

ЗАПОБІГАННЯ ЕКОЛОГІЧНИМ НЕБЕЗПЕКАМ РЕЗЕРВУАРІВ ЗБЕРІГАННЯ ОТРУЙНИХ І ЛЕГКОЗАЙМИСТИХ РІДИН ЗА СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Олена Сєрікова

кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища

Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевська, 94, Харків, Україна, 61023, sierikova_olena@ukr.net

ORCID: 0000-0003-0354-9720

Наземні циліндричні резервуари великої місткості використовують для зберігання різноманітних рідин, наприклад, води для пиття й пожежогасіння, нафти, хімічних речовин і зрідженого газу. Джерелом техногенного впливу на навколишнє природне середовище є штатна експлуатація, підготовчі та ремонтні роботи на резервуарах, а також розлив отруйних і легкозаймистих рідин під дією сейсмічних навантажень, пожежі й вибухи на резервуарах. В Україні, окрім землетрусів природного походження на сейсмічних територіях, має місце проблема слабосейсмічних і несейсмічних територій, схильних до техногенних землетрусів, що можуть бути викликані підземними вибухами, видобутком корисних копалин та антропогенними впливами. Розглянуто коливання рідини в твердих і пружних резервуарах. Установлено, що зміна рівня в часі для резервуарів без покривної мембрани може бути дуже великою і призводити до виникнення надлишкового тиску на стінку резервуара. Установка плаваючої мембрани призводить до зниження як рівня вільної поверхні, так і тиску на стінки бака.

Ці результати дають змогу запобігти руйнуванню резервуарів і продовжити термін їх служби за допомогою кришки плаваючої мембрани. Це дасть можливість підвищити рівень екологічної безпеки прилеглих до резервуарів територій і запобігти виникненню надзвичайних ситуацій.

Важливим і необхідним є постійний контроль за територіями, на яких знаходяться резервуари отруйних і легкозаймистих рідин, прогнозування можливих впливів навколишнього середовища на ці об'єкти й цих об'єктів на довкілля, запобігання пошкодженням, руйнуванням і порушенням герметичності резервуарів унаслідок техногенних і природних впливів, управління ризиками виникнення НС на цих об'єктах.

Ключові слова: екологічна безпека, резервуари, легкозаймиста рідина, сейсмічні навантаження, техногенний вплив.

Вступ. Наземні циліндричні резервуари великої місткості використовуються для зберігання різноманітних рідин, наприклад, води для пиття та пожежогасіння, нафти, хімічних речовин і зрідженого газу. Джерелом техногенного впливу на навколишнє природне середовище є штатна експлуатація, підготовчі та ремонтні роботи на резервуарах, а також розлив отруйних і легкозаймистих рідин під дією сейсмічних навантажень, пожежі й вибухи на резервуарах.

Несправність таких резервуарів часто призводила до розливу токсичного матеріалу з катастрофічними наслідками та пожеж після вибухів, як це сталося після землетрусів у Нортріджі 1994 року, Кобе 1995 року, Коджаелі 1999 року та 2011 року в Східній Японії [1–4]. В Україні, окрім землетрусів природного походження на сейсмічних територіях, має місце проблема слабосейсмічних і несейсмічних територій, схильних до техногенних землетрусів, що можуть бути викликані підземними вибухами, видобутком корисних копалин та антропогенними впливами [5; 6].

Тому, коли такі резервуари розташовані в сейсмонезбезпечних регіонах, вони повинні залишатися функціональними або пошкодження повинні бути на прийнятному рівні після землетрусів.

Стационарний базовий резервуар потребує міцної основи й механізму кріплення у вигляді болтів, щоб витримати значний момент перекидання, який виникає через сейсмічні навантаження. Але через вартість резервуари для зберігання рідини часто не кріпляться до фундаменту навіть у сейсмічних зонах.

Задовільна робота резервуарів під час сильних трясок ґрунту має вирішальне значення для сучасних споруд. Ємності, які були неналежним чином спроектовані або деталізовані, зазнали значної шкоди під час минулих землетрусів [4]. Пошкодження сталевих резервуарів для зберігання внаслідок землетрусу може мати кілька форм. Великі осьові стискаючі напруги внаслідок балочного вигину стінки резервуару можуть спричинити «слонову ногу» – вигин стінки. Виплескування рідини може пошкодити дах і верхню частину стінки бака. Високі напруги поблизу погано

деталізованих базових анкерів можуть розірвати стінку бака. Основний зсув може подолати тертя, що спричиняє ковзання бака. Підйом основи в незакріплених або частково закріплених резервуарах може пошкодити з'єднання трубопроводів, які не здатні витримувати вертикальні переміщення, розірвати з'єднання пластини й оболонки через надмірні напруги в стиках і спричинити нерівномірне осідання фундаменту [7].

Тому дослідження техногенних впливів, зокрема впливу коливань і вібрацій, на резервуари для зберігання отруйних і легкозаймистих рідин і зменшення цих впливів на навколишнє природне середовище є досить актуальною науково-практичною проблемою підвищення рівня екологічної безпеки резервуарів і прилеглих територій.

Метою роботи є запобігання екологічним небезпекам резервуарів зберігання отруйних і легкозаймистих рідин у разі сейсмічних навантажень шляхом установавання кришки плаваючої мембрани та моделювання параметрів коливань рідини в резервуарах, а також упровадження алгоритму дій у разі пошкодження, руйнування й порушення герметичності резервуарів для збереження отруйних і легкозаймистих рідин під дією техногенних і природних факторів.

Огляд літератури. Дослідженнями щодо визначення екологічного стану ґрунтів і відновлення нафтозабрудненого ґрунту займалися Л. Черняк та ін. [8].

У роботах різних авторів досліджено розплескування резервуарів різної форми для зберігання нафтопродуктів, запропоновано низку технічних рішень, що дають змогу зменшити розплескування рідини та забезпечити екологічну безпеку резервуарів.

Отримані результати свідчать про необхідність зниження рівня плескання. Для цього застосовують різні демпферні пристрої, серед яких – горизонтальні та вертикальні перегородки, запропоновані в роботі [9]. Установка перегородок призводить до зміщення частотного спектру. Але частоти сил збудження в результаті штучних землетрусів могли мати широкий спектр.

У працях [10–12] показано, що встановлення плаваючої кришки призводить до значної зміни частот, до зменшення плескань.

У роботі [13] розраховано структурні пошкодження резервуарів для зберігання токсичних і легкозаймистих рідин від сильних вітрів.

О.В. Кендзера розглядав різні сейсмічні навантаження та відгуки ґрунтів [5; 6].

Більшість наукових праць А. Коргіна [14], Ф. Qin [15], Б. Халмурадова [16] присвячені оцінюванню значущості впливу резервуарів для збереження токсичних і легкозаймистих рідин на навколишнє середовище та моніторингу зміни герметичності водойм, швидкості їх руйнування під дією техногенних і кліматичних чинників, але такий суттєвий вплив на стійкість пласта, як землетруси, вивчено недостатньо.

Аналіз досліджень із питань розплескування рідини в резервуарах подано в працях Р.А. Ібрагіма [17; 18].

Модель кінцевих елементів розроблена [19] для вивчення вільної вібрації рідини в резервуарі довільної геометрії з гнучкою мембраною, яка обмежує вільну поверхню рідини. В інших статтях також розглядали рухомі контейнери для запобігання резонансу й таким різним навантаженням на контейнери.

Методи дослідження. Вертикальний циліндричний резервуар для зберігання небезпечних рідин працює таким чином. Під час землетрусу, близького до вибуху або іншої події, що включає сейсмічні навантаження, небезпечна рідина в баку починає коливатися. Коливання рідини призводять до утворення хвиль і плескання на її вільній поверхні. В інших роботах автора пропонується встановити гнучку оболонку-мембрану з композитного матеріалу, який плаває на поверхні рідини, гасить коливання поверхні й усуває ефект коливань.

Сейсмічну міцність оцінювали наступним чином. На першому етапі за допомогою методів, розроблених у роботі [9], визначено частоти й режими власних коливань резервуара. Далі визначено модель інерційних сейсмічних навантажень на конструкцію. Аналіз експериментальних досліджень сейсмостійкості в роботі показав, що зазвичай тільки найнижчі власні частоти коливань знаходяться в ділянці сейсмічного резонансу. Вищі власні частоти значно віддалені від ділянки сейсмічного резонансу. Зазвичай уже друга власна частота вища за верхню межу спектра.

Установлено, що нижні частоти коливань ємності з рідиною при заданих механічних і геометричних характеристиках є частотами плескання. Розділені частотні спектри коливань вільної поверхні та пружних стінок.

Досліджено вимушені коливання пласта при заданому сейсмічному навантаженні. Тут розглядаються коливання рідини з і без покриття вільної

поверхні. У роботі розглянуто питання про коливання рідини в довільній оболонці обертання.

По-перше, частоти й режими власних коливань резервуара визначено за допомогою методів граничних елементів (ВЕМ). Змочену поверхню оболонки позначено S_1 , а вільну поверхню S_0 (рис. 1). Як модель нафтоховища розглядається циліндрична оболонка з плоским дном, частково заповнена рідиною.

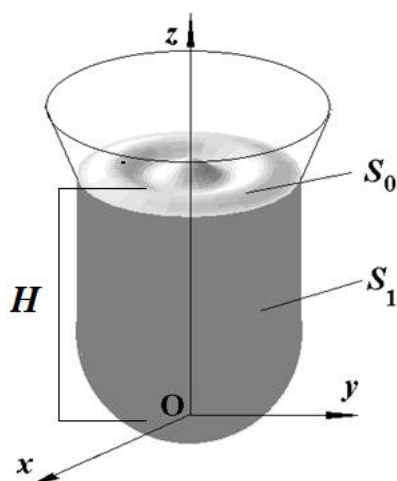


Рис. 1. Оболонка обертання

Уважалось, що декартова система координат $Oxyz$, пов'язана з оболонкою, вільна поверхня рідини S_0 збігається з площиною спокою $z=H$. Передбачається, що рідина ідеальна, нестислива, а її рух, що почався в стані спокою, є безвихровим. За цих умов існує потенціал для швидкостей рідини, який задовольняє рівняння Лапласа:

$$V_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x}; V_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y}; V_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (1)$$

Значення тиску p на стінки оболонки визначено з лінеаризованого інтеграла Бернуллі за формулою:

$$p = -\rho_l \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + gz \right) + p_0 + a_s(t)x, \quad (2)$$

де Φ – потенціал швидкості, g – прискорення сили тяжіння, z – координата точки рідини, виміряна у вертикальному напрямку, ρ_l – густина рідини, p_0 – атмосферний тиск, $a_s(t)$ – функція, що характеризує зовнішній вплив (горизонтальне сейсмічне прискорення). У рівнянні значення gz є гравітаційним потенціалом, тому на вільній поверхні тиск еквівалентний тиску навколишнього середовища, тобто $p = p_0$.

Для управління впливом на навколишнє природне середовище (НПС) резервуарів для

збереження отруйних і легкозаймистих рідин розроблено алгоритм дій у разі пошкодження, руйнування та порушення герметичності резервуарів для збереження отруйних і легкозаймистих рідин під дією техногенних і природних факторів (рис. 2).

На відміну від інших, цей алгоритм дає змогу враховувати, окрім забруднених територій, що потребують ліквідації наслідків забруднення отруйними та легкозаймистими рідинами, також території з ризиком забруднення від зовнішнього впливу, що значно підвищує рівень екологічної безпеки об'єктів довкілля. Для задовільної роботи алгоритму запропоновано вважати територію поблизу резервуару такою, що вимагає постійного контролю за негативними впливами на об'єкти довкілля протягом усього терміну експлуатації резервуару.

Обговорення результатів. Рисунок 3а демонструє порівняння рівня вільної поверхні, що змінюється з і без мембрани як покриття, а рисунок 3б показує залежність p_n від часу. Чорні лінії відповідають коливанням без покриття, а синіми лініями позначено криві, отримані в разі припущення наявності еластичної мембрани, установленої на рівні вільної поверхні.

Отримані результати дають змогу зробити висновок, що встановлення мембрани призводить до значного зниження як рівня підйому вільної поверхні, так і тиску на стінки бака. Ці дані можуть бути корисними для оцінювання стабільності резервуарів у разі сейсмічних навантажень.

Розглянуто коливання рідини в твердих і пружних резервуарах. Установлено, що зміна рівня в часі для резервуарів без покривної мембрани може бути дуже великою і призводити до виникнення надлишкового тиску на стінку резервуара. Установка плаваючої мембрани призводить до зниження як рівня вільної поверхні, так і тиску на стінки бака.

Ці результати дають змогу запобігти руйнуванню резервуарів і продовжити термін їх служби за допомогою кришки плаваючої мембрани. Це дасть можливість підвищити рівень екологічної безпеки прилеглих до резервуарів територій і запобігти виникненню надзвичайних ситуацій.

Таким чином, майбутні дослідження стосуються вільних і вимушених коливань рідини в пружних резервуарах із пружними перегородками. Геометрію резервуара також можна легко змінити, тому результати будуть отримані для конічних, сферичних і складних корпусів із пере-

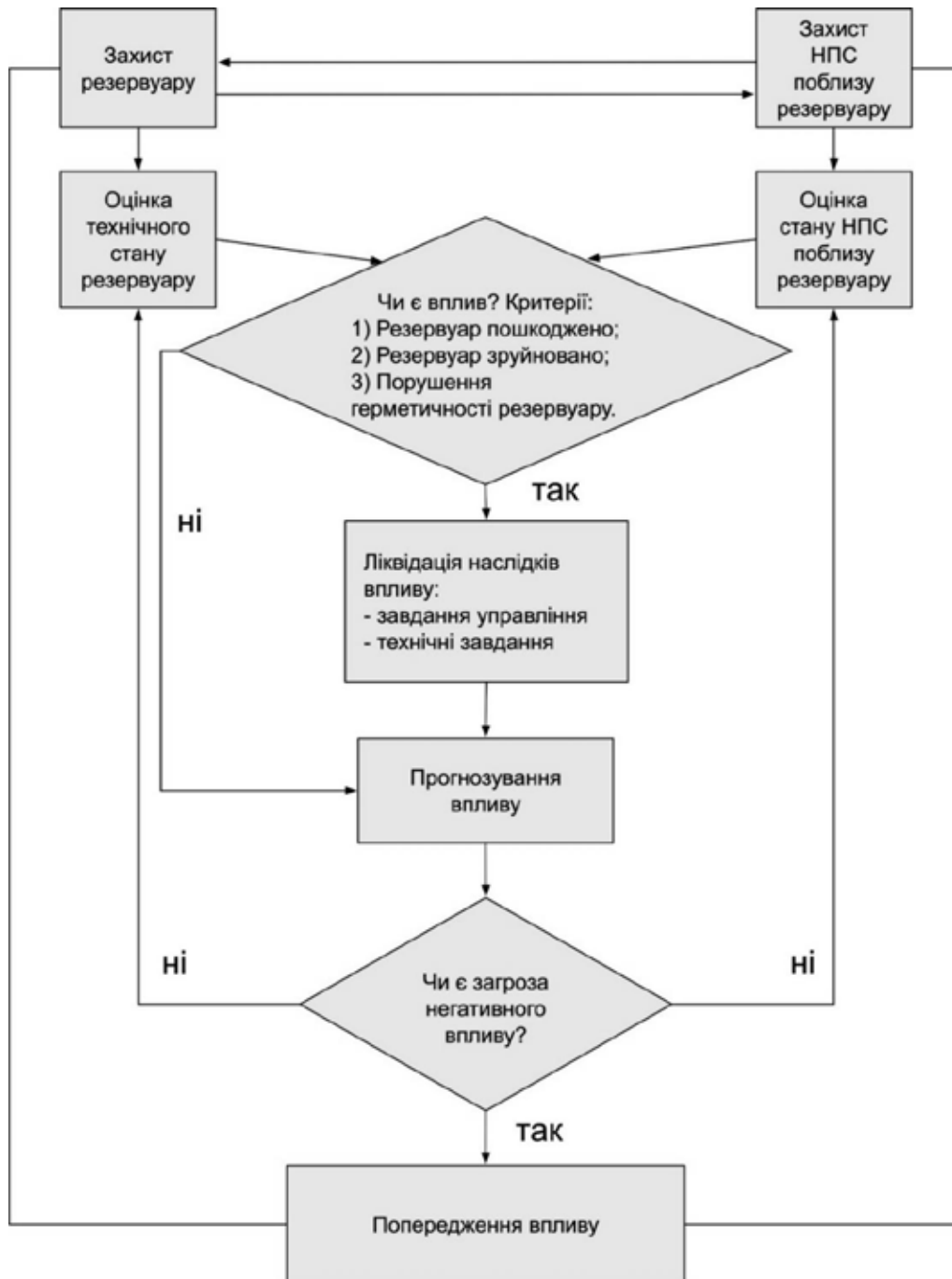


Рис. 2. Алгоритм дій у разі пошкодження, руйнування та порушення герметичності резервуарів для збереження отруйних і легкозаймистих рідин під дією техногенних і природних факторів

городками та без них. Це дасть змогу дати рекомендації щодо встановлення захисних елементів (кришок, перегородок) [20].

Висновки. Розглянуто коливання рідини в твердих і пружних резервуарах. Установлено, що зміна рівня в часі для резервуарів без покривної мембрани може бути дуже великою і призводити до виникнення надлишкового тиску на стінку резервуара. Установка плаваючої мемб-

рани призводить до зниження як рівня вільної поверхні, так і тиску на стінки бака.

Ці результати дають змогу запобігти руйнуванню резервуарів і продовжити термін їх служби за допомогою кришки плаваючої мембрани. Це дасть можливість підвищити рівень екологічної безпеки прилеглих до резервуарів територій і запобігти виникненню надзвичайних ситуацій.

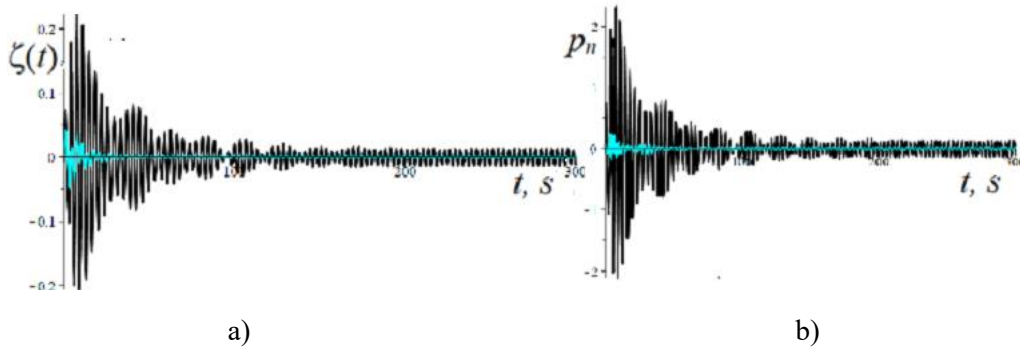


Рис. 3. Часові історії ξ і p_n

Важливим і необхідним є постійний контроль за територіями, на яких знаходяться резервуари отруйних і легкозаймистих рідин, прогнозування можливих впливів навколишнього середовища на ці об'єкти й цих об'єктів на довкілля, запобігання пошкодженням, руйнуванням і порушенням герметичності резервуарів унаслідок техногенних і природних впливів, управління ризиками виникнення НС на цих об'єктах.

ЛІТЕРАТУРА

1. NIST GCR 97-720, A study of the performance of petroleum storage tanks during earthquakes, 1933–1995, Building and Fire Research Laboratory, Gaithersburg, Maryland, 1997. [Online]. Available: <https://nehrlsearch.nist.gov/static/files/NIST/PB99132896.pdf>.
2. Radnić J., Grgić N., Kusić M. S., Harapin A. (2018). Shake table testing of an open rectangular water tank with water sloshing. *354 Journal of Fluids and Structures*, vol. 81, 97–115.
3. Sivý M., Musil M. (2016). Seismic resistance of storage tanks containing liquid in accordance with principles of Eurocode 8 standard. *Strojnícky časopis-Journal of Mechanical Engineering*, vol. 66, no. 2, 79–88.
4. Bülent ERKMEN; (2022), Seismic Performance Evaluation and Retrofit of Liquid Storage Tanks- Case Study. *Sakarya University Journal of Science*, 26(2), 347-356. DOI: 10.16984/saufenbilder.997699.
5. Kendzera O.V., Mykulyak S.V., Semenova Yu.V., Skurativska I.A., Skurativskiy S.I. (2020). Assessment of seismic response of a soil layer with the oscillating inclusions. *Geophysical journal*, 42 (4), 47–58.
6. Kendzera O.V., Mykulyak S.V., Semenova Yu.V., Skurativska I.A., Skurativskiy S.I. (2021). Seismic response of a layered soil deposit with inclusions. *Geophysical journal*, 43 (2), 3–13.
7. Praveen K. Malhotra, Thomas Wenk, Martin Wieland. (2000). Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks. *Structural Engineering International*. 10(3), 197–201. DOI: 10.2749/101686600780481509.
8. Черняк Л.М., Маджд С.М., Міхеев О.М. Використання рослинних тест-систем для визначення токсичності ґрунту на території аеропорту. *Вісник Кременчуцького національного університету*. 2020. № 4 (123). С. 50–55.
9. Gnitko V., Degtyariov K., Naumenko V., Strelnikova E. (2017). BEM and FEM analysis of the fluid-structure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. vol. 5, no. 3, 317–328. DOI: 10.2495/CMEM-V5-N3-317-328.
10. Choudhary N., Kumar N., Strelnikova E., Gnitko V., Kriutchenko D., Degtyariov K. (2021). Liquid vibrations in cylindrical tanks with flexible membranes. *Journal of King Saud University – Science*. vol. 33, no. 8, 101589, doi. org/10.1016/j.jksus.2021.101589.
11. Sierikova O., Strelnikova E., Kriutchenko D. (2023). Membrane installation in storage tanks for seismic loads impact protection. *Acta Periodica Technologica*, (54), 209–222. <https://doi.org/10.2298/APT2354209S>.
12. Choudhary N., Strelnikova E. (2021). Liquid vibrations in a container with a membrane at the free surface. *Vibroengineering PROCEDIA*, Vol. 37, 13–18. <https://doi.org/10.21595/vp.2021.21996>.
13. Ramirez O., Mesa A., Zuluaga S., Munoz F., Sanchez-Silva M., Salzano E. (2019). Fragility Curves of Storage Tanks Impacted by Strong Winds. *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 77, 91–96.
14. Korgin A.V., Kudishin Y.I., Ermakov V., Emelianov M.V., Zeyd-Kilani L. (2016). Modeling of seismic impacts on the oil tanks. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016. Vol. 11, Number 3, 1680–1686.
15. Qin F., Chen, S., Chen, R. et al. (2021). Leakage detection of oil tank using terahertz spectroscopy. *Sci. China Technol. Sci.* 64, 1947–1952. <https://doi.org/10.1007/s11431-021-1884-1>.
16. Khalmuradov B., Harbuz S., Ablieieva I. (2018). Analysis of the technogenic load on the environment during Forced ventilation of tanks. *Technology audit and production reserves*. № 1/3 (39), 45–52. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.124341.
17. Ibrahim R.A., Pilipchuck V.N., Ikeda T. (2001). Recent Advances In Liquid Sloshing Dynamics. *Applied Mechanics Reviews*. Vol. 54, № 2, 133–199.
18. Ibrahim R.A. *Liquid Sloshing Dynamics*. Cambridge University Press, New York: 948.

19. Kolaei A., Rakheja S. (2019). Free vibration analysis of coupled sloshing-flexible membrane system in a liquid container. *Journal of Vibration and Control*. 25(1), 84–97. DOI: 10.1177/1077546318771221.

20. Sierikova O., Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V. (2022). Reducing Environmental Hazards of Prismatic Storage Tanks under Vibrations. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 21, 249–257. DOI: 10.37394/23201.2022.21.27.

PREVENTION OF ENVIRONMENTAL HAZARDS OF POISONOUS AND FLAMMABLE LIQUID STORAGE TANKS UNDER SEISMIC LOADS

Olena Sierikova

PhD, Assistant Professor at the Department of Applied Mechanics and Environmental Protection Technologies

National University of Civil Defence of Ukraine, 94 Chernyshevskaya str., Kharkiv, Ukraine, 61023, sierikova_olena@ukr.net

ORCID: 0000-0003-0354-9720

Large-capacity above-ground cylindrical tanks are used to store a variety of liquids, such as potable and fire-fighting water, oil, chemicals, and liquefied gas. The source of technogenic impact on the surrounding natural environment is regular operation, preparatory and repair work on tanks, as well as spillage of poisonous and flammable liquids under the influence of seismic loads, fires and explosions on tanks. In Ukraine, in addition to earthquakes of natural origin in seismic territories, there is a problem of low-seismic and non-seismic territories prone to technogenic earthquakes, which could be caused by underground explosions, mining and anthropogenic influences. Fluid fluctuations in solid and elastic reservoirs have been considered. It has been established that the change in level over time for tanks without a covering membrane could be very large and lead to excessive pressure on the tank wall. Installation of a floating membrane leads to a decrease in both the level of the free surface and the pressure on the tank walls.

These results make it possible to prevent the destruction of tanks and extend their service life with the help of a floating membrane cover. This will increase the environmental safety level of the territories adjacent to the reservoirs and prevent emergencies.

It is important and necessary to constantly monitor the territories where the reservoirs of poisonous and flammable liquids are located, predict the possible effects of the environment on these objects and these objects on the environment, prevent damage, destruction and violations of the tightness of the reservoirs due to man-made and natural influences, management of the risks of emergencies at these facilities.

Key words: environmental safety, tanks, flammable liquid, seismic loads, technogenic influence.

REFERENCES

1. NIST GCR 97-720, A study of the performance of petroleum storage tanks during earthquakes, 1933–1995, Building and Fire Research Laboratory, Gaithersburg, Maryland, 1997. [Online]. Available: <https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/NIST/PB99132896.pdf>.

2. Radnić J., Grgić N., Kusić M. S., Harapin A. (2018). Shake table testing of an open rectangular water tank with water sloshing. *354 Journal of Fluids and Structures*, vol. 81, 97–115.

3. Sivý M., Musil M. (2016). Seismic resistance of storage tanks containing liquid in accordance with principles of Eurocode 8 standard. *Strojnícky časopis-Journal of Mechanical Engineering*, vol. 66, no. 2, 79–88.

4. Bülent ERKMEN; (2022), Seismic Performance Evaluation and Retrofit of Liquid Storage Tanks-Case Study. *Sakarya University Journal of Science*, 26(2), 347–356. DOI: 10.16984/saufenbilder.997699.

5. Kendzera O.V., Mykulyak S.V., Semenova Yu.V., Skurativska I.A., Skurativskiy S.I. (2020). Assessment of seismic response of a soil layer with the oscillating inclusions. *Geophysical journal*, 42 (4), 47–58.

6. Kendzera O.V., Mykulyak S.V., Semenova Yu.V., Skurativska I.A., Skurativskiy S.I. (2021). Seismic response

of a layered soil deposit with inclusions. *Geophysical journal*, 43 (2), 3–13.

7. Praveen K. Malhotra, Thomas Wenk, Martin Wieland. (2000). Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks. *Structural Engineering International*. 10(3), 197–201. DOI: 10.2749/101686600780481509.

8. Chernyak L.M., Majd S.M., Mikheev O.M. (2020). Vykorystannia roslynnykh test-system dlia vyznachennia ekolohichnoho stanu gruntiv na terytorii aeroportu. [The use of plant test systems to determine the ecological condition of soils on the territory of the airport]. *Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug*. No. 4 (123), 50–55 [in Ukrainian].

9. Gnitko V., Degtyariov K., Naumenko V., Strelnikova E. (2017). BEM and FEM analysis of the fluid-structure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. vol. 5, no. 3, 317–328. DOI:10.2495/CMEM-V5-N3-317-328.

10. Choudhary N., Kumar N., Strelnikova E., Gnitko V., Kriutchenko D., Degtyariov K. (2021). Liquid vibrations in cylindrical tanks with flexible membranes. *Journal of King*

Saud University – Science. vol. 33, no. 8, 101589, doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101589.

11. Sierikova O., Strelnikova E., Kriutchenko D. (2023). Membrane installation in storage tanks for seismic loads impact protection. *Acta Periodica Technologica*, (54), 209–222. <https://doi.org/10.2298/APT2354209S>.

12. Choudhary N., Strelnikova E. (2021). Liquid vibrations in a container with a membrane at the free surface. *Vibroengineering PROCEDIA*, Vol. 37, 13–18. <https://doi.org/10.21595/vp.2021.21996>.

13. Ramirez O., Mesa A., Zuluaga S., Munoz F., Sanchez-Silva M., Salzano E. (2019). Fragility Curves of Storage Tanks Impacted by Strong Winds. *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 77, 91–96.

14. Korgin A.V., Kudishin Y.I., Ermakov V., Emelianov M.V., Zeyd-Kilani L. (2016). Modeling of seismic impacts on the oil tanks. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016. Vol. 11, Number 3, 1680–1686.

15. Qin F., Chen, S., Chen, R. et al. (2021). Leakage detection of oil tank using terahertz spectroscopy. *Sci.*

China Technol. Sci. 64, 1947–1952. <https://doi.org/10.1007/s11431-021-1884-1>.

16. Khalmuradov B., Harbuz S., Ablicieva I. (2018). Analysis of the technogenic load on the environment during Forced ventilation of tanks. *Technology audit and production reserves*. № 1/3 (39), 45–52. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.124341

17. Ibrahim R.A., Pilipchuck V.N., Ikeda T. (2001). *Recent Advances In Liquid Sloshing Dynamics*. *Applied Mechanics Reviews*. Vol. 54, № 2, 133–199.

18. Ibrahim R.A. *Liquid Sloshing Dynamics*. Cambridge University Press, New York: 948.

19. Kolaei A., Rakheja S. (2019). Free vibration analysis of coupled sloshing-flexible membrane system in a liquid container. *Journal of Vibration and Control*. 25(1), 84–97. DOI: 10.1177/1077546318771221.

20. Sierikova O., Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V. (2022). Reducing Environmental Hazards of Prismatic Storage Tanks under Vibrations. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 21, 249–257. DOI: 10.37394/23201.2022.21.27.

Стаття надійшла 15.10.2023