

УДК 539.3:624.04:004.942

**СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКТУ
ОБОЛОНКОВОЇ СТРУКТУРИ З ОСНОВОЮ****Є.А. Єгоров¹,**

д-р техн. наук, професор

О.С. Кучеренко²,

канд. техн. наук, науковий співробітник

О.В. Репринцев²,

канд. техн. наук, старший науковий співробітник

¹*Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпро*²*Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Дніпро*

DOI: 10.32347/2410-2547.2023.110.421-429

Розглядається задача моделювання оболонкової структури у вигляді вертикального сталевого резервуару. Обговорюються кілька підходів до моделювання подібних конструкцій. Досліджується поведінка зони контакту стінка-днище-основа при різних значеннях надлишкового тиску та рівнях рідкого продукту в резервуарі, визначаються умови можливого відриву днища від основи у вузлі сполучення його з циліндричною стінкою.

Ключові слова: моделювання, оболонка, резервуар, контакт, надлишковий тиск, гідростатичний тиск, скінчений елемент, ANSYS.

Вступ. Оболонкові структури - важлива складова сучасної енергетики. Серед них резервуар є однією із найпоширеніших. Ця інженерна конструкція використовується для зберігання рідких речовин, серед іншого — і нафтопродуктів. Саме досвід масового використання нафтових резервуарів свідчить про те, що деякі особливості роботи цих споруд не завжди правильно враховуються в інженерних розрахунках, побудованих, як правило, на традиційних аналітичних методах [1]. Це пов'язано з низкою ефектів, що обумовлені фізичною та геометричною нелінійностями, які мають місце в процесі деформування резервуарних оболонок, і які практично не можуть бути враховані аналітично. Для типових розрахунків резервуарних конструкцій і за нормальних умов експлуатації ці розбіжності не мають критичного впливу на цілісність таких споруд, але будь-які зміни конструктивних параметрів з одночасною зміною технології зберігання та виникненнями нестандартних впливів зовнішнього середовища (сейсмічні впливи, ударні хвилі від вибухових пристроїв, погодні катаклізми тощо) можуть призвести до непередбачуваних негативних наслідків. Варто зазначити, що кожен резервуар унікальний і має безліч характеристик та дефектів, властивих лише даній конструкції [2, 3]. Один з найефективніших шляхів подолання цієї проблеми полягає в подальшому дослідженні оболонкових структур як

скінченно-елементних моделей в CAE (computer-aided engineering) системах. Саме в такому ракурсі і розглядають сталевий резервуар автори цієї статті. Слід зазначити, що такий шлях вже неодноразово застосовувався в багатьох попередніх роботах – як при аналізі роботи типових конструкцій та елементів [4, 5], так і при новітньому оптимальному проектуванні [6]. Але в даному випадку моделювання виконувалося в рамках дослідження нестандартних ситуацій, тому воно має принципові відмінності.

1. Постановка задачі. Розглядається задача моделювання вертикального сталевого резервуару об'ємом 20000 кубічних метрів у системі ANSYS при дії комбінації статичних навантажень. Геометрична модель об'єкту представлена у вісесиметричному вигляді. Досліджується напружено-деформований стан циліндричної стінки, а також зони контакту циліндричної стінки з плоским дном при різних параметрах навантаження. Вважається, що зв'язок основи з дном резервуару є одностороннім.

Моделювання виконувалося із застосуванням програмного комплексу ANSYS в три- та двовимірній постановках. В тривимірному моделюванні використовувалися скінченні елементи типу SHELL181 та SHELL281 (рис. 1), які базуються на теорії пластин Міндліна–Рейснера. Різниця між цими двома типами елементів полягає у кількості вузлів (4 та 8 відповідно).

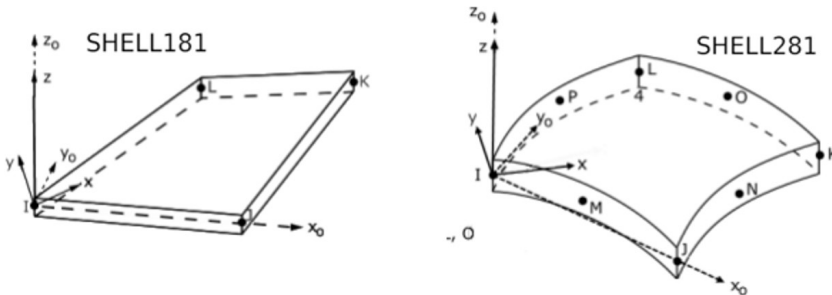


Рис. 1. Геометрія елементів SHELL181 та SHELL281

При розв'язанні вісесиметричної задачі в двовимірній постановці моделювання здійснювалося за допомогою скінченних елементів PLANE182 та PLANE183 (рис. 2).

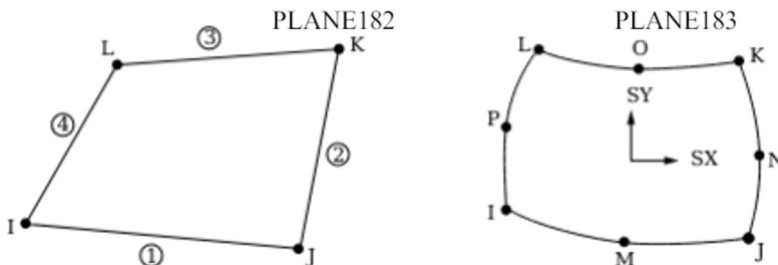


Рис. 2. Геометрія елементів PLANE182 та PLANE183

2. Геометричне моделювання резервуару. За основу геометричної моделі взято конструкцію вертикального циліндричного резервуару для нафти та нафтопродуктів місткістю 20000 м³. Резервуар має циліндричну стінку, плоске днище та купольну стаціонарну покрівлю.

Циліндрична стінка резервуару складається з 12 поясів, де кожен пояс має номінальну висоту 1490 мм, тобто циліндрична стінка резервуару має загальну висоту 17880 мм і діаметр 39900 мм. Товщини поясів стінки визначаються у відповідності до інженерних розрахунків міцності та

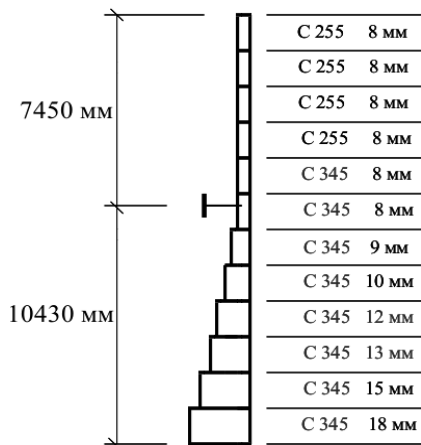


Рис. 3. Компонування циліндричної стінки

виготовлених зі сталі С345, на які спирається циліндрична стінка і які активно задіяні в роботі вузла сполучення циліндричної стінки з днищем.

Днище спирається на жорстку (бетонну) основу. Зв'язок днища з основою має односторонній характер.

Покрівля резервуару моделюється у вигляді купольної оболонки, жорсткість якої забезпечує загальну цілісність цієї споруди.

Отже, при просторовому геометричному вісесиметричному проектуванні резервуару із зазначеними параметрами модель набуває вигляду як на рис. 4 (а).

3. Скінченно-елементна модель зони контакту «стінка-днище-основа». Для моделювання зони контакту «стінка-днище-основа» застосовувалася двовимірною модель, зображена на рис. 4(б), із скінченними елементами PLANE183 (рис. 2) з 8 вузлами та квадратичним законом переміщень. Вигляд зони контакту в такій моделі наведено на рис. 5.

Нижню частину залізобетонної основи зафіксовано. Між днищем та основою моделюється контакт типу “Frictional” із коефіцієнтом тертя 0.45 та можливістю відриву [7]. Також введено обмеження на радіальне переміщення верхньої частини резервуару у точках контакту дах-стінка.

стійкості. При цьому для 6 нижніх поясів використовується сталь класу С345 (підвищеної міцності), а для решти поясів - С255. Для збільшення загальної стійкості циліндричної стінки на шостому зверху поясі встановлюється кільце жорсткості. Прийнята за такими параметрами схема стінки наведена на рис. 3.

Днище резервуару має вигляд круглій пластини зі сталі С255 завтовшки 6 мм. Контурна частина шириною 1390 мм моделює наявність крайкових листів завтовшки 15 мм,

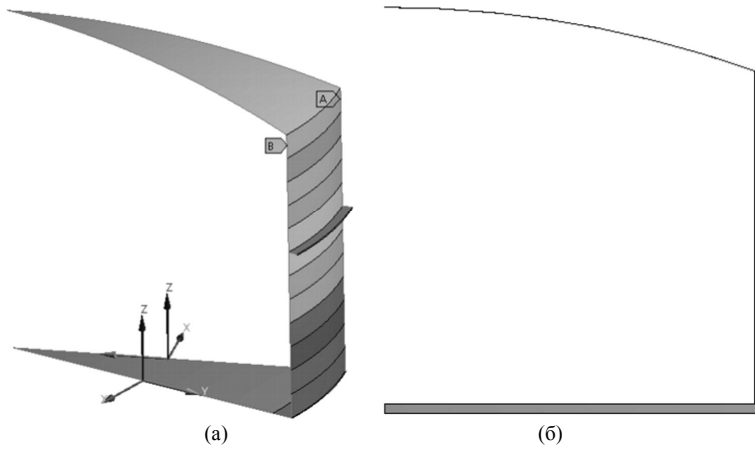


Рис. 4. Вісесиметричні моделі резервуару: (а) - тривимірна, (б) - двовимірна

На резервуар діють такі навантаження:

- 1) власна вага конструкції;
- 2) гідростатичний тиск від продукту зі щільністю 1000 кг/м^3 ;
- 3) надлишковий тиск, який набуває значення 2, 2.5 та 3 кПа.

Для верифікації моделі обчислимо радіальні

переміщення оболонки за формулою, яка при відсутності надлишкового тиску має наступний вигляд [8]:

$$\omega = -\frac{\rho g R^2}{Et} \{H - h - e^{-\beta h} [H \cos \beta h + (H - \frac{1}{\beta}) \sin \beta h]\}, \quad (1)$$

де ρ – щільність рідини, g – прискорення вільного падіння, R – радіус резервуару, H – висота резервуару, h – координата висоти, E – модуль Юнга, t – товщина стінки, β – коефіцієнт деформації стінки, який розраховується наступним чином:

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{(1 - \nu^2)}{R^2 t^2}}, \quad (2)$$

де $\nu=0.3$ – коефіцієнт Пуассона.

На рис. 6 наведено розподілення деформацій та напружень у циліндричній стінці при відсутності надлишкового тиску.

Значення, розраховані за формулою (1), зображені хрестиками. Розбіжність між даними, отриманими за допомогою чисельного моделювання в ANSYS, та даними, які впливають з аналітичних розрахунків, не перевищує 5%, що свідчить про адекватність скінченно-

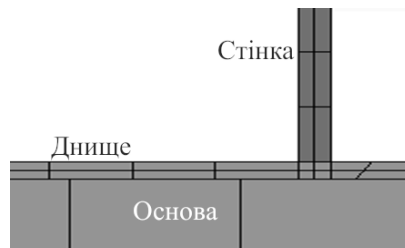


Рис. 5. Зона контакту «стінка-днище-основа»

елементної моделі та можливість її використання для дослідження інших ефектів.

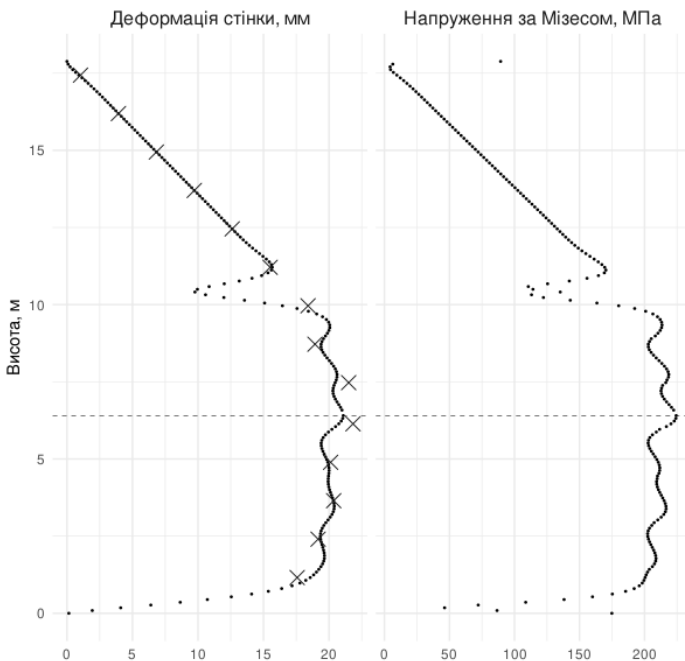
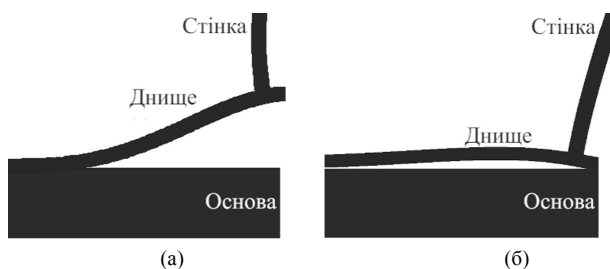


Рис. 6. Розподілення деформацій та напружень в оболонці

4. Аналіз зони контакту. Аналіз зони контакту виконувався для нестандартних умов експлуатації, які в даному випадку полягали у виникненні аварійного занадто великого внутрішнього тиску в резервуарі (2.5 та 3 кПа проти 2 кПа за нормальних умов). Модель зони контакту «днище-основа» з одностороннім зв'язком дозволяє відрив днища від основи, у процесі якого відбувається розкриття контакту. Повний відрив днища від основи відбувається за певної комбінації надлишкового та гідростатичного тисків в резервуарі. На рис. 7 (а) показана якісна картина процесу відокремлення днища від основи.



(а)

(б)

Рис. 7. Відрив днища від основи

На рис. 8 наведені графіки залежності максимальної відстані днища від основи при різних значеннях надлишкового тиску та рівня рідкого продукту.

З наведених графіків випливає, що при певних значеннях рівня рідини в резервуарі відбувається зменшення відриву майже до нуля з подальшим помітним зростанням. Цей перелом пояснюється тим, що зі збільшенням гідростатичного тиску ефект відриву, обумовлений наявністю надлишкового тиску, поступово зменшується, натомість відбувається процес розвитку внутрішнього відриву, спричинений зростаючим моментом від гідростатичного тиску. Якісна картина цього процесу зображена на рис. 7 (б).

Варто зазначити, що розглянуті тут особливості роботи сталевого резервуару на жорсткій основі можуть мати місце і в умовах експлуатації резервуарів на м'яких основах, але загальний ефект буде дещо меншим.

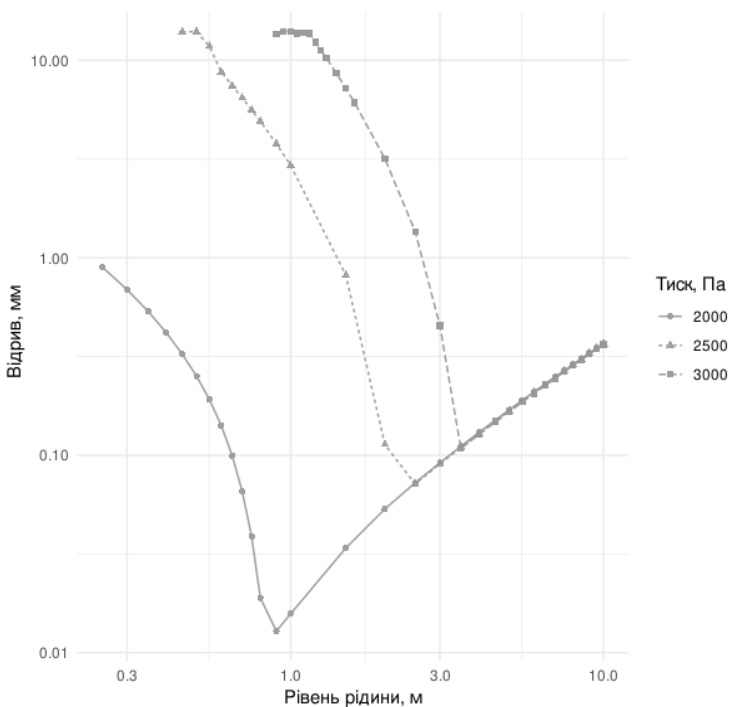


Рис. 8. Залежність зазору між днищем та основою від рівня рідини в резервуарі при різних значеннях надлишкового тиску

Висновки

1. Створена скінченно-елементна модель оболонкової структури узгоджується з аналітичним розв'язком та дозволяє визначати деформації та напруження в оболонці.

2. Деталізація вузла «стінка-днище-основа» із контактною зоною, яка має за мету дослідження процесу відриву днища від основи, показала двоїстість досліджуваного явища, а саме: при наявності надлишкового тиску при низькому рівні рідкого продукту в резервуарі спочатку

відбувається «крайовий» відрив днища від основи, який із зростанням рівня продукту поступово зменшується; на певному етапі починається процес розвитку внутрішнього «прихованого» відриву днища від основи.

3. Поява «крайового» відриву призводить до збільшення величини згинального моменту в точці сполучення стінки з днищем, «прихований» відрив навпаки зменшує згинальний момент в точці сполучення у порівнянні з аналітичними розрахунками при двосторонній моделі зв'язку днища з основою.

Моделювання виконувалося у системі ANSYS ACADEMIC. Графіки будувалися за допомогою пакету ggplot2 [9] системи статистичного моделювання R.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Priestley M.J.N. Analysis and design of circular prestressed concrete storage tanks // PCI Journal. – 1985. – Vol. 30. – Issue 4. – P. 64–85.
2. Гудрамович В.С., Демєнков А.Ф., Єгоров Е.А., Рєпринцев А.В. О влиянии технологии изготовления на несущую способность стальных резервуаров // Проблемы прочности. – 2006. – №4. – С. 125-131.
3. Демєнков А.Ф., Рєпринцев А.В., Самарская Е.В. Влияние технологических и эксплуатационных дефектов на прочность вертикальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // Вісник Дніпропетровського ун-ту. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2006. – № 2/2, Вип. 10. – С. 51–55.
4. 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.
5. Krivenko O.P., Vorona Yu.V., Kozak A.A. Finite element analysis of nonlinear deformation, stability and vibrations of elastic thin-walled structures // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – К.: KNUBA, 2021. – Issue 107. – P. 20-34.
6. Єгоров Е.А., Кучеренко О.С. Щодо оптимальної топології підпірної стінки // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2022. – Вип. 108. – С. 369-376.
7. 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.
8. Timoshenko S., Woinowsky-Kreiger S. Theory of plates and shells. New York: McGraw-Hill Book Company. - 1959.
9. Wickham H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. New York: Springer-Verlag. – 2016.

REFERENCES

1. Priestley M.J.N. Analysis and design of circular prestressed concrete storage tanks // PCI Journal. – 1985. – Vol. 30. – Issue 4. – P. 64–85.
2. Hudramovich V.S., Demenkov A.F., Egorov E.A., Reprytsev A.V. O vliianii tehnologii izgotovleniia na nesushchuiu sposobnost stalnikh rezervuarov. (On the influence of the technology of manufacturing on the load-bearing capacity of steel tanks) // Problemy prochnosti. - 2006. – №4. – P. 125-131.
3. Demenkov A.F., Reprytsev A.V., Samarskaia E.V. Vliianye tehnologicheskikh i ekspluatatsyonnykh defektov na prochnost vertykalnykh rezervuarov dlia hraneniia nefty i nefteproduktov. (Influence of technological and operational defects on the strength of vertical tanks for oil and petroleum products) // Visnyk Dnipropetrovskoho un-tu. – Dnipropetrovsk: DNU, 2006. – № 2/2, Issue 10. – P. 51–55.
4. 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.
5. Krivenko O.P., Vorona Yu.V., Kozak A.A. Finite element analysis of nonlinear deformation, stability and vibrations of elastic thin-walled structures // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – К.: KNUBA. - 2021. – Issue 107. – P. 20-34.

6. *Yegorov Y., Kucherenko O.* Optimal topology of retaining wall // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA. - 2022. – Issue 108. – P. 369-376.
7. *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.
8. *Timoshenko S., Woinowsky-Kreiger S.* Theory of plates and shells. New York: McGraw-Hill Book Company. - 1959.
9. *Wickham H.* ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. New York: Springer-Verlag. – 2016.

Стаття надійшла 27.02.2023

Сгоров С.А., Кучеренко О.С., Репринцев О.В.

СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКТУ ОБОЛОНКОВОЇ СТРУКТУРИ З ОСНОВОЮ

Розглядається задача моделювання оболонкової структури у вигляді вертикального сталевого резервуару об'ємом 20000 кубічних метрів при дії комбінації статичних навантажень. Циліндрична стінка резервуару має загальну висоту 17880 мм і діаметр 39900 мм. Товщини поясів стінки визначаються у відповідності до інженерних розрахунків міцності та стійкості. Геометрична модель об'єкту представлена в вісесиметричному вигляді. Досліджується напружено-деформований стан циліндричної стінки, а також зони контакту циліндричної стінки з плоским дном при різних параметрах навантаження. Вважається, що зв'язок основи з дном резервуару є одностороннім. Між дном та основою моделюється контакт типу "Frictional" з коефіцієнтом тертя 0.45 та можливістю відриву. Нижню частину основи зафіксовано. Також введено обмеження на радіальне переміщення верхньої частини резервуару у точках контакту дах-стінка. Моделювання виконується із застосуванням програмного комплексу ANSYS в три- та двовимірній постановках. В тривимірному моделюванні використовуються скінченні елементи типу SHELL281. При розв'язанні вісесиметричної задачі в двовимірній постановці моделювання здійснюється за допомогою скінчених елементів PLANE183. Верифікація моделі проводиться шляхом порівняння радіальних переміщень оболонки, отриманих за допомогою чисельного моделювання, зі значеннями, які обчислені аналітично. При цьому розбіжність між даними не перевищує 5%, що свідчить про адекватність скінченно-елементної моделі. Аналіз зони контакту виконується для нестандартних велик експлуатації, які в даному випадку полягають у виникненні аварійного занадто великого внутрішнього тиску в резервуарі (2.5 та 3 кПа проти 2 кПа за нормальних умов). Модель зони контакту «дно-основа» з одностороннім зв'язком дозволяє відрив дна від основи, у процесі якого відбувається розкриття контакту. Повний відрив дна від основи відбувається за певної комбінації надлишкового та гідростатичного тисків в резервуарі. При певних значеннях рівня рідини в резервуарі відбувається зменшення відриву майже до нуля з подальшим помітним зростанням. Цей перелом пояснюється тим, що зі збільшенням гідростатичного тиску ефект відриву, обумовлений наявністю надлишкового тиску, поступово зменшується, натомість відбувається процес розвитку внутрішнього відриву, спричинений зростаючим моментом від гідростатичного тиску.

Ключові слова: моделювання, оболонка, резервуар, контакт, надлишковий тиск, гідростатичний тиск, скінчений елемент, ANSYS.

Yegorov Y.A., Kucherenko O.Ye., Repryntsev O.V.

FINITE ELEMENT MODELLING OF THE CONTACT BETWEEN SHELL STRUCTURE AND FOUNDATION

This paper presents the problem of modelling of a shell structure as a vertical steel tank with a volume of 20000 cubic meters under a combination of static loads. The total height of the cylindrical wall of the tank is 17880 mm, and its diameter is 39900 mm. The wall thicknesses have been determined according to the design requirements of strength and buckling. The geometric model of the object has an axisymmetric form. The task is to perform the analysis of the stress-deformed state of the cylindrical wall and the contact zone of the wall with the foundation under different loads. The type of the contact is "Frictional" with a coefficient of friction equal to 0.45. The lower part of the foundation has been fixed. We have also restricted the radial movement of the upper part of the tank. Modelling has been carried out using the ANSYS simulation software. In three-dimensional modelling, finite elements of the SHELL281 type have been used. When solving an axisymmetric problem in a two-dimensional formulation, we have used PLANE183 finite elements. We have

verified the model by comparing the radial displacements of the shell obtained using numerical simulation with the values calculated analytically. The discrepancy between the data does not exceed 5%, which indicates the adequacy of the finite element model. We have performed the analysis for non-standard operating conditions, which suppose the excessive internal pressure in the tank (2.5 and 3 kPa against 2 kPa under normal conditions). The contact "bottom - foundation" with a one-way connection allows separation of the bottom from the foundation. The complete detachment occurs under a specific combination of excessive and hydrostatic pressures. For certain levels of liquid in the tank, the gap decreases almost to zero, followed by a noticeable increase. This rapid change can be explained by the fact that with an increase in the hydrostatic pressure the effect of separation due to the excessive pressure decreases, and then the process of internal separation occurs, caused by the increasing moment from hydrostatic pressure.

Keywords: modelling, shell, tank, contact, excess pressure, hydrostatic pressure, finite element, ANSYS.

УДК 539.3:624.04:004.942

Єгоров Є.А., Кучеренко О.Є., Репринцев О.В. Скінченно-елементне моделювання контакту оболонкової структури з основою // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник. – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 110. – С. 421-429.

Розглядається задача моделювання оболонкової структури у вигляді вертикального сталевого резервуару та досліджується поведінка зони контакту стінки-днище-основа при різних значеннях надлишкового та гідростатичного тисків.

Лл. 8. Бібліогр. 9 назв.

UDC 539.3:624.04:004.942

Yegorov Y.A., Kucherenko O.Ye., Repryntsev O.V. Finite element modelling of the contact between shell structure and foundation // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUCA, 2023. – Issue 110. – P. 421-429.

The paper introduces the problem of modelling of a shell structure as a vertical steel tank and analysis of the wall-bottom-foundation contact considering various combinations of excessive and hydrostatic pressures.

Fig. 8. Ref. 9.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металевих конструкцій ЄГОРОВ Євгеній Аркадійович.

Адреса робоча: 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а, ДВНЗ "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", ЄГОРОВ Євгеній Аркадійович.

Мобільний тел.: +380679451816

E-mail: evg_egorov@ukr.net

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2993-0570>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук (PhD), науковий співробітник КУЧЕРЕНКО Олександр Євгенович.

Адреса робоча: 49005, м. Дніпро, вул.Лешко-Попеля, 15, Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, КУЧЕРЕНКО Олександр Євгенович.

E-mail: akch7@cryptolab.net

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, старший науковий співробітник РЕПРИНЦЕВ Олексій Васильович.

Адреса робоча: 49005, м. Дніпро, вул.Лешко-Попеля, 15, Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, РЕПРИНЦЕВ Олексій Васильович.

E-mail: alrprn@i.ua