

ВПЛИВ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ЦИЛІНДРИЧНІ РЕЗЕРВУАРИ ЧАСТКОВО ЗАПОВНЕНІ ЕКОЛОГІЧНО НЕБЕЗПЕЧНОЮ РІДИНОЮ

Серікова Олена Миколаївна

ORCID ID: 0000-0003-0354-9720

канд. техн. наук, старший викладач

кафедри прикладної механіки та технологій захисту навколишнього середовища
Національний університет цивільного захисту України, Україна

Стрельнікова Олена Олександрівна

ORCID ID: 0000-0003-0707-7214

докт. техн. наук, професор; провідний науковий співробітник зі спеціальності
механіка деформівного твердого тіла

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України

Крютченко Денис Володимирович

ORCID ID: 0000-0002-6804-6991

аспірант

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, Україна

Вступ. Оцінка динамічного сейсмічного впливу при проектуванні резервуарів для зберігання екологічно небезпечних рідин - складна інженерна проблема, якій присвячено багато публікацій [1-7] та ін.

Резервуари для зберігання нафтопродуктів, що широко використовуються у міському господарстві та промисловості, є екологічно небезпечними джерелами техногенного впливу на навколишнє середовище, виступаючи об'єктами неконтрольованих викидів пароповітряних або парогазоповітряних сумішей та розливів нафтопродуктів з подальшими пожежами та вибухами. Правильно спроектовані нафтосховища повинні запобігати витоків та потенційному забрудненню ґрунту, поверхневих або ґрунтових вод. Аналіз джерел на навколишнє середовище під час експлуатації резервуарів свідчить про те, що сталеві вертикальні резервуари навіть за нормальної експлуатації є екологічно небезпечними.

Руйнування резервуарів можливе в результаті раптової дії сейсмічних навантажень різної сили. Рідина, що зберігається в резервуарах, починає відчувати інтенсивне плескання [2]. Явище плескання в частково заповнених резервуарах може призвести до високого тиску на стінки резервуару, руйнування його конструкції або втрати стійкості та може спричинити витік небезпечної рідини [5-8].

Аналіз літератури. У роботі [9] розраховано структурні пошкодження резервуарів для зберігання токсичних і горючих рідин від сильних вітрів.

Кендзера О.В. розглядав різні сейсмічні навантаження та відгуки в ґрунтах [3,4].

Більшість наукових праць Коргіна А.В. [10], Qin F. [11], Халмурадов Б. [12] присвячені оцінці значущості впливу водосховищ для збереження токсичних і легкозаймистих рідин на навколишнє середовище та моніторингу зміни герметичності резервуарів, швидкості їх руйнування під дією техногенних і кліматичних чинників, але такий суттєвий вплив на стійкість резервуарів, як землетруси, вивчено недостатньо.

Аналіз досліджень проблем плескань рідини в резервуарах, наведені у роботах Ібрагіма [13,14]. Відзначимо також роботи про плескання рідини в циліндричних резервуарах під дією сейсмічних навантажень [15-17].

Покращення характеристик матеріалів резервуарів досліджено в роботах [18,19].

Метою роботи є дослідження впливу сейсмічних навантажень на циліндричні резервуари частково заповнені екологічно небезпечною рідиною для запобігання виникненню надзвичайних ситуацій та негативного впливу на навколишнє середовище [20].

В даний час для сейсмічного аналізу та проектування резервуарів, як правило, використовуються методи, що базуються на багатокомпонентній пружинно-масовій аналогії Хаузнера [21,22]. Цей підхід дозволяє розглянути складну динамічну поведінку резервуара та його вмісту у спрощеній формі.

Динамічний аналіз оболонкових конструкцій часто виконується за допомогою кінцевих елементів. Але тривимірний нелінійний аналіз з урахуванням взаємодії рідини та ґрунту є складним та надзвичайно трудомістким завданням. Тому для дослідження міцності і стійкості резервуарів при імпульсних і сейсмічних навантаженнях приймаються спрощені гіпотези. Передбачається, наприклад, що рідина складається з двох частин: що рухається разом з ємністю як жорстке ціле і частини, що рухається зі своєю частотою. Визначення меж цих частин рідини проводиться емпірично. Не враховується також еластичність стін резервуара. Відсутні роботи, в яких би враховувалася геометрична нелінійність матеріалу та нелінійний характер поведінки рідини.

У [18] запропоновано підхід, заснований на використанні методу граничних елементів, для вирішення задачі про власні коливання пружних оболонок обертання, заповнених рідиною, і для вирішення задачі про власні коливання рідини у жорстких резервуарах. Цей підхід має певні переваги. У роздільних рівняннях функції та їх похідні визначаються тільки на межах області, що дозволяє суттєво зменшувати розмірність систем рівнянь. Цей метод дає також якісно нові можливості у моделюванні пов'язаного динамічного завдання, саме він і буде застосований у цьому дослідженні.

Постановка задачі. Розглядається пов'язана динамічна задача для оболонки обертання, частково заповненої рідиною, схильною до короткочасного імпульсного навантаження.

Припустимо, що рідина ідеальна, стислива, а її перебіг (індукований рухом тіла) є безвихровим. Позначивши компоненти швидкості через V_x, V_y, V_z , умову стискання суцільного середовища отримаємо з наступної рівності:

$$\operatorname{div} V = \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Оскільки потік безвихровий, існує потенціал швидкостей ϕ

$$V_x = \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad V_y = \frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad V_z = \frac{\partial \phi}{\partial z},$$

що задовольняє внаслідок (1) гармонійному рівнянню

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0.$$

Матричне рівняння руху оболонки, частково заповненої рідиною, запишемо у вигляді

$$LU + M\ddot{U} = P + Q \quad (2)$$

де L, M – матриці жорсткості та мас; $U = (u_1, u_2, u_3)$ – вектор-функція переміщень; $Q(t)$ – вектор зовнішнього навантаження, $P(t)$ – гідродинамічний тиск рідини. Тиск рідини знаходимо з інтегралу Коші-Лагранжа, який у лінійному наближенні має вигляд

$$\frac{P}{\rho_l} = -\frac{\partial \phi}{\partial t} - gz + \frac{P_0}{\rho_l}, \quad (3)$$

де ϕ – потенціал швидкостей; ρ_l – щільність рідини; z – координата точки рідини, що відраховується у вертикальному напрямку, g – прискорення вільного падіння.

Позначимо змочену поверхню оболонки через S_1 , а вільну поверхню – S_0 . Нехай декартова система координат $Oxuz$ пов'язана з оболонкою, вільна поверхня рідини S_0 збігається з площиною xOy у стані спокою. Вважаємо, що резервуар з рідиною піддається динамічному впливу. На змоченій поверхні пружної оболонки потрібно виконання умови непротікання, на вільній поверхні задаються динамічні та кінематичні граничні умови. Динамічною граничною умовою є рівність тиску на вільній поверхні атмосферному тиску, а кінематична умова полягає в тому, що частинки рідини, що спочатку перебували на вільній поверхні, залишаються на ній увесь час наступного руху.

Таким чином, приходимо до наступного крайового завдання

$$LU + M\ddot{U} + \rho_l \dot{\phi} + gz = Q$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial w}{\partial t}, \quad P \in S_1; \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = \dot{\zeta}, \quad P \in S_0; \quad \dot{\phi} + g\zeta = 0, \quad P \in S_0$$

для визначення невідомих функцій U та ϕ .

Чисельні результати. Слід зазначити, що в динамічному завданні горизонтального сейсму необхідно розглядати лише $\alpha = 0$ та $\alpha = 1$ у виразах, тому що при сейсмічному навантаженні збуджуються лише нульова та перша гармоніки.

Щоб переконатися у надійності запропонованого чисельного алгоритму, проведено порівняння з результатами, отриманими методом кінцевих елементів. Розглянемо циліндричну оболонку із плоским дном, частково заповнену рідиною. Геометрія резервуара показана на рис.1, параметри резервуара такі: радіус $R = 1$ м, товщина $h = 0.01$ м, довжина $L = 2$ м, модуль пружності $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$, щільність матеріалу $\rho = 7800$ кг/м³, щільність рідини $\rho_l = 1000$ кг/м³. Рівень заповнюючої рідини позначений через H ($H=0.8$ м). Граничні умови: $u_r = u_z = u_\theta = 0$ при $z = 0$ та $r=R$.

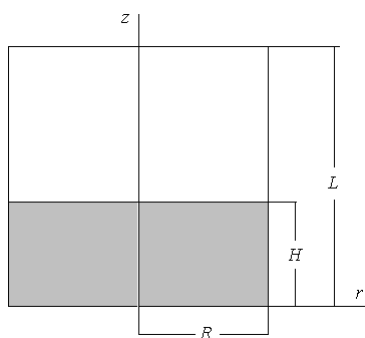


Рис. 1. Циліндричний резервуар із рідиною

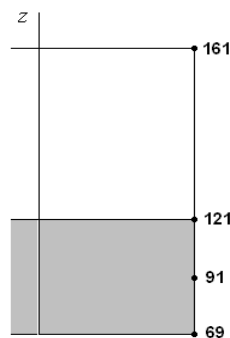


Рис. 2. Схема вузлів

Розглянемо завдання про вимушені коливання оболонки з рідиною під впливом імпульсного навантаження. Радіальне навантаження (Рис.3) раптово діє циліндричну поверхню резервуара

$$q(r, z, t) = q_0 \cos k\phi(r, z) \exp(-t / \tau)$$

де $q_0 = 0.1$ МПа, $\tau = 14.2 \cdot 10^{-6}$ с. Час дії імпульсу $t_n = 5 \cdot 10^{-3}$ с.

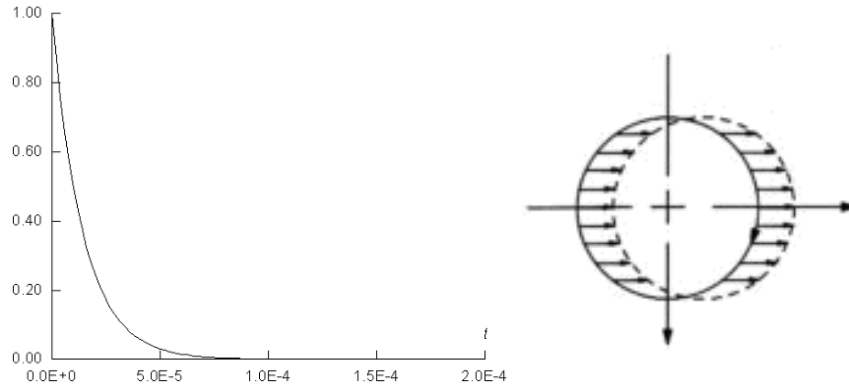


Рис. 3. Імпульсне навантаження

Для ілюстрації розрахунків радіальне переміщення обчислено у чотирьох точках, що показані на рис. 2; точка 1 (вузол 91) розташована на змоченій частині стінки, точка 2 (вузол 121) належить межі вільної поверхні рідини, точка 3 (вузол 69) знаходиться поблизу основи, точка 4 (вузол 161) знаходиться на вершині стінки оболонки. На рис. 4-7 представлені радіальні переміщення, обчислені запропонованим методом (суцільна лінія) та за допомогою кінцево-елементного комплексу (штрихова лінія).

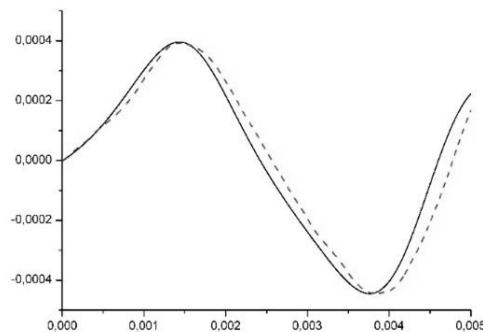


Рис. 4. Зміна у часі радіального переміщення у точці 1

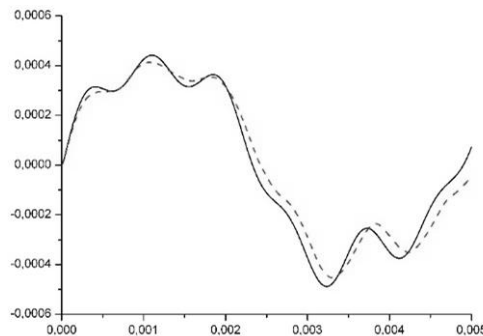


Рис. 5. Зміна у часі радіального переміщення у точці 2

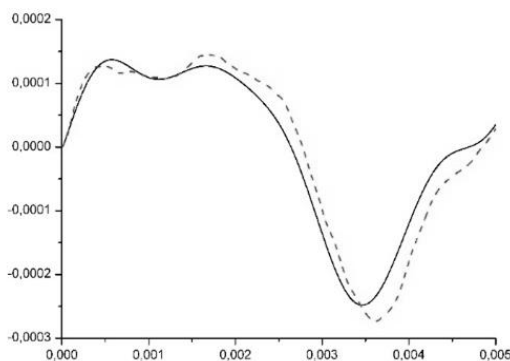


Рис. 6. Зміна у часі радіального переміщення у точці 3

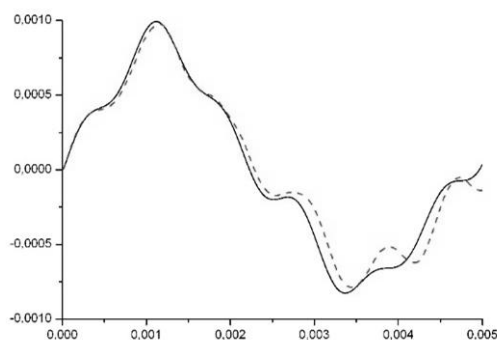


Рис. 7. Зміна у часі радіального переміщення у точці 4

Ілюстрації демонструють добре узгодження результатів, одержаних різними методами, що свідчить про надійність запропонованого алгоритму.

Висновки. Розроблено ефективний чисельний метод аналізу динамічної поведінки довільних оболонок обертання, частково заповнених рідиною, при сейсмічному та імпульсному навантаженні. Потенціал швидкостей представлений у вигляді суми двох доданків, що відповідають завданням визначення частот та форм вільних коливань рідини у жорсткій оболонці та пружній оболонці з рідиною без урахування гравітаційної складової. Інтегрування за обсягом рідини зведено до інтегрування вздовж меридіана оболонки та радіусу вільної поверхні рідини, тобто. є одновимірним. У цьому полягає основна перевага нашого методу, заснованого на комбінації методу граничних інтегральних рівнянь, методу кінцевих елементів та розкладання до лав Фур'є. Проведено чисельні дослідження динаміки циліндричного резервуара, заповненого рідиною, що не стискається.

Список використаних джерел:

1. Sierikova O., Strelnikova E., Degtyarev K. (2022) Seismic Loads Influence Treatment on the Liquid Hydrocarbon Storage Tanks Made of Nanocomposite Materials. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. vol. 17: 62-70. DOI: 10.37394/232011.2022.17.9
2. Degtyariev K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. (2022) Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). P. 297-302.
3. Kendzera O.V., Mykulyak S.V., Semenova Yu.V., Skurativska I.A., Skurativskyi S.I. (2020). Assessment of seismic response of a soil layer with the oscillating inclusions. Geophysical journal, 42 (4): 47–58.
4. Kendzera O.V., Mykulyak S.V., Semenova Yu.V., Skurativska I.A., Skurativskyi S.I. (2021) Seismic response of a layered soil deposit with inclusions. Geophysical journal, 43 (2): 3–13.

5. Sierikova O., Strelnikova E., Gnitko V., Tonkonozhenko A., Pisnia L. (2022) Nanocomposites Implementation for Oil Storage Systems Electrostatic Protection. Conf. Proc. of Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – ICTM-2021. Synergetic Engineering Springer Nature Switzerland AG 2022 M. Nechyporuk et al. (Eds.): ICTM 2021, LNNS 367: 573-585. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_49
6. Sierikova O., Strelnikova E., Degtyarev K. (2022) Strength Characteristics of Liquid Storage Tanks with Nanocomposites as Reservoir Materials. 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). P. 151-157.
7. Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova E. (2022) Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. Materials Science Forum. Vol. 1068: 223-229. doi:10.4028/p-888232
8. Серікова О. М., Стрельнікова О. О. (2020) Вплив резервуарів для збереження отруйних та легкозаймистих рідин на навколишнє середовище. Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма VII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 21–24 квітня 2020 р.). С. 238–239.
9. 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.
10. 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. Vol. 11, Number 3:1680-1686.
11. 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>
12. 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
13. Ibrahim R. A., Pilipchuck V. N., Ikeda T. (2001) Recent Advances In Liquid Sloshing Dynamics. Applied Mechanics Reviews, Vol. 54, №. 2: 133–199.
14. Ibrahim R. A. (2005) Liquid Sloshing Dynamics. Cambridge University Press, New York: 948.
15. Ventsel E., Naumenko V., Strelnikova E., Yeseleva E. (2010) Free vibrations of shells of revolution filled with a fluid. Engineering analysis with boundary elements, 34: 856–862.
16. Degtyarev K., Glushich P., Gnitko V., Strelnikova E. (2015) Numerical Simulation of Free Liquid-Induced Vibrations in Elastic Shells, International Journal of Modern Physics and Applications. Vol. 1, No. 4: 159-168. DOI: 10.13140/RG.2.1.1857.5209
17. Gnitko V., Degtyarev K., Karaiev A., Strelnikova E. (2019) Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity. WIT Transactions on Engineering Sciences. WIT Press:13–25. DOI: 10.2495/BE410021
18. Sierikova O., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K. (2021) Boundary Calculation Models for Elastic Properties Clarification of Three-dimensional Nanocomposites Based on the Combination of Finite and Boundary Element Methods. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek): 351-356. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570086.
19. Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova O. (2021) The Deformable and Strength Characteristics of Nanocomposites Improving. Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. Vol. 1038: 144-153.
20. Серікова, О. М., Стрельнікова, О. О., Колосков, В. Ю. (2020) Підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій України, схильних до підтоплення [Текст] : монографія / О. М. Серікова, О. О. Стрельнікова, В. Ю. Колосков – Х. : НУЦЗ України. 142 с.
21. Medvedovskaya T., Strelnikova E., Medvedyeva K. (2015) Free hydroelastic vibrations of hydroturbine head covers. Int. J. Eng. and Advanced Research Technology. Vol. 1. № 1: 45–50.
22. Strelnikova E., Gnitko V., Krutchenko D., Naumemko Y. (2018) Free and forced vibrations of liquid storage tanks with baffles. J. Modern Technology & Engineering. Vol. 3. № 1: 15–52.