

УДК 528.4

Шульц Р.В., Чмчян Т.Т., Білоус М.В.

## ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ПІДПІРНИХ СТІНОК ПРИ БУДІВНИЦТВІ МЕТРОПОЛІТЕНУ

**Постановка проблеми** Оскільки будівництво метро відбувається в містах які часто мають складну та хаотичну забудову, різні геологічні умови, значну кількість інженерних комунікацій діючих та не діючих спостереження за осіданнями та деформаціями є вкрай важливим завданням. Зрозуміло, що безпосередньо при будівництві до існуючих факторів та навантажень додається вплив будівельної техніки та міського транспорту. Ці фактори мають особливе значення при будівництві метрополітену відкритим способом та будівництві станцій метро. В цьому випадку значного впливу зазнають підпірні стінки тунелю та станції. Визначення просторових підпірних стінок є з технологічної точки зору достатньо складною задачею. В умовах будівництва створення геодезичних мереж, для спостережень за деформаціями, та підтримка їх в належному стані вимагає від геодезиста значних зусиль. Тому пошук відповідних технологічних рішень є актуальною проблемою. В роботі пропонується використання електронних тахеометрів, які в комбінації з розробленою методикою обробки дозволять вирішити поставлену проблему.

**Огляд попередніх публікацій** Загальні рекомендації, щодо визначення горизонтальних та вертикальних переміщень наведені в [1]. В цьому стандарті методи і засоби рекомендуються для визначення просторових переміщень без врахування особливостей будівництва споруди. Другий важливий момент це використання для визначення окремо вертикальних та горизонтальних переміщень різних приладів та методик, що значно збільшує строки виконання робіт і є критичним в умовах будівництва споруд. Більш детальні коментарі і розрахунки точності можна знайти в класичній роботі з інженерної геодезії [2]. Закордоном використанню сучасних приладів для спостереження за деформаціями саме тунелів метро присвячено достатньо значну кількість робіт, прикладом тут можуть бути роботи [3, 4]. Всі ці роботи стосуються спостереження за деформаціями лише тунелю під час його експлуатації.

**Постановка завдання** Метою даної роботи є розробка технології визначення просторових переміщень підпірних стінок з використанням електронних тахеометрів та розробка методики обробки результатів спостережень.

**Основний зміст роботи** Будівництво метрополітену в місті Києві відбувається в достатньо складних умовах. Мають місце значні перепади висот

та складна забудова. В таких умовах висота підпірних стінок рис. 1 досягає 20 метрів і навіть більше.



Рис. 1 Розташування підпірних стінок

Як зазначено в постановці проблеми спостереження за деформаціями таких стінок є вкрай важливим.

З технологічної точки зору можливі декілька варіантів реалізації схем спостережень. Реалізація кожної з них залежить від умов будівництва і показана на рис. 2. Перед початком будівництва метро вздовж тунелю створюється лінійно-кутова мережа, що може включати також GPS-спостереження. Punkти такої мережі розташовують в місцях довготривалого зберігання. Варіант, що позначений на схемі **I** припускає, що прилади можна безпосередньо встановити на пункти опорної мережі і з них виконати спостереження деформаційних марок в підпірній стінці.

Такий варіант реалізувати досить складно, через значні відстані та часто відсутність видимості.

Варіант **II** найбільш розповсюджений. Безпосередньо в зоні видимості підпорної стінки створюють тимчасову мережу від пунктів опорної мережі. Звичайно, що така багатоступеневість мережі є джерелом додаткових похибок про, що буде сказано окремо.

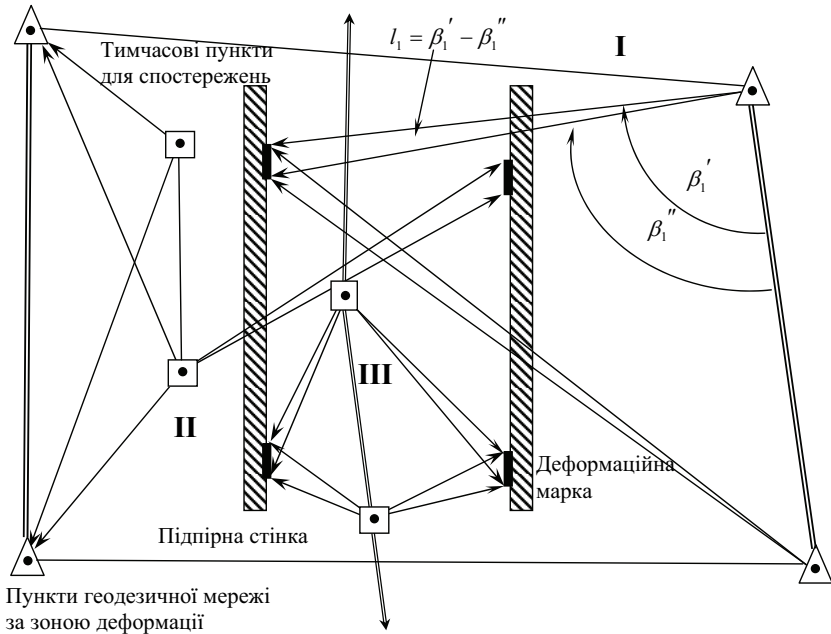


Рис. 2 Можливі технологічні схеми визначення деформацій підпірної стінки

Варіант III передбачає можливість виконання спостережень з пунктів, що знаходяться на дні котловану. Зрозуміло, що така мережа сама вимагає постійного контролю її стабільності.

В будь-якому з варіантів для спостережень використовують електронні тахеометри, що працюють в без рефlectorному режимі. Використання таких тахеометрів дозволяє використовувати в якості деформаційних марок плоскі візирні цілі на які немає необхідності встановлювати відбивачі або візирні марки. Марки закріплюють безпосередньо в підпірній стінці рис. 3.

Якщо взяти за основу варіант II, то спостереження в двох циклах можна схематично представити на рис. 4. В кожному циклі спостережень безпосередньо вимірюють горизонтальний кут  $\beta$ , зенітну відстань  $z$  та відстань  $R$ . В такому випадку координати точки відносно пункту спостережень обчислюють за виразами (1):

$$X_1 = X_p + R \cos z \cos \beta, Y_1 = Y_p + R \sin z \cos \beta, Z_1 = Z_p + R \sin \beta \quad (1)$$



Рис. 3 Розташування деформаційних марок

Для виразів (1) нескладно отримати зворотні вирази, для обчислення кутів та відстаней через координати опорних пунктів та координати деформаційних марок:

$$\left. \begin{aligned} R_{p1} &= \sqrt{(X_p - X_1)^2 + (Y_p - Y_1)^2 + (Z_p - Z_1)^2}; \\ z_{p1} &= \arccos\left(\frac{Z_p - Z_1}{R_{p1}}\right) \quad \beta_{p1} = \arccos\left(\frac{X_p - X_1}{R_{p1} \sin z_{p1}}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Звичайно необхідно виконувати спостереження кожної марки мінімум з двох точок з подальшою процедурою зрівнювання.

Згідно з методикою визначення деформацій, що запропонована в роботі [5] для планових зміщень, розробимо методику для визначення просторових зміщень.

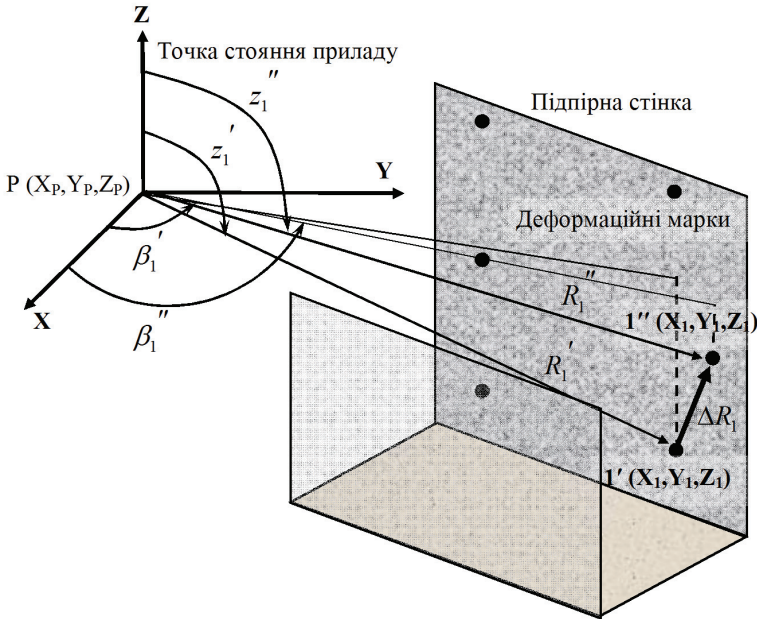


Рис. 4 Визначення деформації підпірної стінки

Головна ідея полягає у безпосередньому визначенні переміщень марок за вимірними в кожному циклі кутами та відстанями. При зрівнюванні кутових та лінійних вимірів вирішують рівняння деформацій, що відповідають вимірним величинам. В результаті зрівнювання отримують шукані зміщення деформаційних марок. Для кожної деформаційної марки в другому та наступних циклах спостережень можна скласти три рівняння деформацій:

$$\left. \begin{aligned} a_{p1} \delta X_1 + b_{p1} \delta Y_1 + c_{p1} \delta Z_1 + l_{\beta 1} &= v_{\beta 1} \\ d_{p1} \delta X_1 + e_{p1} \delta Y_1 + f_{p1} \delta Z_1 + l_{z1} &= v_{z1} \\ g_{p1} \delta X_1 + h_{p1} \delta Y_1 + k_{p1} \delta Z_1 + l_{R1} &= v_{R1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де  $a_{p1}, b_{p1}, c_{p1}, d_{p1}, e_{p1}, f_{p1}, g_{p1}, h_{p1}, k_{p1}$  частинні похідні, від (2) за вимірними величинами;  $l_{\beta 1} = \beta_1 - \beta_1'$ ;  $l_{z1} = z_1 - z_1'$ ;  $l_{R1} = R_1 - R_1'$  - вільні члени, що обчислені, як різниці між вимірними величинами в першому і наступному циклах;  $\delta X_1, \delta Y_1, \delta Z_1$  - шукані деформації після двох циклів спостережень.

Не будемо наводити вирази для обчислення частинних похідних через їх громіздкість. Вкажемо, що визначення координат деформаційних марок за виразами вимірними кутами та відстанню цілком співпадає з вимірюваннями, що виконуються при вирішенні геометричних задач космічної геодезії, зокрема

варіант, коли спостережуваними величинами є: топоцентричне схилення  $\delta$ , топоцентричне пряме сходження  $\alpha$  та топоцентрична відстань  $\rho$ . Отже значення частинних похідних можна отримати наприклад з [6] простою заміною вимірних величин, враховуючи, що  $z = 90 - \delta$ . Кількість векторів зміщень дорівнює  $3n$ , де  $n$  – кількість деформаційних марок. Вектор просторових переміщень отримують з класичного рішення за методом найменших квадратів.

$$\delta \mathbf{R} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \quad (4)$$

Така методика обробки також дозволяє виконати оцінку точності визначення деформацій через коефіцієнти оберненої матриці.

Тепер звернемо увагу на вплив похибок пунктів спостережень на похибку визначення переміщення. Як правило координати пунктів на приймають безпомилковими, чого звичайно не можна вважати при багатоступеневій геодезичній мережі. Тому з методичної точки зору найбільш вдалим вирішенням такої проблеми є задача зрівнювання з врахуванням похибок вихідних даних. Згідно з [7] допустиму середню квадратичну похибку вихідних даних якою можна знехтувати при визначенні координат точок обчислюють за виразом:

$$m_{\text{вих}}^2 \leq 0,11 m_{\text{вим}}^2 \quad (5)$$

Таким чином можна визначити точність визначення координат вихідних пунктів відносно яких визначають переміщення підпірної стінки.

Таблиця 1

**СКП визначення координат опорних пунктів**

| СКП визначення деформації, мм | СКП вихідних пунктів, мм |
|-------------------------------|--------------------------|
| 2                             | 0,7                      |
| 5                             | 1,6                      |
| 10                            | 3,3                      |

У випадку, коли похибками вихідних даних знехтувати неможливо необхідно відповідно до рекомендацій [7] виконувати зрівнювання з врахуванням похибок вихідних даних.

Другою важливою задачею є згідно до основних принципів розрахунку будівельних конструкцій, дослідження стійкості. Окрім визначення критичних місцевих деформацій важливим є також визначення положення підпірної стінки в цілому. Зазвичай таку задачу вирішують шляхом апроксимації отриманих координат точок стінки площиною. За отриманими параметрами площини можна встановити орієнтацію підпірної стінки і зробити висновки, щодо її стійкості.

З метою визначення рівняння апроксимуючої площини в нормальній формі використаємо алгоритм запропонований в [8]. Рівняння площини в нормальній формі має вигляд:

$$AX + BY + CZ + D = 0 \quad (5)$$

Сформуємо матрицю **P** координат деформаційних марок після *i*-го циклу та матрицю **C**, що містить середні значення координат:

$$P = \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} \frac{\sum X_n}{n} & \frac{\sum Y_n}{n} & \frac{\sum Z_n}{n} \end{pmatrix}$$

Обчислимо матрицю **M**

$$\mathbf{M} = n\mathbf{C}^T\mathbf{C} - \mathbf{P}^T\mathbf{P}$$

Для матриці **M** обчислюємо **E** – вектор елементами якого є власні значення матриці **M** та **V** – матриця, що містить нормовані власні вектори, що відповідають власним значенням матриці **M**. Для максимального власного значення з **E** отримуємо власний вектор **N**. Коефіцієнти рівняння площини дорівнюють:

$$-\mathbf{N} = (A \quad B \quad C)^T \quad D = \mathbf{N}\mathbf{C}^T$$

Маючи рівняння площини в нормальній формі можна обчислити наприклад критичний кут нахилу підпірної стінки  $\theta$

$$\cos\theta = \frac{|A_0A_1 + B_0B_1 + C_0C_1|}{\sqrt{A_0^2 + B_0^2 + C_0^2} \sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}}$$

Процедура розрахунку власних значень матриць та нормованих власних значень векторів, що їм відповідають, досить добре розроблена і є практично у всіх математичних програмних засобах.

**Висновки** В роботі запропоновано комплексне рішення визначення деформацій підпірних стінок. Отримані результати включають в себе технологію спостереження за деформаціями, методику математичної обробки результатів спостережень та пропозиції щодо інтерпретації отриманих результатів. Наступним етапом досліджень має бути визначення необхідної точності спостережень та розрахунок точності запропонованої технології визначення деформацій підпірних стінок.

### Список літератури

1. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений ГОСТ 24846-81 М., Госстройиздат, 1982.
2. Левчук Г.П., Новак В.Е., Лебедев Н.Н. Прикладная геодезия. Геодезические работы при изысканиях и строительстве инженерных сооружений. Под. ред.. Г.П. Левчука. - М.: Недра, 1983 - 400с.
3. Roderik Lindenberg, Norbert Pfeifer, Tahir Rabbani. Accuracy analysis of the leica HDS3000 and feasibility of tunnel deformation monitoring. ISPRS WG III/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands, September 12-14, 2005 6p.
4. Хамид Фарамарз Пур Разработка методов анализа деформаций подземных сооружений: Автореф. дис. кандидата техн. наук: 25.00.32/ Московский государственный университет геодезии и картографии – М., — 2007 г. -17 с.
5. Геодезические работы при строительстве мостов В.В. Грузинов, О.Н. Малковский, В.Д. Петров, Под ред. В.А. Коугия, – Москва „Недра”, 1986.- 346 с.
6. Машимов М.М Уравнивание геодезических сетей. - М.: Недра, 1979 - 367с.
7. Маркузе Ю.И. Основы уравнительных вычислений. – М.: Недра, 1990. - 240с.
8. Никулин Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005 – 560 с.

### Анотація

В роботі запропоновано технологію визначення просторових переміщень підпірних стінок з використанням електронних тахеометрів та розроблено методику обробки результатів спостережень.

### Аннотация

В работе предложено технологию определения пространственных перемещений подпорных стенок с использованием электронных тахеометров и разработана методика обработки результатов наблюдений