

*В статті досліджено залежність точності визначення напружено-деформованого стану стінки резервуара від похибки вимірювання координат точок її поверхні. Для цього обчислено методичну похибку методу визначення напружень та похибку системи вимірювання координат точок. Наведено залежність похибки вимірювання координат від кількості опор, з яких проводиться вимірювання, та радіуса резервуара. Вказано шляхи підвищення точності вимірювання координат*

*Ключові слова: вертикальний сталевий циліндричний резервуар, похибка вимірювання, напружено-деформований стан, координати*

*В статье исследована зависимость точности определения напряженно-деформированного состояния стенки резервуара от погрешности измерения координат точек ее поверхности. Для этого вычислена методическая погрешность метода определения напряжений и погрешность системы измерений координат точек. Приведена зависимость погрешности измерения координат от количества опор, из которых производится измерение, и радиуса резервуара. Указаны пути повышения точности измерений координат*

*Ключевые слова: вертикальный стальной цилиндрический резервуар, погрешность измерения, напряженно-деформированное состояние, координаты*

УДК 622.692.4

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.37796

# ВПЛИВ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ПЕРЕМІЩЕНЬ СТІНКИ РЕЗЕРВУАРА НА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ВНУТРІШНІХ НАПРУЖЕНЬ

**Х. В. Паньків**

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра комп'ютерних технологій в системах  
управління і автоматики Івано-Франківський  
національний технічний  
університет нафти і газу  
вул. Карпатська, 15,  
м. Івано-Франківськ, Україна, 76019  
E-mail: khpankiv@gmail.com

## 1. Вступ

Визначення залишкового ресурсу вертикальних сталевих циліндричних резервуарів (РВС) є актуальною науково-технічною задачею, яку значно ускладнює складний навантажений режим їх роботи, що зумовлює необхідність контролю їх напружено-деформованого стану (НДС), зокрема розподіл напружень в стінці резервуара. Існуючі експериментальні методи визначення НДС вимагають прямого контакту з поверхнею резервуара, володіють низькою оперативністю та є складними в застосуванні для таких великогабаритних об'єктів, якими є РВС, і на практиці використовуються тільки для уточнення напружень на певній ділянці резервуара. Існуючі математичні методи вимагають врахування інформації про всі сили та навантаження, які діють на резервуар, що в більшості випадків є можливим лише з великим наближенням, тому вірогідність контролю цими методами є низькою.

В роботі [1] автором запропоновано методику оцінки зміни НДС стінки РВС за переміщеннями точок її поверхні без визначення всіх сил та навантажень, що діють на нього.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Розроблена автором система оцінки зміни НДС вимагає визначення координат точок поверхні стінки РВС в два моменти часу в циліндричній системі ко-

ординат з початком в центрі резервуара. З цією метою можна використовувати існуючі дані геометричного калібрування РВС згідно ДСТУ 4147-2003. Проте дана процедура є дуже трудомісткою, тому ці дані доцільно використовувати для визначення координат точок поверхні в початковий момент часу. Існуючі лазерні скануючі системи [2] є простими в експлуатації і високоточними, проте їх вартість є високою, що перешкоджає їх широкому застосуванню в Україні. Розроблена в [3] система не вимагає відбиваючих маркерів, проте вона є ручною і трудомісткою в застосуванні до таких крупногабаритних об'єктів, якими є РВС. В [4] розроблена система, яка складається з синхронізованих проектора та CCD камери, що будують 3D модель сканованого об'єкта. Проте, вона не визначає координат точок поверхні об'єкта та потребує спеціальних умов розміщення об'єкта. Також низька роздільна здатність CCD камери (близько 500 точок на кадр) не забезпечує необхідну точність. В роботі [5] розглянуто робота, який рухається по досліджуваній поверхні та сканує її за допомогою вбудованого лазера, що ускладнює його застосування для вимірювання РВС через вертикальність стінки резервуара та наявність додаткового обладнання.

Тому для оперативного визначення координат стінки резервуара розроблено систему [6], що проектує скануючу лінію лазера на стінку резервуара і фотографує її твірну. Оскільки розроблена методика оцінки зміни НДС стінки РВС [1] використовує координати точок поверхні стінки, то похибка вимірю-

вання координат буде суттєво впливати на точність визначення НДС.

### 3. Мета і задачі дослідження

Оскільки в запропонованому методі [1] визначення НДС матеріалу стінки РВС за переміщеннями точок її поверхні компоненти тензора зміни напружень знаходяться з використанням закону Гука для пружнодеформованого ізотропного тіла, то для оцінки похибки розробленого методу доцільно скористатися цим законом. Модуль Юнга для сталі становить 210000 МПа, що зумовлює значну похибку визначення напружень при невеликій похибці вимірювання координат.

Метою роботи є визначення достатньої похибки вимірювання координат точок поверхні стінки РВС за допомогою розробленої системи [6] для забезпечення необхідного рівня точності визначення НДС.

Для досягнення мети поставлено та вирішено наступні задачі:

- визначення методичної похибки розробленого методу оцінки НДС;
- визначення похибки вимірювання координат за допомогою розробленої системи;
- оцінювання кількості опор, з яких необхідно проводити вимірювання.

### 4. Методична похибка визначення НДС матеріалу стінки РВС за переміщеннями точок її поверхні

Згідно [7], якщо вимірювання координат стінки РВС  $\Delta r$  проводиться з похибкою 1 мм, а радіус резервуара становить 5 м (периметр  $P$  близько 31 м), то за законом Гука похибка обчислення напружень становить:

$$\Delta \sigma = E \frac{\Delta r}{P} \approx 7 \text{ МПа.} \quad (1)$$

Згідно ДБН В.2.6-163 2010 різниця між межею текучості сталі та гранично допустимими значеннями напружень становить:

$$(\gamma_m - \gamma_c) / \gamma_c, \quad (2)$$

де  $\gamma_c$  та  $\gamma_m$  – коефіцієнти умов роботи та надійності за матеріалом рівні 0,8 та 1,025 відповідно.

Тому, як допустиму похибку вимірювання напружень можна прийняти 29 %. Мінімальна гарантована границя текучості для сталей, які використовуються для спорудження РВС, становить 245 МПа (для сталі СтЗпс5), що з врахуванням коефіцієнтів умов роботи та надійності за матеріалом рівна 190 МПа. Тобто, для забезпечення похибки обчислення зміни напружень 29 % (55 МПа) точність вимірювання координат точок поверхні стінки повинна складати 7,8 мм. Слід звернути увагу, що при більшому радіусі резервуара похибка обчислення напружень буде меншою, або з збереженням рівня похибки визначення напружень можна проводити вимірювання координат точок поверхні стінки з меншою точністю, оскільки при збільшенні радіуса

стінки РВС точність вимірювання координат точок поверхні зменшується.

Похибка від непопадання в ту саму точку при вимірюванні координат в перший та другий момент часу компенсується тим, що розроблений метод та система визначення зміни НДС матеріалу стінки РВС використовує дані про переміщення всієї поверхні стінки, яка отримується з використанням інтерполяційних та апроксимаційних процедур.

Методична похибка розробленої системи контролю зміни НДС матеріалу стінок РВС складається з похибок від неврахування температурного впливу та анізотропії на зміну НДС.

В розробленій математичній моделі, врахування температурної складової носить виключно інтегральний характер. Температурні напруження обчислюються за формулою [8]:

$$\sigma_T = (3\lambda + 2\mu)\alpha\Delta T, \quad (3)$$

де  $\alpha$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу (рівний для сталі СтЗ  $11,9 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ );  $\Delta T$  – зміна температури.

Тоді, при зміні температури під час проведення вимірювань на  $3^\circ\text{C}$  температурні напруження становлять 12 МПа.

Різниця температури навколишнього середовища в два моменти вимірювання може сягати  $40^\circ\text{C}$  (одне вимірювання проводиться взимку, а інше влітку). Для врахування її впливу на контроль зміни НДС матеріалу стінки РВС використовується формула (1).

Коефіцієнт анізотропії для сталі становить 0,9. Тому максимальна методична похибка від неврахування анізотропії матеріалу становить для сталі СтЗ 19 МПа.

Отже, максимальна методична похибка розробленої системи контролю зміни НДС матеріалу стінок РВС за переміщеннями точок їх поверхні для сталі СтЗ становить 31 МПа.

### 5. Похибка визначення координат точок поверхні стінки РВС за допомогою розробленої системи

Узагальнена схема накопичення похибки розробленої в [6] системи визначення координат точок поверхні стінки РВС наведена на рис. 1. Сумарна похибка вимірювання координат точок поверхні стінки резервуара складається з похибок вимірювання координати опорної точки  $\Delta R$  та похибки вимірювання координат точок твірної по фотографії відносно координат опорної точки  $\Delta R_K$ .

Похибка вимірювання координати опорної точки  $\Delta R_M$  складається з наступних складових похибок:

– вимірювання відстані  $\Delta D$ , яка складається з похибок вимірювання відстані лазерним далекоміром  $\Delta d$ , нерівномірностей встановлення приладу  $\Delta X$  і  $\Delta Y$  та встановлення всіх опор на одному рівні  $\Delta h$ ;

– вимірювання кута  $\Delta \Phi$ , яка складається з похибок вимірювання кута кутівим позиціонером  $\Delta \varphi$  та нерівномірності встановлення приладу по азимуту  $\Delta X$ .

Похибка вимірювання координат точок твірної по фотографії відносно координат опорної точки  $\Delta R_K$  складається з похибок вимірювання відстані  $\Delta D$ , ви-

мірювання кута  $\Delta\Phi$ , похибки нерівномірностей встановлення приладу по висоті схилу  $\Delta Y$ , та методичних похибок: масштабу фотографії  $\Delta M$  та похибки  $\Delta v$ , зумовленої вимірюванням під кутом  $\beta$  до напрямку дефекта форми стінки (рис. 2).

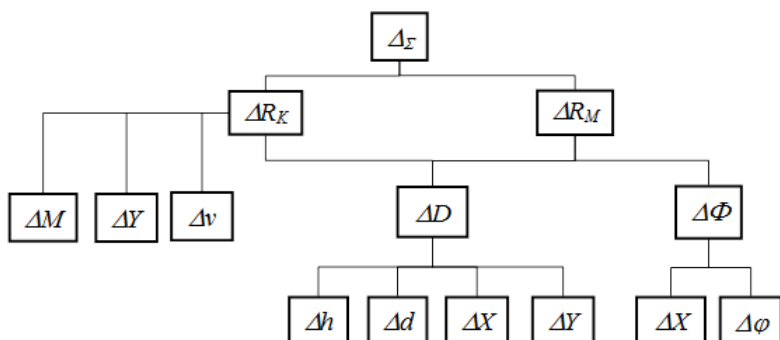


Рис. 1. Схема накопичення похибки системи визначення координат точок поверхні стінки РВС

Максимальна абсолютна похибка вимірювання кута при використанні у приладі прецизійного диску з 18000 поділками шкали по периметру становитиме  $\Delta\phi = 360^\circ / 18000 = 0,02^\circ$ . При куті вимірювання  $30^\circ$  відносна похибка дорівнює 0,0667 %.

Закон розподілу такої похибки з достатнім ступенем вірогідності можна вважати нормальним [9]. Отже, сеньоквадратичне відхилення (СКВ) даної похибки таке:

$$\sigma_\phi = \frac{\gamma_\phi}{k_n} = \frac{0,000667}{2,066} = 0,000322. \tag{4}$$

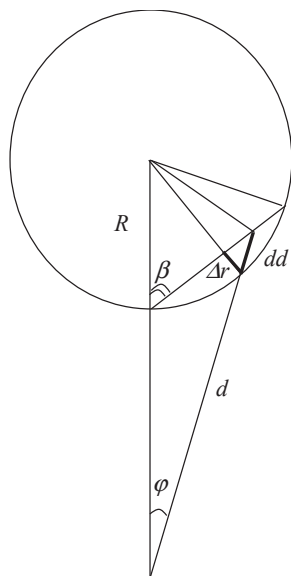


Рис. 2. Схема визначення похибки вимірювання координати опорної точки на стінці з дефектом, промодельованим прямою

При максимальних похибках нерівномірностей встановлення приладу  $\Delta X$  і  $\Delta Y$  рівних 0,01 %, їх СКВ рівне:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\gamma_x}{k_n} = \frac{0,0001}{2,066} = 0,000048. \tag{5}$$

Тоді СКВ випадкової відносної похибки вимірювання кута визначається за формулою:

$$\sigma_\phi = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = 0,000326. \tag{6}$$

Максимальна абсолютна похибка лазерного далекоміра становить 1,5 мм при робочому діапазоні 50 м [10]. Тоді при радіусі резервуара 5 м при вимірюванні з трьох опор максимальна відстань до твірної становить  $5 \cot(30^\circ) = 8,66$  м. Тоді відносна похибка дорівнює 3,46 %.

Закон розподілу такої похибки також нормальний, отже, СКВ даної похибки рівне:

$$\sigma_d = \frac{\gamma_d}{k_n} = \frac{0,0346}{2,066} = 0,000084. \tag{7}$$

Похибка встановлення опор на одному рівні для нівеліра I класу точності рівна 0,1 мм. При встановленні позиціонера на висоті 1 м приведена похибка становить 0,01 %, а СКВ рівне:

$$\sigma_h = \frac{\gamma_h}{k_n} = \frac{0,0001}{2,066} = 0,000048. \tag{8}$$

Тоді СКВ випадкової приведенної похибки вимірювання відстані визначається за формулою:

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_h^2} = 0,000119. \tag{9}$$

Оскільки похибки вимірювання кута і відстані є слабокорельованими між собою, то СКВ випадкової приведенної похибки вимірювання координати опорної точки визначається як похибка непрямих вимірювань [11] і для трьох опор визначається за формулою:

$$\sigma_{RM} = \sqrt{\left[ \left( \frac{\partial \Delta r_k^j}{\partial d_j} \right)^2 \sigma_D^2 + \left[ \left( \frac{\partial \Delta r_k^j}{\partial \phi_j} \right)^2 \sigma_\phi^2 \right]}, \tag{10}$$

Тоді, при радіусі РВС 5 м, при вимірюванні з трьох опор максимальне СКВ похибки вимірювання координати опорної точки рівне 0,002826.

До методичних похибок визначення координат точок твірної відносної опорної точки доцільно віднести похибку дискретизації цифрового фотоапарата  $\Delta M$  та похибку  $\Delta v$ , зумовлену вимірюванням під кутом  $\beta$  до напрямку дефекта форми стінки.

Похибка дискретизації цифрового фотоапарата  $\Delta M$  залежить від мінімального масштабу матриці та фокусної відстані фотоапарата, зокрема, для фотоапарата Nikon D5200 вона становить 0,33 мм/піксель при відстані до об'єкта 1 м. Максимальний розмір об'єкта, який можна сфотографувати на відстані 1 м становить  $w_m f = 2$  м, тоді відносна похибка рівна 0,0163 %. Ця по-

хибка розподілена за рівномірним законом розподілу. Тоді її СКВ рівне:

$$\sigma_M = \frac{\gamma_M}{k_r} = \frac{0,000163}{1,73} = 0,000094. \quad (11)$$

Для визначення похибки, зумовленої тим, що вимірювання проводяться не по нормалі стінки РВС, розглянуто вплив дефекта форми поверхні стінки, який промодельовано прямою, що сполучає кінці дефекта (випуклості чи вм'ятини), і направлена під кутом  $\beta$  до нормалі стінки РВС (рис. 2). Тоді абсолютна похибка вимірювання відхилень координати точки твірної від координати опорної точки визначається за формулою:

$$dv = dd - \Delta r = \frac{\Delta r}{\sin(\beta - \phi)} - \Delta r, \quad (12)$$

де  $dd$ ,  $\Delta r$ ,  $\beta$ ,  $\phi$  — показані на рис 2.

Відносна похибка розподілена за нормальним законом розподілу, а її СКВ визначається за формулою:

$$\sigma_v = \frac{\gamma_v}{k_n} = \frac{1}{2,066 \cdot r} \left( \frac{\Delta r}{\sin(\beta - \phi)} - \Delta r \right). \quad (13)$$

де  $r$  — координата опорної точки сфотографованої твірної.

Максимальна допустима висота вм'ятини  $\Delta r$  згідно Правил технічної експлуатації резервуарів становить 45 мм. Якщо дефект зорієнтований перпендикулярно до нормалі стінки РВС, а вимірювання проводиться під кутом  $20^\circ$ , то при радіусі резервуара 5 м  $\sigma_v = 0,00028$ .

Похибка визначення координат точок твірної відносно опорної точки за фотографією визначається як похибка непрямих вимірювань без врахування кореляції. Її СКВ визначається за формулою:

$$\sigma_{RK} = \sqrt{\sigma_v^2 + \sigma_Y^2 + \left( \frac{\partial \Delta r_k^j}{\partial d_j} \right)^2 \sigma_D^2 + \left( \frac{\partial \Delta r_k^j}{\partial \phi_j} \right)^2 \sigma_\phi^2 + \left( \frac{\partial \Delta r_k^j}{\partial Mas} \right)^2 \sigma_M^2}. \quad (14)$$

Якщо відхилення точки твірної від опорної точки становить 17 пікселів на відстані 8,66 м під кутом  $20^\circ$  (близько 45 мм) при довжині кронштейну 1 м, то СКВ відносної похибки вимірювання координат точок твірної відносно опорної точки рівне  $\sigma_{RK} = 0,000292$ .

Тоді сумарна відносна похибка вимірювання координат точок визначається за формулою:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_{RK}^2 + \sigma_{RM}^2}. \quad (15)$$

Для умов, наведених вище для радіуса РВС 5 м і вимірюванні з трьох опор СКВ відносної похибки рівне  $\sigma_\Sigma = 0,002841$ . Ентропійне значення зведеної сумарної приведенної похибки системи обчислюється за формулою:

$$\gamma = k_n \cdot \sigma_\Sigma = 0,002841 \cdot 2,066 = 0,005869. \quad (16)$$

Таким чином, ентропійне значення зведеної сумарної приведенної похибки системи становить 0,59 %.

## 6. Оцінювання кількості опор, з яких необхідно проводити вимірювання, для забезпечення необхідної точності

Для оцінювання залежності кількості опор  $n$ , з яких проводиться вимірювання для забезпечення необхідного рівня точності, від радіуса резервуара  $R$  приймається, що резервуар є колом, вписаним в фігуру, утворену прямими між опорами. Тоді:

$$d = R \cdot \text{ctg}(\phi), \quad (17)$$

$$\phi = 90 - \frac{180}{n}.$$

Графік залежності похибки вимірювання від радіуса резервуара та кількості опор вимірювання (рис. 3) враховує похибку при переведенні координат в перше положення опори.

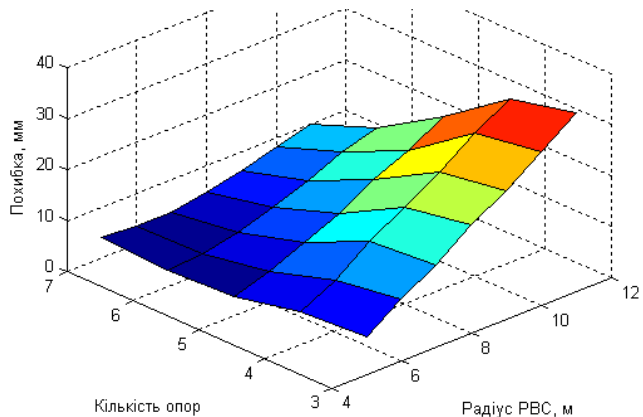


Рис. 3. Залежність похибки вимірювання координати  $r$  від радіуса РВС та кількості опор

Як видно з рис. 3, чим більший радіус резервуара, тим з більшою кількістю опор проводиться фотографування для забезпечення необхідного рівня точності. Для резервуара радіусом 5 м при проведенні вимірювань з 7 опор похибка вимірювання радіальної координати становить 0,098 %, тобто 4,9 мм, що є достатнім рівнем точності вимірювання координат точок поверхні для забезпечення необхідного рівня точності обчислення зміни НДС за розробленою методикою.

## 7. Висновки

Таким чином в статті обчислено похибку вимірювання координат точок поверхні стінки РВС з використанням розробленої системи та показано вплив цієї похибки на точність оцінки НДС матеріалу стінки РВС. Показано шляхи зменшення похибки, а саме: збільшення кількості поділок прецизійного диску кутового позиціонера та використання фотоапарата з більшою роздільною здатністю. Приведено залежність похибки вимірювання від радіуса резервуара та кількості опор вимірювання.

Зменшення впливу похибки вимірювання координат точок поверхні стінки РВС на точність обчислення зміни НДС її матеріалу забезпечується використанням згладжуючих сплайнів.

За результатами досліджень можна зробити висновки про те, що розроблена система вимірювання координат точок поверхні стінки РВС забезпечують достатній рівень точності для використання їх з метою оцінки зміни НДС матеріалу стінки РВС.

---

#### Література

1. Паньків, Х. В. Контроль зміни напружено-деформованого стану стінок вертикальних сталевих циліндричних резервуарів [Текст] / Х. В. Паньків // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – Т. 2, № 7 (262). – С. 50–52. – Режим доступу: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/12388/10276>
2. Brown, D. C. When Stringless Paving Carries the Day. Improved accuracy and savings of labor and materials leads this contractor to stringless concrete paving [Electronic Resources] / D. C. Brown // Grading & Excavation Contractor – September/October 2011. pp. 50-51. – Available at: <https://portal.leica.com/enewsletters/enews6.7/GX-Stringless%20Paving.pdf>
3. Zhang, S. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement [Text] / S. Zhang, D. Van Der Weide, J. Oliver // Optics Express – 2010. – Vol. 18, Issue 9. – P. 9684–9689. doi: 10.1364/OE.18.009684
4. Kofman, J. Hand-held 3D scanner for surface-shape measurement without sensor pose tracking or surface markers [Text] / J. Kofman, K. Borribanbunpotkat // Virtual and Physical Prototyping. – 2014. – Vol. 9, Issue 2. – P. 81–95. doi: 10.1080/17452759.2014.893807
5. Larsson, S. Motion control and data capturing for laser scanning with an industrial robot [Text] / S. Larsson, J. A. P. Kjellander // Robotics and Autonomous Systems – 2006. – Vol. 54, Issue 6. – P. 453–460. doi: 10.1016/j.robot.2006.02.002
6. Паньків, Х. В. Система для безконтактного вимірювання координат точок поверхні стінки вертикальних сталевих циліндричних резервуарів [Текст] / Х. В. Паньків // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2014. – № 2 (51). – С. 179–186.
7. Олійник, А. П. Математичні моделі процесу квазістаціонарного деформування трубопровідних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації : наукове видання [Текст] / А. П. Олійник. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. – 320 с.
8. Седов, Л. И. Механика сплошных сред : учеб. пособие : в 2 т. [Текст] / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1984. – 560 с.
9. Fuller, W. A. Measurement Error Models [Text] / W. A. Fuller. – John Wiley & Sons, USA, 2005. – 464 p.
10. Лазерный дальномер DLE 50 Professional [Електронний ресурс] /ООО «Роберт Бош». – Москва, 2003. – Режим доступа: <http://www.bosch-pt.com/productspecials/professional/dle50/ru/ru/start/index.htm>
11. Carroll, R. J. Measurement Error in Nonlinear Models: A Modern Perspective, Second Edition [Text] / R. J. Carroll, D. Ruppert, L. A. Stefanski, C. M. Crainiceanu. – CRC Press, USA, 2006. – 488 p. doi: 10.1201/9781420010138