

В.М. Ковтун, асистент кафедри геодезії та землеустрою
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДХИЛЕНЬ ВІД ВЕРТИКАЛЬНОСТІ СТІНОК РЕЗЕРВУАРІВ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЬНИХ

У роботі висвітлено опрацювання геодезичних інструментальних спостережень в складі технічного огляду резервуарів вертикальних сталей для визначення їх геометричних параметрів. Представлено алгоритм розрахунку центра резервуара вертикального сталю на підставі даних інструментальних спостережень, виконаних на реальному об'єкті. Розроблений алгоритм дає можливість визначити центр кола, що описує споруду чи об'єкт округлої форми, використовуючи просторові координати цього об'єкта, зокрема, за відсутності даних про весь периметр об'єкта. Розраховано відхилення від вертикальності стінок резервуара вертикального сталю шляхом визначення радіальних зміщень. Виконано розрахунок крену резервуара шляхом визначення напрямного вектора апроксимуючої прямої, яка описує вісь резервуара, це дало змогу отримати виправлені значення радіальних зміщень. Виконано аналіз точності знаходження цієї апроксимуючої прямої.

Ключові слова: РВС, резервуар вертикальний сталю, геометричні параметри, технічний огляд, експертне обстеження, центр кола, крен.

Вступ. Проблема надійності і працездатності обладнання і споруд об'єктів магістральних нафтопроводів і нафтопродуктопроводів є дуже важливою в галузі транспортування і зберігання нафти і нафтопродуктів. Що більше надійного обладнання і менше його відмов, то рідше простої у роботі транспорту нафти і нафтопродуктів, аварій з розливом палива та інших шкідливих для підприємства і навколишнього середовища наслідків. Металеві резервуари вертикальні сталі (РВС) належать до відповідальних зварних конструкцій, що працюють у важких експлуатаційних умовах. Наявність у резервуарах жорстких зварних з'єднань і зниження пластичних властивостей металу за від'ємних температур викликає значні внутрішні напруження і створює умови, що унеможливають їх перерозподіл. Ці та ряд інших причин (нерівномірні опади, корозія) знижують експлуатаційну надійність резервуара, іноді призводять до його руйнування. Періодичне обстеження і комплексна дефектоскопія дають можливість своєчасно виявляти дефекти, які були допущені під час виготовлення, спорудження резервуарів, а також виникли в процесі експлуатації. Для підвищення надійності резервуарів і продовження терміну працездатності зі збереженням рівня наливу нафти потрібно своєчасно відповідно до нормативних документів виконувати технічний огляд (експертне обстеження) технічного стану всіх конструктивних елементів резервуарів й усувати виявлені дефекти.

Аналіз дослідження і публікацій. Велику роль в розвиток методики спостереження за геометричними параметрами резервуарів вертикальних сталей внесли О.М. Самойленко, Х.В. Паньків, І.П. Бородай, П.І. Баран,

Т. Шевченко, О. Мороз, В. Гарнавський, А.Г. Чибунічев, Е.К. Честкин, А.А. Бешр Ашраф, А.В. Иванов, А.А. Тарасенко, П.В. Чепур, С.В. Чирков та інші.

Сучасні методи вимірювання за допомогою електронних Total Position Station (TPS), лазерного сканування досліджено в роботах професора О.М. Самойленка [9]. Ці методи дають змогу одержати більш об'єктивну і точну інформацію про геометрію споруди.

Використання електронних приладів, таких як електронні тахеометри чи нівеліри, наземні лазерні сканери [10; 11], суттєво зменшують затрати часу та на порядок підвищують точність вимірів.

Одним з найважливіших завдань, яке вирішують під час геодезичного контролю РВС, є визначення відхилень від вертикальності стінок резервуара [1; 3-5]. Основними геодезичними приладами, які можуть використовуватись для розв'язання поставленої проблеми, є електронні тахеометри [12; 13], наземні лазерні сканери та трикоординатні вимірювальні системи, трекери та мультистанції [14]. У деяких випадках можуть бути застосовані теодоліти, наприклад, автоколімаційні (автоколімаційні тахеометри не випускають) [2].

Постановка завдання. Резервуари, що знаходяться в експлуатації, підлягають технічному діагностуванню (експертному обстеженню) як об'єкти підвищеної небезпеки [8]. Згідно з нормативним документом [6] експертне обстеження (технічне діагностування) охоплює, окрім дефектоскопії, також інструментальні геодезичні обміри, такі як нівелювання дна та кришки даху резервуара, визначення відхилення від вертикалі його стінок.

Тому постає питання визначення геометричних параметрів резервуара, а саме відхилення від вертикальності його стінок, на підставі даних, отриманих з інструментальних геодезичних спостережень за допомогою сучасних приладів.

Основна частина. Згідно з нормативними вимогами [6; 8] резервуари повинні проходити повне обстеження не рідше, аніж через 10 років за терміну експлуатації резервуара до 20 років і кожні вісім років під час експлуатації понад 20 років. Тому в грудні 2014 року був виведений з експлуатації наземний вертикальний циліндричний сталевий зварний резервуар номінальною місткістю 75 000 м³ з плаваючим дахом та подвійною стінкою підприємства ЛВДС «Броди» для повного планового обстеження.

Була використана методика визначення відхилень стінок резервуара від вертикалі, основана на координатних вимірах кожного шва. Залежно від ситуації навколо резервуара обирали схему геодезичної мережі у вигляді замкнутого три-, чотири-, шести- або навіть восьмикутника (рис. 1, *а*). Найкоротша віддаль від точок геодезичної мережі до твірної резервуара була в межах від однієї до чотирьох висот резервуара. Важливо, щоби сторони геодезичної мережі були приблизно однакової довжини, а віддалі від точок геодезичної мережі до стінки резервуара – майже однаковими. Беручи до уваги дослідження фахівців [12] та [13], з однієї станції електронним тахеометром безвідбитковим способом виконано виміри лише чотирьох швів (рис. 1, *б*) для того, щоби уникнути ймовірного ковзання променя чи втрати точності через його розсіювання. Таким чином були отримані координати стінки резервуара вздовж вертикалі, проведеної з нижньої точки першого пояса [6] на рівні кожного пояса резервуара.

Вимірювання виконано в одній умовній системі координат через брак планових координат реперів поблизу резервуара шляхом прокладання замкнутого тахеометричного ходу. За допомогою визначених координат станцій цього ходу були розраховані його лінійно-кутові значення, що дало нам змогу його урівняти. За результатами зрівнювання прокладений нами хід був вимірний з відносною точністю 1/78288.

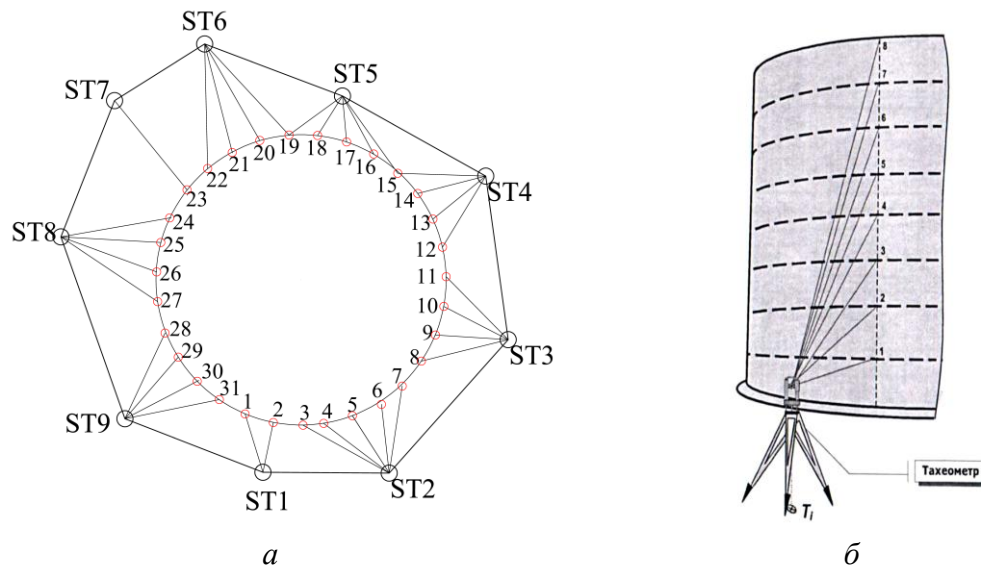


Рис. 1. Визначення відхилень стінок резервуара:
 а – тахеометричний хід, прокладений навколо резервуара;
 б –приклад вимірювання координат кожного шва

Кількість горизонтальних і вертикальних перетинів на циліндричній частині резервуара вибрано відповідно до нормативного документа [2]. За допомогою рулетки на висоті 0,75Н першого пояса були розмічені крейдою вертикальні січення та підписані їх номери. Після інструментальних спостережень отримано координати X, Y, H 278 точок в одній умовній системі координат.

Згідно з нормативними документами [6; 8] одним із завдань геодезичного контролю за геометричними параметрами резервуарів вертикальних сталевих є визначення відхилень від вертикальності стінок резервуара. Самі відхилення являють собою радіальні зміщення точок на кожному поясі резервуара відносно нульового (початкового пояса). Тому постає проблема визначення центра кола, який формує поверхню резервуара, і радіусів кожної точки, для якої й знаходять відхилення.

Пропонується для визначення координат центра кола, що формують точки нульового пояса, застосовувати метод найменших квадратів [7]:

$$[pv^2] = \min. \tag{1}$$

Усі виміри резервуара були прийняті рівноточними, тобто $p=1$:

$$[v^2] = \min. \tag{2}$$

Для розв’язання поставленої задачі використовували параметричний спосіб, оскільки функція кола є відомою (3):

$$R = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}. \tag{3}$$

Перш за все потрібно розрахувати початкові значення координат центра ($X0^i$, $Y0^i$) та радіуса кола ($R0^i$). Для цього пропонується взяти середньоарифметичне значення, а саме:

$$X0^i = \frac{1}{m} \times \sum_{j=0}^m X_{i,j}; \quad (4)$$

$$Y0^i = \frac{1}{m} \times \sum_{j=0}^m Y_{i,j}; \quad (5)$$

$$R_{i,j} = \sqrt{(X_{i,j} - X0^i)^2 + (Y_{i,j} - Y0^i)^2}; \quad (6)$$

$$R0^i = \frac{\sum_{j=0}^m \sqrt{(X_{\text{Рез}j} - X_0)^2 + (Y_{\text{Рез}j} - Y_0)^2}}{m}, \quad (7)$$

де $X_{i,j}$, $Y_{i,j}$ – значення координат точок на i -му поясі резервуара j -го шва; $R_{i,j}$ – розрахований радіус точки резервуара на i -му поясі j -го шва; $R0^i$ – середній радіус i -го пояса резервуара; n – кількість поясів резервуара; m – кількість точок в одному поясі резервуара.

Наступним кроком є встановлення абсолютного екстремуму функції:

$$\Delta^i = \sum_{j=0}^m (R_{i,j} - R0^i)^2 \rightarrow \min; \quad (8)$$

$$\Delta^i = \sum_{j=0}^m \left[\sqrt{(X_{i,j} - X0^i)^2 + (Y_{i,j} - Y0^i)^2} - R0^i \right]^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

тобто прирівнювання часткових похідних до нуля:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta^i}{\partial X0^i} &= 2 \times \sum_{j=0}^m \left[\frac{\sqrt{(X_{i,j} - X0^i)^2 + (Y_{i,j} - Y0^i)^2} - R0^i}{\sqrt{(X_{i,j} - X0^i)^2 + (Y_{i,j} - Y0^i)^2}} \times (X_{i,j} - X0^i) \right] = \\ &= 2 \times \sum_{j=0}^m \left[(X_{i,j} - X0^i) - \frac{R0^i (X_{i,j} - X0^i)}{\sqrt{(X_{i,j} - X0^i)^2 + (Y_{i,j} - Y0^i)^2}} \right] = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Delta^i}{\partial Y0^i} = 2 \times \sum_{j=0}^m \left[(Y_{i,j} - Y0^i) - \frac{R0^i (Y_{i,j} - Y0^i)}{\sqrt{(X_{i,j} - X0^i)^2 + (Y_{i,j} - Y0^i)^2}} \right] = 0; \quad (11)$$

$$\frac{\partial \Delta^i}{\partial R0^i} = -2 \times \sum_{j=0}^m \left[\sqrt{(X_{i,j} - X0^i)^2 + (Y_{i,j} - Y0^i)^2} - R0^i \right] = 0. \quad (12)$$

На підставі даних, отриманих з інструментальних спостережень, та застосовуючи для розрахунку метод найменших квадратів, були встановлені координати центра кола кожного пояса (табл. 1).

Зрозуміло, що точки, які знімалися на поверхні резервуара, не знаходяться в одному колі, а описують фігуру, що до нього наближається, тому й встановлення центра чи радіуса такої фігури є однозначно неможливим. За допомогою методу найменших квадратів можливо розрахувати такий центр, який буде якомога краще задовольняти умову збереження однакового радіуса для кожної точки.

Як уже згадувалося, одним з важливих завдань, яке вирішується під час геодезичного контролю РВС, є визначення відхилень від вертикальності стінок резервуара [1; 3-5].

Згідно з нормативними документами [8] максимальне відхилення від вертикалі поясів стінки на висоті H становить:

$$\Delta = 0,005 \text{мм} \times H_{i,j} + 10 \text{мм}. \quad (13)$$

Для визначення відхилення від вертикальності стінок резервуара (рис. 2) використовували радіальні зміщення, тобто різницю радіусів-векторів проєкцій точок в одному вертикальному перерізі на рівні кожного пояса з точками нульового пояса (пояса з найменшою висотою).

Таблиця 1

Розраховані координати центрів кіл кожного пояса

№ пояса	Координати, м		
	X	Y	Z
9	48,2591	109,9815	114,8570
8	48,2634	109,9830	113,7079
7	48,2617	109,9843	112,4503
6	48,2662	109,9802	109,9821
5	48,2662	109,9775	107,4763
4	48,2642	109,9792	105,5074
3	48,2657	109,9828	103,4962
2	48,2686	109,9823	101,5269
1	48,2715	109,9799	99,5919

Аналізуючи отримані дані (табл. 1), можна дійти висновку, що координати центрів кіл кожного пояса, які описують резервуар, відрізняються, це свідчить про наявність крену резервуара.

Для коректного розрахунку відхилення від вертикальності стінки сталюого резервуара від точок на поясі з найнижчою висотою потрібно визначити кут нахилу та ввести поправки у відповідні значення відхилень.

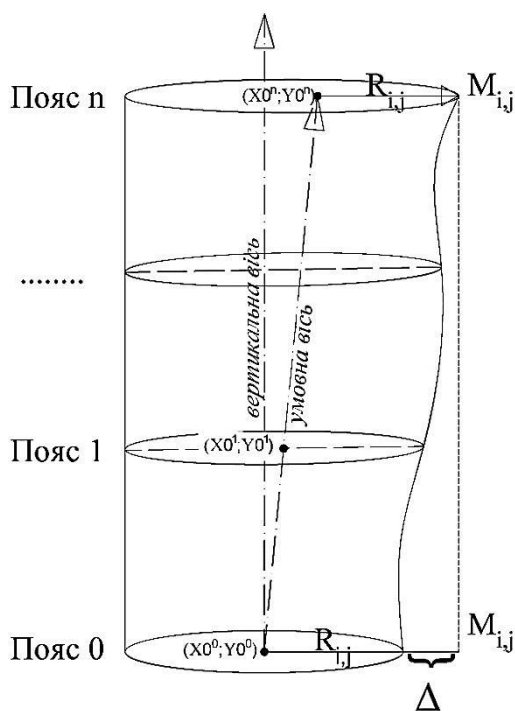


Рис. 2. Визначення радіальних зміщень

Для визначення радіальних зміщень скористаємося такими формулами:

$$\Delta_{i,j} = R_{i,j} - R_{0,j}; \quad (13)$$

$$R_{i,j} = \sqrt{(X_{i,j} - X0^i - H_{i,j} \times tg_x)^2 + (Y_{i,j} - Y0^i - H_{i,j} \times tg_y)^2}; \quad (14)$$

$$R_{0,j} = \sqrt{(X_{0,j} - X0^i - H_{0,j} \times tg_x)^2 + (Y_{0,j} - Y0^i - H_{0,j} \times tg_y)^2}; \quad (15)$$

$$H_{i,j} = Z_{i,j} - Z_{0,j}, \quad (16)$$

де i – номер порядку $i \in [0; n]$, n – кількість поясів; j – номер порядку $j \in [0; m]$, m – кількість точок в одному поясі; tg_x – проекція кута нахилу на площину ХН; tg_y – проекція кута нахилу на площину УН; $H_{i,j}$ – відносна висота точки на поверхні резервуара; $Z_{i,j}$ – координата відповідної точки на поверхні резервуара.

Для розрахунку кута нахилу резервуара, а отже, його проекцій на площини ХН та УН треба знайти рівняння прямої в просторі. Відповідне рівняння прямої повинно проходити через точки, які є центрами кіл кожного пояса.

Відомо, що будь-яка пряма в просторі може бути задана точкою $M_1(x_1, y_1, z_1)$, що належить їй, та напрямним вектором $\vec{s} = (m, n, p)$, колінеарним до цієї прямої. Таке рівняння називається канонічним рівнянням прямої та має вигляд:

$$\frac{x-x_1}{m} = \frac{y-y_1}{n} = \frac{z-z_1}{p}. \quad (17)$$

Рівняння може бути задане також двома точками $M_1(x_1, y_1, z_1)$ та $M_2(x_2, y_2, z_2)$, що належать цій прямій:

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1}, \quad (18)$$

тобто

$$\begin{aligned} m &= x_2 - x_1 = \Delta x; \\ n &= y_2 - y_1 = \Delta y; \\ p &= z_2 - z_1 = \Delta z. \end{aligned} \quad (19)$$

На основі наведених формул (17-19) можна знайти рівняння прямих, які проходять через точку центра кола найнижчого пояса з координатами $(X0^0, Y0^0, H_{0,j})$ та центр кола відповідного пояса з координатами $(X0^i, Y0^i, H_{i,j})$:

$$\begin{aligned} m_i &= \Delta x_i = X0^i - X0^0; \\ n_i &= \Delta y_i = Y0^i - Y0^0; \\ p_i &= \Delta z_i = Z0^i - Z0^0; \\ \frac{x-X0^0}{m_i} &= \frac{y-Y0^0}{n_i} = \frac{z-Z0^0}{p_i}. \end{aligned} \quad (20)$$

За умови, що крен резервуара є сталим вздовж всієї його висоти, всі точки центрів кіл кожного пояса мали б бути на одній прямій. З попереднього опрацювання даних спостережень встановлено, що точки центрів кіл кожного пояса відхиляються від прямої. Для розрахунку крену треба скласти рівняння прямої, яка проходить через центр кола найнижчого пояса, таким чином мінімізуючи віддалі до точок центрів кожного пояса за способом найменших квадратів. Для розрахунку віддалі скористаємося алгоритмом.

Якщо задано рівняння прямої (20), то нескладно знайти $\vec{s} = (m, n, p)$ – напрямний вектор прямої і $M_1(x_1, y_1, z_1)$ – координати точки, що належить цій

прямій. Із властивостей векторного добутку відомо, що модуль векторного добутку векторів дорівнює площі паралелограма, побудованого на цих векторах:

$$S = |\overline{M_0M_1} \times \bar{s}|. \quad (21)$$

З другого боку, площа паралелограма дорівнює добутку його сторони на висоту, проведену до цієї сторони:

$$S = |\bar{s}| \times d. \quad (22)$$

У розгляданому випадку висота дорівнюватиме віддалі від точки до площини d , а сторона паралелограма – модулю напрямного вектора \bar{s} .

Прирівнявши вирази (21) та (22), отримуємо формулу віддалі від прямої до точки в просторі:

$$d = \frac{|\overline{M_0M_1} \times \bar{s}|}{|\bar{s}|}. \quad (23)$$

Векторний добуток можна представити у вигляді матриці з відомими $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ та шуканими m, n, p :

$$\overline{M_0M_1} \times \bar{s} = \begin{vmatrix} I & J & K \\ \Delta x & \Delta y & \Delta z \\ m & n & p \end{vmatrix}, \quad (24)$$

де

$$\begin{aligned} I &= \Delta y \times p - \Delta z \times n; \\ J &= \Delta x \times p - \Delta z \times m; \\ K &= \Delta x \times n - \Delta y \times m; \\ |\bar{s}| &= \sqrt{m^2 + n^2 + p^2}. \end{aligned} \quad (25)$$

Підставивши вирази (24) та (25) в рівняння (23), отримаємо вираз для розрахунку віддалі від прямої, яка проходить через центр кола найнижчого ярусу резервуара та задана напрямним вектором $\bar{s} = (m, n, p)$, що проходить через вісь резервуара до d_i :

$$d_i = \frac{\sqrt{((Y_0^i - Y_0^0) \times p - (Z_0^i - Z_0^0) \times n)^2 + ((X_0^i - X_0^0) \times p - (Z_0^i - Z_0^0) \times m)^2 + ((X_0^i - X_0^0) \times n - (Y_0^i - Y_0^0) \times m)^2}}{\sqrt{(X_0^i - X_0^0)^2 + (Y_0^i - Y_0^0)^2 + (Z_0^i - Z_0^0)^2}}. \quad (26)$$

Після відповідних перетворень рівняння (26) дає змогу отримати віддалі d . Далі треба задати умову способу найменших квадратів для знаходження напрямного вектора, мінімізуючи віддалі від прямої:

$$[p_i d_i^2] = \min,$$

вважаючи, що величини віддалей є рівноточними, тобто з рівними вагами:

$$[d_i^2] = \min. \quad (27)$$

Аналогічно наведеній схемі розрахуємо абсолютні екстремуми функцій, прирівнюючи їх часткові похідні до нуля:

$$\begin{aligned} \frac{\partial d_i}{\partial m} &= \frac{m \times \Delta y_i^2 - n \times \Delta x_i \times \Delta y_i + m \times \Delta z_i^2 - p \times \Delta x_i \times \Delta z_i}{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2} \times \sqrt{(m \times \Delta y_i - n \times \Delta x_i)^2 + (m \times \Delta z_i - p \times \Delta x_i)^2 + (n \times \Delta z_i - p \times \Delta y_i)^2}} = 0 \\ \frac{\partial d_i}{\partial n} &= \frac{n \times \Delta x_i^2 - m \times \Delta x_i \times \Delta y_i + m \times \Delta z_i^2 - p \times \Delta y_i \times \Delta z_i}{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2} \times \sqrt{(m \times \Delta y_i - n \times \Delta x_i)^2 + (m \times \Delta z_i - p \times \Delta x_i)^2 + (n \times \Delta z_i - p \times \Delta y_i)^2}} = 0 \\ \frac{\partial d_i}{\partial p} &= \frac{p \times \Delta x_i^2 - m \times \Delta x_i \times \Delta z_i + p \times \Delta y_i^2 - n \times \Delta y_i \times \Delta z_i}{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2} \times \sqrt{(m \times \Delta y_i - n \times \Delta x_i)^2 + (m \times \Delta z_i - p \times \Delta x_i)^2 + (n \times \Delta z_i - p \times \Delta y_i)^2}} = 0 \end{aligned}$$

Використовуючи дані, наведені в табл. 1, та систему рівнянь (28), були розраховані елементи m , n , p напрямного вектора прямої, яка задовільняє умову (27) наземного вертикального циліндричного сталевого зварного резервуара номінальною місткістю $75\ 000\ \text{м}^3$ з плаваючим дахом та подвійною стінкою підприємства ЛВДС «Броди»:

$$\begin{aligned} m &= -0.005844309; \\ n &= 0.00118217; \\ p &= 8.029864232. \end{aligned} \tag{29}$$

Задаючись значеннями m , n , p (29) напрямного вектора \bar{s} , можна розрахувати проекції кута нахилу на площини ХН (tg_x) та УН (tg_y):

$$\begin{aligned} tg_x &= \frac{m}{p} = -0.00073; \\ tg_y &= \frac{n}{p} = 0.000147. \end{aligned} \tag{30}$$

Знаки тангенсів проекцій кута нахилу також вказують на напрямок крену: за додатного значення це північ і схід, за від'ємного – південь і схід для проекцій на площини ХН та УН відповідно.

Для встановлення СКП відтворення осі резервуара апроксимуючою прямою пропонується розрахувати відхилення координат прямої на висоті пояса від координат центра кола того самого пояса за відомою формулою Гаусса (табл. 1):

$$m_{tg} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n [(x_0^0 + H_{i,j} \times tg_x) - x_0^i]^2 + [(y_0^0 + H_{i,j} \times tg_y) - y_0^i]^2}{n}} = 2.7\ \text{мм}. \tag{31}$$

Таким чином, можна стверджувати, що знайдена пряма апроксимує вісь резервуара з високою точністю.

За допомогою формул (13-15) та значень табл. 1 були отримані результати радіальних зміщень, які представлені в табл. 2 та 3.

Таблиця 2

Обчислені результати радіальних зміщень у 5-му шві

№ горизонту	Висота, м	Допустиме відхилення, мм	Радіальні зміщення, мм	Допуск проведеного вимірювання
0	0	0	0	Допуск
1	1,9	20	19	Допуск
2	3,9	30	20	Допуск
3	5,9	40	43	Перевищення допуску
4	7,9	49	36	Допуск
5	10,4	62	31	Допуск
6	12,9	74	8	Допуск
7	14,1	81	-18	Допуск
8	15,3	86	-35	Допуск

Проаналізувавши отримані результати радіальних зміщень шва №5, бачимо, що перевищення регламентованого допуску (12) в 40 мм спостерігається лише на горизонті №3 та становить 43 мм.

Таблиця 3

Обчислені результати радіальних зміщень у 8-му шві

№ горизонту	Висота, м	Допустиме відхилення, мм	Радіальні зміщення, мм	Допуск проведеного вимірювання
0	0	0	0	Допуск
1	2,0	20	-12	Допуск
2	3,9	30	-2	Допуск
3	5,9	40	-2	Допуск
4	7,9	50	-19	Допуск
5	10,4	62	-9	Допуск
6	12,9	74	-6	Допуск
7	14,1	81	2	Допуск
8	15,3	87	-11	Допуск

Для більш наочного, графічного, представлення отриманих результатів побудовані розрізи резервуара по напрямках радіусів швів №5 і №8 (рис. 4).

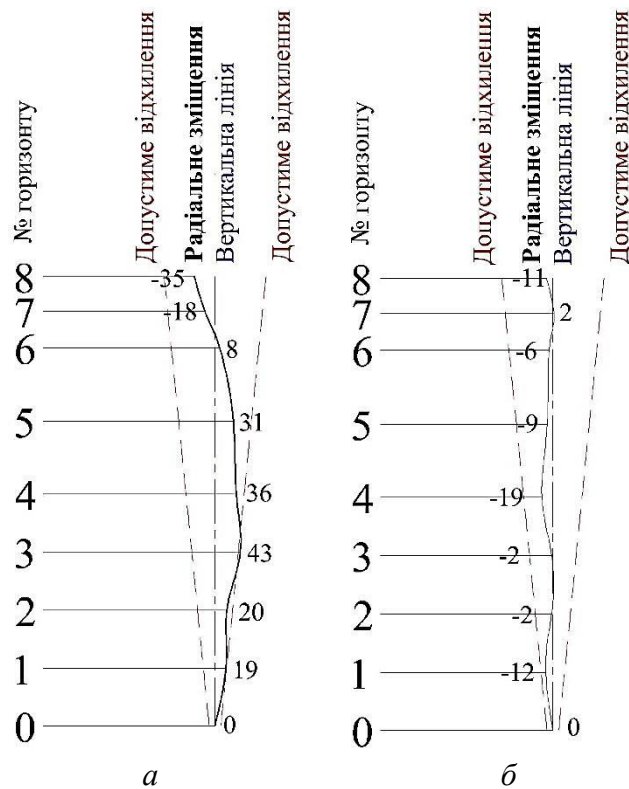


Рис. 4. Розріз резервуара по 5-му (а) і 8-му (б) шву

Наведені таблиці та рисунки дають змогу аналізувати відхилення від вертикальності стінки резервуара лише в місцях безпосереднього вимірювання, тобто в тих місцях, де вони були безпосередньо виміряні геодезичними приладами.

Сучасні методи визначення геометричних параметрів резервуарів, що ґрунтуються на використанні електронних Total Position Station (TPS) і лазерному скануванні, досліджено в роботах професора О. М. Самойленка [9]. З метою максимального використання цієї інформації й автоматизації процесів її опрацювання доцільним є використання БСІ під час створення 3D-поверхні РВС для визначення його геометричних параметрів.

Висновки

1. У роботі представлено алгоритм розрахунку центра резервуара на основі даних інструментальних геодезичних спостережень.
2. Розроблений алгоритм може бути використаний для визначення центра будь-якої споруди округлої форми, просторові координати якої відомі.
3. З досвіду використання розробленого алгоритму на реальних об'єктах відомо, що навіть за відсутності просторових координат деяких точок на поверхні об'єктів можна знайти координати центра.
4. У статті розраховано кут нахилу осі резервуара шляхом визначення напрямного вектора апроксимуючої прямої.
5. Наведено розраховані дані геометричних параметрів, а саме радіальних зміщень зовнішньої стінки наземного вертикального циліндричного сталевого зварного резервуара номінальною місткістю 75 000 м³ з плаваючим дахом та подвійною стінкою підприємства ЛВДС «Броди», отримані на основі реальних інструментальних геодезичних спостережень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Грінченко Є.М.* Визначення терміну безпечної експлуатації стінки вертикального резервуару для збереження нафтопродуктів в експлуатації [Текст] / Грінченко Є.М., Соколов Д.Л., Федоренко Р.М. // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2014. – № 19. – С. 38-48.
2. *Метрологія.* Резервуари стаціонарні вимірювальні вертикальні. Методика повірки (калібрування) геометричним методом із застосуванням геодезичних приладів: ДСТУ 7473:2016 [Текст]. - На заміну ДСТУ 7473:2013. Чинний від 2017-01-01. - Київ : УкрНДНЦ, 2016. – IV. – 74 с.
3. *Заміховський Л. М.* Математичне моделювання напружено-деформованого стану вертикальних сталевих резервуарів [Текст] / Л.М. Заміховський, Х.В. Мартинюк // Наукові вісті Інституту менеджменту і економіки. – 2006. – № 2(10). – С. 96–100.
4. *Заміховський Л. М.* Оцінка напружено-деформованого стану вертикальних сталевих циліндричних резервуарів за переміщеннями точок їх поверхні [Текст] / Л. М. Заміховський, Х. В. Паньків // Вісник КДПУ. – 2007. – Част. 1, Вип. 4. – С. 141–143.

5. *Конструирование и расчёт вертикальных цилиндрических резервуаров низкого давления: учеб. пособие / А. А. Лапшин, А. И. Колесов, М. А. Агеева // Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2009. – 122 с.*
6. *Магістральні нафтопроводи. Нафтоперекачувальні станції, морські термінали. Технічний огляд, експертне обстеження технологічного обладнання і трубопроводів. Методи і методики: СОУ 60.3-31570412-027:2007. – [Чинний від 2007-09-28]. – К.: ВАТ «Укртрансффта», 2007. – 219 с.*
7. *Метешкін К.О. Математична обробка геодезичних вимірів: навч. посіб. / К.О. Метешкін, Д. В. Шаульський. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 176 с.*
8. *Настанова з проведення технічного діагностування вертикальних сталевих резервуарів [Текст]: ДСТУ–Н Б А.3.1–10:2008. – [Чинний від 2009–07–01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 63с.*
9. *Самойленко А. Н. Повышение точности определения геометрических параметров и градуировки вертикальных цилиндрических резервуаров при их поверке /А. Н. Самойленко, В. В. Заец // Измерительная техника. – 2007. – № 3. – С. 29-33.*
10. *Середович А. В. Методика определения геометрических характеристик стальных цилиндрических резервуаров с использованием лазерного сканирования/ Д.В. Комиссаров, А.В. Середович, А.В. Иванов // ГЕО-СИБИРЬ-2005: сб. материалов науч. конгр., 25-29 апр. 2005 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2005. – Т. 1: Геодезия, картография, маркшейдерия, ч. 1. – С. 221-225.*
11. *Середович А. В. Разработка методики определения геометрических параметров РВС по данным лазерного сканирования / А.В. Середович, А.В. Иванов // ГЕО-СИБИРЬ-2006: сб. материалов науч. конгр., 24-28 апр. 2006 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2006. – Т. 1: Геодезия, картография, маркшейдерия, ч. 2. – С. 160-164.*
12. *Тарасенко М.І. Методика визначення технічних параметрів електронних тахеометрів при роботі у безвідбивачевому режимі / М.І. Тарасенко, А.Г. Тіщенко// Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2009. – Вип. 72. – С. 54-61.*
13. *Тревого І. С. Оптимізація використання плівкових відбивачів для спостереження за деформаціями інженерних споруд / І. С. Тревого, Є. Ю. Ільків, Д. В. Кухтар // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2013. – Вип. 78. – С. 146–148.*
14. *Тревого І. Застосування мультистанції Leica MS60 з метою проведення високоточного геопросторового моніторингу / І. Тревого, А. Горб, О. Мелешко // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2016. – Вип. 1 (31). – С. 28–32.*

REFERENCES

1. Hrinchenko Ye.M., Sokolov D.L. & Fedorenko R.M. (2014). Vyznachennia terminu bezpechnoi ekspluatatsii stinky vertykalnoho rezervuaru dlia zberezhenia naftoproduktiv v ekspluatatsii [Determination of the term of safe operation of the wall

of the vertical tank for the storage of petroleum products in operation] – *Problemy nadzvychainykh sytuatsii - Problems Emergencies*, 19, 38-48 [in Ukrainian].

2. Metrolohiia. Rezervuary statsionarni vymiriualni vertykalni. Metodyka povirky (kalibruvannia) heometrychnym metodom iz zastosuvanniam heodezychnykh prykladiv [Metrology. Tanks stationary vertical measuring. Method of verification (calibration) geometric method using geodetic instruments]. (2016). *DSTU 7473: 2016* from 2017-01-01. Kyiv: UkrNDNTs [in Ukrainian].

3. Zamikhovskiy L. M. & Martyniuk Kh. V. (2006). Matematyчне modeliuvannia napruzheno–deformovanoho stanu vertykalnykh stalnykh rezervuariv [Mathematical modeling of the stress-strain state of vertical steel tanks]. *Naukovi visti Instytutu menedzhmentu i ekonomiky - Scientific reports of the Institute of Management and Economics*, 2 (10), 96–100 [in Ukrainian].

4. Zamikhovskiy L. M. & Pankiv Kh. V. (2007). Otsinka napruzhenodeformovanoho stanu vertykalnykh stalnykh tsylindrychnykh rezervuariv za peremishchenniamy tochok yikh poverkhni [Estimation of the stressed-deformed state of vertical steel cylindrical tanks by moving the points of their surface]. *Visnyk KDPU – Bulletin of the KRSPU*, part 1, issue 4, 141–143 [in Ukrainian].

5. Lapshyn A. A., Kolesov A. Y. & Aheeva M. A. (2009). *Konstruyrovanye y raschet vertykalnykh tsylindrycheskykh rezervuarov nyzkoho davleniya [Design and calculation of vertical cylindrical low pressure tanks]*. N. Novhorod, NNHASU [in Russian].

6. Mahistralni naftoprovody. Naftoperekachuvalni stantsii, morski terminaly. Tekhnichniy ohliad, ekspertne obstezhennia tekhnolohichnoho obladnannia i truboprovodiv. Metody i metodyky [Main oil pipelines. Oil pumping stations, marine terminals. Technical examination, expert examination of technological equipment and pipelines. Methods and Techniques]. (2007). *SOU 60.3-31570412-027:2007* from 2007-09-28. Kyiv: VAT «Ukrtransnafta» [in Ukrainian].

7. Meteshkin K. O. & Shaulskiy D. V. (2012). *Matematychna obrobka heodezychnykh vymiriv [Mathematical processing of geodetic measurements: a tutorial]*. Kharkiv.: KhNAMH [in Ukrainian].

8. Nastanova z provedennia tekhnichnoho diahnostuvannia vertykalnykh stalevykh rezervuariv [Instructions for technical diagnostics vertical steel tanks]. (2009). *DSTU–N B A.3.1–10:2008* from 2009–07–01. Kyiv: Minrehionbud [in Ukrainian].

9. Samoilenko A. N. & Zaets V. V. (2007). Povyshenye tochnosty opredeleniya heometrycheskykh parametrov y hraduyrovky vertykalnykh tsylindrycheskykh rezervuarov pry ykh poverke [Increasing the accuracy of determining the geometric parameters and grading of vertical cylindrical tanks during their verification]. *Yzmyertelnaia tekhnika - Engineering technique*, 3, 29-33 [in Ukrainian].

10. Seredovych A. V. & Yvanov A.V. (2006). Metodyka opredeleniya heometrycheskykh kharakterystyk stalnykh tsylindrycheskykh rezervuarov s yspolzovanyem lazernoho skanyrovannia [Method of determination of geometric characteristics of steel cylindrical tanks using laser scanning]. *HEO-SYBYR-2005: sbornyk materyalov nauchnoho konhresa - GEO-SIBERIA-2005: collection of materials of the scientific congress*. (Vol.1), (pp. 221-225). Novosybyrsk: SSUGT [in Russian].

11. Seredovych A. V. & Yvanov A.V. (2006). Razrabotka metodyky opredeleniya heometrycheskykh parametrov RVS po dannym lazernoho skanyrovaniya [Development of the method for determining the geometric parameters of the RVS according to the laser scanning data]. *HEO-SYBYR-2006: sbornyk materyalov nauchnogo konhresa - GEO-SIBERIA-2006: collection of materials of the scientific congress*. (Vol.2), (pp. 160-164). Novosybyrsk: SSUGT [in Russian].

12. Tarasenko M.I. & Tishchenko A.H. (2009). Metodyka vyznachennia tekhnichnykh parametriv elektronnykh takheometriv pry roboti u bezvidbyvachevomu rezhymi [Method of determination of technical parameters of electronic tacheometers during operation in non-reflective mode]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia - Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 72, 54-61 [in Ukrainian].

13. Trevoho I. S., Ilkiv Ye. Yu. & Kukhtar D. V. (2013). Optymizatsiia vykorystannia plivkovykh vidbyvachiv dlia sposterezhennia za deformatsiiami inzhenernykh sporud [Optimize the use of film reflectors to monitor the deformation of engineering structures]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia - Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 78, 146–148 [in Ukrainian].

14. Trevoho I., Horb A. & Meleshko O. (2016). Zastosuvannia multystantsii Leica MS60 z metoiu provedennia vysokotochnoho heoprosorovoho monitorynhu [Application of multistation Leica MS60 for high-precision geospatial monitoring]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva - Modern achievements of geodesic science and production*, issue 1 (31), 28–32 [in Ukrainian].

В.М. Ковтун

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ВЕРТИКАЛЬНОСТИ СТЕНОК РЕЗЕРВУАРОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ

Работа посвящена обработке геодезических инструментальных наблюдений в составе технического осмотра резервуаров вертикальных стальных для определения их геометрических параметров. В работе представлен алгоритм расчета центра резервуара вертикального стального на основе данных инструментальных наблюдений, выполненных на реальном объекте. Разработанный алгоритм позволяет определять центр круга, который описывает сооружение или объект округлой формы, используя пространственные координаты этого объекта, в частности, даже при отсутствии данных по всему периметру объекта. Рассчитаны отклонения от вертикальности стенок резервуара вертикального стального путем определения радиальных смещений. В работе выполнен расчет крена резервуара путем определения направляющего вектора аппроксимирующей прямой, описывающей ось резервуара, что позволило получить исправленные значения радиальных смещений. Выполнен анализ точности нахождения этой аппроксимирующей прямой.

Ключевые слова: РВС, резервуар вертикальный стальной, геометрические параметры, технический осмотр, экспертное обследование, центр круга, крен.

CALCULATING THE DEVIATION OF VERTICAL STEEL TANK WALLS FROM VERTICALITY

The work is devoted to the processing of geodetic instrumental observations included in technical inspection of vertical steel tanks aimed to determine their geometric parameters. The research presents the algorithm for calculating the center of the vertical steel tank based on the data collected through instrumental observations performed on a real object. The developed algorithm allows to determine the center of the circle circumscribing a structure or an object of round form using the spatial coordinates of this object, in particular, even in the case of the absence of the data on the whole perimeter of an object. The deviations of the walls of the vertical steel tank from verticality were calculated by detecting radial displacements. In this paper, the calculation of the tank's bank was executed using the determination of the directing vector of the approximating line describing the axis of the tank, which made it possible to obtain the corrected numbers of radial displacements. An analysis of the accuracy of determining this approximating line was carried out.

Keywords: VST, vertical steel tank, geometric parameters, technical inspection, expert examination, center of the circle, bank.

Надійшла до редакції

02.03.2019

УДК 528.48

<https://doi.org/10.32347/0130-6014.2019.66.45-51>

В. С. Староверов, канд. техн. наук, професор,
К. О. Нікітенко, асп. кафедри інженерної геодезії

Київський національний університет будівництва і архітектури

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ АЕРОФОТОЗЙОМКИ ПІД ЧАС ПАСПОРТИЗАЦІЇ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

У статті розглянуто особливості розрахунку параметрів аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) під час паспортизації магістральних трубопроводів. Викладено спосіб оперативного оцінювання якості аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів.

У роботі проаналізовано переваги аерофотозйомки об'єктів магістральних трубопроводів та представлені параметри літака на маршруті. Крім того, встановлено порядок виконання аерофотознімальних робіт для цілей картографування. Необхідність аерофотознімання пояснюється тим, що за багато років в Україні накопичився величезний масив інформації про діючі магістральні трубопроводи-газопроводи. Однак ці дані частково не впорядковані, а частково втрачені, що не дає можливості оперативно скористатися ними в разі аварійної ситуації або обґрунтовано планувати роботи з реконструкції.