННЯ ТОКСИЧНИХ ТА ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН І ГАЗІВ ПРИ ДІЇ ВИСОКОГО ТИСКУ З ЄМНОСТЕЙ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ПРИ ЇХ ЗБЕРІГАННІ

У роботі методом математичного моделювання з використанням законів термодинаміки та механіки рідин і газів одержані аналітичні залежності для дослідження параметрів витікання токсичних та вибухонебезпечних речовин і газів при дії високого тиску з ємностей при їх зберіганні. При моделюванні процесу швидкості витікання газу було використано принцип Сен-Венана. Одержано залежність тривалості витікання газу з ємностей спеціального призначення при зміні площі аварійного отвору і перепаду тиску. Отримані співвідношення дають змогу визначити швидкість та масову витрату газу в залежності від площі отвору, часу витікання та різниці тисків.

Результати досліджень представлені графічно.

Ключові слова: резервуар, токсичні речовини, втрата цілісності резервуара, швидкість, маса, тиск.

Постановка проблеми

Стан живучості арсеналів, баз і складів озброєння, ракет і боєприпасів Збройних Сил (ЗС) України, на яких зберігаються вибухонебезпечні речовини, значно впливає на їх боєдатність. В умовах збройної агресії з боку Російської Федерації збереження наявного боєзапасу ЗС України набуло важливого значення. Ці ситуації засвідчили необхідність запровадження на державному рівні додаткових організаційних заходів щодо захисту об'єктів зберігання вибухонебезпечних речовин ЗС України.

Аналіз надзвичайних подій (аварій) в місцях зберігання вибухонебезпечних речовин (ВР) та пально-мастильних матеріалів, що пов'язані із порушенням порядку їх експлуатації, дозволяє дійти висновку, що це – глобальна проблема сучасності.

Токсичні та вибухонебезпечні речовини є основною складовою на військових базах, які зберігаються у ємностях спеціального призначення, а саме у циліндричних вертикальних резервуарах (РВС), які є найбільш розповсюдженими. Внаслідок підпалу або пошкодження цих ємностей відбувається витік токсичних та вибухонебезпечних речовин, що може призвести до вибуху, а також спричинити зараження військової техніки, території та різних об'єктів, в тому числі особового складу, що унеможливує проведення бойових дій протягом тривалого часу.

Пожежа на нафтобазі “БРСМ-Нафта” в селі Крачки Васильківського району Київської області, що розташована 30 км від столиці, почалася 8 червня 2015 року і тривала протягом 8 днів і була однією з найбільш резонансних аварій та пожеж на території України. Вона становила досить високу небезпеку, оскільки неподалік була розміщена військова частина із значним бойовим арсеналом. Внаслідок вибуху та пожежі на нафтобазі загинули 6 осіб і 18 травмовано. Загальна маса палива на цій нафтобазі становила близько 15000 тонн, що за вивільненою енергією є еквівалентним 12 бомбам, скинутим на Хіросіму. Тому, щоб запобігти вибухопожежонебезпеці, до міцності циліндричних інженерних споруд висуваються досить високі вимоги.

Циліндричні резервуари для зберігання вибухонебезпечних речовин і нафтопродуктів на військових складах є основними. Вони розташовуються у вигляді окремих резервуарів або групами резервуарів (резервуарні парки). Вертикальні наземні сталеві резервуари (РВС) із стаціонарним дахом набули найбільшого розповсюдження об'ємом від 100 до 50000 м³, які розташовуються на відкритих площадках. Резервуари наповнюються на 80% об'єму відповідно до норм експлуатації. Отже, в кожному резервуарі є об'єм газу, що знаходиться під внутрішнім тиском. Протягом року ємності піддаються дії як додатних, так і від'ємних атмосферних температур. Дуже часто є досить

різкі зміни температур, внаслідок чого рідини інтенсивно випаровуються або різко конденсуються накопичені гази. При випаровуванні 1 м^3 нафтопродукту займає 770 м^3 пари, а 1 м^3 водяного розчину – 1750 м^3 пари. Тобто різко змінюється тиск в резервуарі.

Одним із основних завдань у загальній проблемі вибухобезпеки є вміння визначати наслідки аварійних вибухів на будівельні чи вибухозахисні конструкції, а також на особовий склад, що знаходиться поряд.

Тому питання впливу тиску при різкому нагріванні ємностей внаслідок природних чинників та нештатних випадків на міцнісні характеристики інженерних споруд вказаного типу є важливими із теоретичних і практичних боків. У разі виникнення аварійних ситуацій потрібно знати час і швидкість витікання вибухонебезпечних речовин та газів у залежності від площі отвору для швидкої оцінки та запобігання їх розповсюдженню. Тому саме такі задачі і є предметом розгляду у цій роботі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Механіка руйнації та вибуху РВС досить складна і, на жаль, ще мало вивчена. В цей же час потрібно зауважити, що згідно з дослідженнями та матеріалами експертизи руйнація РВС, в основному, відбувається внаслідок руйнування найбільш навантаженого елемента, а саме вузла з'єднання днища резервуара з його боковою стінкою [2-3]. Дослідження впливу температури, а також температурних напружень на з'єднанні бокової циліндричної поверхні з днищем проведено у працях [4-10]. У працях [1, 11] проведено аналіз впливу гідростатичного тиску на бокову поверхню стінки резервуара. Але у вищесказаних статтях не було проведено дослідження параметрів витікання вибухонебезпечних рідин та газів при руйнації циліндричних резервуарів внаслідок надлишкового тиску. Актуальність досліджень підтверджується збільшенням в останні роки техногенних аварій, зокрема і в Збройних Силах України, циліндричних ємностей для зберігання нафтопродуктів і вибухонебезпечних речовин, які пов'язані із температурними та силовими впливами.

Формулювання мети статті

Дослідження параметрів витікання вибухонебезпечних речовин і газів, які знаходяться в резервуарі при внутрішньому тиску.

Виклад основного матеріалу

За умов пожежі, а також при підвищенні температур за рахунок природних чинників, циліндричні ємності нагріваються та інтенсивність випаровування

нафтопродуктів збільшується. Тиск в резервуарі буде збільшуватися при наявності постійної покривлі. Якщо інтенсивність випаровування більша ніж пропускна здатність дихальної арматури, тоді утворюється загроза вибуху. Внаслідок вибуху в РВС дуже часто відбувається відрив днища від бокової циліндричної поверхні і резервуар миттєво відлітає на висоту понад 100 м та розливає нафтопродукт на територію резервуарного парку та сусідні резервуари, внаслідок чого площа горіння інтенсивно збільшується.

Руйнування цілісності циліндричного резервуара, а саме відрив днища від його поверхні, сприяють силові та температурні напруження абсолютна величина яких збільшується завдяки збільшенню температури нагріву та відповідно внутрішнього тиску.

Масу газу, який міститься в резервуарі, можна визначити з рівняння Менделєєва-Клапейрона

$$m = \mu_i \cdot \frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{p \cdot V}{R_i \cdot T}, \quad (1)$$

де μ_i – молярна маса речовини, кг/моль ; p – тиск газу, Па; V – об'єм резервуара, м^3 ; $R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$ – універсальна газова стала; T – температура газу в резервуарі, К .

Масова витрата газу $M = \frac{m}{\tau}$ пов'язана зі швидкістю його витікання таким співвідношенням

$$M = \rho \cdot \omega \cdot v, \quad (2)$$

де M – масова витрата, кг/с ; ρ – густина газу, кг/м^3 ; τ – тривалість витікання газу, с; ω – площа отвору, з якого витікає газ, м^2 ; v – швидкість витікання газу, м/с .

Швидкість витікання газу можна визначити за формулою Сен-Венана [1]

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_2} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (3)$$

де p_1 – тиск газу в резервуарі, Па; p_2 – атмосферний тиск, Па; $k = 1,29$ – показник адіабати; ρ_2 – густина газу, кг/м^3 .

Підставивши вираз (3) у (2), отримаємо

$$M = \frac{\omega \cdot p_1}{R_2 \cdot T} \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R_2 \cdot T \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (4)$$

де $R_2 = \frac{R}{\mu_2}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{кг}}$ – газова стала.

Оскільки тиск газу зменшується в процесі його витікання, то буде зменшуватися й швидкість витікання та масова витрата газу. Запишемо (1) в диференціальній формі

$$dm = \frac{V}{R_i \cdot T} dp \quad (5)$$

Враховуючи, що $M = \frac{dm}{d\tau}$ і (5), отримуємо таке співвідношення

$$M = \frac{V}{R \cdot T} \frac{dp}{d\tau} \quad (6)$$

З виразу (6) визначимо тривалість витікання газу з резервуара

$$\tau(\omega) = \frac{V}{\omega \cdot R_2 \cdot T} \cdot$$

$$\int_{p_2}^{p_1} \frac{dp}{\sqrt{2 \cdot \left[\frac{k}{k-1} \cdot \frac{p^2}{R_2 \cdot T} \cdot \left(\left(\frac{p_2}{p} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right) \right]}} \quad (7)$$

Розрахунки проводились за формулами (3)-(7) при таких параметрах: $p_1 = 5 \cdot 10^5$ Па, $p_2 = 10^5$ Па, $k = 1,29$, $T = 350$ К, $\mu_2 = 0,018$ кг/моль, $V = 1000$ м³.

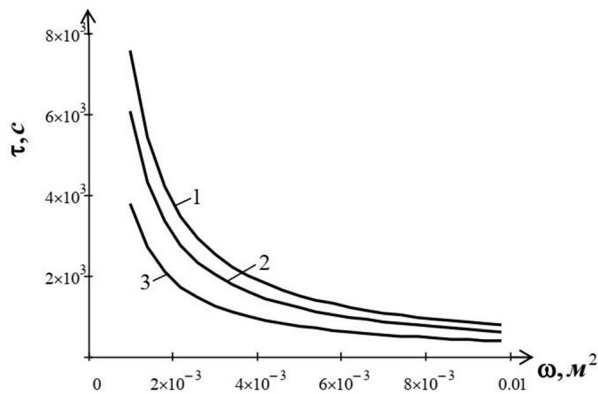


Рис 1. Тривалість витікання газу з резервуара в залежності від площі отвору при 1 - $V = 1000$ м³; 2 - $V = 800$ м³; 3 - $V = 500$ м³

На рис.1 показано закон зміни тривалості витікання газу з резервуара в залежності від площі отвору. Аналіз графічної залежності показує, що найбільш інтенсивне витікання здійснюється з малих отворів. Так, при площі отвору $\omega = 4 \cdot 10^{-3}$ м² час витікання з резервуара об'ємом $V = 1000$ м³ становить 1990 с, а для резервуара об'ємом $V = 500$ м³ – 997 с.

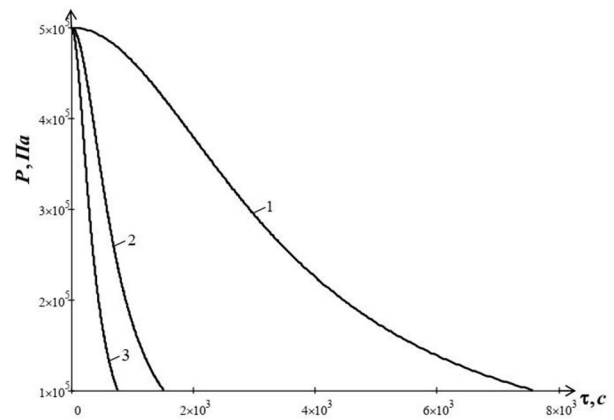


Рис 2. Зміна тиску в резервуарі при розгерметизації 1 - $\omega = 0,001$ м²; 2 - $\omega = 0,005$ м²; 3 - $\omega = 0,01$ м²

На рис.2 зображена графічна залежність зміни тиску в резервуарах в залежності від часу при різних площах отворів витікання. Аналіз графіка показує, що при отворі, рівному $\omega = 0,001$ м², при $V = 1000$ м³ повне витікання здійснюється за 7580 с, а при отворі $\omega = 0,01$ м² – 758 с.

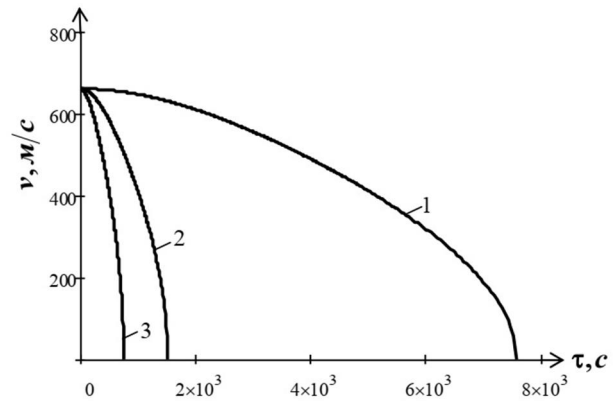


Рис 3. Зміна швидкості аварійного витікання газу з резервуара 1 - $\omega = 0,001$ м²; 2 - $\omega = 0,005$ м²; 3 - $\omega = 0,01$ м²

Зміна швидкості витікання в залежності від часу зображено графічно на рис.3. Аналіз залежності показує, що величина швидкості витікання різко зменшується із збільшенням отвору.

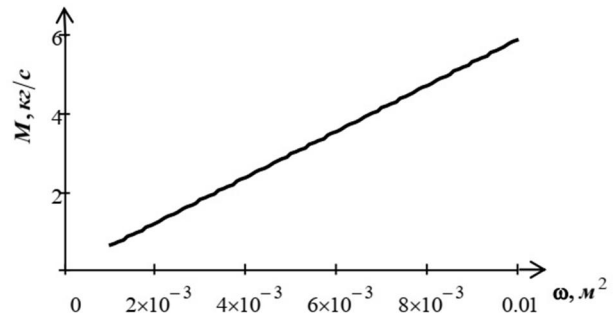


Рис 4. Зміна маси аварійного витікання газу з резервуара в залежності від площі отвору

На рис.4 показана графічна залежність зміни маси газу за секунду в залежності від величини отвору. Аналіз графіка показує, що маса газу при аварійному витіканні збільшується пропорційно зміні отвору.

Висновки

Пально-мастильні матеріали та вибухонебезпечні речовини є основною складовою у Збройних Силах України, до яких відносяться з особливою обережністю до їх зберігання. У разі виникнення аварійних ситуацій потрібно знати час та швидкість витікання вибухонебезпечних речовин і газів в залежності від площі отвору. Це дозволить швидко оцінити та запобігти їх розповсюдженню.

Площа аварійного отвору є важливим показником в даних дослідженнях. Використовуючи вищевказані графічні результати, отримано залежність тривалості витікання газу від зміни площі аварійного отвору і перепаду тиску.

Необхідність завчасного і достовірного прогнозування наслідків аварійних вибухів обумовлена також тим, що, навіть застосовуючи жорсткі заходи безпеки під час зберігання вибухонебезпечних речовин, неможливо повністю усунути загрозу виникнення аварійних вибухів.

Тому задача на дослідження аварійних ситуацій інженерних циліндричних ємностей при впливі температури і тиску, що призводить до розливу вибухонебезпечних речовин та загазованості, є актуальною.

Список літератури

1. Величко Л.Д., Лозинський Р.Я., Семерак М.М. *Термодинаміка та теплопередача в пожежній справі*. ЛДУБЖД. Львів: Вид-во "СПОЛОМ", 2011. 504 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., Чернецький В.В., Байгала В.М. Напружено-деформований стан стінки та днища вертикальних сталевих резервуарів при їх нагріві. *Вісник ЛДУБЖД*. 2015. № 12. С. 228–235.
4. Elsheikh A.H., Guo J., K.-M. Lee Thermal deflection and thermal stresses in a thin circular plate under an axisymmetric heat. *Journal of thermal stresses*. 2018. V. 42. pp. 361-373. DOI: <https://doi.org/10.1080/01495739.2018.1482807> (дата звернення 10.02.2021).
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, 1044-1052 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0333-0> (дата звернення 10.07.2021).

7. Alexandrov S., 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/10.1243/03093240111512720> (дата звернення 1.06.2021).
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). 627–639. <https://doi.org/10.12989/SEM.2016.58.4.627> (дата звернення 10.02.2021).
9. Semerak, F.V., Glek, R.R. The thermally stressed state of a round plate heated by an annular heat source. *J Math Sci* № 64. 944–946. 1993. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01140322> (дата звернення 10.02.2021).
10. Dafni Pantousa, Luis A. Godoy On the mechanics of thermal buckling of oil storage tanks. *Thin-walled structures*. 2019. № 145, С. 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*. Москва : Недра, 1995. С. 44-172.

References

1. Velychko L.D., Lozinskiy R.Ya. and Semerak M.M. (2011), "Termodunamika ta teploperedacha v pozhazhnyy spravi" [The theory of elasticity]. Lviv, "SPOLOM". 504 p. [in Ukrainian].
2. Hlova, T., Semerak, M., Hlova, B., & Mykhailiushyn, M. (2021). "Vplyv zminu tysku na cilisnist rezervuariv zberihannya naftoproduktiv i toksichnyh rechovin" [The influence of pressure changes on the integrity of tanks for storage of petroleum products and toxic substances]. *Military Technical Collection*, Issue № 24, pp. 31–36. <https://doi.org/10.33577/23124458-24.2021.31-36> (Accessed 10.02.2021). [in Ukrainian].
3. Semerak M.M., Hlova T.Ya., Chernetskiy V.V. and Baytala V.M. (2015), "Napryzheno-deformovanui stan stinku ta dnyshcha vertikalnuh stalevuh rezervuariv pru ih nahryvi" [Stress-strain state of the wall and bottom of vertical steel tank under heating]. *Bulletin of Lviv state university of life safety*. № 12. pp. 228 – 235. [in Ukrainian].
4. Elsheikh A.H., Guo J. and K.-M. Lee (2018), Thermal deflection and thermal stresses in a thin circular plate under an axisymmetric heat. *Journal of thermal stresses*. V. 42, pp. 361-373. DOI: <https://doi.org/10.1080/01495739.2018.1482807> (Accessed 10.02.2021). [in English].
5. T. Hlova, M. Semerak, B. Hlova (2020), "Vplyv zminu temperatury na cilisnist rezervuariv zberihannya naftoproduktiv i toksichnyh rechovin" [The influence of temperature changes on the integrity of tanks for storage of petroleum products and toxic substances] // *Military Technical Collection*. 2020. №23. С. 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. <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*.

№ 36 (2). pp. 169-175. DOI: <https://doi.org/10.1243/0309324-011512720> (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*. № 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. <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*. № 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]: Moscow: Nedra. pp. 44-172. [in Russian].

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСТЕЧЕНИЯ ТОКСИЧЕСКИХ И ВЗРЫВООПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ И ГАЗОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ИЗ ЕМКостей СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ ИХ ХРАНЕНИИ

М.М. Семерак, Т.Я. Глова, Б.Н. Глова, О.С. Петрученко

В работе методом математического моделирования с использованием законов термодинамики и механики жидкостей и газов получены аналитические зависимости для исследования параметров утечки токсических и взрывоопасных веществ и газов при воздействии высокого давления из емкостей при их хранении. При моделировании процесса скорости истечения газа было использовано принцип Сен-Венана. Получена зависимость продолжительности утечки газа из емкостей специального назначения при изменении площади аварийного отверстия и перепада давления. Полученные соотношения позволяют определить скорость и массовый расход газа в зависимости от площади отверстия, времени истечения и разности давлений. Результаты исследований представлены графически.

Ключевые слова: резервуар, токсические вещества, потеря целостности резервуара, скорость, масса, давление.

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

M. Semerak, T. Hlova, B. Hlova, O. Petruchenko

Tanks for the storage of oil products and toxic substances in warehouses are the main ones. They can be in the form of separate tanks or a group of tanks. The most widespread are vertical steel tanks with a stationary roof that a placed in open areas. The tanks heat up, and the intensity of evaporation of the oil product increases in case of fire. If there is a permanent roof, the pressure in the tank will increase. If the capacity of the breathing valves is less than the intensity of evaporation then there is a risk of explosion. Explosions in the tank often lead to the separation of the bottom, and the side cylindrical surface and the roof fly away instantly, spilling oil on neighboring tanks and the territory of the tank's park. Then the combustion area increases intensively. The destruction of the integrity of the tank, due to the separation of the bottom, contributes to temperature and power stresses, the value of which increases with increasing temperature of their heating and increasing pressure, respectively. The values of temperature stresses are added to the power stresses caused by pressure, and when the critical value is reached, destruction occurs.

In the article by the method of mathematical modeling using the laws of thermodynamics and mechanics of liquids and gases, analytical dependences for research of parameters of leakage of toxic substances and gases at action of high pressure from capacities at their storage are received. Saint-Venant's principle was used to model the gas flow rate process. The dependence of the duration of gas leakage from special purpose tanks at the change of the area of the emergency hole and the pressure drop is obtained. The obtained results allow determining the velocity and mass flow rate of the gas depending on the area of the hole, the time flow, and the difference of pressure. Therefore, the task of research the emergency situations of engineering cylindrical tanks under the influence of temperature and pressure, which leads to the spillage of toxic substances and gassiness is actual. The researches results are presented graphically.

Keywords: tank, toxic substances, loss of tank integrity, speed, mass, pressure.