



## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНИХ РОБІТ ПРИ БУДІВНИЦТВІ МОСТОВИХ ПЕРЕХОДІВ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ

*Рассматриваются вопросы точности инженерно-геодезических работ при строительстве мостовых переходов, использования для этого данных о функционировании элементов конструкции и их напряженно-деформированном состоянии. Предложено методика определения точности инженерно-геодезических наблюдений при строительстве мостовых переходов на разных этапах.*

*The matter under consideration includes the accuracy of engineering and geodetic works in highway stream crossings construction, using construction elements functioning data and their stressedly-deformed state. The methods of accuracy ranking for engineering and geodetic survey in highway stream crossings construction at different stages of completion are proposed.*

**Вступ та постановка проблеми.** Мости є унікальними і складними спорудами, які повинні виконувати свої функції не менше як сто років. Тому дуже важливим питанням було і залишається надійність таких споруд. Головний чинник надійності мостової конструкції – точність монтажу її елементів, яка залежить передусім від точності геодезичних робіт.

Проблема визначення точності геодезичних робіт для забезпечення будівництва мостів досі не вирішена. Вважаємо, що завдання нормування таких робіт можна вирішити в ході визначення характеристик напружено-деформованого стану мостових переходів.

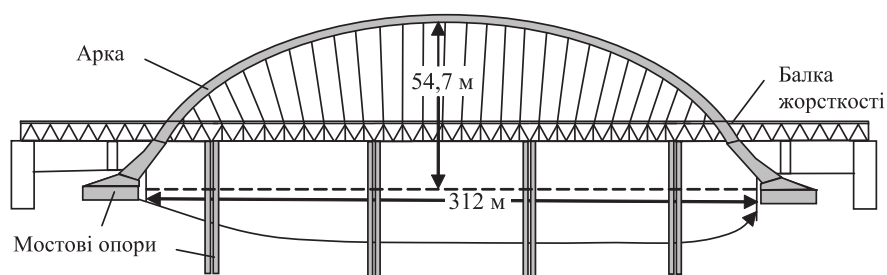
**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням обґрунтування точності геодезичних робіт при будівництві складних споруд займалися М. Г. Відуєв [3], П. І. Баран [1], С. П. Войтенко [4], Т. Т. Чмчян [10] та інші. Методи, описані ними, дозволяють визначати точність геодезичних спостережень і при будівництві мостів. Проте, на нашу думку, ці методи не повною мірою відповідають сучасним вимогам, тому що не враховують особливості функціонування готової споруди – моста.

**Метою** даної публікації є постановка та вирішення проблеми нормування точності інженерно-геодезичних робіт на різних етапах будівництва мостових переходів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Під час будівництва та в ході експлуатації інженерних споруд виникає явище деформації елементів конструкції внаслідок впливу різних чинників, у т. ч. й викликаних помилками у точності виготовлення будівельних конструкцій, в точності монтажу і в точності геодезичних розмічувальних робіт. Під дією зовнішніх сил, таких як вітер, температура, та власної маси конструкції загальна деформація зростає, що спричинює додаткові внутрішні на-

пруження та зміщення вузлів у конструкції.

Як приклад розглянемо арковий мостовий перехід (мал. 1). Основна несуча конструкція моста – безшарнірна арка прольотом  $l = 312$  м, стріла її підйому  $f = 54,7$  м. Контур осі арки, судячи з її геометричних розмірів, – квадратна парабола. За допомогою тросів арка підтримує балку жорсткості – конструкцію, яка забезпечує пересування по мосту. Балка жорсткості є нерозрізною фермою. Таку конструкцію, завдовжки 312 м має Подільський мостовий перехід через р. Дніпро у Києві.



Мал. 1. Принципова схема аркового мостового переходу

Визначення характеристик напружено-деформованого стану мостового переходу виконується в два етапи методами будівельної механіки. На першому етапі будується фізична модель реальної конструкції. Така модель передбачає ідеалізацію геометричних характеристик елементів конструкції, характеристик її взаємодії з іншими, різних зовнішніх впливів та поведінки конструкції при цьому.

На другому етапі за визначеною фізичною моделлю будують математичну, яка дозволяє виявити напружено-деформований стан кожного елемента конструкції та ступінь його відхилення під впливом зовнішніх чинників.

Для встановлення точності геодезичних робіт будемо поетапно визначати напружено-деформований стан конструкції мостового переходу.

Такими етапами будівництва мостових переходів є спорудження мостових опор, монтаж балки жорсткості та монтаж арки мостового переходу.



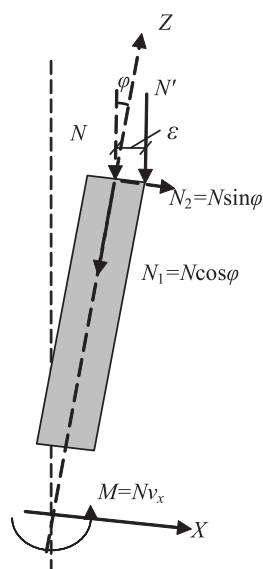
**Зведення мостових опор.** Тимчасові мостові опори служать для підтримки конструкції балки жорсткості та арки під час будівництва мостового переходу. Опори такого типу зазвичай використовуються при спорудженні балкових мостових переходів. При монтажі цих опор найчастіше виникають такі технологічні помилки: порушення вертикальності монтажу опори та помилки встановлення опори у плані.

У першому випадку, коли опору встановлено під деяким кутом нахилу, велике зовнішнє навантаження від конструкцій прогонів моста згинає її. Це призводить до зменшення утримувальної здатності опори, а при надмірних кутах нахилу – і до втрати нею стійкості й, зрештою, до руйнування.

У другому випадку вектор навантажень від конструкцій прогонів моста проходить не через вісь опори, що зумовлює додаткове напруження у тілі опори і також вигинає її.

Побудуємо розрахункову модель поведінки опори внаслідок дії вказаних помилок монтажу опори. На мал. 2 зображена нахилена на кут  $\varphi$  опора під дією стискної сили  $N$ .

Зобразимо опору у вигляді однорідного стрижня сталого перерізу. Стрижень закріплюється нижнім торцем. На верхній торець діє сила  $N'$ , яка стискує його.



Мал. 2. Основні сили, що діють на мостові опори:  
 $N'$  – сила тиску на опору від прогінних конструкцій;  
 $N$  – сила тиску на опору уздовж її осі;  
 $N_1$  – поздовжня проекція сили тиску на опору;  
 $N_2$  – поперечна проекція сили тиску на опору;  
 $\varphi$  – кут нахилу опори;  
 $\varepsilon$  – ексцентриситет передачі навантаження на мостову опору

На прогин верхнього торця опори впливають всі названі в підписі до мал. 2 чинники, тому точно визначити сумарну їх дію неможливо. Тож визначимо цю характеристику наближено, використовуючи принцип суперпозиції дії окремих сил:

$$v_x = v_v + v_\varepsilon + v_l, \quad (1)$$

де  $v_v$  – прогин верхнього торця опори під дією поперечної сили;  $v_\varepsilon$  – прогин верхнього торця опори під дією ексцентриситету передачі навантаження;  $v_l$  – прогин верхнього торця опори, спричинений встановленням опори із деяким відхиленням від вертикалі.

Повний прогин верхнього торця опори визначаємо наближено за формулою

$$v_x = \frac{Nl^3}{3EI} + \frac{N\varepsilon l^2}{2EI} + \varphi, \quad (2)$$

де  $E$  – модуль Юнга;  $I$  – момент інерції перетину опори;  $l$  – висота мостової опори.

Питаннями деформації стрижня, закріпленого в одній точці, займався М. В. Корноухов [6]. Він вивів рівняння дій сил у стрижні, що виникають при стисненні:

$$v_x = v_0 + L\varphi \sin \frac{x}{L} - \frac{M_0}{N \cos \varphi} \left(1 - \cos \frac{x}{L}\right) - L \operatorname{tg} \varphi \left(\frac{x}{L} - \sin \frac{x}{L}\right); \quad (3)$$

$$M = \frac{EI}{L} \varphi \sin \frac{x}{L} + M_0 \cos \frac{x}{L} + N \sin \varphi L \sin \frac{x}{L}, \quad (4)$$

де  $L$  – коефіцієнт, який визначають за формулою

$$L = \sqrt{\frac{EI}{N}} \quad M_0 - \text{момент, що діє в затисненому кінці стрижня: } M_0 = Nv_x.$$

Зробимо підстановку:

$$\varphi + \frac{Nl^3}{3EI} + \frac{N\varepsilon l^2}{2EI} = L\varphi \sin \frac{l}{L} - \left(\varphi + \frac{Nl^3}{3EI} + \frac{N\varepsilon l^2}{2EI}\right) \left(1 - \cos \frac{l}{L}\right) - L\varphi \left(\frac{l}{L} - \sin \frac{l}{L}\right); \quad (5)$$

$$N\varepsilon = \frac{EI}{L} \varphi \sin \frac{l}{L} + \left(\varphi + \frac{Nl^3}{3EI} + \frac{N\varepsilon l^2}{2EI}\right) N \cos \frac{l}{L} + N\varphi L \sin \frac{l}{L}. \quad (6)$$

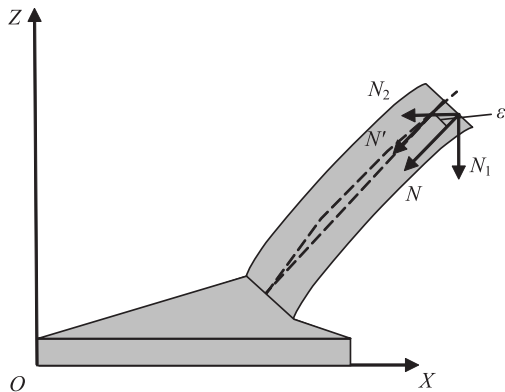
Маємо:

$$\varepsilon = \frac{\frac{EI}{L} \varphi \sin \frac{l}{L} + \frac{l^3 N^2}{3EI} \cos \frac{l}{L} + N\varphi \cos \frac{l}{L} + N\varphi L \sin \frac{l}{L}}{N - \frac{N^2 l^2}{2EI} \cos \frac{l}{L}}; \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{\left(N - \frac{Nl^2}{2EI} \cos \frac{l}{L}\right) \left(2 \frac{Nl^3}{3EI} + \frac{Nl^3}{3EI} \cos \frac{l}{L}\right) + \left(N - \frac{Nl^2}{2EI} \cos \frac{l}{L}\right) \left(2L \sin \frac{l}{L} - l\right) + \frac{Nl^2}{2EI} \left(2 - \cos \frac{l}{L}\right) \frac{N^2 l^3}{3EI} \cos \frac{l}{L}}{-\frac{Nl^2}{2EI} \left(2 - \cos \frac{l}{L}\right) \left(\frac{EI}{L} \sin \frac{l}{L} + Nl \cos \frac{l}{L} + Nl \sin \frac{l}{L}\right)}. \quad (8)$$



**Аркові мостові опори.** Головна відмінність таких опор – вони сприймають як вертикальні, так і горизонтальні навантаження від моста (від так званого розпору арки). Їх навмисно роблять нахиленими (криволінійними) – ставлять під деяким кутом нахилу для протидії силам впливу маси моста та розпору арки. На мал. 3 показано схему такої мостової опори та сили, що діють на неї.



Мал. 3. Схема аркової мостової опори:  
 $N_1$  – вертикальна складова тиску на мостову опору (вага мостового переходу);  
 $N_2$  – горизонтальна складова тиску на мостову опору (розпір арки);  
 $N$  – рівнодія сил тиску моста на опору;  
 $N'$  – проекція рівнодії сил тиску моста на вісь опори

У вертикальній площині необхідно забезпечити правильний кут нахилу опори та проектне положення торця опори. По суті це ті самі величини  $\varphi$  та  $\varepsilon$ , які ми розглядали при аналізі тимчасових мостових опор.

Маємо:

$$(\varphi + \Delta\varphi)l + \frac{Nl^3}{3EI} + \frac{N\epsilon l^2}{2EI} = L(\varphi + \Delta\varphi)\sin\frac{l}{L} - \left( (\varphi + \Delta\varphi)l + \frac{Nl^3}{3EI} + \frac{N\epsilon l^2}{2EI} \right) \left( 1 - \cos\frac{l}{L} \right) - L(\varphi + \Delta\varphi) \left( \frac{l}{L} - \sin\frac{l}{L} \right); \quad (9)$$

$$N\epsilon = \frac{EI}{L} (\varphi + \Delta\varphi)\sin\frac{l}{L} + \left( (\varphi + \Delta\varphi)l + \frac{Nl^3}{3EI} + \frac{N\epsilon l^2}{2EI} \right) N \cos\frac{l}{L} + N(\varphi + \Delta\varphi)L\sin\frac{l}{L}. \quad (10)$$

Звідки

$$\epsilon = \frac{\frac{EI}{L} (\varphi + \Delta\varphi)\sin\frac{l}{L} + \frac{l^3 N^2}{3EI} \cos\frac{l}{L} + N(\varphi + \Delta\varphi)l \cos\frac{l}{L} + N(\varphi + \Delta\varphi)L\sin\frac{l}{L}}{N - \frac{N^2 l^2}{2EI} \cos\frac{l}{L}}; \quad (11)$$

$$\varphi = \frac{\left( N - \frac{Nl^2}{2EI} \cos\frac{l}{L} \right) \left( 2\frac{Nl^3}{3EI} + \frac{Nl^3}{3EI} \cos\frac{l}{L} \right) + \left( N - \frac{Nl^2}{2EI} \cos\frac{l}{L} \right) \left( 2L\sin\frac{l}{L} - l \right) - \frac{Nl^2}{2EI} \left( 2 - \cos\frac{l}{L} + \varphi \right) \frac{N^2 l^3}{3EI} \cos\frac{l}{L}}{\frac{Nl^2}{2EI} \left( 2 - \cos\frac{l}{L} \right) \left( \frac{EI}{L} \sin\frac{l}{L} + Nl \cos\frac{l}{L} + Nl \sin\frac{l}{L} \right)} - \Delta\varphi.$$

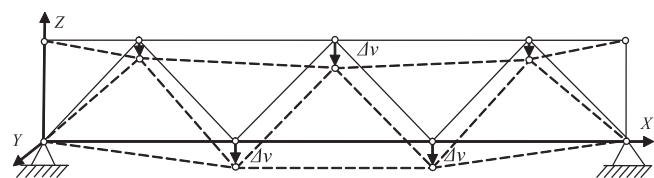
**Монтаж балки жорсткості.** Ця балка є основною частиною мостового переходу, функція якої – сприймати навантаження від проїжджого транспорту. Оскільки зазвичай прогони у мостах великі, а навантаження від власної маси, навантаження додаткових споруд і транспорту теж мають істотні значення, то у вертикальній площині балка жорсткості має вигляд ферми.

При будівництві балки жорсткості необхідно відслідковувати такі параметри:

- довжину самої балки та її окремих елементів;
- встановлення елементів балки строго по осі мостового переходу;
- висотну складову елементів балки згідно з проектом.

Зуважимо, що найістотнішим із цих параметрів є останній. При великих навантаженнях навіть незначне відхилення у положенні деяких елементів балки жорсткості може призвести до появи суттєвих надлишкових напружень у конструкції і, відповідно, до її руйнування.

Вертикальні зміщення точок стрижнів відповідного поясу змінюються згідно з лінійним законом, оскільки згин стрижнів у розрахунковій моделі ферми відсутній (мал. 4).



Мал. 4. Вертикальні зміщення вузлів ферми

Вважаємо, що робити повний розрахунок стійкості балки жорсткості за всіма параметрами геодезістам недоцільно. Такий розрахунок проводять проектувальники. При проектуванні конструкції враховуються нормативні значення навантажень при різних коефіцієнтах умов роботи (вони змінюються в межах 1,1 – 1,4, а в середньому береться коефіцієнт 1,2). По суті це означає, що при розрахунку на 20 % підвищено значення розрахункового моменту, який з'являється в конструкції під дією різних чинників. Виходить, що допускається надлишкове навантаження на арку на 20 %. Саме на це значення і розраховується допустима похибка в геодезичних вимірах.



Розглядаючи найгірший варіант, припускаємо, що зусилля у сусідніх вузлах ферми моста в навантаженому стані розподілені в різні сторони:

$$\Delta z = 2\Delta v = \sum_{j=1}^n \frac{S_i^j S_p^j l^j}{EF^j}, \quad (13)$$

де  $S_i^j$  – зусилля, які виникають в  $j$ -му стрижні ферми під дією одиничного навантаження;  $S_p^j$  – зусилля, які виникають в  $j$ -му стрижні ферми під час проектного навантаження;  $F^j$  – площа поперечного перетину стрижня.

Маємо:

$$\Delta z = \frac{1}{2 \cdot 10^5} \left( \frac{0,5 \cdot 1 \cdot 8}{0,0624} \cdot 2 + \frac{0,707 \cdot 0,628 \cdot 5,656}{0,0392} \cdot 4 + \frac{1 \cdot 0,718 \cdot 8}{0,0448} \right) = 3,5 \text{ мм.}$$

У конструкції ферми основну лінійну деформацію забезпечують пояси. Тому необхідно визначити, наскільки максимально можна розтягнути або стиснути пояс ферми, щоб він не втратив міцність.

Із закону Гука випливає:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (14)$$

де  $\varepsilon$  – відносна деформація поясу, яку визначають з виразу  $\varepsilon = \Delta l/l$ ;  $E$  – модуль пружності матеріалу (сталі) на розтяг та стиснення (для сталі  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа).

Оскільки ферми виготовляють на заводах у вигляді окремих елементів, а на місці будівництва їх лише збирають, то геодезичний контроль вже не може вплинути на зміну довжини конструкцій прогонів. Тому в ході монтажу мостового переходу одним із видів геодезичних робіт є тільки перевірка його довжини та визначення довжини компенсаційної вставки.

Допустиму поздовжню деформацію мостового переходу (вісь  $OX$ ), а звідси і точність монтажних робіт, визначають за формулою

$$\Delta l = \frac{0,2[\sigma]_{\text{матер}}}{E} l, \quad (15)$$

де  $l$  – довжина елемента (конструкції прогону).

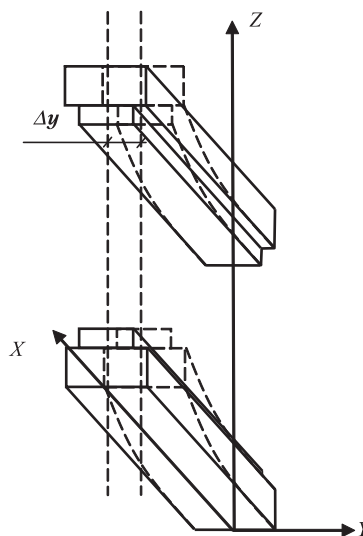
При довжині мостового переходу  $l = 312$  м маємо:  $\Delta l = 237$  мм.

У горизонтальній площині ферму можна представити у вигляді двох стрижнів, які діють разом (мал. 5).

Запишемо допустиме напруження, яке виникає при згинанні стрижня:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M}{W_x}, \quad (16)$$

де  $W_x$  – момент опору перерізу при згинанні;  $W_x = \frac{I}{y_{\text{max}}}$ ;  $I_x$  – момент інерції перерізу;  $y_{\text{max}}$  – максимальна відстань від осі перерізу до його крайньої точки.



Мал. 5. Згин поясів балки жорсткості під дією монтажних похибок

Якщо всі елементи конструкції балки жорсткості будуть встановлені ідеально, тобто без відхилень, то моменти сил на стиках елементів дорівнюватимуть нулю. У разі відхилення моменти сил, що виникають у стрижні, знайдемо за формулою

$$M = Nl, \quad (17)$$

де  $l$  – довжина стрижня;  $N$  – сила, яка згинає кінець стрижня.

Силу  $N$ , під дією якої згинається стрижень, визначимо за формулою

$$N = \frac{3EI\Delta y}{l^3}, \quad (18)$$

де  $\Delta y$  – прогин стрижня на кінці (максимальний прогин).

Запишемо залежність моменту, який виникає в балці жорсткості, від похибки збирання. Для визначення точності геодезичних робіт використаємо принцип, описаний у праці [9].

Як було наголошено вище, при ідеальному збиранні елементів балки жорсткості моменти сил на стику елементів дорівнюють нулю. Якщо елементи встановлені з похибкою, у місці їх стику виникнуть додаткові моменти сил.

Оскільки спостереження при встановленні елементів моста необхідно виконувати по кожному вузлу балки жорсткості, точність геодезичних робіт визначимо з виразу [9]

$$m = \frac{Ml^2}{EI\pi^2}, \quad (19)$$

де  $m$  – СКП визначення планового положення вузлів балки жорсткості;  $l$  – відстань між вузлами балки жорсткості.

Тоді точність встановлення кожного вузла конструкції прогону в проектне положення по осі  $OY$  становитиме:



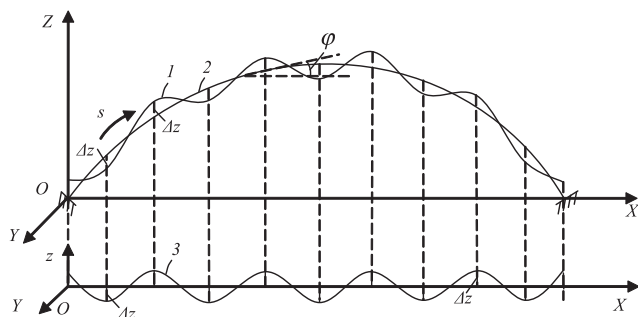
$$m = \frac{l^2}{EI\pi^2} \sigma_{\max} \cdot \frac{I}{y_{\max}} = \frac{\sigma_{\max} l^2}{E\pi^2 y_{\max}}. \quad (20)$$

При  $\sigma_{\max} = 2292 \text{ кг/см}^2$ ,  $l = 8 \text{ м}$ ,  $y_{\max} = 0,71 \text{ м}$  маємо:  $m = 11 \text{ мм}$ .

**Монтаж арки мостового переходу.** У мостових спорудах арка є основною опорною конструкцією моста, оскільки саме вона приймає основне навантаження. На арку дуже великий вплив має геометрія конструкції або, іншими словами, точність, з якою була витримана геометрія арки під час монтажу.

Конструктивно арка добре “працює” у вертикальній площині, тобто у тій площині, в якій зігнута. Отже, виходить, що горизонтальні навантаження на арку слід по можливості зводити до мінімуму. Оскільки в ході будівництва мостів на арку діють великі навантаження, то навіть незначна дія не у вертикальній площині може спричинити втрату конструкцією стійкості і, як наслідок, її руйнування. Тому часто проектувальники приймають рішення зводити не одну, а дві паралельні арки, зв’язані між собою системою стрижнів.

Через помилки в процесі монтажних робіт вісь арки неминуче деформується. Виникає необхідність визначити критичну межу деформації, щоб це не призвело до істотної зміни опорної здатності арки. На мал. 6 зображено деформовану (1) та проектну (2) осі. У найгіршому випадку, коли виникають найбільші моменти сил, монтажні помилки проявляють себе по-різному.



Мал. 6. Деформована вісь арки в декартовій системі координат:

- 1 – деформована вісь арки в дуговій координаті  $s$ ;
- 2 – проектна вісь арки в дуговій координаті  $s$ ;
- 3 – деформована вісь арки в прямокутній координаті  $x$ .

Розрахунку аркових систем у будівельній механіці приділяється особлива увага. Існує залежність між деформаціями осі арки та силами і моментами сил, що виникають у процесі функціонування арки:

$$N = EF(s) \frac{du_s}{ds}; \quad (21)$$

$$M = EI(s) \frac{d^2v_s}{ds^2}. \quad (22)$$

Проте ці формули не дуже підходять геодезистам. Проблема в тому, що під час спостережень геодезисти вимірюють значення  $u_x$  і  $v_x$  – компоненти відповідно горизонтального та вертикального зміщення точок арки, а у формулах задіяні елементи зміщення  $u_s$  і  $v_s$  в дуговій координаті  $s$ . Для геодезистів важливо визначити функції, якими описуються компоненти напружено-деформованого стану, що містять незалежну змінну горизонтальну координату  $x$ , а не дугову  $s$ . Тому похідні стосовно дугової координати у співвідношеннях (14) та (22) замінимо на похідні по  $x$ :

$$N = EF(x) \cos \varphi \frac{du_x}{dx}; \quad (23)$$

$$M = EI(x) \cos^2 \varphi \left( \sin 2\varphi \frac{4f}{l^2} \frac{dv_x}{dx} + \frac{d^2v_x}{dx^2} \right), \quad (24)$$

де  $\varphi$  – кут між дотичною до осі арки в даній точці та віссю  $OX$ .

У цьому випадку криву деформованої осі арки можна розвернути на прямокутну координату  $x$ .

Хоча відстань між контрольними точками уздовж арки різна, на окремій ділянці між сусідніми контрольними точками крива прогинів (див. мал. 2) може бути апроксимована косинусоїдою (у площині  $XOZ$ ):

$$v_x = a \cos bx, \quad (25)$$

де  $a$ ,  $b$  – коефіцієнти апроксимації кривої;  $v_x$  – прогин арки по осі  $OZ$  (на мал. 6 –  $\Delta z$ ).

Знаходимо першу та другу похідні:

$$\frac{dv_x}{dx} = -ab \sin bx; \quad \frac{d^2v_x}{dx^2} = -b^2 v_x. \quad (26)$$

Робимо заміни:

$$\max \left| \frac{dv_x}{dx} \right| = a = m_z; \quad \sin bx = 1; \quad b = \frac{\pi}{l_m}, \quad (27)$$

де  $l_m$  – відстань між контрольними точками.

Тоді приріст моментів сил, що діють в арці, виразиться так:

$$\Delta M = EI(x) \cos^2 \varphi \left( -\sin 2\varphi \frac{4f}{l^2} m_z \frac{\pi}{l_m} - \frac{\pi^2}{l_m^2} m_z \right). \quad (28)$$

Середню квадратичну похибку геодезичних робіт у вертикальній площині знаходимо за формулою

$$m_z = \frac{\Delta M}{EI(x) \cos^2 \varphi \left( \sin 2\varphi \frac{4f}{l^2} \frac{\pi}{l_m} + \frac{\pi^2}{l_m^2} \right)}. \quad (29)$$

При  $\Delta M = 5,21 \cdot 10^4 \text{ кНм}$ ,  $l = 312 \text{ м}$ ,  $f = 54,7 \text{ м}$ ,  $E = 2,13 \cdot 10^8 \text{ кН/м}^2$ ,  $I = 2,4988 \text{ м}^4$ ,  $l_m = 45,9 \text{ м}$  матимемо:  $m_z = 8,8 \text{ мм}$ , при  $l_m = 75,6 \text{ м}$  матимемо:  $m_z = 14,5 \text{ мм}$ .

Аналогічно визначаємо точність геодезичних робіт при монтажі елементів арки в горизонталь-



ній площині ( $XOY$ ). При визначенні точності геодезичних робіт у горизонтальній площині слід враховувати технологію будівництва мостового переходу. На відміну від вертикальної площини, довжина арки та її геометрична вісь у горизонтальній площині контролюється встановленням компенсаційної вставки. Тому важливо отримати точність геодезичних робіт при визначенні довжини компенсаційної вставки. Виконаємо розрахунки.

Крива прогинів арки може бути апроксимована таким рівнянням:

$$u_x = c \cos dx, \quad (30)$$

де  $c, d$  – коефіцієнти апроксимації кривої;  $u_x$  – прогин арки по осі  $OX$ .

Знаходимо першу похідну цього рівняння:

$$\frac{du_x}{dx} = -c d \sin dx \quad (31)$$

Робимо заміну:

$$\max \left| \frac{du_x}{dx} \right| = c = m_x; \quad \sin dx = 1; \quad d = \frac{\pi}{l_m}. \quad (32)$$

Матимемо:

$$N = -EF(x) \cos \varphi m_x \frac{\pi}{l_m}. \quad (33)$$

Тоді СКП геодезичних робіт у горизонтальній площині становитиме:

$$m_x = \frac{N l_m}{EF \cos \varphi \pi}. \quad (34)$$

При  $\Delta M = 5,21 \cdot 10^4$  кНм,  $l = 312$  м,  $f = 54,7$  м,  $E = 2,13 \cdot 10^8$  кН/м<sup>2</sup>,  $F = 0,7164$  м<sup>2</sup>,  $l_m = 312$  м матимемо:  $m_x = 28,7$  мм.

У напрямі осі  $OY$  арка працює як прямолінійний стрижень. Тому розрахунок точності геодезичних робіт при будівництві арки в напрямі  $OY$  аналогічний процесу розрахунку балки жорсткості.

Тоді СКП встановлення кожного вузла арки у проектне положення (по осі  $OY$ ) визначимо за формулою

$$m_y = \frac{\sigma_{\max} l^2}{E \pi^2 y_{\max}}. \quad (35)$$

Слід зауважити, що для забезпечення вказаної точності геодезичного забезпечення будівництва мостового переходу необхідно враховувати деформацію металевих конструкцій мосту за раху-

нок температури. При цьому вимірювати температуру металу необхідно в декількох місцях одночасно як на сонячній, так і на тіньовій сторонах конструкції.

**Висновки та перспективи дослідження.** Розглянута методика визначення середньоквадратичної похибки геодезичних робіт при монтажі конструкцій мостів дозволяє оптимізувати технологію завдяки правильному вибору методу розмічування та засобу вимірювання. Під час будівництва мостів слід забезпечити високу точність монтажу елементів конструкції за рахунок удосконалення технології будівельного виробництва, а саме укрупнення деталей моста на стапелі, спорудження моста з обох берегів одночасно тощо. Для таких складних та унікальних об'єктів, як мости, доцільно визначити технологію і точність геодезичних робіт, враховуючи подальшу експлуатацію споруди. Автори зараз працюють над питаннями адаптування даної методики визначення точності геодезичних робіт на інших типах мостів.

#### Література

1. Баран П. И. Геодезические работы при монтаже и эксплуатации оборудования. – М.: Недра, 1990. – 233 с.
2. Будур А. И., Белогуров В. Д. Стальные конструкции. Справочник конструктора. – К.: Сталь, 2004. – 210 с.
3. Видуев Н. Г., Чмчян Т. Т. Теория размерных цепей. – К.: КИСИ, 1965. – 55 с.
4. Войтенко С. П. Геодезические исследования точности возведения зданий и сооружений: Дис... канд. техн. наук / Киев. инж.-строит. ин-т. – К., 1971. – 175 с.
5. Дарков А. В., Шапошников Н. Н. Строительная механика: Учеб. для строит. спец. вузов. – 8-е изд. – М.: Высш. шк., 1986. – 607 с.
6. Корноухов Н. В. Избранные труды по строительной механике. – К.: Изд-во АН УССР, 1963. – 284 с.
7. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – К.: Сталь, 2002. – 600 с.
8. Староверов В. С. К определению точности и периодов наблюдений осадок инженерных сооружений // Инж. геодез. – 1978. – Вып. 32. – С. 57-61.
9. Староверов В. С., Бачишин Б. Д., Егоров А. И. Расчет точности положения узла сборных сооружений // Инж. геодез. – 2001. – Вып. 46. – С. 81-85.
10. Чмчян Т. Т. Расчет точности геодезических работ в строительстве: Справочник. – М.: Недра, 1988. – 150 с.

Надійшла 23.06.09