УДК 539.3:624.04:004.942 https://doi.org/10.15407/itm2024.01.058

О. Є. КУЧЕРЕНКО

СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНА МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА НА ЖОРСТКІЙ ОСНОВІ

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: ak_sci@proton.me

У даній статті розглядається задача скінченно-елементного моделювання вертикального сталевого резервуара об’ємом 20000 кубічних метрів, який зазнає впливу статичних навантажень. Зазначена структура має циліндричну стінку загальною висотою 17880 мм та діаметром 39900 мм. Товщини поясів стінки визначаються на основі інженерних розрахунків міцності та стійкості. Модель представлена у вісесиметричному вигляді; досліджується напружено-деформований стан циліндричної стінки, проводиться аналіз зони контакту плоского днища з жорсткою основою при різних параметрах навантаження – надлишкового та гідростатичного тисків. Розробка моделі виконується за допомогою програмного комплексу для скінченно-елементного моделювання ANSYS Mechanical; використовуються тривимірні елементи типу SOLID186 та SHELL281 для вісесиметричного моделювання оболонкової структури в тривимірній постановці. Для моделювання зони контакту застосовуються скінченні елементи CONTA174, які використовуються для подання рухомої поверхні зі сторони днища та TARGE170 (зі сторони нерухомої жорсткої основи) Для верифікації моделі порівнюються радіальні переміщення оболонки, отримані за допомогою чисельного моделювання, з аналітично обчисленими значеннями. Розбіжність не перевищує 4 %, що свідчить про адекватність скінченно-елементної моделі. Аналіз зони контакту проводиться для нестандартних умов експлуатації, таких як аварійний надлишковий внутрішній тиск в резервуарі (2.5 та 3 кПа порівняно з 2 кПа за нормальних умов). Модель зони контакту "днище–основа" з одностороннім зв’язком дозволяє відрив днища від основи, при цьому відбувається розкриття контакту. Повний відрив днища від основи відбувається за певної комбінації надлишкового та гідростатичного тисків в резервуарі. Зменшення відриву при певних значеннях рівня рідини може пояснюватися зменшенням ефекту відриву від надлишкового тиску, при цьому водночас відбувається процес розвитку внутрішнього відриву, спричинений зростаючим моментом від гідростатичного тиску. Внутрішній відрив призводить до збільшення величини згинального моменту в точці сполучення стінки з днищем, що при певних умовах може привести до виникнення пластичних деформацій з подальшим розвитком аварійного стану.

Ключові слова: *оболонка, резервуар, моделювання, основа, тиск, скінчений елемент, контакт, ANSYS.*

This study addresses the problem of finite element modeling of a 20,000 m^3 vertical steel tank subjected to static loads. The structure includes a cylindrical wall of total height 17,880 mm and diameter 39,900 mm. The shell thicknesses of the cylindrical wall are determined according to strength and buckling design standards. The geometric model is axisymmetric. The analysis involves the calculation of the stress and strain fields of the cylindrical wall and the contact zone between the flat bottom and the rigid foundation under various combinations of external loads, namely, excessive and hydrostatic pressures. The ANSYS Mechanical software is used for finite element analysis. Three-dimensional SOLID186 and SHELL281 elements are used for axisymmetric modeling of the shell structure in a three-dimensional formulation. To simulate the contact zone, CONTA174 and TARGE170 finite elements are used to model the moving contact surface of the bottom and the fixed surface of the rigid foundation, respectively. The model is verified by comparing the radial displacements calculated numerically and analytically. The discrepancy does not exceed 4%, thus evidencing the adequacy of the finite element model. The contact zone is analyzed for non-standard service conditions, such an excessive internal pressure in the tank (2.5 and 3 kPa compared to 2 kPa under normal conditions). The unilaterally constrained "bottom–foundation" contact zone model allows the bottom to detach from the foundation, thus leading to contact opening. A full detachment occurs under a certain combination of the excessive and the hydrostatic pressure. For certain liquid levels in the tank, the gap decreases, which may be due to a reduced effect of the excessive pressure. This is accompanied by the development of internal detachment caused by the increasing moment from the hydrostatic pressure. The internal detachment increases the bending moment at the wall–bottom junction, which, under certain conditions, may cause plastic deformations followed by the development of an emergency state.

Keywords: shell, tank, modeling, foundation, pressure, finite element, contact, ANSYS.

Вступ. Оболонкові конструкції широко застосовуються у різних галузях промисловості, а вертикальні резервуари являються однією з найпоширеніших форм таких споруд. Ці інженерні об’єкти використовуються для зберігання сипучих та рідких речовин, зокрема нафтопродуктів. Статистичні дані, отримані при експлуатації різноманітних резервуарів, вказують на те, що певні особливості їх роботи не завжди адекватно враховуються в інженерних розрахунках, які ґрунтуються переважно на традиційних аналітичних методах [1, 2]. Це обумовлено рядом ефектів, що виникають через фізичні та геометричні нелінійності при деформації оболонкових структур, що на практиці майже неможливо врахувати, використовуючи суто аналітичні методики.

При нормальних умовах експлуатації ці ефекти не завжди є критичними для цілісності та безпеки споруд. Проте будь-які зміни конструктивних параметрів та впливу зовнішнього середовища (динамічні навантаження, ударні хвилі від вибухових пристроїв, інші аварійні ситуації тощо) можуть призвести до непередбачуваних негативних наслідків.

Варто зазначити, що кожен резервуар має специфічні для даної конструкції дефекти [3, 4]. Один із ефективних способів їх врахування полягає в подальшому дослідженні таких споруд як скінченно-елементних моделей у системах інженерно-комп'ютерного проєктування. Цей підхід неодноразово використовувався в попередніх дослідженнях як для аналізу існуючих конструкцій та елементів [5, 6], так і для проєктування споруд нового типу [7].

Постановка задачі. У системі ANSYS моделюється вертикальний сталевий резервуар об'ємом 20000 кубічних метрів, який зазнає впливу комбінації статичних навантажень. Геометрична модель об'єкту подається у вісесиметричному вигляді. Об'єктом дослідження є напружено-деформований стан циліндричної стінки та зона контакту плоского днища з жорсткою основою при різних параметрах навантаження.

Моделювання проводиться у програмному комплексі ANSYS у тривимірній постановці з застосуванням скінченних елементів SOLID186 та SHELL281 (рис. 1). Останні базуються на теорії пластин Міндліна–Рейснера. Для моделювання контакту застосовуються скінченні елементи CONTA174 та TARGE170 (рис. 2).

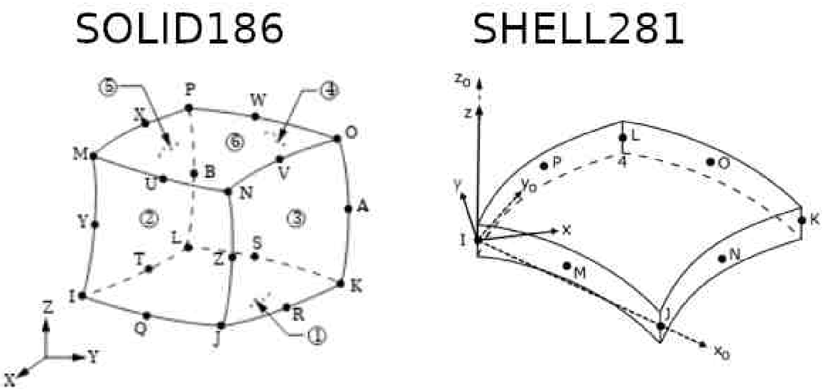


Рис. 1 – Геометрія елементів SOLID186 та SHELL281

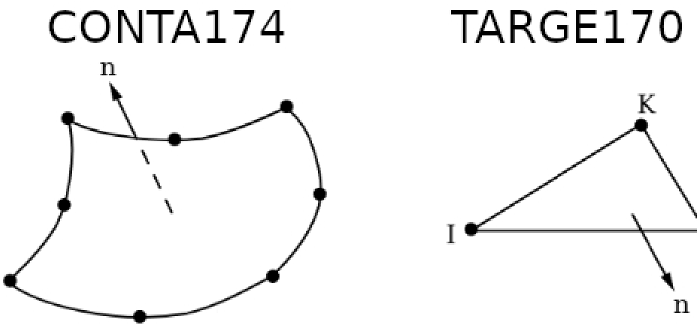


Рис. 2 – Геометрія елементів CONTA174 та TARGE170

Геометрична модель резервуара. Геометрична модель ґрунтується на конструкції вертикального циліндричного резервуара для нафти та нафтопродуктів ємністю 20000 м^3. Резервуар включає циліндричну стінку, плоске днище та дах у вигляді купола.

Циліндрична стінка складається з 12 поясів, при цьому кожен пояс має номінальну висоту 1490 мм. Загальна висота циліндричної стінки резервуара становить 17880 мм, а діаметр – 39900 мм. Товщини поясів стінки розраховані згідно з інженерними вимогами до міцності та стійкості [8]. На нижніх 8 поясах використовується сталь підвищеної міцності класу С345, а на решті – С255. Для поліпшення загальної стійкості на шостому зверху поясі встановлено кільце жорсткості. Параметри стінки представлені у таблиці 1.

Днище резервуара представляє собою круглу пластину зі сталі С255 товщиною 6 мм. Також моделюються окрайкові листи завтовшки 15 мм та завширшки 1390 мм, які вироблені зі сталі С345. Ці листи є опорою для циліндричної стінки та відіграють важливу роль у вузлі з’єднання циліндричної стінки з днищем. Днище спирається на жорстку бетонну основу, при цьому зв’язок днища з основою є одностороннім. Покрівля моделюється у формі купольної оболонки відповідної жорсткості.

Зображення тривимірної вісесиметричної моделі резервуара із зазначеними параметрами наведено на рис. 3

Таблиця 1

Параметри поясів резервуара

<table>
<tr><th>№ пояса</th><th>Товщина, мм</th><th>Тип сталі</th></tr>
<tr><td>12</td><td rowspan="6">8</td><td rowspan="4">С255</td></tr>
<tr><td>11</td></tr>
<tr><td>10</td></tr>
<tr><td>9</td></tr>
<tr><td>8</td><td rowspan="8">С345</td></tr>
<tr><td>7</td></tr>
<tr><td>6</td><td>9</td></tr>
<tr><td>5</td><td>10</td></tr>
<tr><td>4</td><td>12</td></tr>
<tr><td>3</td><td>13</td></tr>
<tr><td>2</td><td>15</td></tr>
<tr><td>1</td><td>18</td></tr>
</table>

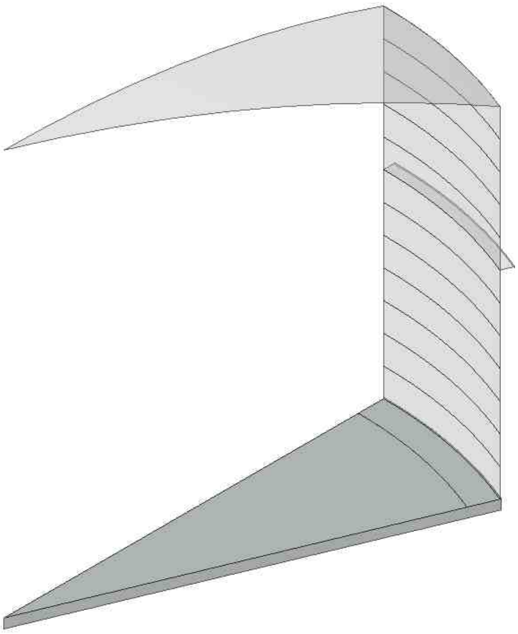


Рис. 3 – Геометрична вісесиметрична тривимірна модель резервуара

Модель контакту «днище–основа». Для моделювання контакту "днище–основа" використовується тривимірна модель з покращеною сіткою розбиття. У цій моделі для побудови циліндричної стінки та днища задіяні скінченні елементи SHELL281 (рис. 1) з 8 вузлами та квадратичним законом переміщень. Також використовуються нелінійні елементи SOLID186 (рис. 1) для моделювання жорсткої бетонної основи. Структура зони контакту подана на рис. 4.

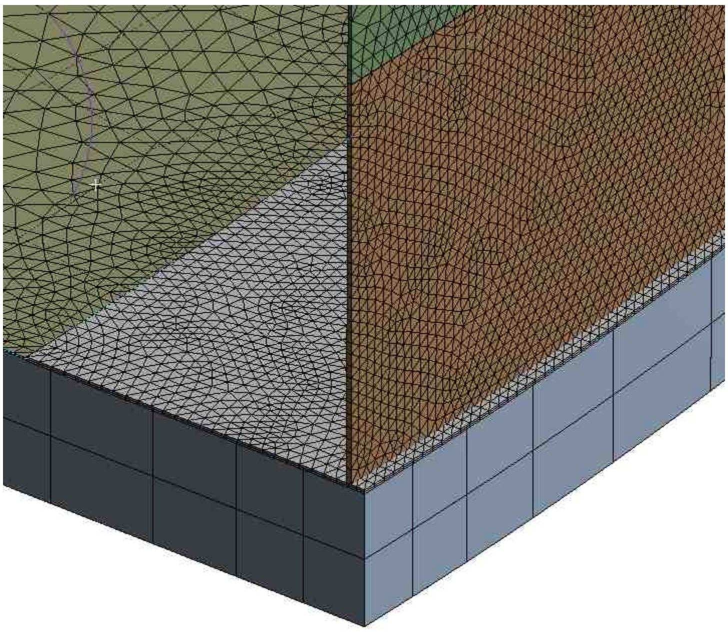


Рис. 4 – Модель контакту «днище–основа»

Нижня частина залізобетонної основи зафіксована. Між днищем та основою моделюється контакт з можливістю відриву [9]. Контакт такого типу моделюється за допомогою скінченних елементів CONTA174 та TARGE170 (рис. 2). На резервуар діють такі навантаження:

1) сила тяжіння;
2) гідростатичний тиск від продукту з густиною 1000 кг/м^3;
3) надлишковий тиск в межах від 2 до 3 кПа.

Для верифікації моделі обчислено радіальні переміщення оболонки за формулою, яка за наявності лише гідростатичного навантаження має наступний вигляд [10]:

$$\mu = -\frac{{}^{\circ} g R^2}{Et}\{L - y - e^{-\ y}[L\cos\ \ y + (L - \frac{1}{\ })\sin\ \ y]\}, \tag{1}$$

де $^{\circ}$ – густина рідини, g – прискорення вільного падіння, R – радіус резервуара, L – висота резервуара, y – координата висоти, E – модуль Юнга, t – товщина стінки, – коефіцієнт деформації стінки. На рис. 5 наведено розподілення деформацій у циліндричній стінці при відсутності надлишкового тиску.

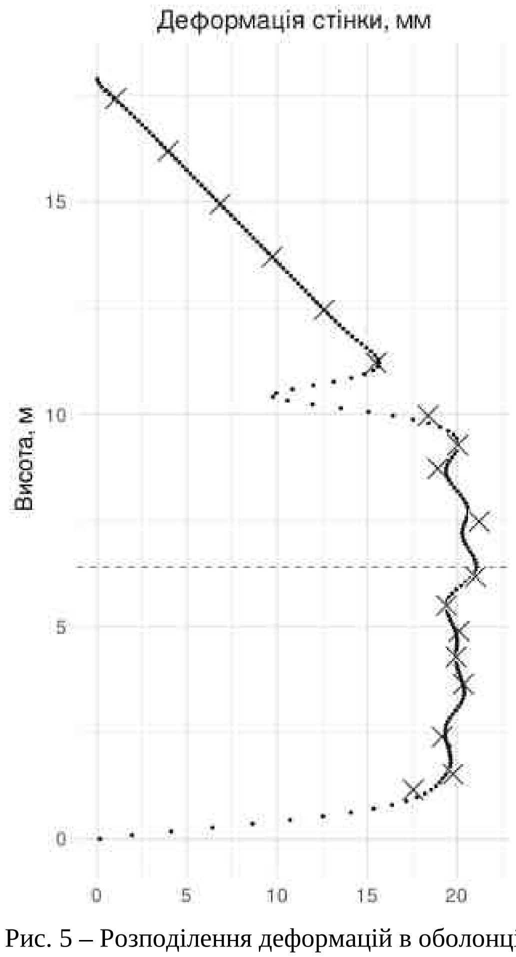
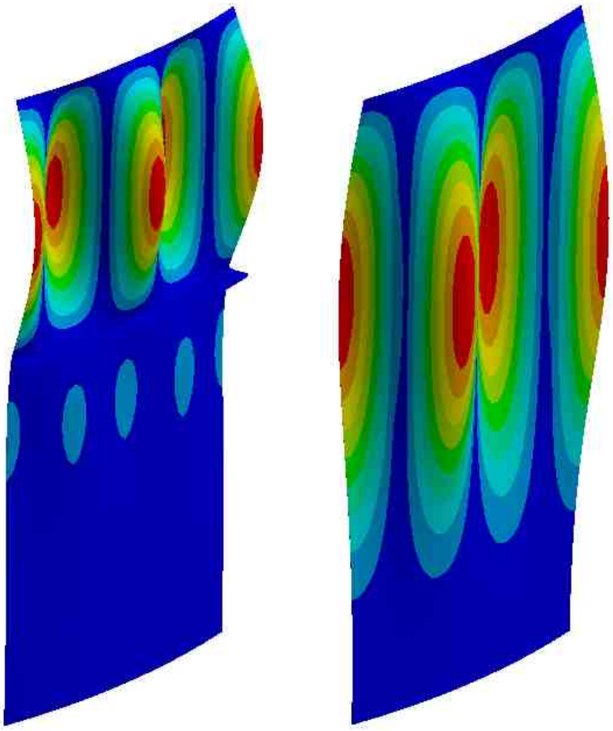


Рис. 5 – Розподілення деформацій в оболонці

Розраховані за формулою (1) значення позначені хрестиками. Розбіжність (середньоквадратична похибка) між даними, які отримані за допомогою чисельного моделювання в ANSYS, та даними, які випливають з аналітичних розрахунків, не перевищує 4 %. Це свідчить про коректність тривимірної скінченно-елементної моделі.

Також при проведенні лінійного аналізу на стійкість виявлено, що за зазначеної конфігурації циліндрична оболонка структури втратить стійкість при зовнішньому тиску ~1950 Па. На рис. 6, а) показана перша форма втрати стійкості. Для порівняння на рис. 6, б) зображено схему втрати стійкості при відсутності кільця жорсткості. При цьому критичний тиск дорівнюватиме ~1118 Па, тобто кільце значно підвищує загальну жорсткість оболонки конструкції.



а) б)

Рис. 6 – Форма втрати стійкості оболонки при лінійному аналізі

4. Аналіз контакту між днищем та основою. Аналіз зони контакту був проведений із застосування тривимірної моделі (рис. 4) для нестандартних умов експлуатації, які включали в себе виникнення аварійного внутрішнього тиску в резервуарі (від 2.5 кПа до 3 кПа). Модель контакту з одностороннім зв’язком дозволяє відрив днища від основи, при цьому відбувається розкриття контакту. Повний відрив днища від основи відбувається за певної комбінації надлишкового та гідростатичного тисків. На рис. 7 показана якісна картина процесу відокремлення окрайкових листів від основи та розподілення напружень у днищі та стінці резервуара.

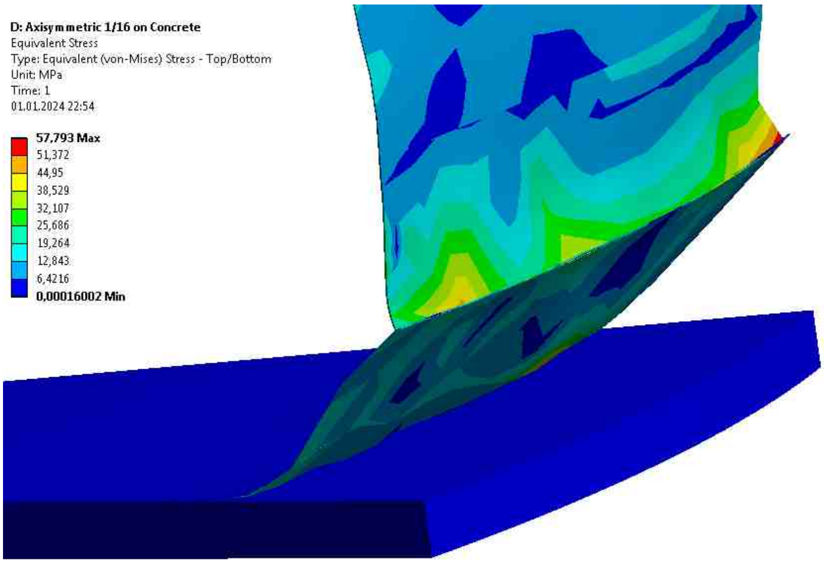


Рис. 7 – Повний відрив днища від основи

При зростанні рівня рідини в резервуарі спостерігається зменшення відриву майже до нуля. Зі збільшенням гідростатичного тиску ефект відриву, обумовлений наявністю надлишкового тиску, зменшується, в той же час відбувається процес розвитку внутрішнього відриву, спричинений зростаючим моментом від гідростатичного тиску. Якісна картина цього процесу зображена на рис. 8.

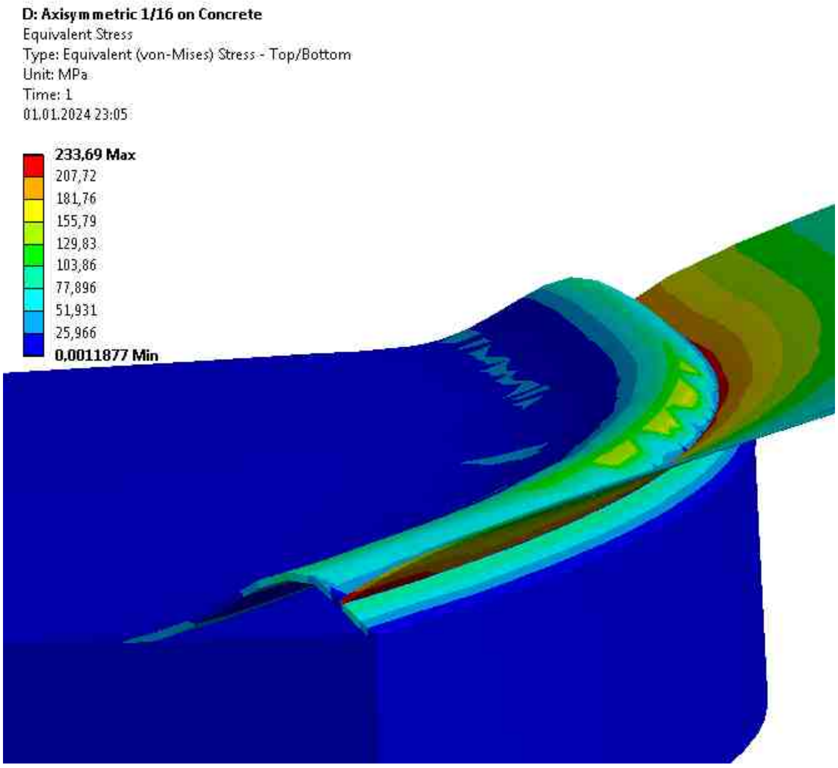


Рис. 8 – Внутрішній відрив днища від основи

Висновки.

1. Створена тривимірна скінченно-елементна модель вертикального сталевого резервуара об'ємом 20000 м^3 узгоджується з теоретичними засадами та дозволяє визначати деформації та напруження в оболонці конструкції.
2. Деталізація контакту «днище–основа» для дослідження явища відриву днища від основи виявила дві фази процесу. Зокрема, при наявності надлишкового тиску при низькому рівні рідкого продукту в резервуарі спочатку відбувається крайовий відрив днища від основи, який поступово зменшується зі зростанням рівня рідини. Друга фаза пов'язана із розвитком внутрішнього відриву днища від основи за рахунок гідростатичного тиску.
3. Внутрішній відрив призводить до збільшення величини згинального моменту в точці сполучення стінки з днищем з відповідним ростом напруження, що при певних умовах (наприклад, наявності додаткових навантажень – снігових, вітрових, ударно-вибухових тощо) може привести до виникнення пластичних деформацій з подальшим розвитком аварійного стану.

1. *Timoshenko S., Gere J.* Theory of elastic stability. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc. 1961. 541 p.
2. *Priestley M. J. N*. Analysis and design of circular prestressed concrete storage tanks. PCI Journal. 1985. Vol. 30, Issue 4. P. 64–85. https://doi.org/10.15554/pcij.07011985.64.85
3. *Гудрамович В. С., Деменков А. Ф., Егоров Е. А., Репринцев А. В.* О влиянии технологи изготовления на несущую способность стальных резервуаров. Проблемы прочности. 2006. №4. С. 125–131. https://doi.org/10.1007/s11223-006-0060-3
4. *Деменков А. Ф., Репринцев А. В., Самарская Е. В.* Влияние технологических и эксплуатационных дефектов на прочность вертикальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. Вісник Дніпропетровського ун-ту. 2006. № 2/2, Вип. 10. С. 51–55.
5. *Tarasenko A. A., Chepur P. V., Chirkov S. V., Tarasenko D. A.* Steel Storage Oil Tank Simulated Using Ansys Workbench 14.5. Fundamental research. 2013. №10. С. 3404–3408.
6. *Krivenko O. P., Vorona Yu. V., Kozak A. A.* Finite element analysis of nonlinear deformation, stability and vibrations of elastic thin-walled structures. In: Strength of Materials and Theory of Structures. Iss. 107. Kyiv: KNUBA, 2021. Pp. 20–34. https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.107.20-34
7. *Єгоров Є. А., Кучеренко О. Є.* Щодо оптимальної топології підпірної стінки // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. К.: КНУБА, 2022. Вип. 108. С. 369–376. https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.369-376
8. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проєктування. К.: Мінрегіон України, 2014. 199 с.
9. *Cavalieri F. J, Cardona A.* An augmented lagrangian method to solve three-dimensional nonlinear contact problems. Latin American Applied Research. 2012. Vol. 42, № 3. P. 281–289.
10. *Timoshenko S., Woinowsky-Kreiger S.* Theory of plates and shells. New York: McGrow-Hill Book Company. 1959. 580 p.

Отримано 22.01.2024,
в остаточному варіанті 13.02.2024