

УДК 624.014:624.046.5:699.852

doi:10.31650/2707-3068-2024-28-63-74

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОСИЛЕННЯ СТАЛЕВОГО ПІДЗЕМНОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО РЕЗЕРВУАРУ

Бакулін Є.А., к.т.н., доцент,

bakulin959@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0238-5384

Усенко М.В., к.т.н., ст. викладач

usenkonick201084@gmail.com, ORCID: 0009-0001-1969-1265

Бакуліна В.М., ст. викладачка

bakulina88@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0849-9697

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

Анотація. Досить часто, у реальних умовах експлуатації, підземні резервуари призначені для зберігання рідких матеріалів, втрачають експлуатаційну придатність за короткий термін експлуатації. Найбільша кількість дефектів пов'язана з втратою місцевої стійкості оболонок резервуару. У роботі проведено аналіз напружено-деформованого стану типового резервуару об'ємом $75,0\text{ м}^3$ з циліндричної двошарової оболонки. Визначені причини втрати місцевої стійкості оболонок та надані відповідні рекомендації.

Метою роботи є визначення напружено-деформаційного стану резервуара для виявлення причин деформацій корпусу та надання відповідних рекомендацій щодо його зміцнення. Працює в реальних умовах експлуатації за фактичного навантаження.

Ключові слова: підземний резервуар, циліндрична двошарова оболонка, чисельне моделювання, напружено-деформований стан, дефекти, стійкість, експлуатація, посилення.

Постановка проблеми. У реальних умовах експлуатації, підземні резервуари призначені для зберігання рідких матеріалів, втрачають експлуатаційну придатність за короткий термін експлуатації. Найбільша кількість дефектів пов'язана з втратою місцевої стійкості оболонок резервуару.

У роботі досліджувався підземний резервуар, призначений для зберігання паливних матеріалів, об'ємом $75,0\text{ м}^3$. Резервуар складається з циліндричної двошарової оболонки, звареної із повздовжніх листів та двох боковин еліптичної форми. Зовнішній діаметр резервуару складає $3,24\text{ м}$; внутрішній діаметр – $3,22\text{ м}$; довжина резервуару – $9,68\text{ м}$; товщина зовнішньої стінки – 4 мм ; внутрішньої – 5 мм . П'ять кілець жорсткості складаються із кутика $75\times 75\times 5\text{ мм}$ та смугової сталі товщиною 5 мм .

Резервуар встановлений на заглиблений залізобетонний фундамент на якому встановлено два ложементу з кутом обхвату циліндричної оболонки у 120° та фіксацією резервуара сталевими поясами. Низ (днище) резервуара знаходиться на позначці – $4,74\text{ м}$, верх на позначки – $1,50\text{ м}$ від поверхні землі. Налив палива здійснюється через люк (горловину) діаметром 800 мм , що знаходиться у верхній центральній частині резервуару. З метою запобігання забрудненню оточуючого середовища паливними матеріалами, по периметру фундаменту влаштована дренажна система з накопичувальною ємкістю та геомембранним захистом.

Аналіз останніх джерел і публікацій. Діюча нормативна база у галузі проєктування сталевих резервуарів [1–3], розроблена на ще початку ХХІ століття, потребує удосконалення з урахуванням актуальних розробок провідних наукових шкіл України [4–6] та ін.

Нормативне забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель та споруд [7], раціональний захист території забудови [8], реалізовані проєктні рішення тощо – на жаль не завжди забезпечує належну експлуатацію будівельних конструкцій будівель та інженерних споруд [9, 10] і спонукає інженерів та науковців постійно підвищувати власний рівень підготовки із урахуванням сучасних досягнень у галузі [4, 11].

Розроблені критерії надійності [5] та ризиків [6] під час визначення дійсного технічного стану будівельних конструкцій із урахуванням наявних дефектів [12, 13 та ін.], корозійно-механічних руйнувань [14], наявності складних інженерно-геологічних умов забудови [15] (у тому числі із урахуванням дії сейсмічних навантажень [16, 17]), необхідності проведення реконструкції у складних умовах щільної забудови [18], методи влаштування підпірних стінок [8, 19], – далеко не весь перелік викликів, які постають під час проектування, зведення, монтажу та безпечної надійної експлуатації об'єктів будівництва.

Аналіз будівельної нормативної бази розділяє резервуари на дві основні групи: **вертикальні** циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів [1] та сталеві резервуари **горизонтальні** [2]. У роботі [20] наведені принципи конструювання та особливостей розрахунку вертикального циліндричного сталевих резервуару (ємністю 5 тис. м³) відкритого типу із урахуванням появи крайового ефекту. Класифікація сталевих резервуарів, зображена авторами у [21] дозволила розробити загальний алгоритм розрахунку сталевих резервуарів для зберігання вуглеводнів, а також представити типологію та основні характеристики існуючих резервуарів. Науковцями [16] систематизовані проблемні питання будівництва та експлуатації нафтових вертикальних сталевих резервуарів у складних інженерно-геологічних умовах. Отже, проведений аналіз наводить лише поодинокі випадки наукових розробок щодо проектування, технологій виготовлення, безпечної експлуатації та посилення сталевих резервуарів заритого типу.

Постановка завдання. Метою роботи є визначення напружено-деформованого стану резервуару, який працює у реальних умовах експлуатації від фактичного навантаження для виявлення причин деформацій корпусу та надання відповідних рекомендацій щодо його посилення.

Основним навантаженням на підземний резервуар є зовнішній тиск ґрунту. Аналітичний розрахунок резервуару виконується як горизонтальної циліндричної оболонки із еліптичними боковинами на дію зовнішнього тиску у відповідності до СОУ МПП 71.120-217:2009 [22].

Основний матеріал і результати. Чисельне моделювання виконувалося у тривимірній постановці за допомогою ПК «ЛІРА САПР» із урахуванням особливостей, наведених у роботі [23]. Загальний вигляд 3D моделі резервуару (рис. 1) та його просторової скінчено-елементної моделі, представлений на рис. 2.

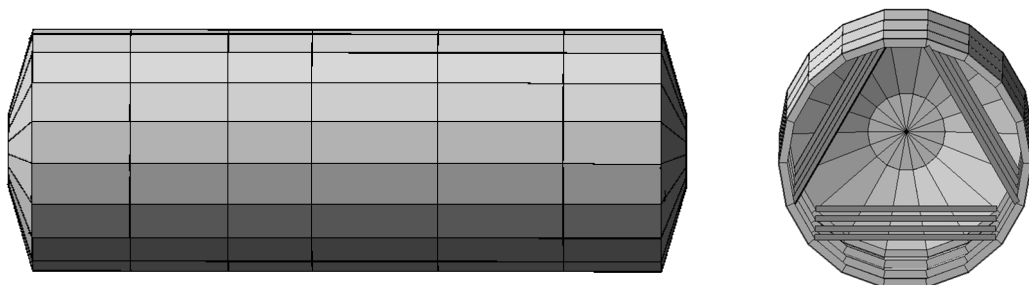


Рис. 1. Тривимірна чисельна 3D модель резервуару

Розглянуто наступний розрахунковий випадок: резервуар без продукту повинен витримувати тиск ґрунту. Аналітичні формули наведені для випадку дії зовнішнього тиску, постійного як за довжиною, так і за колом оболонки. Основні характеристики жорсткості конструктивних елементів резервуара представлені у табл. 1.

Чисельне моделювання підземного резервуара проводилося на сполучення зусиль середнього тиску, який є еквівалентним тиску ґрунту, що визначається із урахуванням [22] за наступними залежностями:

$$P_{cp} = 0,7(P_z + P_g); \quad (1)$$

$$P_g = \gamma_f \cdot \gamma_0 \cdot (H + 0,15D_n); \quad (2)$$

$$P_z = \gamma_f \cdot \gamma_0 \cdot (H + 0,5D_n) \cdot g^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (3)$$

де: P_{cp} – середній тиск ґрунту; P_v – інтенсивність вертикального тиску ґрунту; P_h – інтенсивність горизонтального (бічного тиску ґрунту); $\gamma_f = 1,3$ – коефіцієнт надійності за навантаженням від тиску ґрунту; $\gamma_0 = 1,73 \text{ тс/м}^3$ – питома вага ґрунту; H – висота засипки до верху резервуара; φ – кут внутрішнього тертя ґрунту; D_n – зовнішній діаметр резервуара; $k = 2,4$ – коефіцієнт запасу стійкості.

Таблиця 1

Характеристики жорсткості конструктивних елементів резервуара

Типи жорсткості	Найменування елементів	Параметри (перерізи, жорсткість, розподілене навантаження)
1	пластина Н 5 мм	$E=2.1\text{e}+007 \text{ тс/м}^2$, $V=0.2$, $H=0.5 \text{ см}$, $R_0=7.85 \text{ тс/м}^3$
2	кутик $75 \text{ мм} \times 75 \text{ мм} \times 5 \text{ мм}$	$q=0.00579879$
		$EF=15523.5 \text{ тс}$, $E_{Iy}=8.3 \text{ тс} \times \text{м}^2$
		$E_{Iz}=8.3 \text{ тс} \times \text{м}^2$, $G_{Ik}=0.0576 \text{ тс} \times \text{м}^2$
		$Y_1=0.976 \text{ мм}$, $Y_2=2.65 \text{ мм}$, $Z_1=0.976 \text{ мм}$, $Z_2=2.65 \text{ мм}$, $RU \ Y=0 \text{ рад.} \times 1000$, $RU \ Z=0 \text{ рад.} \times 1000$
3	пластина Н 4 мм	$E=2.1\text{e}+007 \text{ тс/м}^2$, $V=0.2$, $H=0.4 \text{ см}$, $R_0=7.85 \text{ тс/м}^3$

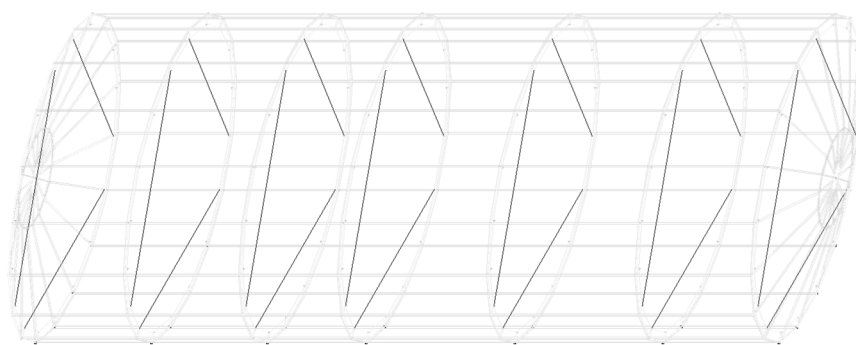


Рис. 2. Загальний вигляд скінчено-елементної моделі резервуара

Епюра природного тиску ґрунту змінюється від $2,25 \text{ тс/м}^3$ на позначці $-1,50 \text{ м}$ від поверхні землі до $9,72 \text{ тс/м}^3$ на рівні фундаменту резервуара, рис. 3.

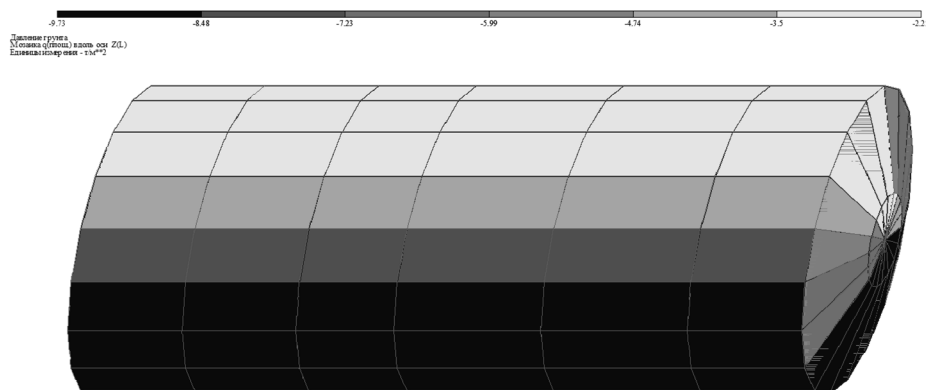


Рис.3. Мозаїка навантажень від тиску ґрунту

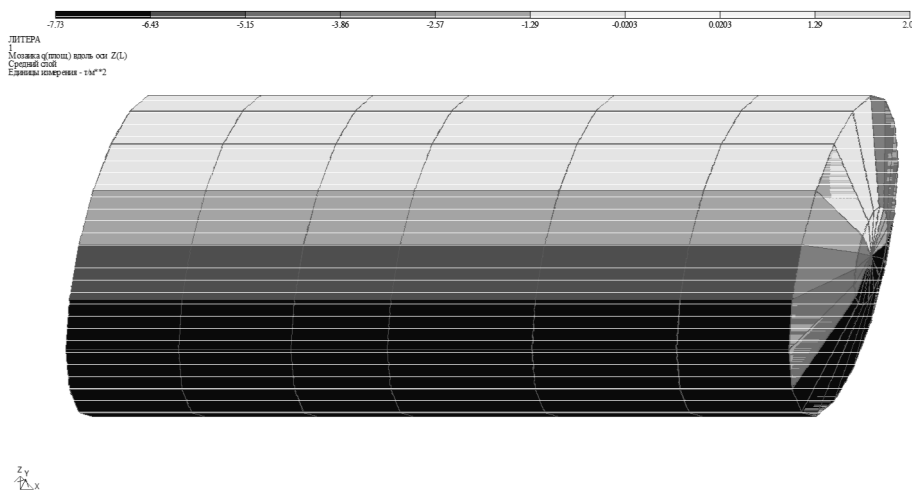


Рис. 4. Мозаїка навантажень від першого основного сполучення завантажень (власна вага, паливо, ґрунт)

Мінімальна допустима товщина стінки резервуара, без врахування кілець жорсткості, розраховуємо за формулами [22]:

$$t_{\min} = \max \left\{ 1,06 \frac{10^{-2} \cdot D}{B} \cdot \left(\frac{p \cdot L}{10^{-5} \cdot E \cdot D} \right)^{0,4} \right\} =$$

$$= 1,06 \frac{10^{-2} \cdot 3,24}{2,57} \cdot \left(\frac{9,72 \cdot 9,68}{10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^7 \cdot 3,24} \right)^{0,4} = 0,095 \text{ м},$$

де

$$B = \max \left\{ 1; 0,47 \left(\frac{p}{10^{-5} \cdot E} \right)^{0,067} \cdot \left(\frac{L}{D} \right)^{0,4} \right\} =$$

$$= \max \left\{ 1; 0,47 \left(\frac{9,72}{10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^7} \right)^{0,067} \cdot \left(\frac{9,68}{3,24} \right)^{0,4} \right\} = 2,57,$$

p – значення розрахункового тиску ґрунту (у даному випадку – середній тиск ґрунту становить $9,72 \text{ тс/м}^2$); L – довжина обичайки у м; E – модуль пружності сталі у тс/м^2 .

Результати чисельних розрахунків підземного резервуару, призначений для зберігання паливних матеріалів дозволили отримати ізополі переміщень вздовж осі OZ від першого основного сполучення навантажень (рис. 5), деформовану схему споруди резервуару (рис. 6),

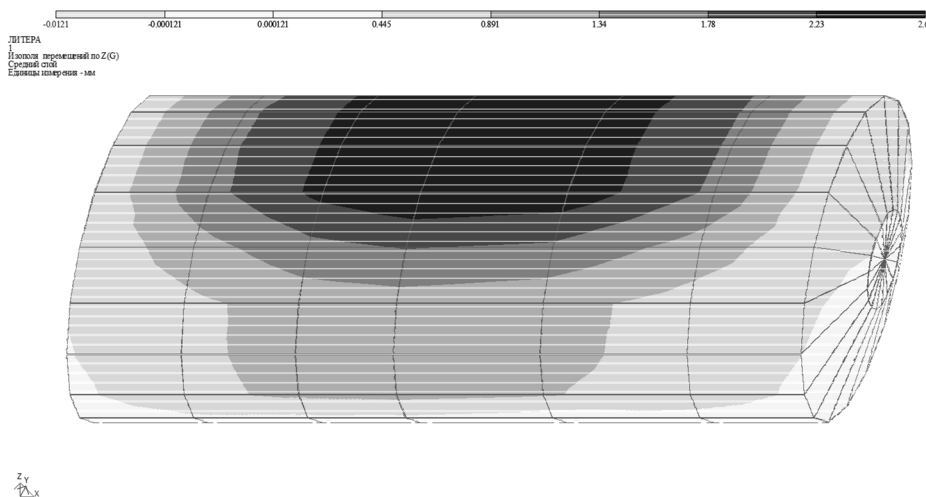


Рис. 5. Ізополі переміщень вздовж осі OZ від першого основного сполучення навантажень

форму втрати стійкості стінки резервуару із урахуванням коефіцієнту 0,25 (рис. 7), повздовжні зусилля «розтягу-стиску» у стержневих елементах кілець посилення (рис. 8), ізополя головних напружень N_1 (рис. 9) та N_3 (рис. 10) у пластинах обичайки резервуару, ізополя еквівалентних напружень розтягу NE у пластинах обичайки резервуару (рис. 11).

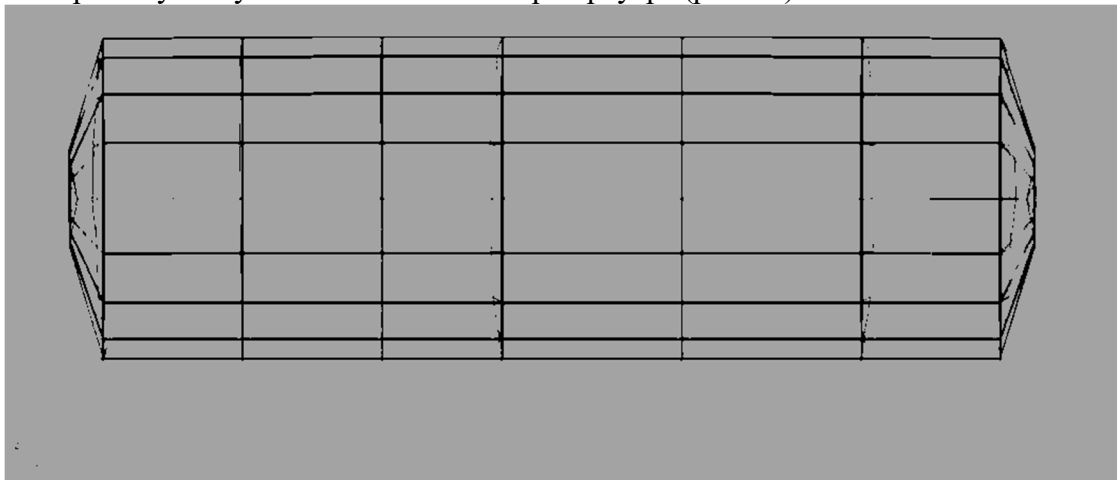


Рис. 6. Деформована схема резервуару

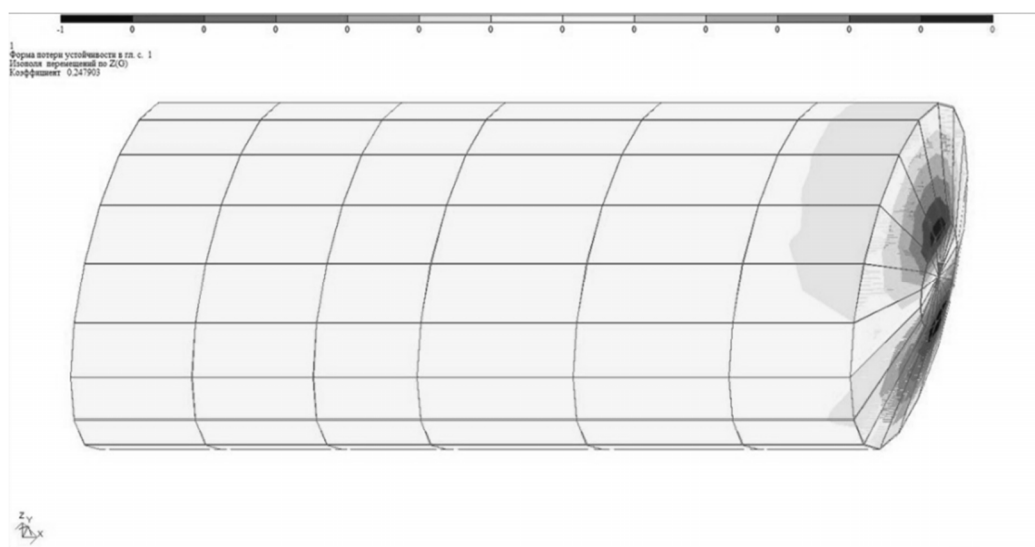


Рис. 7. Форма втрати стійкості стінки резервуару. Коефіцієнт $0.25 < 1$

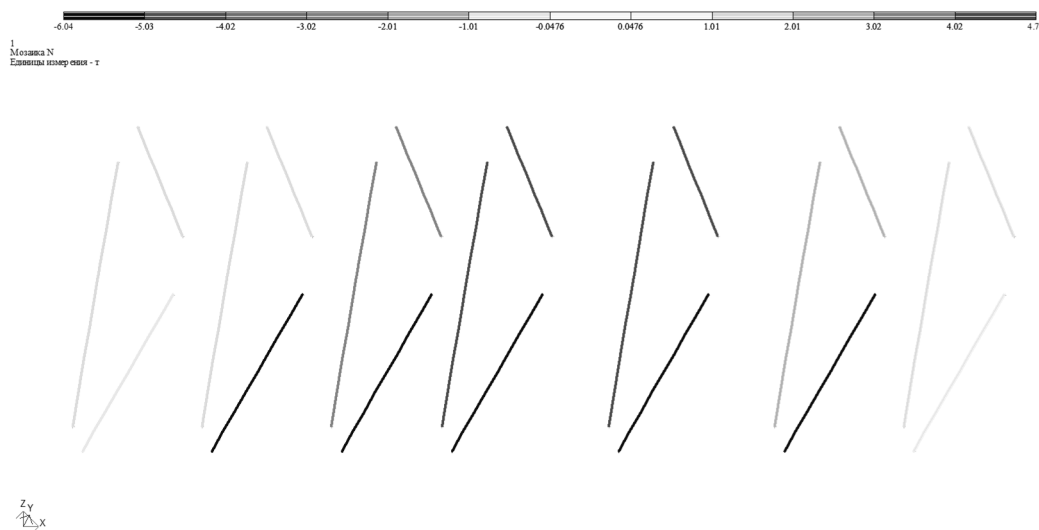
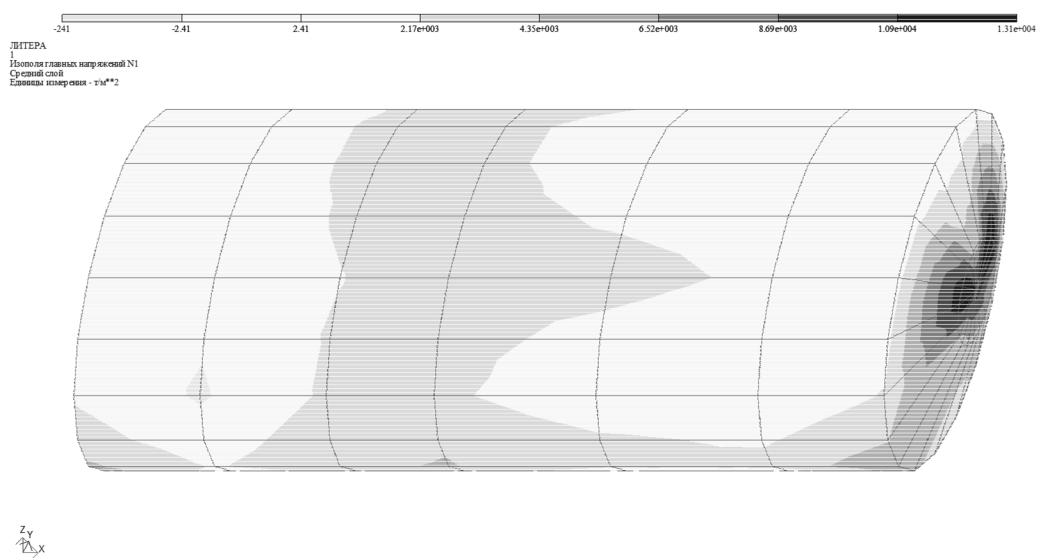
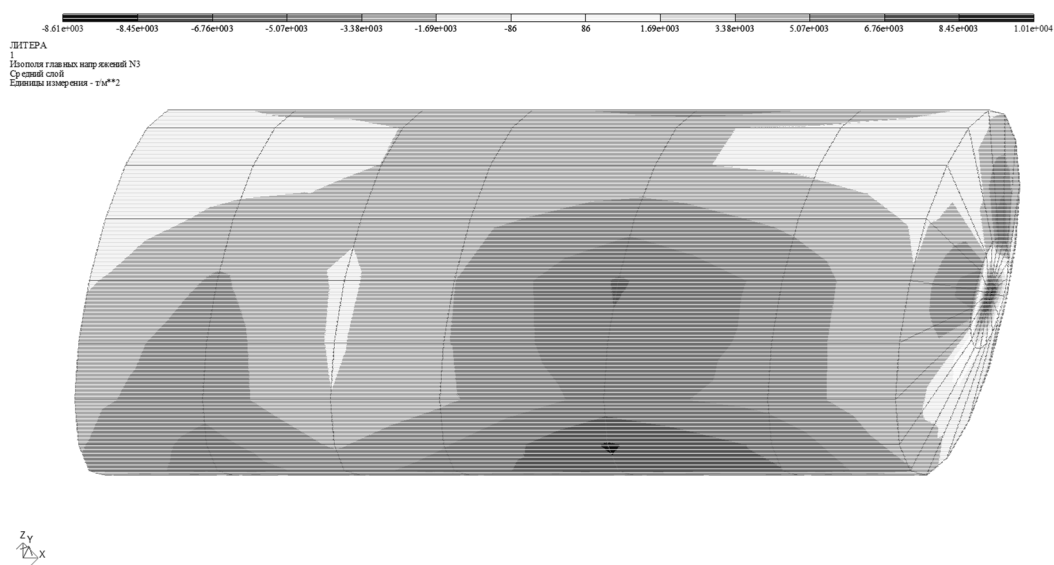
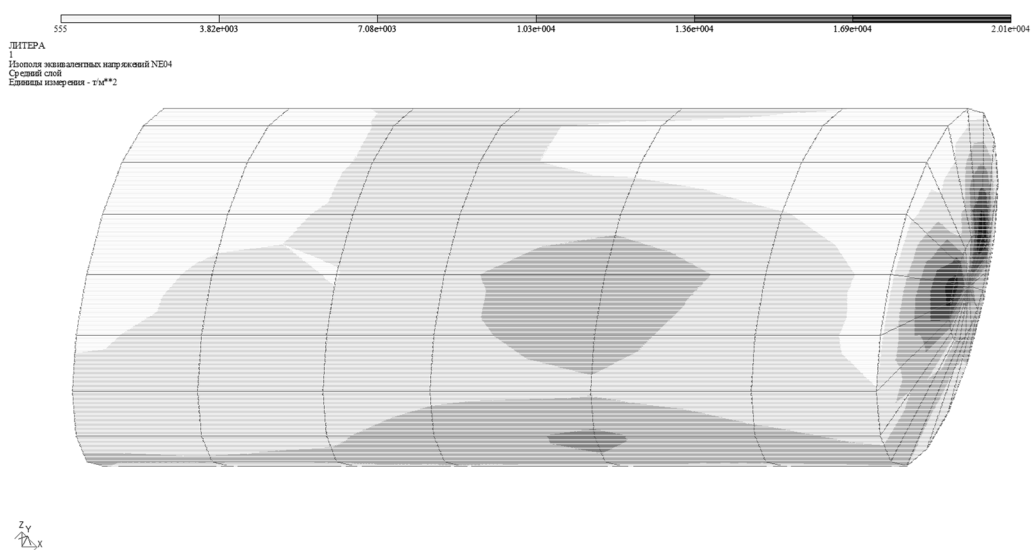


Рис. 8. Повздовжні зусилля в стержневих елементах кілець підсилення

Рис. 9. Ізополя головних напружень N_1 у пластинах обичайки резервуараРис. 10. Ізополя головних напружень N_3 у пластинах обичайки резервуараРис. 11. Ізополя еквівалентних напружень NE (розтяг) у пластинах обичайки резервуара

Отримані результати перевірки кілець жорсткості, виконаних із кутика за граничними станами першої групи (рис. 12) зроблені у відповідності до діючих будівельних норм [1–3 та ін.] із використанням розрахункового сполучення навантажень у ПК «ЛІРА САПР» [23].

Виконані також розрахунки щодо перевірки кілець жорсткості за граничними станами другої групи (рис. 13) та перевірені їхня спроможність на місцеву стійкість (рис. 14).

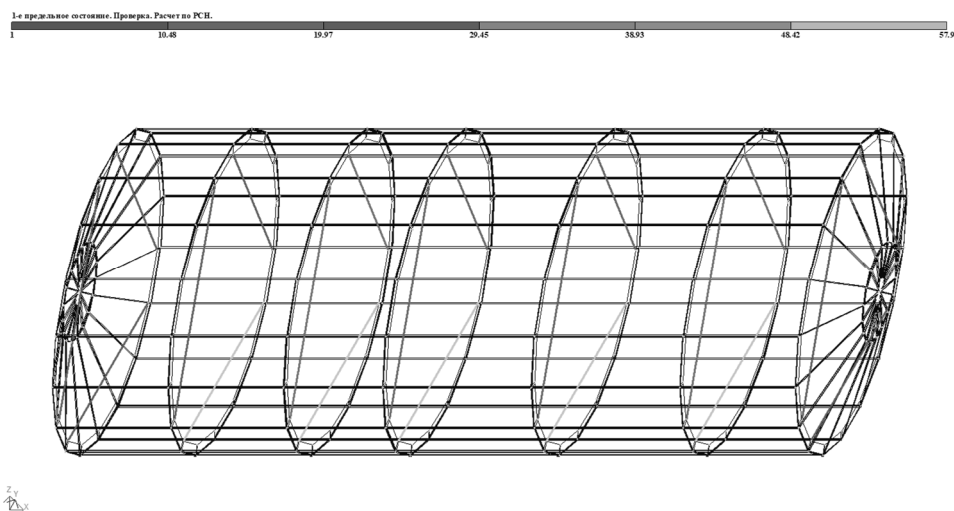


Рис. 12. Результати перевірки кілець жорсткості за граничними станами першої групи

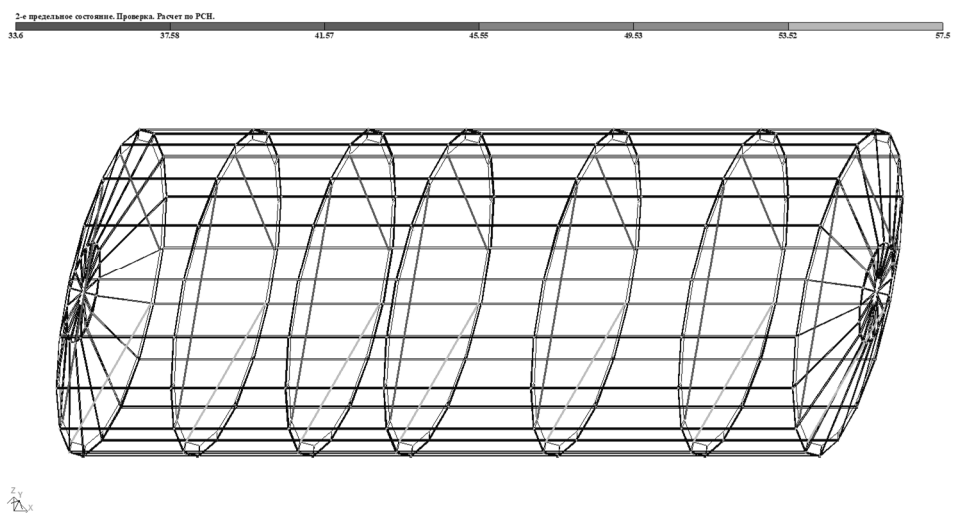


Рис. 13. Результати перевірки кілець жорсткості за граничними станами другої групи

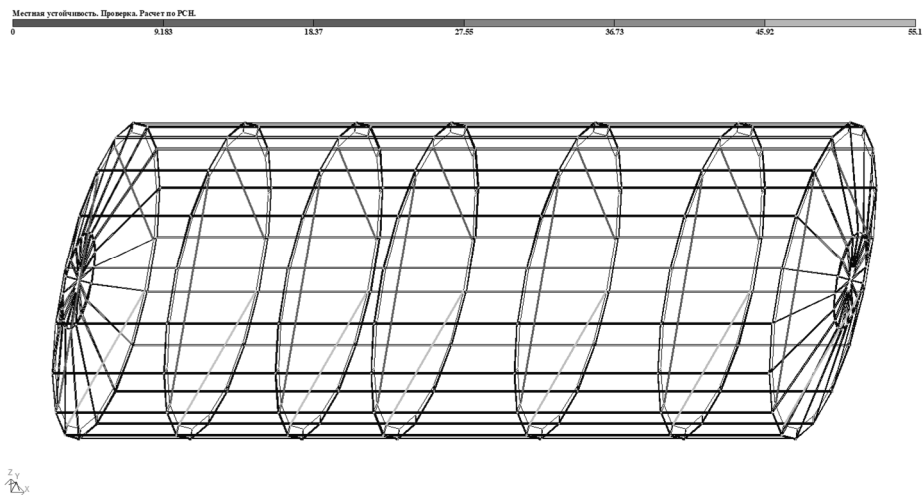


Рис. 14. Результати перевірки кілець жорсткості на місцеву стійкість

Виконаний порівняльний аналіз реальних деформацій двошарової оболонки циліндричного сталевго резервуару із чисельно-аналітичною моделлю у ПК «ЛІРА САПР» [23], який показує схожі місця утворення та розповсюдження дефектів і деформацій оболонки, рис. 15.

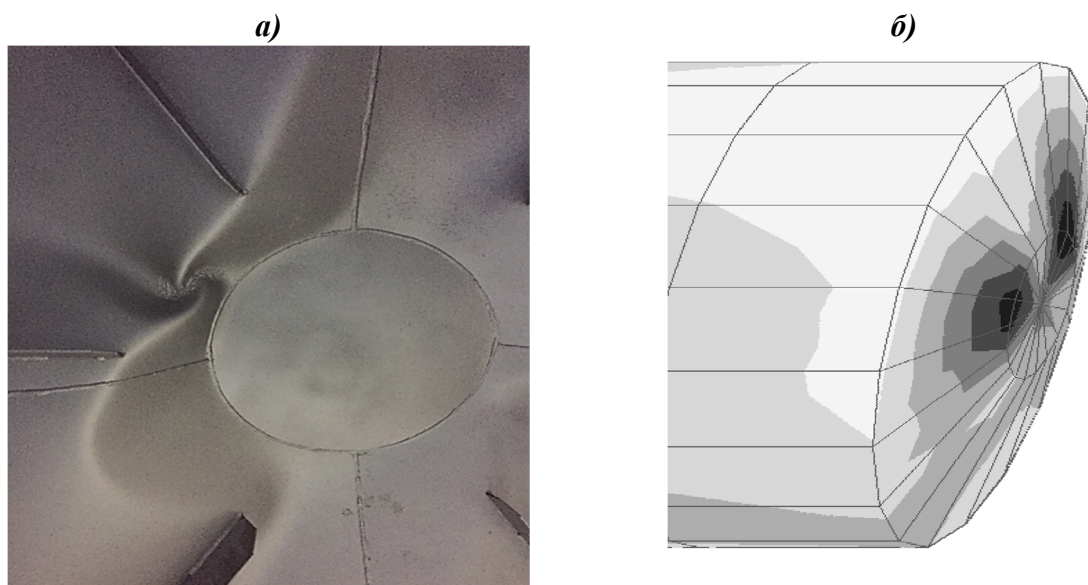


Рис. 15. Порівняльний аналіз реальних деформацій циліндричного резервуару (а) із чисельно-аналітичною моделлю (б)

Це підтверджує можливість застосування чисельних моделей будівель та інженерних споруд у складних, неординарних інженерних задачах і створює додаткові передумови до поліпшення існуючої нормативної бази у галузі будівництва.

Висновки. У роботі проведено аналіз напружено-деформованого стану типового резервуару об'ємом $75,0 \text{ м}^3$ з циліндричної двошарової оболонки. Визначені причини втрати місцевої стійкості оболонок та надані відповідні рекомендації.

Реальні деформації сталевго резервуару об'ємом $75,0 \text{ м}^3$ (рис. 15, а) та результати розрахунку чисельної моделі резервуару (рис. 15, б) мають схожий характер.

Резервуар може використовуватись із умов збільшення товщини зовнішньої обичайки до $10,0 \text{ мм}$ та усуненню виявлених дефектів.

Література

1. Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови : ДСТУ Б В.2.6-183:2011. [Чинний з 2012–10–01]. – К. : Мінгеріон України, 2012. – 99 с. – (Національний стандарт України).
2. Настанова. Резервуари сталеві горизонтальні для нафтопродуктів. Конструкції і розміри: ДСТУ-3Т Б В.2.6-103:2010. – [Чинний від 2010-03-03]. – (Національний стандарт України).
3. Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище $93,3 \text{ кПа}$: ВБН В.2.2-58.1-94. – [Чинні від 1994-04-01; Зміна №1 затверджена наказом Держнафтогазпрому України від 24. 12. 1999 № 136-а і введена в дію з 01 січня 2000 року]. – (Відомчі будівельні норми України).
4. Гордєєв В.М. Українська науково-технічна школа дослідження та проектування сталевих будівельних конструкцій / В.М. Гордєєв, А.В. Перельмутер, О.В. Шимановський; під заг. ред. д.т.н., проф. О. В. Шимановського. – К. : Сталь, 2022. – 444 с.
5. Пічугін С.Ф. Сучасні проблеми надійності в будівництві: навч. посібн. (теоретична частина курсу) / С.Ф. Пічугін. – Полтава: НУ ПП, 2023. – 254 с.

6. Семко О.В. Керування ризиками при проектуванні та експлуатації сталезалізобетонних конструкцій : монографія / О.В. Семко, О.П. Воскобійник. – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – 514 с.

7. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ : ДБН В.1.2-14:2018. – [Чинний від 2019-01-01]. – К.: УкрНДІпроектстальконструкція, 2018. – 60 с. – (Державні будівельні норми України).

8. Bakulin Y.A. Engineering protection and prepatation of territories : study guide; under the editorship of cand tech. science Ye.A. Bakulin / Ye.A. Bakulin, I.A. Yakovenko, V.M. Bakulina. – Kyiv : NULES of Ukraine, 2022. – 205 p.

9. Бакулін Є.А. Визначення параметрів напружено-деформованого стану споруди башти силосу та її конструктивних елементів за наслідками руйнування / Є.А. Бакулін, І.А. Яковенко, В.М. Бакуліна // Achievements of Ukraine and EU countries in technological innovations and invention : collective monograph. – Riga : Izdevnieciba “Baltija Publishing”, 2022. – Р. 1–43.

10. Бакулін Є.А. Наслідки руйнування та надання комплексної оцінки можливості подальшої експлуатації будівлі корівника у смт. Немішаєво / Є.А. Бакулін, І.А. Яковенко // Збірник тез доповідей ХХІ Міжнародної онлайн-конференції науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування конструювання та дизайн» (25–26 березня 2021 р.), – К. : НУБіП України, 2021. – С. 67–69.

11. Гілодо О. Ю. Металеві конструкції у питаннях та відповідях : навч. посіб. / О.Ю. Гілодо. – Одеса : Астропринт, 2019. – 120 с.

12. Бакулін Є.А. Критерії надійності та ризиків при оцінюванні технічного стану експлуатованих будівель / Є.А. Бакулін // Будівництво України. – 2013. – №1. – С. 2–4.

13. Колесніченко С.В. Визначення залишкового ресурсу будівельних сталевих конструкцій за показниками індексу надійності / С.В. Колесніченко, Ю.В. Селютін, Д.Ф. Оболонков, О.С. Карабанов // Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини : зб. наук. праць. – 2021. – Вип. № 25. – С. 48–55.

14. Макаренко В. Підвищення спротиву корозійно-механічному руйнуванню зварних оболонкових ємностей водонапірних башт / [Макаренко В., Білик С., Хомутецька Т. та ін.] // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2022. – Вип. 39. – С. 33–43.

15. Голышев А.Б. Сопротивление железобетонных конструкций, зданий и сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях: монография / А.Б. Голышев, Вл. И. Колчунов, И.А. Яковенко. – К. : «Талком», 2015. – 371 с.

16. Зоценко М.Л. Особливості проектування нафтових резервуарів у складних інженерно-геологічних умовах при сейсмічних впливах / М.Л. Зоценко, Ю.Л. Вінніков, М.О. Харченко, І.І. Ларцева // Academic journal. Series Industrial Machine Building. Civil Engineering. – 2017. – Т.1(48). – С. 175–182.

17. Emelyanov, S., Nemchinov, Y., Kolchunov, V., & Yakovenko, I. (2016). Details of large-panel buildings seismic analysis. Enfoque UTE, 7(2), pp. 120 – 134.

18. Kaliukh I., Kosheleva N., Yakovenko I., Dzhalalov M., Kotlyar M. and Bashkirov G. Monitoring and mathematical modelling of the pit construction impact on the subway tunnels during reconstruction of the Postal Square // 15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Nov 2021, Volume 2021, p.1 – 5.

19. Бакулін Є.А. Методи розрахунку підпірних стін / Є.А. Бакулін, В.М. Бакуліна, Н.О. Костира // Науковий Вісник НУБіП. Серія Техніка та Енергетика. – 2017. – Вип. 262. С. 72 – 87.

20. Бойко А.В. Конструирование и расчет цилиндрических резервуаров емкостью 5 тыс. м³ / А.В. Бойко. // Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини : зб. наук. праць. – 2015. – Вип. № 19. – С. 3–9.

21. Чичулін В.П. Проектування сталевих резервуарів для зберігання вуглеводнів / В.П. Чичулін, К.В. Чичуліна // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. –2019. – Т. 30 (69). – № 1, ч. 2. – С. 133–137.

22. Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови : СОУ МПП 71.120-217:2009. – [Чинний від 2009-09-01]. – К. : Мінпромполітики України, 2009. – 193 с. – (Стандарт Міністерства промислової політики України).

23. Барабаш М.С. Комп'ютерні технології проектування металевих конструкцій: навч. посіб. / М.С. Барабаш, С.В. Козлов, Д.В. Медведенко. – К. : НАУ, 2012. – 572 с.

References

- [1] *Rezervuary vertykalni tsylindrychni stalevi dlia nafty ta naftoproduktiv. Zahalni tekhnichni umovy*, DSTU B V.2.6-183:2011, Natsionalnyi standart Ukrainy, 2012.
- [2] *Nastanova. Rezervuary stalevi horyzontalni dlia naftoproduktiv. Konstruktsii i rozmyry*, DSTU-3T B V.2.6-103:2010, Natsionalnyi standart Ukrainy, 2010.
- [3] *Proektuvannia skladiv nafty i naftoproduktiv z tyskom nasychenykh pariv ne vyshche 93,3 kPa*, VBN V.2.2-58.1-94, Vidomchi budivelni normy Ukrainy, 1994.
- [4] V.M. Hordeiev, A.V. Perelmutter, O.V. Shymanovskyi, *Ukrainska naukovo-tekhnichna shkola doslidzhennia ta proektuvannia stalevykh budivelnykh konstruktsii*, prof. O.V. Shymanovskyi, Ed. Kyiv: Stal, 2022.
- [5] S.F. Pichuhin, *Suchasni problemy nadiinosti v budivnytstvi (teoretychna chastyna kursu)*. Poltava: NU PP, 2023.
- [6] O.V. Semko, O.P. Voskobiinyk, *Keruvannia ryzykamy pry proektuvanni ta ekspluatatsii stalezalizobetonnykh konstruktsii*. Poltava: PoltNTU, 2012.
- [7] *Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstruktsii ta osnov*, DBN V.1.2-14:2018, Derzhavni budivelni normy Ukrainy, 2018.
- [8] Ye.A. Bakulin, I.A. Yakovenko, V.M. Bakulina, *Engineering protection and prepatation of territories*, Ye.A. Bakulin, Ed. Kyiv : NULES of Ukraine, 2022.
- [9] Ye.A. Bakulin, I.A. Yakovenko, V.M. Bakulina, “*Vyznachennia parametriv napruzhenodeformovanoho stanu sporudy bashty sylosu ta yii konstruktyvnykh elementiv za naslidkamy ruinuvannia*”, in Achievements of Ukraine and EU countries in technological innovations and invention. Riga: Izdevnieciba “Baltija Publishing”, 2022. pp. 1–43. Available at:
- [10] Ye.A. Bakulin, I.A. Yakovenko, “*Naslidky ruinuvannia ta nadannia kompleksnoi otsinky mozhyvosti podalshoi ekspluatatsii budivli korivnyka u smt. Nemishaievo*” in *Proc. XXI In. Conf. Problems and Prospects of technical and bioenergy systems development for nature Environment: Construction and Design*, Kyiv, 2021, pp. 67–69.
- [11] O.Yu. Hilodo, *Metalevi konstruktsii u pytanniakh ta vidpovidiakh*. Odesa: Astroprynt, 2019.
- [12] Ye.A. Bakulin, “*Kryterii nadiinosti ta ryzykiv pry otsiniuvanni tekhnichnoho stanu ekspluatovanykh budivel*”, *Construction of Ukraine*, no 1, pp. 2–4, 2013.
- [13] S.V. Kolesnichenko, Yu.V. Seliutin, D.F. Obolonkov, O.S. Karabanov, “*Vyznachennia zalyshkovoho resursu budivelnykh stalevykh konstruktsii za pokaznykamy indeksu nadiinosti*”, *Modern structures of metal and wood*, iss. 25, pp. 48–55, 2021. Available at:
- [14] V. Makarenko, S. Bilyk, T. Khomutetska & oth., “*Pidvyshchennia sprotyvu koroziino-mekhanichnomu ruinuvanniu zvarnykh obolonkovykh yemnosteï vodonapirnykh basht*”, *Problems of water supply, drainage and hydraulics*, vol. 39, pp. 33–43, 2022.
- [15] A.B. Golyshev, Vl.I. Kolchunov, I.A. Yakovenko, *Soprotivleniye zhelezobetonnykh konstruktsiy, zdaniy i sooruzheniy, vozvodimyykh v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh*. Kyiv: Talkom, 2015.
- [16] M.L. Zotsenko, Yu.L. Vinnikov, M.O. Kharchenko, I.I. Lartseva, “*Osoblyvosti proektuvannia naftovykh rezervuariv u skladnykh inzhenerno-heolohichnykh umovakh pry seismichnykh vplyvakh*”, *Academic journal. Series Industrial Machine Building. Civil Engineering*, vol. 1, iss. 48, pp.175–182, 2017.

- [17] S. Emelyanov, Y. Nemchinov, V. Kolchunov, I. Yakovenko, “Details of large-panel buildings seismic analysis”, *Enfoque UTE*, vol. 7(2), pp. 120 – 134, 2016.
- [18] I. Kaliukh, N. Kosheleva, I. Yakovenko, M. Dzhalalov, M. Kotlyar & G. Bashkirov, “Monitoring and mathematical modelling of the pit construction impact on the subway tunnels during reconstruction of the Postal Square”, in *Proc. 15th Int. Conf. Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Kyiv, 2021, pp. 1–5.
- [19] Ye.A. Bakulin, V.M. Bakulina, N.O. Kostyra “Metody rozrakhunku pidpirnykh stin”, *Scientific Bulletin of NULeS of Ukraine. Machinery & Energetics Series*, vol. 262, pp. 72 – 87, 2017.
- [20] A.V. Boyko, “Konstruirovaniye i raschet tsilindricheskikh rezervuarov emkostyu 5 tys. m³”, *Modern structures of metal and wood*, iss. 19, pp. 3–9, 2015.
- [21] V.P. Chychulin, K.V. Chychulina, “Proektuvannia stalevykh rezervuariv dlia zberihannia vuhlevodniv”, *Academic notes of the Tavri National University named by V.I. Vernadskyi. Series: Technical Sciences*, vol. 30, iss. 69, no 1, p. 2, pp. 133–137, 2019.
- [22] *Posudyny ta aparaty stalevi zvarni. Zahalni tekhnichni umovy*, SOU MPP 71.120-217:2009, Standart Ministerstva promyslovoi polityky Ukrainy, 2009.
- [23] M.S. Barabash, S.V. Kozlov, D.V. Medvedenko, *Kompiuterni tekhnolohii proektuvannia metalevykh konstruksii*. Kyiv: NAU, 2012.

NUMERICAL MODELLING OF STEEL STRENGTHENING UNDERGROUND CYLINDRICAL TANK

Bakulin Ye.A., Ph.D., Associate Professor,
bakulin959@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0238-5384

Usenko M.V., Ph.D., Senior Teacher
usenkonick201084@gmail.com, ORCID: 0009-0001-1969-1265

Bakulina V.M., Senior Teacher
bakulina88@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0849-9697

Abstract. Quite often, underground tanks designed to store liquid materials lose their operational suitability in a short period of operation in real conditions. The largest number of defects is associated with the loss of tank shell local resistance. It was carried out the stress-strain state analysis for a typical tank with a volume of 75.0 m³ made of a cylindrical two-layer shell. There are determined the reasons for the local stability loss of the shells and the corresponding recommendations are given.

The purpose of the paper is to determine the tank's stress-deformation state to identify the causes of deformations of the casing and to provide appropriate recommendations for its strengthening. It works in real operating conditions by the actual loading.

The main load on the underground tank is the external pressure of the soil. The calculation of the tank is performed as for a horizontal cylindrical shell with elliptical sidewalls under the action of external pressure.

The main results. It is considered following calculation case: the tank without product must withstand the soil pressure. Analytical formulas are given for the case of external pressure, which is constant both along the length and around the circumference of the shell.

The natural pressure curve of the soil varies from 2.25 tf/m³ at the mark -1.50 m from the surface of the earth to 9.72 tf/m³ at the level of the foundation of the tank. The numerical calculations results of the underground tank made it possible to obtain: the isofields of movements along the vertical axis; the deformed scheme of the structure; the form of the loss of stability of the tank wall; the longitudinal forces of "tension-compression" in the core elements of the strengthened rings; the isofields of the main and equivalent tensile stresses in the plates of the tank lining.

The obtained results of the verification of the rigidity rings according to the ultimate and serviceability limit states in accordance with the current building regulations using the calculated combination of loads in PC "LIRA FEM". It was verified their capacity for local stability.

It was performed the comparative real deformations analysis for two-layer shell of cylindrical steel tank with a numerical analytical model in PC "LIRA FEM". It shows similar places of formation and distribution of defects and deformations for shell.

Conclusions. The paper analyzes the typical tank stress-strain state with a volume of 75.0 m^3 , which is made of cylindrical two-layer shell. There are determined the reasons for local stability loss for the shells. The corresponding recommendations are given.

The real deformations of steel tank with a volume of 75.0 m^3 and the calculation results of the tank's numerical model have a similar character.

The tank can be used under the conditions of increasing the thickness of the outer layer to 10.0 mm and removing the detected defects.

Key words: underground tank, cylindrical two-layer shell, numerical modelling, stress-strain state, defects, stability, operation, strengthening.