

ТЕХНОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ОПОР РЕЗЕРВУАРІВ ЗА ДАНИМИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ

Изложены результаты исследования возможностей метода наземного лазерного сканирования при наблюдениях за деформациями и смещениями инженерных сооружений.

It is considered the results of research of possibilities of ground laser scanning for observations of deformations and displacements of engineering structures.

Постановка проблеми. Масове впровадження нових технологій у практику геодезичного виробництва потребує уточнення сфери застосування різних типів сучасного геодезичного обладнання при вирішенні задач інженерної геодезії.

Основними приладами, які застосовуються при будівництві та моніторингу споруд, є роботизовані електронні тахеометри і наземні лазерні сканери, що працюють в режимі без відбивача. Але дотепер застосування для цього наземного лазерного сканування недостатньо обґрунтовано, не вироблено відповідних технологічних схем. Тому таким актуальним є дослідження можливостей цього методу при спостереженнях за деформаціями та зміщеннями інженерних споруд.

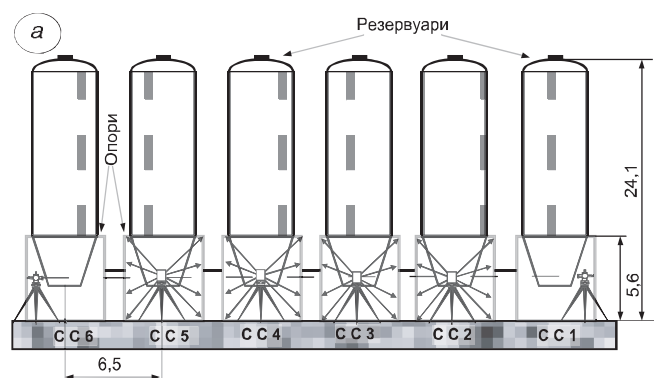
Огляд попередніх публікацій. На всіх конференціях Міжнародної федерації геодезистів (FIG), міжнародних форумах співтовариства фотограмметрії та дистанційного зондування (ISPRS) питанню інженерного застосування наземного лазерного сканування приділяється багато уваги. Досвід застосування наземного лазерного сканування для вирішення задач інженерної геодезії узагальнено у праці [5]. У праці [7] розглянуто методику визначення деформацій циліндричних резервуарів нафтохранилищ з використанням роботизованих електронних тахеометрів; у [2] подається детальний огляд варіантів застосування наземного лазерного сканування при визначенні деформацій поверхні резервуарів; в [1] проаналізовано можливості цього методу та питання інтерпретації отриманих результатів.

Загалом необхідно відмітити, що відомі автору даного дослідження роботи носять здебільшого експериментальний характер. У названих публікаціях не розглянуто повну технологічну схему виконання робіт, яка повинна включати: попередні розрахунки точності сканування й точності геодезичних робіт, технологію виконання польових робіт та методику оброблення результатів сканування. Тому актуальним залишається питання розроблення відповідної технологічної схеми, яка повинна включати вказані вище компоненти.

Постановка завдання. Мета даного дослідження – вивчити можливості методу наземного лазерного сканування в ході спостережень за деформаціями та зміщеннями сталевих циліндричних опор резервуарів.

Основний зміст дослідження. Технологію визначення деформацій інженерних споруд з використанням наземного лазерного сканування відпрацьовано при виконанні спостережень за опорами вертикальних циліндричних резервуарів ЗАТ "Оболонь". Роботи було виконано інженерами сектору інженерної геодезії та геоінформатики ДП "Випробувальний центр будівельних конструкцій".

Резервуари розташовано на суцільній бетонній плиті в зоні зі складними геологічними умовами. Висота кожного з резервуарів становить 24,1 м. Конструктивно опора являє собою вертикальну сталеву циліндричну оболонку, встановлену на бетонну плиту, у верхню частину якої вмонтовано металевий пояс, на який і встановлено сам резервуар. Схему облаштування резервуарів наведено на мал. 1, а.



Мал. 1. Схема розміщення: а – резервуарів і станцій сканування (СС); б – опорних марок (⊗) на внутрішній поверхні резервуару та пунктів базису (■)



У ході попереднього обстеження було встановлено, що положення резервуарів мають значні відхилення від вертикалі, викликані нерівномірним осіданням плити та деформацією опор резервуарів. Як виявилось згодом, вони викликані головним чином неякісним виготовленням опор.

При спостереженні виконано комплекс геодезичних робіт трьох видів: спостереження за осіданнями бетонної плити методом високоточного тригонометричного нівелювання; спостереження за кренами резервуарів методом бокового нівелювання; визначення деформацій поверхні опор методом лазерного сканування. Було розроблено власну методику спостережень за допомогою лазерного сканера.

Оскільки між усіма опорами існувала видимість, між 1-ю і 6-ю опорами було розмічено базис в єдиній системі координат. На внутрішній поверхні кожної опори закріпили 4 марки, координати яких було визначено в системі опорного базису електронним тахеометром Trimble S8 способом полярної засічки. За попереднім розрахунком встановлено, що точність визначення просторового положення марок дорівнює 1 мм.

Приблизно з середини кожної опори було виконано сканування і за марками знайдено координати станцій у єдиній системі. Схему виконання вимірювань на опорному базисі наведено на мал. 1, б.

До речі, при реалізації такої схеми спостережень з'являється можливість визначити не тільки деформації поверхні опор, а й взаємні їх зміщення.

Найжорсткіші умови висуваються до точності визначення деформації поверхні опори. За умови використання лазерного сканера кінцева точність виконання робіт пов'язана з точністю апроксимації даної поверхні. При апроксимації методом найменших квадратів (МНК) визначають коефіцієнти рівняння, що апроксимує цю поверхню. Наведемо середню квадратичну похибку (СКП) його вирішення [3]:

$$m = \left(\frac{\partial F}{\partial x_1} \right)^2 m_A^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} \right)^2 m_B^2 + \dots,$$

де $m_A^2 = \mu^2 Q_{11}$; $m_B^2 = \mu^2 Q_{22}$; ...

Якщо прийняти, що

$$\mu^2 = 2(n - k)m^2(\mu),$$

де $m^2(\mu)$ – СКП вимірювання, вага якого прийнята за одиницю, тоді матимемо результат, в якому гранична похибка не повинна перевищувати

$$\Delta(\mu) = \frac{\Delta}{\sqrt{2(n - k) \left[\left(\frac{\partial F}{\partial x_1} \right)^2 Q_{11} + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} \right)^2 Q_{22} + \dots \right]}}. \quad (1)$$

За виразом (1) можна встановити точність визначення координат точок на поверхні опори. Знаючи похибку вимірювання відстані m_R , похибку вимірювання вертикального кута m_ω , похибку вимірювання горизонтального кута m_β , обчислюють СКП визначення координат точки з однієї станції сканування. Оскільки безпосередньо спостережу-

ваними величинами є горизонтальні та вертикальні кути і відстані, для отримання СКП координат точок матрицю \mathbf{M}_S трансформують відповідно до правила перетворення коваріацій [4]:

$$\mathbf{M}_T = \mathbf{A} \cdot \mathbf{M}_S \cdot \mathbf{A}^T, \quad (2)$$

де \mathbf{M}_T – матриця СКП координат точки; \mathbf{A} – матриця часткових похідних від вимірюваних величин; \mathbf{M}_S – діагональна матриця, що містить СКП вимірювання кутів і відстані. Для прикладу: вимірювання вертикальних і горизонтальних кутів з СКП 10 кутових секунд і точністю вимірювання ліній в режимі без відбивача 2 мм/50 м значення похибок визначення координат при кутах нахилу 45° та відстані 6 м становитиме: $m_X = 1,4$ мм, $m_Y = 1$ мм, $m_Z = 1$ мм.

Точність геодезичних спостережень розраховують, використовуючи принцип максимально можливих планових зміщень δR_{\max}^{\min} . Якщо прийняти СКП визначення деформації $m_{\delta R_{\max}^{\min}}$, то умова для розрахунку точності спостережень буде такою:

$$\delta R_{\max}^{\min} \geq z_q m_{\delta R_{\max}^{\min}}, \quad (3)$$

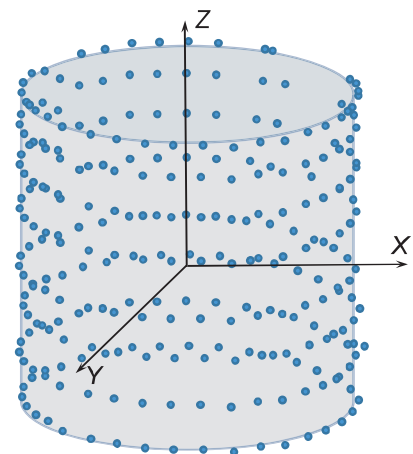
де z_q – коефіцієнт, що залежить від прийнятого рівня довірчої імовірності p .

Виходячи з принципу рівного впливу, точність визначення компонентів по координатних осях X та Y для заданих переміщень δR_{\max}^{\min} можна встановити за таким виразом:

$$m_{X,Y} \leq \frac{\delta R_{\max}^{\min}}{z_q \sqrt{2}}. \quad (4)$$

Якщо прийняти, що для опори, яка є вертикальною циліндричною оболонкою, максимальна допустима деформація δR_{\max}^{\min} дорівнює 1/8 товщини оболонки, то для оболонки товщиною 45 мм отримаємо: $\delta R_{\max}^{\min} = 5,6$ мм; $m_{X,Y} = 2,0$ мм. Отже, лазерний сканер дозволяє визначити деформації поверхні опори з необхідною точністю.

Після виконання сканування для кожної опори було отримано хмару точок (мал. 2), за якою і виконано аналіз відхилень опори від проектних (оптимальних) розмірів.

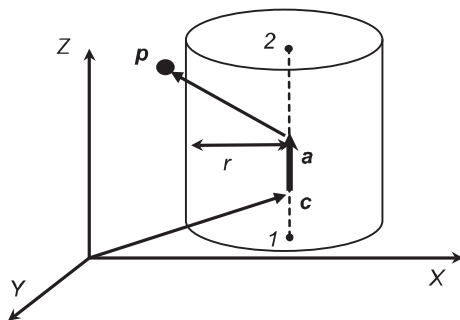


Мал. 2. Хмара точок опори циліндричного резервуару



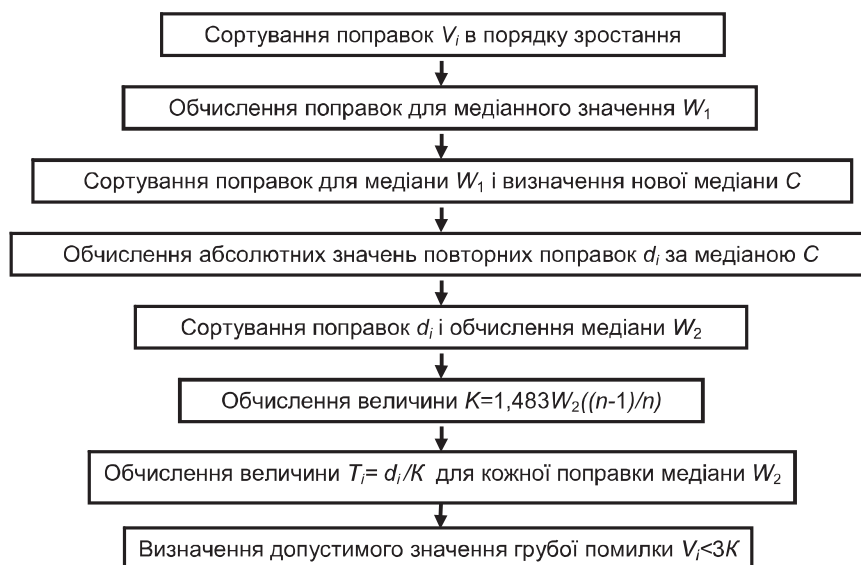
Після виконання сканування було проведено математичне оброблення результатів і отримано рівняння циліндричної поверхні опори. Для апроксимації використано програмний продукт КТН-INORA (розробка шведського Королівського технологічного інституту). Параметрами циліндричної поверхні були: $a=(a_x \ a_y \ a_z)$ – напрямні косинуси осі циліндра; $c=(c_x \ c_y \ c_z)$ – координати точки на осі циліндра, яка є найближчою до початку координат, і радіус r (мал. 3). Якщо i -та точка знаходилась на поверхні циліндра, то розв'язувалось таке векторне рівняння: $\|(\mathbf{p}-\mathbf{c})\cdot\mathbf{a}\|-\mathbf{r}=0$ [6; 8; 10]. Дорівнянь поправок додавались рівняння у вигляді обмежень:

$$\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = 1; \quad a_x c_x + a_y c_y + a_z c_z = 0.$$



Мал. 3. Основні параметри циліндра

Важливий момент: точність моделювання поверхні за даними сканування вища в порівнянні з точністю визначення координат окремої точки. Для досягнення потрібної точності необхідно виключити можливі грубі помилки з результатів сканування. Це роблять за такою схемою (див. мал. 4).



Мал. 4. Схема виключення грубих помилок з результатів сканування

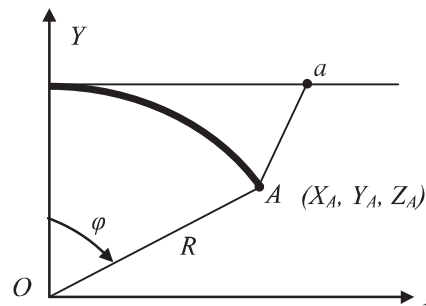
У результаті апроксимації отримуємо: радіус опори; координати верхньої та нижньої точок опори, які визначають напрямок її осі й за допомогою яких можна обчислити напрямні косинуси осі опори та визначити її нахил. Значення одержаних оцінок координат верхньої і нижньої точок та радіуса опор МНК наведено в таблиці.

Оцінювання параметрів опор резервуарів

№ опори	Координати нижньої точки на осі, м			Координати верхньої точки на осі, м			Радіус, м
	X ₁	Y ₁	Z ₁	X ₂	Y ₂	Z ₂	
3	9999,942	10000,046	-0,005	9999,948	10000,027	5,246	2,795
4	1000,081	999,963	0,030	1000,069	999,948	5,211	2,798
5	999,916	1000,019	-0,017	999,913	999,978	5,226	2,801

СКП одиниці ваги апроксимації μ_a становить 1,5 мм.

Результати апроксимації найзручніше показати графічно як ізополі відхилень поверхні опори кожного резервуара від оптимальної поверхні циліндра. Для цього виконують розгортку поверхні опори на площину [1; 2; 9] в еквідистантній проекції, яка не дає спотворень, оскільки відстані на дотичну площину дорівнюють відстаням на поверхні циліндра (мал. 5).



Мал. 5. Проекція поверхні опори на площину

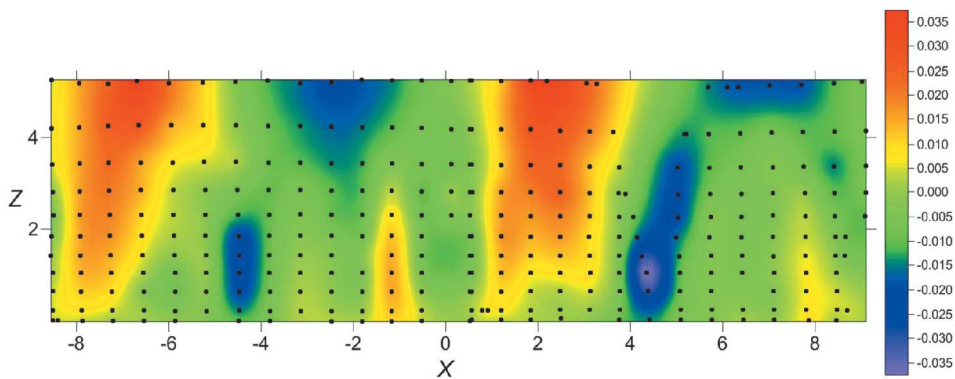
Для перетворення координат підходять такі вирази:

$$\begin{aligned} X_a &= R\varphi_A; \\ Y_a &= R = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}; \\ Z_a &= Z_A. \end{aligned}$$

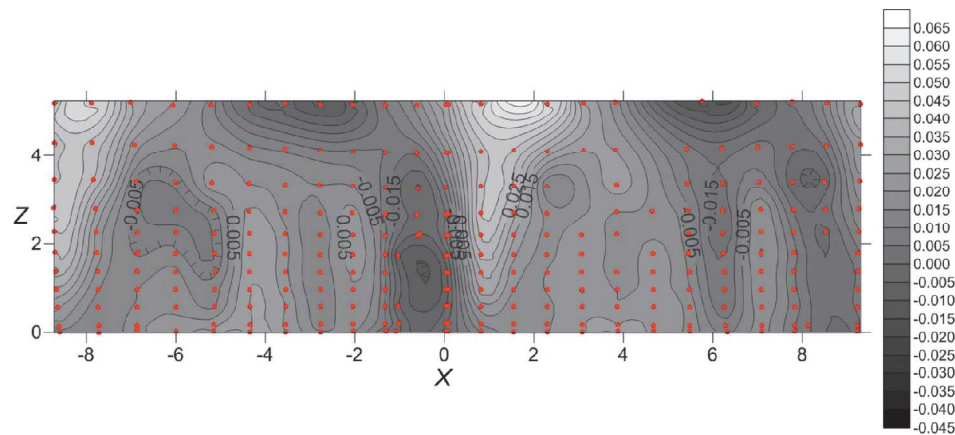
Вигляд ізополі деформацій поверхні опори зображено на мал. 6.

Деформації опори можна передати і в звичнішій для геодезистів формі – у вигляді горизонталей (мал. 7).

Результати спостережень свідчать, що всі опори резервуарів зазнали деформації. Найбільші від'ємні відхилення від оптимальної поверхні зафіксовано в резервуарах № 2 і № 3 (до -30 мм), а найбільші додатні – в резервуарі № 5 (до +50 мм). Отже, можемо зробити загальний висновок про



Мал. 6. Відхилення поверхні опори № 2 від оптимальної поверхні циліндричної оболонки



Мал. 7. Деформації опори № 5, відображені горизонталями

необхідність зміцнення опор усіх резервуарів у місцях найбільших деформацій та проведення повторного циклу спостережень після наповнення резервуарів.

Висновки та перспективи досліджень. Встановлено, що метод наземного лазерного сканування дає змогу оперативно спостерігати за деформаціями інженерних споруд типу циліндричних оболонок. Поверхня циліндричної оболонки побудована з точністю 1,5 мм, що задовольняє вимоги до точності визначення деформацій. Результат дослідження: запропоновано технологічну схему виконання спостережень за деформаціями споруд даного типу методом наземного лазерного сканування. Необхідно зауважити, що деякі програмні засоби дозволяють виконати обчислення деформацій поверхні як різницю між двома хмарами точок. Недоліком такого підходу є використання хмар точок, в яких навіть після попереднього оброблення результатів вимірів помітні грубі помилки. Ця обставина вимагає проведення подальших досліджень у цьому напрямку для розроблення методик обчислення деформацій інженерних споруд за даними наземного лазерного сканування.

Література

1. *Ашраф, А. Бешр.* Разработка и совершенствование технологий определения деформаций инженерных со-

ружений с помощью современных высокоточных геодезических способов и средств измерений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.32 / Бешр А. Ашраф, Новосибирск, 2010. – 25 с.

2. *Середович, В.А.* Наземное лазерное сканирование: монография [Текст] / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова. – Новосибирск: СГА, 2009. – 261 с.

3. *Чмчян, Т.Т.* Расчет точности геодезических работ в строительстве: справочник [Текст] / Т.Т. Чмчян. – М.: Недра, 1988. – 151 с.

4. *Шульц, Р.В.* Розрахунок точності визначення горизонтальних переміщень споруд методом наземного лазерного сканування [Текст] / Р.В. Шульц // Інж. геод. – 2008. – Вип. 54. – С. 244-254.

5. *Шульц, Р.В.* Теорія і практика використання наземного лазерного сканування в задачах інженерної геодезії: автореф. дис. ... доктора техн. наук: 05.24.01 / Р.В. Шульц, Київ, 2012. – 34 с.

2012. – 34 с.

6. *Elkhrachy, I.* Towards an Automatic Registration for Terrestrial Laser Scanner Data [Text] / I. Elkhrachy // Thesis for the Degree of Master of Science. Braunschweig, Germany: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, 2008. – 128 p.

7. *Gairns, C.* Development of a Semi-Automated System for Structural Monitoring Using a Reflectorless Total Station [Text] / C. Gairns // Thesis for the Degree of Master of Science. Department of Geodesy and Geomatics Engineering. – New Brunswick, Canada: University of New Brunswick, 2008. – 117 p.

8. *Lindenbergh, R.* Accuracy analysis of the leica HDS3000 and feasibility of tunnel deformation monitoring [Text] / R. Lindenbergh, N. Pfeifer, T. Rabbani // ISPRS WG III/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands, September 12-14, 2005. – 6 p.

9. *Monserrat, O.* Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching [Text] / O. Monserrat, M. Crosetto // Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. – 2008. – № 63. – P. 142-154.

10. *Rabbani, T.* Automatic Reconstruction of Industrial Installations Using Point Clouds and Images [Text] / T. Rabbani // Thesis for the Degree of Doctor of Science. Nederlandse Commissie voor Geodesie Netherlands Geodetic Commission Delft, May 2006. – 175 p.

Надійшла 23.07.12