

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

**АДАМЕНКО ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ**

УДК 528.48

**МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ТОЧНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНИХ РОБІТ ПРИ  
ЗВЕДЕННІ МОСТІВ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-  
ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ**

05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового  
ступеня кандидата технічних наук

Київ 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському національному університеті будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

**Науковий керівник**

кандидат технічних наук, професор, **Староверов Володимир Сергійович**, Київський національний університет будівництва і архітектури, професор кафедри інженерної геодезії.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор, **Могильний Сергій Георгійович**, Донецький національний технічний університет, завідувач кафедри геоінформатики і геодезії;

кандидат технічних наук, **Білоус Микола Васильович**, директор дочірнього підприємства «Укргеодезмарк» Публічного акціонерного товариства «Київметробуд».

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 р. о \_\_\_ годинні на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.09 у Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03680, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31, ауд. 319.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03680, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, доцент

О. П. Ісаєв

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасні тенденції розвитку галузі будівництва полягають в ускладненні конструктивних рішень об'єктів будівництва для покращення їх дизайну, вирішення проблем міцності та технології будівництва. Одним із важливих напрямів будівництва є спорудження мостів, де в останні часі з'явилася тенденція перекриття все більших та все складніших водотоків. Так як будівництво мостів дуже складне і відповідальне завдання, останні повинні виконувати свої функції упродовж довгого часу, на період не менше за сотню років. Для забезпечення тривалого та надійного строку експлуатації таких відповідальних споруд, необхідно приділити особливу увагу точності відтворення геометрії конструкції. Однією із основних складових відтворення геометрії конструкцій мостів є геодезичне забезпечення їх монтажу.

Об'єм геодезичних спостережень визначається типом, виглядом і розмірами запроектованої споруди, місцевими умовами та ступенем їх вивченості. Досвід будівництва і експлуатації мостових переходів вказує на те, що нормативна база, яка регламентує об'єм та точність геодезичних робіт не відповідає сучасним вимогам. Вимоги, які наведені в існуючих нормативних документах неповні, і стосуються здебільшого точності та конфігурації планової та висотної геодезичної основи під час будівництва. Самі методи, якими виконуються нормування точності геодезичних робіт, використовують дані про геометрію споруди, але не враховують її роботу. В результаті, для деяких мостових переходів наявні вимоги можуть не забезпечити необхідної точності збирання конструкції, для інших – призвести до необґрунтованого збільшення об'єму геодезичних вимірювань.

Все це приводить до висновку про необхідність більш детальної проробки питань щодо призначення точності робіт при будівництві мостових переходів. Вирішення проблеми нормування точності геодезичних робіт при будівництві мостів можливо вирішити на основі аналізу напружено-деформованого стану їх конструкцій.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Обраний напрямок дисертаційного дослідження безпосередньо пов'язаний з реалізацією законів України "Про автомобільні дороги" (№2862-15, 2005 р.), "Про стандартизацію" (№2408-III, 2001 р.), постанови Кабінету Міністрів (КМ) №768, 2008 р. "Про внесення змін до Державної програми розвитку автомобільних доріг загального користування на 2007 - 2011 роки"; принципів, що визначені в "Рішенні про Концепцію підвищення експлуатаційної надійності мостових споруд на автомобільних дорогах держав - учасниць СНД на 2008 - 2015 роки" (затверджене постановою КМ України №921, 2010 р.). Крім того, принципів, що визначені в "Про затвердження плану заходів з комплексного розв'язання проблем соціально-економічного розвитку м. Києва" (розпорядження КМ №891-р, 2010 р.).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є вирішення науково-прикладної задачі удосконалення методів обґрунтування і розрахунку точності геодезичних робіт при будівництві і експлуатації мостових переходів на основі аналізу їх напружено-деформованого стану. Для досягнення поставленої мети в роботі поставлені та виконані такі основні завдання:

- аналіз існуючих методів геодезичного забезпечення будівництва мостів;
- побудова фізичної та математичної моделей конструкцій мостів;
- розроблення методики розрахунку допустимих похибок будівництва мостів;
- розроблення методики розрахунку точності геодезичних робіт при будівництві мостів на основі результатів моделювання їх конструкцій;
- удосконалення технології геодезичних робіт при будівництві мостів.

**Об'єктом дослідження** є точність геодезичних робіт при будівництві мостів.

**Предметом дослідження** є методи визначення точності монтажних і геодезичних робіт при будівництві мостів.

**Методи дослідження.** Для досліджень використано сучасні математичні методи. Методологічною основою дослідження є принципи і положення будівельної механіки, метод кінцевих елементів, методи статистики, методи аналізу та узагальнення окремих досліджень, теорію розмірних ланцюгів, принципи мізерного та рівного впливу дії помилок вимірювань.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційній роботі виконане теоретичне узагальнення та одержано практичні результати вирішення прикладної задачі визначення точності геодезичних робіт при будівництві мостів, а саме:

1. Розроблено модель попереднього розрахунку і моделювання величин початкових зміщень вузлів конструкцій мостових переходів, яка дозволяє встановити функціональну залежність між допустимими зміщеннями вузлів конструкцій мосту та напруженнями, які виникають в цих конструкціях, для наступних частин мосту:

- опори,
- балка жорсткості,
- аркові конструкції;

2. Розроблено методику розрахунку точності геодезичних робіт при будівництві мостів, яка дозволяє визначити точність геодезичних робіт при забезпеченні монтажу всіх конструкцій мосту;

3. Запропоновано методику визначення точності геодезичних робіт при будівництві мостів за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для розрахунку будівельних конструкцій;

4. Запропоновано методику аналітичного врахування зміщень вузлів будівельних конструкцій при встановленні їх у проектне положення.

### ***Практичне значення одержаних результатів***

Методика визначення точності геодезичних робіт підвищує обґрунтованість та об'єктивність нормування точності геодезичних робіт та підвищує надійність експлуатації мостів. Методика аналітичного врахування зміщень вузлів будівельних конструкцій дозволяє полегшити завдання дотримання геометрії будівельних конструкцій.

Матеріали досліджень використовувалися при розробці проекту виконання геодезичних робіт при будівництві балки жорсткості Подольського мостового переходу.

Результати досліджень доцільно впровадити у виробництво при визначенні точності геодезичних робіт позакласових мостів.

***Особистий внесок здобувача.*** Сформульовані у дисертації наукові положення, висновки і пропозиції належать автору особисто та є його науковим доробком. В наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належить: в [2] – створення та реалізація кінцево-елементної моделі деформації мосту, на основі розрахунку даної моделі була визначена точність геодезичних робіт при будівництві мостів, в [3, 12] – створення математичних моделей повздожньої та поперечної деформації прогонних конструкцій мосту, деформації конструкцій мостових опор, визначення точності геодезичних робіт, в [4, 14] – створення методики врахування дійсних зміщень вузлів будівельної конструкції в процесі її монтажу, в [5] – створення та реалізація математичної моделі деформації мостових опор, визначення точності геодезичних робіт, в [6] – створення математичної моделі повздожньої та поперечної деформації прогонних конструкцій мосту, виконання розрахунків моделі деформації прогонних конструкцій мосту у вертикальній площині, визначення точності геодезичних робіт, в [7] – створення та реалізація математичної моделі деформації аркових мостових опор, в [8] – аналіз існуючих методів нормування точності геодезичних робіт при забезпеченні будівництва мостових переходів, в [9] – реалізація математичної моделі деформації аркових конструкцій, визначення точності геодезичних робіт при забезпеченні будівництва арок мосту, в [10, 13] – аналіз та вдосконалення методики геодезичного моніторингу мостів з урахуванням останніх геодезичних технологій.

***Апробація результатів дисертації.*** Основні положення дисертації доповідались і обговорювались на щорічних науково-практичних конференціях Київського національного університету будівництва і архітектури (м.Київ, 2007-2011 р.р.), конференціях молодих вчених КНУБА (м.Київ, 2007-2011 р.р.), на міжнародних конференціях молодих вчених “GAC-2009” (м.Львів, 2009 р.) та “GAC-2011” (м.Львів, 2011 р.) , на науково-практичній конференції молодих вчених “Політ-2010” (м. Київ, 2010 р.).

***Публікації.*** Основні положення та результати, одержані в дисертаційній роботі, опубліковано у 14 наукових працях. Із них 10 у фахових виданнях. 4 наукові роботи опубліковано в матеріалах

конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 152 сторінки, у тому числі 59 рисунків та 5 таблиць, список використаних джерел із 115 найменувань на 12 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, окреслено зв'язок з науковими планами і темами, сформульовано мету і задачі дослідження та розкрито наукову новизну, наукове і практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі **«Сучасний стан нормування точності геодезичних робіт при будівництві мостових переходів»** приведені загальні відомості про мостові переходи, наведена класифікація мостових переходів в залежності від конструкції та розмірів мостів. Розглянуті питання пов'язані з технологією геодезичних робіт при будівництві мостів.

Аналіз нормативної документації дає підставу говорити, що вона не відповідає сучасним вимогам, а в деяких випадках носить суперечливий характер. Офіційні вимоги до кількості та точності геодезичних робіт при будівництві мостових переходів подані в СНіП 3.01.01-85, СНіП 3.01.03. Слід зауважити, що вимоги, які наведені в цих документах неповні, і стосуються здебільшого точності та конфігурації планової та висотної геодезичної основи під час будівництва. Інші геодезичні роботи, як вказано в цих документах, необхідно виконувати в кількості та з точністю, що наведено в ПВГР. Більше того, вказані в СНіПах норми не мають обґрунтування, тому, при спорудженні деяких (особливо – великих) мостових переходів, вказані норми можуть не дозволити виконати геодезичні роботи з належною якістю і точністю, а при спорудженні інших – бути занадто точними, що в свою чергу призведе до збільшення та подорожчання геодезичних робіт.

Все це приводе до висновку про необхідність подальших досліджень питань призначення точності геодезичних робіт при будівництві мостів.

Найпоширеніший спосіб визначення точності геодезичних робіт - теорія розмірних ланцюгів. Цей спосіб використовується в цивільному будівництві, де набув широкого поширення. Розробив теорію способу М. Г. Відуєв. Ним запропоновані основні положення та ідеї теорії розмірних ланцюгів. Надалі метод був вдосконалений Т. Т. Чмчяном, С. П. Войтенко, В. С. Ситником, Ю. В. Столбовим і іншими. Хоч ці методи і добре себе зарекомендували на практиці, все ж треба зауважити, що вони враховують лише геометрію споруди, не враховуючи роботу самої конструкції.

Питаннями нормування точності геодезичних робіт при будівництві мостових переходів займався і А. А. Атакішієв, зокрема при будівництві висячих мостових переходів. Велику увагу автор приділяв коливанням мостів та вимірюванню амплітуди цих коливань.

У своїй дисертаційній роботі Б. Д. Бачишин вирішує задачу призначення точності геодезичних робіт для будівельних оболонок на основі аналізу напружено-деформованого стану побудованої фізичної моделі конструкції.

Аналогічним методом О. І. Єгоров вирішує задачу призначення точності геодезичних робіт для баштових споруд на основі аналізу напружено-деформованого стану побудованої фізичної моделі споруди.

У цілому необхідно відзначити, що питання про призначення точності геодезичних робіт при забезпеченні будівництва мостів вирішено не повністю. Із розглянутих вище методів деякі виглядають досить перспективними, і тому їх можна застосувати на мостових переходах. В цілому можна сказати, що задачу нормування геодезичних робіт при будівництві мостових переходів можливо вирішити за допомогою моделювання їх напружено-деформованого стану.

У другому розділі «**Розрахунок технологічної точності будівництва мостового переходу**» розглянуті питання побудови фізичних і математичних моделей мостів та їх окремих конструкцій. Геодезичні спостереження за несучими конструкціями дозволяють стежити за загальним станом конструкції, зокрема за напружено-деформованим станом. Проте похибки геодезичних спостережень можуть вплинути на адекватність дослідження реального стану конструкції. З іншого боку, забезпечення занадто високої точності збільшує вартість і трудомісткість геодезичних робіт. Тому актуальним залишається вибір оптимальних параметрів геодезичних робіт, які, з одного боку, забезпечують достатню точність, а з іншого - не призводили до надмірного підвищення трудомісткості.

Для визначення загального стану та аналізу напружень мостового переходу запропоновані моделі його напружено-деформованого стану. Побудова таких моделей є найважливішою і першочерговою задачею, на підставі аналізу якої повинні призначатися точність та методика геодезичних робіт.

Основні вимоги, що виставляються до моделі, – її подібність та адекватність реальній споруді. Зв'язок між побудованою моделлю та реальним процесом забезпечується поєднанням у моделі інформації двох типів:

- 1) логічно обґрунтованих гіпотез, які описують властивості об'єкту моделювання;
- 2) емпіричних даних, які характеризують ці властивості.

Під час побудови фізичної та математичної моделі мосту повинні бути виконані наступні дії:

- ідеалізація геометричних розмірів моста;
- ідеалізація фізичної поведінки споруди;
- ідеалізація дії зовнішніх умов на міст;
- ідеалізація взаємодії окремих елементів моста між собою, та дії рухомого складу на міст.

При необхідності планування геодезичних робіт необхідно враховувати, що конструкції мосту вже спроектовані, тобто проведений розрахунок перетинів стрижнів на всі можливі зовнішні навантаження та їх несприятливі поєднання. По запроектованих перетинах знаходяться очікувані максимальні зусилля в стрижнях ферми:

$$N = F \sigma_{кр} m, \quad (1)$$

де  $N$  – зусилля в стрижні,

$F$  – площа поперечного перетину стрижня,  $\sigma_{кр}$  – допустима напруга матеріалу стрижня,  $m$  – коефіцієнт умови роботи ( по суті, запасу).

Оскільки значення коефіцієнту умови роботи коливаються від 1 до 1,4, то в середньому, вважатимемо  $m=1,2$ . Це означає, що допускається перевантаження стрижня на 20%. Саме на це значення пропонується розраховувати допустиму похибку геодезичних вимірювань.

В дисертаційній роботі, на основі розрахунку міцності, запропоновано виконувати моделювання напружено-деформованого стану для частин моста, які не являють собою окрему, завершену та стійку конструкцію, що може існувати окремо. Прикладом таких частин є арка, ферми, балка жорсткості моста. Для опор мосту та конструкції мосту в цілому, в дисертаційній роботі запропоновано виконувати моделювання зміщень вузлів конструкції на основі розрахунку стійкості. При цьому, моделювання напружено-деформованого стану опор виконується через розрахунок стійкості стисненого стрижня під навантаженням, мосту - за допомогою метода кінцевих елементів в програмному комплексі MSC NASTRAN.

При моделюванні запропоновано мостову опору замінити стрижнем постійного перерізу, встановленого з деяким відхиленням від вертикалі, та защемленого нижнім кінцем. Вважаємо, що фундамент опори побудований на стійкому ґрунті, який під дією навантаження не буде просідати, або просідання буде невеликим, рівномірним та однаковим по всій площі опираючої опори. Мостова опора однорідна по всій своїй довжині, має постійний переріз та складається з одного матеріалу, кожний переріз опори, на будь-якій висоті, однаково сприймає навантаження. Припустимо, що передача навантаження від прогонних конструкцій на опору і з опори на ґрунт відбувається точково, тобто в розрахунковій схемі будуть відсутні всі розподілені навантаження, їх дію буде замінювати точково прикладене навантаження. У нашому випадку необхідно врахувати вплив деяких технологічних похибок при будівництві мостової опори на її міцність і подальшу роботу по передачі навантаження від прогонних конструкцій.

При монтажі мостових опор найбільш важливі такі технологічні похибки: вертикальність монтажу опори та встановлення опори у плані.

У першому випадку, коли опора побудована під деяким кутом нахилу, велике зовнішнє навантаження від конструкцій прогонів моста згинає та нахиляє опору. Це призводить до зменшення несучої здатності опори, а при великих кутах нахилу опори – до втрати стійкості і руйнування. У другому



випадку вектор навантажень від конструкцій прогонів моста проходить не через вісь опори, що в свою чергу призводить до появи додаткових напружень у тілі опори і також вигинає її. Модель поведінки опори під дією вказаних похибок має вигляд:

$$\frac{Pl^3}{3EI} + \frac{P\epsilon^2}{2EI} + \varphi_0 l =$$

$$= v_0 + L\varphi_0 \sin \frac{x}{L} - \frac{P \left( \frac{Pl^3}{3EI} + \frac{P\epsilon^2}{2EI} + \varphi_0 l \right)}{N} \left( 1 - \cos \frac{x}{L} \right) - \frac{P\varphi_0 L}{N} \left( \frac{x}{L} - \sin \frac{x}{L} \right), \quad (2)$$

$$P\epsilon = \frac{EI}{L} \varphi_0 \sin \frac{x}{L} + P \left( \frac{Pl^3}{3EI} + \frac{P\epsilon^2}{2EI} + \varphi_0 l \right) \cos \frac{x}{L} + P\varphi_0 L \sin \frac{x}{L}. \quad (3)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу першого роду,  $I$  – геометричний момент інерції опори,  $N_x$  – поздовжньо прикладена сила по осі стрижня на висоті  $x$ ,  $Q_x$  – поперечно прикладена сила по осі стрижня на висоті  $x$ ,  $v_x$  – відхилення дійсної осі стрижня від проектної на висоті  $x$ ,  $\varphi_x$  – кут повороту осі стрижня на висоті  $x$ ,  $M_x$  – момент сил, що діє в осі стрижня на висоті  $x$ ,

$$L = \sqrt{\frac{EI}{N}}, \quad (4)$$

При  $E = 2,13 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ,  $l = 30 \text{ м}$ ,  $I = 8,68 \cdot 10^{-3} \text{ м}^4$ ,  $F = 0,139 \text{ м}^2$ , маємо  $\varphi_0 = 0,00838$ ,  $\epsilon = 0,251 \text{ м}$ .

Зміщення верхнього торця опори:  $\Delta_{\delta_{mo}} = \varphi_0 l + \epsilon = 0,499 \text{ м}$ .

Основною несучою конструкцією балки жорсткості мостових переходів є ферма. За розрахункову модель ферми, зазвичай приймають шарнірно-стрижньову модель. Хоча в реальній фермі стрижні з'єднуються жорсткими деталями – косинками, проте в розрахунковій моделі вважають, що точка перетину осей стрижнів, що сполучаються, – вузол – забезпечує відсутність вигину в стрижнях. Відсутність згину в стрижнях забезпечуються певними конструктивними рішеннями, зокрема, передачею навантаження у вузли ферми за допомогою додаткових допоміжних конструкцій. Особливість технології будівництва балки жорсткості великих мостів приводить до необхідності контролю довжини як окремих елементів балки жорсткості, ферм, так і самої балки в цілому. У випадку, коли кожний новий фрагмент ферми має встановлюватися у проектне положення, кінцевий елемент у ланцюзі фрагментів балки жорсткості може не вміщатися, або, навпаки, бути завеликим за залишений під нього зазор. При розрахунку допустимих зміщень вузлів конструкції балки жорсткості у вертикальній площині запропоновано її замінити шарнірно-стрижньовою моделлю, при визначенні горизонтальних зміщень – балкою. При будівництві балки

жорсткості необхідно забезпечити дотримання наступних технологічних параметрів:

- довжини балки жорсткості та довжини окремих елементів;
- співвідношенні встановлення елементів балки жорсткості мостового переходу;
- висотного встановлення елементів балки жорсткості у проектне положення.

Технологічну похибку при встановленні конструкції у проектне положення по довжині запропоновано знаходити за формулою:

$$\Delta_l = \frac{0,2\sigma_{кр} l}{E}, \quad (5)$$

При  $\sigma_{кр} = 245 \text{ МПа}$ ,  $E = 2,13 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ,  $l = 80 \text{ м}$  отримуємо  $\Delta_l = 18,8 \text{ мм}$ . Таким чином технологічна похибка по довжині при встановленні конструкції балки жорсткості довжиною 80 метрів у прогоні складає  $\Delta_l = 18,8 \text{ мм}$ .

Технологічну похибку при встановленні конструкції балки жорсткості по осі моста запропоновано знаходити із наступної залежності:

$$\Delta_y = \frac{0,2\sigma_{кр} Fl^3}{2EI}, \quad (6)$$

При  $\sigma_{кр} = 245 \text{ МПа}$ ,  $E = 2,13 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ,  $F = 1,072 \text{ м}^2$ ,  $I = 7,54 \cdot 10^{-3} \text{ м}^4$ ,  $l = 80 \text{ м}$  отримуємо  $\Delta_y = 83,7 \text{ мм}$ . Таким чином технологічна похибка встановлення балки жорсткості у проектне положення складає  $\Delta_y = 83,7 \text{ мм}$ .

Допустимі зміщення вузлів ферми у вертикальній площині запропоновано визначати за формулою Мора. Прикладаємо до вузлів верхнього поясу ферми одиничне навантаження, визначимо епюри сил в ферми під дією одиничного навантаження по способу Верещагіна. Для того, щоб розглянути як найгірший варіант, припускаємо, що знаки зусиль у вантажному стані співпадають із знаками зусиль в одиничному стані.

Маємо:

$$2\Delta_v = \sum_{j=1}^n \frac{S_i^j S_p^j l^j}{EA^j}, \quad (7)$$

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

Отриманий технологічний допуск встановлення балки жорсткості по вертикалі складає  $\Delta_z = 3,5 \text{ мм}$ .

При розрахунку арки вважатимемо, що аркою є зігнутий стрижень змінного перетину. Перетин стрижня змінюється за лінійним законом. Відповідно, жорсткість стрижня змінюється за лінійним законом. Вважатимемо, що стрижень жорстко закріплений на кінцях і на нього діє

вертикальне навантаження, яке прагне його випрямити. Навантаження, що діє на стрижень, розподілене по його довжині рівномірно.

Під дією похибок монтажу конструкції, в стрижні виникають додаткові моменти, в результаті ексцентриситету передачі навантаження від однієї частки стрижня до іншої. У найгіршому випадку (виникають найбільші моменти сил) похибки монтажу розподіляться в різні боки.

За розрахункові моделі арки запропоновано вважати наступні залежності:

$$N = EF(s) \cos \varphi \frac{du(x)}{dx}, \quad (8)$$

$$M = EI(s) \cos^2 \varphi \left( \sin 2\varphi \frac{4f}{l^2} \frac{dv(x)}{dx} + \frac{d^2v(x)}{dx^2} \right). \quad (9)$$

де  $f$  – стріла підйому арки,  $l$  – довжина арки,  $\varphi$  – кут підйому арки.

Розв'язуючи рівняння (8), (9), визначають технологічні похибки встановлення конструкцій арки мосту у проектне положення.

Так як мостові переходи зазвичай мають достатньо великі розміри, та складаються із великої кількості елементів, то виконання подібних розрахунків є достатньо важкою задачею. Виконувати такі розрахунки вручну нераціонально за часом, або отримані дані будуть недостатньо точними. Для виконання такої задачі в роботі запропоновано використовувати програмний комплекс MSC NASTRAN.

Для розрахунку була запропоновано просторову стрижньова модель конструкції. Кожний стрижень ферми балки жорсткості представлений шістьма скінченними елементами. Всі скінченні елементи арки та балки жорсткості представлені як балочні. Розрахунку підлягають тільки несучі конструкції, оскільки тільки від їхньої роботи залежить стійкість мостового переходу. Розрахунок мостового переходу має бути виконаний на втрату стійкості по лінійному статичному розрахунку моделі. Визначення допустимого навантаження виконується за наступною формулою:

$$([K] - \lambda [\overline{K}_g]) \cdot \{u\} = 0, \quad (10)$$

де  $[K]$  – глобальна матриця жорсткості,

$[\overline{K}_g]$  – глобальна матриця геометричної жорсткості, яка враховує зміну положення конструкції у просторі,

$\{u\}$  – вектор вузлових зміщень конструкції у просторі,

$\lambda$  – критичний параметр навантаження.

За результатами розрахунку конструкції мостового переходу отримуємо модель напружено – деформованого стану втрати стійкості мосту. Критичний параметр навантаження  $\lambda$  в такому випадку дорівнював 9,429. Геодезичному контролю запропоновано відбирати вузли конструкції з найбільшими напруженнями, визначеними за таким розрахунком.

В результаті дослідження розрахункових моделей була встановлена функціональна залежність між величинами, які характеризують міцність

конструкції, і величинами деформацій, які визначаються в процесі виконання геодезичних робіт.

У третьому розділі **«Розрахунок точності геодезичних робіт при будівництві мостового переходу»** був виконаний аналіз чинників, що впливають на точність встановлення прогонних конструкцій мосту у проектне положення та виконане визначення точності геодезичних розмічувальних робіт при забезпеченні встановлення цих конструкцій.

При встановленні прогонної конструкції у проектне положення виникає задача оптимального встановлення прогонної конструкції у прогоні. Розв'язання такої задачі ускладнене відхиленнями дійсного розміру прогонної конструкції від проектних, впливом зовнішнього середовища на розміри самої конструкції та мосту, тощо. Зазвичай, для забезпечення оптимального співвідношення якості та часу монтажних робіт, при геодезичному забезпеченні встановлення конструкції у прогоні, необхідно враховувати дійсну геометрію самої конструкції та побудованих частин мосту.

Отримані величини допусків на встановлення конструкцій мосту у проектне положення має бути вихідною інформацією, з якої геодезисти починають супровід будівництва мостів. На основі цих даних в роботі запропоновано визначати точність геодезичних розмічувальних робіт на різних стадіях будівництва, точність геодезичної розмічувальної основи при забезпеченні будівництва мосту, необхідну точність контрольних робіт та спостережень за деформацією мосту.

В загальному випадку зміщення вузлів конструкції від проектного положення відбувається під дією наступних факторів:

- похибка виготовлення конструкцій мосту;
- похибка укрупнення конструкцій мосту;
- похибка монтажу конструкцій;
- похибка геодезичних вимірювань при монтажі конструкцій;
- деформація конструкції внаслідок зміни її температури.

Під впливом кожного із наведених факторів геометричні розміри конструкції змінюються, відбувається деформація останніх. Для забезпечення високої точності монтажу прогонних конструкцій, геодезисти, при забезпеченні будівництва мостів, повинні враховувати вплив наведених вище факторів.

В роботі розроблена методика аналітичного врахування похибок укрупнення прогонних конструкцій мосту при встановленні їх у проектне положення. Для кожної будівельної конструкції, під час геодезичного контролю за її геометрією, вводиться власна система координат, в якій центр системи координат співпадає з геометричним центром конструкції, вісь  $x$  співпадає з головною віссю конструкції, вісь  $z$  спрямована вертикально,  $y$  – перпендикулярно до осі  $x$  так, щоб утворювати праву систему координат. Забезпечення співпадіння центру координатної системи з центром

будівельної конструкції виконується математично через постопрацювання вимірювань.

Таким чином, постає задача перерахунку координат та зміщень вузлів будівельної конструкції від проектного положення із системи координат самої конструкції у систему координат мосту. Вирішення цієї задачі пропонується на основі перетворення Гельмерта. Оскільки вісь  $z'$  системи координат прогонної конструкції та вісь  $Z$  системи координат мосту спрямовані прямовисно і, відповідно, паралельні, то поворот системи координат при переході від однієї системи до іншої відбувається тільки відносно осі  $Z$ . Додаткового спрощення параметри переходу із системи координат прогонної конструкції у систему координат мосту набувають внаслідок співпадіння масштабу двох систем координат. Таким чином, маємо:

$$X_i = \Delta x + x'_i \cos \varepsilon_z + y'_i \sin \varepsilon_z; \quad (11)$$

$$Y_i = \Delta Y - X'_i \sin \varepsilon_z + Y'_i \cos \varepsilon_z; \quad (12)$$

$$Z_i = \Delta z + z'_i, \quad (13)$$

Зміщенням вузлів прогонної конструкції будемо вважати відхилення реальних координат точок конструкції від проектних:

$$\Delta'_{xi} = x'_i - x'_{im}, \quad \Delta'_{yi} = y'_i - y'_{im}, \quad \Delta'_{zi} = z'_i - z'_{im}. \quad (14)$$

З урахуванням дії температури отримуємо:

$$\Delta''_i = R' \Delta'_i, \quad (15)$$

де  $R'$  – матриця перетворення вузлів із системи координат прогонної конструкції у систему координат мосту прийме наступний вигляд.

$$R' = \begin{bmatrix} \frac{k'' \cos \varepsilon_z}{k'(1 + \alpha \Delta t_i)} & \frac{k'' \sin \varepsilon_z}{k'(1 + \alpha \Delta t_i)} & 0 \\ -\frac{k''' \sin \varepsilon_z}{k'(1 + \alpha \Delta t_i)} & \frac{k'' \cos \varepsilon_z}{k'(1 + \alpha \Delta t_i)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k''}{k'(1 + \alpha \Delta t_i)} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Визначення середніх квадратичних похибок геодезичних робіт при будівництві мосту виконується на основі закону розподілу Ст'юдента:

$$\Delta_\sigma = t m_\sigma, \quad (17)$$

де  $m_\sigma$  – середня квадратична похибка будівельних робіт при забезпеченні будівництва балки жорсткості мосту,  $\Delta_\sigma$  – гранична похибка монтажних робіт.

Відповідно до робіт проф. Г. В. Багратуні:

$$m_\sigma = t m_\varepsilon, \quad (18)$$

$m_\varepsilon$  – середня квадратична похибка геодезичних робіт.

Таким чином, середня квадратична похибка геодезичних робіт при забезпеченні будівництва балки жорсткості мосту становить:

- встановлення елементів балки жорсткості вздовж осі моста –  $m_1 = 1,7 \text{ мм}$  ;

- встановлення елементів балки жорсткості поперек осі мосту –  $m_y = 9,3 \text{ мм}$  ;

- встановлення елементів балки жорсткості у вертикальній площині –  $m_z = 1,6 \text{ мм}$ .

Середня квадратична похибка геодезичних робіт при забезпеченні будівництва арки мосту становить:

- встановлення елементів арки вздовж осі моста –  $m_1 = 8,8 \text{ мм}$  ;

- встановлення елементів арки у вертикальній площині –  $m_z = 4,2 \text{ мм}$ .

Визначення точності геодезичних робіт при будівництві мостових опор запропоновано виконувати за допомогою теорії оцінки точності проторового положення вузлів. Відхилення точок мостової опори від проектного положення виконується внаслідок появи наступних похибок:  $m_1, m_2$  – визначення положення осі опори вздовж осей  $X$  і  $Y$ ;  $m_3$  – вертикального проектування осі;  $m_4$  – визначення проектною позначки на нульовому горизонті;  $m_5$  – відхилення осі від вертикалі за рахунок монтажу;  $m_6$  і  $m_7$  – вимірювання лінійних розмірів відповідно вздовж осей  $X$  і  $Y$ ;  $m_8$  – передачі відмітки на монтажний горизонт. Розглянемо похибки детальніше та визначимо їх вплив на положення вузлів мостової опори.

Запропоновані залежності положення вузлів мостової опори відносно координатних вісей  $X, Y, Z$ :

$$m_x^2 = m_1^2 + k_1^2 m_3^2 + k_1^2 m_5^2 + m_6^2, \quad (19)$$

$$m_y^2 = m_2^2 + k_2^2 m_3^2 + k_2^2 m_5^2 + m_7^2, \quad (20)$$

$$m_z^2 = m_4^2 + m_8^2, \quad (21)$$

де коефіцієнти  $k_i$  мають наступне значення:

$$k_1 = \cos \alpha, \quad k_2 = \sin \alpha, \quad (22)$$

Застосувавши принцип рівного впливу до окремих похибок в кожній із груп і принцип мізерності впливу до похибок першої групи, маємо:

$$m_1^2 + m_{2,3}^2 + m_5^2 + m_{6,7}^2 = \frac{1}{9} (m_4^2 + m_8^2), \quad (23)$$

Точність детальних геодезичних робіт при будівництві опор мостів:

$$m_1 = m_2 = m_3 = m_5 = m_6 = m_7 = \frac{m_{\Gamma\text{мо}}}{2\sqrt{15}} = 7,2 \text{ мм}, \quad m_4 = m_8 = \frac{3m_{\Gamma}}{2\sqrt{5}} = 37,1 \text{ мм}.$$

Четвертий розділ «Застосування характеристик точності геодезичних робіт при будівництві мостів» присвячений аналізу отриманих

у попередніх розділах результатів розрахунку точності та вдосконаленню технології геодезичних робіт при контролі за будівництвом різних конструкцій мостів.

У практиці будівництва мостів виникає цілий ряд конструкторських і технологічних питань, які вимагають розв'язання. Одним з таких питань, є нормування точності геодезичних робіт при будівництві мостових переходів. Найбільш розповсюдженим методом на даний момент, що дозволяє отримати такі дані є теорія розмірних ланцюгів. Для перевірки отриманих в дисертації результатів, в роботі виконується розрахунок точності геодезичних робіт для окремих конструкцій на основі теорії розмірних ланцюгів.

Кожний об'єкт будівництва, або його частина, представляється як сукупність окремих елементів, що мають деякий розмір та складають розмірний ланцюг. Теорія розмірних ланцюгів визначає залежність точності визначення довжини ланцюга від точності визначення довжини окремих ланок, і навпаки. Балка жорсткості мосту представлена у вигляді лінійного розмірного ланцюга.

Похибка замикаючої ланки розмірного ланцюга:

$$\sigma(s) = \sigma(s_i) \sqrt{n + 2 \sum r_{ij}}, \quad (24)$$

де  $\sigma(s_i)$  – допуск на виготовлення елементів конструкції балки жорсткості,  $n$  – кількість ланок розмірного ланцюга,  $r$  – коефіцієнти кореляції ланок розмірного ланцюга.

Арка мосту представляє собою криволінійний розмірний ланцюг із зв'язаними складовими ланками. Похибка визначення положення окремої ланки арки мостового переходу:

$$m(\varphi) = \frac{\rho \cdot n \cdot m(s)}{R} \sqrt{\frac{1}{n + \varphi^2 \frac{n(n+1) \cdot (2n+1)}{6}}}; \quad (25)$$

де  $\varphi$  – довжина криволінійного ланцюга, виражена в кутовій мірі,  $n$  – кількість ланок.

На основі виконаного аналізу отриманих допусків на геодезичні роботи різними методами визначення точності встановлено наступні висновки:

– в цілому, величини середніх квадратичних похибок геодезичних робіт збігаються, що вказує на правильність виконання розрахунку;

– середні квадратичні похибки геодезичних робіт, отримані за теорією розмірних ланцюгів, в цілому менші за відповідні величини, отримані на через моделювання напружено-деформованого стану конструкцій, що вказує на висування надмірних вимог до точності геодезичних робіт при розрахунку точності за теорією розмірних ланцюгів;

– за допомогою моделювання напружено-деформованого стану конструкції, можливо визначити точність геодезичних робіт для більшої кількості процесів;

– недоліком методу визначення точності геодезичних робіт шляхом моделювання напружено-деформованого стану конструкції є більша важкість обчислень, що може негативно вплинути на можливість його поширення.

На основі виконаних розрахунків середніх квадратичних похибок геодезичних робіт при монтажі конструкцій мостів у роботі вдосконалена технологія виконання геодезичних робіт при контролі за геометрією будівельних конструкцій.

## **ВИСНОВКИ**

У дисертаційній роботі здійснено теоретичне узагальнення та викладено практичні результати вирішення науково-прикладної задачі визначення точності геодезичних робіт при будівництві мостів шляхом моделювання напружено-деформованого стану конструкцій.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи такі:

1. Обґрунтовано необхідність розроблення нових методів нормування точності геодезичних робіт при забезпеченні будівництва мостів. Нормативні вимоги до точності геодезичних робіт потребують градації, в залежності від форми та розмірів мостів.
2. Розроблені розрахункові моделі опор, балки жорсткості та арки мосту. Розроблена методика розрахунку допустимих зміщень вузлів будівельних конструкцій мостів, яка дозволяє встановити функціональну залежність між допустимими зміщеннями вузлів конструкцій мосту та напруженнями, які виникають в цих конструкціях, на основі дослідження цих моделей.
3. Розроблено методику розрахунку точності геодезичних робіт при будівництві мостів, яка дозволяє визначити точність геодезичних робіт при забезпеченні монтажу всіх конструкцій мосту на основі встановлених функціональних залежностей між допустимими зміщеннями вузлів конструкцій мосту і напруженнями в цих конструкціях. Виконаний аналіз результатів розрахунку точності геодезичних робіт методами моделювання напружено-деформованого стану та теорією розмірних ланцюгів показав більшу придатність до застосування методу моделювання напружено-деформованого стану.
4. З метою автоматизації виконання розрахунків запропоновано методику визначення точності геодезичних робіт при будівництві мостів за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для розрахунку будівельних конструкцій MSC/NASTRAN. Розроблена методика дозволяє визначити критичні точки конструкції з максимальними напруженнями та зміщеннями у вузлах, за якими необхідно проводити геодезичні спостереження.
5. Запропоновано методику аналітичного врахування похибок укрупнення прогонних конструкцій мосту при встановленні їх у проектне положення. Така методика дозволяє удосконалити технологію геодезичних робіт при забезпеченні монтажу прогонних конструкцій та підвищити якість будівельних робіт.



6. Результати наукових досліджень використовувались при розробці проекту виконання геодезичних робіт на будівництво балки жорсткості Подольського мостового переходу.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Адаменко О. В. Визначення точності геодезичних робіт при будівництві мостових переходів за допомогою теорії розмірних ланцюгів / О. В. Адаменко // Науково-техн. збірник “Містобудування та територіальне планування” –2009. – № 34. – С. 8-14
2. Гайдайчук В. В. Визначення точності геодезичних робіт на основі результатів моделювання мостового переходу за допомогою скінченних елементів / В. В. Гайдайчук, В. С. Староверов, О. В. Адаменко // Науково-технічний збірник “Містобудування та територіальне планування”. – Науково-технічний збірник “Містобудування та територіальне планування”. – 2007. – № 36. – С.7-12
3. Староверов В. С. Методика визначення точності геодезичних робіт при будівництві та експлуатації мостових переходів шляхом моделювання напружено-деформованого стану коснструкцій / В. С. Староверов, О. В. Адаменко // Вісник геодезії та картографії. – 2007. – № 5. – С. 7-12
4. Староверов В. С. Методика перерахунку результатів геодезичного контролю геометрії мостових конструкцій в систему координат мосту / В. С. Староверов, О. В. Адаменко // Містобудування та територіальне планування. – 2011. – № 42. – С. 347-355
5. Чибіряков В. К. Визначення точності геодезичних робіт при будівництві та експлуатації опор мостових переходів / В. К. Чибіряков, В. С. Староверов, О. В. Адаменко. // Інженерна геодезія. – 2008. – № 54. – С. 238-247
6. Чибіряков В. К. Визначення точності геодезичних робіт при будівництві та експлуатації прогонних конструкцій мостових переходів / В. К. Чибіряков, В. С. Староверов, О. В. Адаменко. // Містобудування та територіальне планування. – 2008. – № 31. – С. 443-452
7. Чибіряков В. К. Визначення точності геодезичних робіт при будівництві аркових опор / В. К. Чибіряков, В. С. Староверов, О. В. Адаменко // Інженерна геодезія. – 2010. – № 55. – С. 195-203
8. Чибіряков В. К. Концептуальний підхід до визначення точності геодезичних робіт при будівництві та експлуатації мостових переходів / В. К. Чибіряков, В. С. Староверов, О. І. Єгоров, О. В. Адаменко // Інженерна геодезія. – 2008. – № 54. – С. 270-281
9. Чибіряков В. К. Определение точности геодезических работ при монтаже арочных конструкций мостовых переходов / В. К. Чибіряков, В. С. Староверов, А. В. Адаменко // Містобудування та територіальне планування. – 2009. – № 32. – С. 480-488

10. Хиллер Б. О. Геодезический мониторинг мостов / Б. О. Хиллер, В. С. Староверов, Р. В. Шульц, А. В. Адаменко // Містобудування та територіальне планування. – 2011. – № 39. – С. 413-420.
11. Адаменко О. В. Визначення точності геодезичних робіт при монтажі мостових переходів на основі теорії розмірних ланцюгів / О. В. Адаменко // Матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених ГАС-2009, 14-16 травня 2009р., Львів – Л.: Видавництво національного університета “Львівська політехніка” – С.114-115
12. Староверов В. С. Визначення точності геодезичних робіт при будівництві мостових переходів шляхом моделювання напружено-деформованого стану конструкції / В. С. Староверов, О. В. Адаменко // Матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених ГАС-2009, 14-16 травня 2009. – Львів. : Видавництво національного університета “Львівська політехніка”. – С. 144-146
13. Староверов В. С. Геодезичний моніторинг мостів / В. С. Староверов, О. В. Адаменко // Матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених ГАС-2011, 24-26 листопада 2011. – Львів. : Видавництво Національного університета “Львівська політехніка”. – С. 168-171.
14. Староверов В. С. Методика перерахунку результатів геодезичного контролю геометрії будівельних конструкцій в систему координат об’єкту / В. С. Староверов, О. В. Адаменко // Матеріали Міжнародної Конференції “Геодезичне забезпечення будівництва, сучасний стан, проблеми, перспективи розвитку” 19-20 жовтня 2011р. – К. : Науково-дослідний інститут будівельного виробництва. – С. 67-72.

### АНОТАЦІЯ

**Адаменко О. В. Методи розрахунку точності геодезичних робіт при зведенні мостів шляхом моделювання напружено-деформованого стану.** – Рукопис.

Дисертацією є рукопис на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія і картографія. – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2012.

В дисертації викладено авторській підхід до вирішення науково-прикладної задачі удосконалення методів визначення точності геодезичних робіт при будівництві мостів. Розроблено концептуальний підхід по визначенню точності геодезичних робіт при будівництві мостів шляхом моделювання напружено-деформованого стану конструкцій. Запропоновано розрахункові моделі, які дозволяють визначити допустимі зміщення вузлів опор мосту, прогонних і аркових конструкцій мосту. На основі аналізу запропонованих розрахункових моделей конструкцій мосту запропонована методика визначення точності геодезичних робіт при будівництві цих конструкцій. Запропонована методика контролю геометрії будівельних конструкцій та врахування результатів контролю геометрії цих конструкцій

при геодезичному забезпеченні монтажних робіт.

Запропонована методика визначення точності геодезичних робіт реалізована при створенні проекту виконання геодезичних робіт при будівництві балки жорсткості Подільського мостового переходу.

*Ключові слова:* розрахунок точності, похибка, геодезичні роботи, деформація, розрахункова модель, згинаючий момент, жорсткість.

## АННОТАЦІЯ

**Адаменко А. В. Методы расчета точности геодезических работ при возведении мостов путем моделирования напряженно-деформированного состояния.** – Рукопись.

Диссертацией есть рукопись на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.24.01 – Геодезия, фотограмметрия и картография. – Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, 2012.

В диссертации изложен авторской подход к решению научно-прикладной задачи совершенствования методов определения точности геодезических работ при строительстве мостов. Разработано концептуальный подход к решению задачи определения точности геодезических работ при строительстве мостов путем моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций моста. Предложены расчетные модели моделирования напряженно-деформированного состояния для таких конструкций моста, как опоры, пролетные и арочные конструкции. На основе анализа таких расчетных моделей предложена методика определения точности геодезических работ при строительстве мостов.

Доказана достоверность результатов определения точности геодезических работ путем анализа и сравнения результатов расчета методами моделирования напряженно-деформированного состояния и теорией размерных цепей.

С целью автоматизации выполнения расчета точности геодезических работ при строительстве мостов предложена методика выполнения таких расчетов с помощью специализированного программного обеспечения для расчета строительных конструкций MSC/NASTRAN. Разработанная методика позволяет определить критические точки конструкции с максимальными напряжениями и смещениями в узлах, за которыми необходимо проводить геодезические наблюдения.

Предложена методика контроля геометрии строительных конструкций во время их укрупнения и учета результатов контроля геометрии строительных конструкций во время их монтажа. Такая методика позволяет усовершенствовать технологию выполнения геодезических работ при геодезическом обеспечении монтажа строительных конструкций моста.

На основании определенных характеристик точности геодезических работ при строительстве моста предложены методика и точность

геодезических работ при контроле геометрии укрупнения строительных конструкций моста.

Предложенная методика определения точности геодезических работ была реализована при составлении проекта выполнения геодезических работ на строительство балки жесткости Подольского мостового перехода.

*Ключевые слова:* расчет точности, ошибка, геодезические работы, деформация, расчетная модель, жесткость.

## **ANNOTATION**

**Adamenko O. V. Methods of calculating accuracy of geodetic operations during bridge construction by simulating strain condition. – Manuskript.**

Handwriting is the Ph.D. thesis in Engineering Science according to the speciality 05.24.01 – Geodesy, photogrammetry and cartography – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2012.

The author's strategy towards analysis of improving methods of calculating accuracy of geodetic operations during bridge construction has been taken as a basis for this thesis work. The conceptual approach to determination of accuracy of geodetic operations during bridge construction by simulating strain condition has been worked out and presented in this research. The author offers calculation models that allow determining permissible deviations of units of bridge pillars, wale and arch constructions. Using the analysis of represented calculation models of bridge constructions the new methods of calculation accuracy of geodetic operations during building of these constructions were offered. This control method over the geometry of building constructions and also taking into account the results of such method during geodetic support of installation operations is represented here below.

The offered method of determining accuracy of geodetic operations is realized in the process of geodetic measuring of stiffening beam during the building of Podil bridge crossing.

*Key words:* calculation of accuracy, deviation, geodetic operations, deformation, calculation model, curved point, stiffness.