

## ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ МОСТІВ ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

**Балабух Я.А.**

*Львівський регіональний науково-технічний центр ДерждорНДІ*

---

Для розрахунку сталезалізобетонних прогонових будов мостів після тривалої експлуатації доцільно використовувати сучасні програмні комплекси, при цьому необхідно вносити корективи у вихідні розрахункові схеми для врахування дефектів, які мають місце в елементах споруди.

Конструкції сталезалізобетонних прогонових будов є просторовими конструкціями, і природно прагнення урахування цієї обставини при проектуванні. Однак можливості такого урахування раніше обмежувалися складнощами обчислювального характеру.

На сьогоднішній день теорія споруд має широкий арсенал засобів для розрахунку просторових систем. Нижче розглянуто особливості та принципи розрахунку при використанні тих або інших теорій та методів.

Класична теорія стержневих систем у канонічній формі дуже ефективна, її широко використовують у практиці. Існують як універсальні програми для ЕОМ (наприклад, ЛИРА, МИРАЖ, SCAD та ін.), так і програми для певних класів конструкцій (наприклад, KESSON, RUZST та ін.). Роль останніх залишається значною у зв'язку з простотою застосування та меншими витратами машинного часу у системі автоматизованого проектування.

Зазначена теорія оперує диференціальними рівняннями, які наведено далі.

При розтягу (стиску) відносна деформація пов'язана з осьовою силою співвідношенням

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} = \frac{N}{EA}. \quad (1)$$

Згин у одній з головних площин

$$V''(\text{або } W'') \approx \frac{1}{r} = -\frac{M}{EJ}. \quad (2)$$

Для крутіння у класичній теорії використовують залежність між кутами закручування та крутним моментом

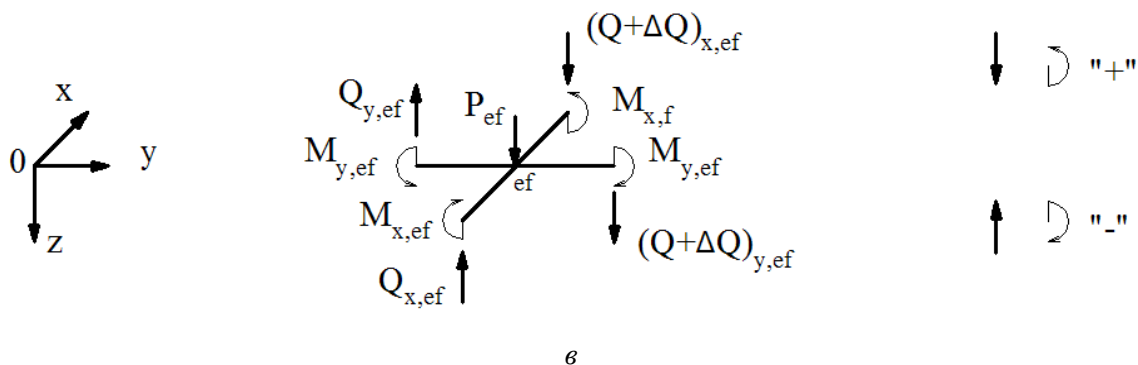
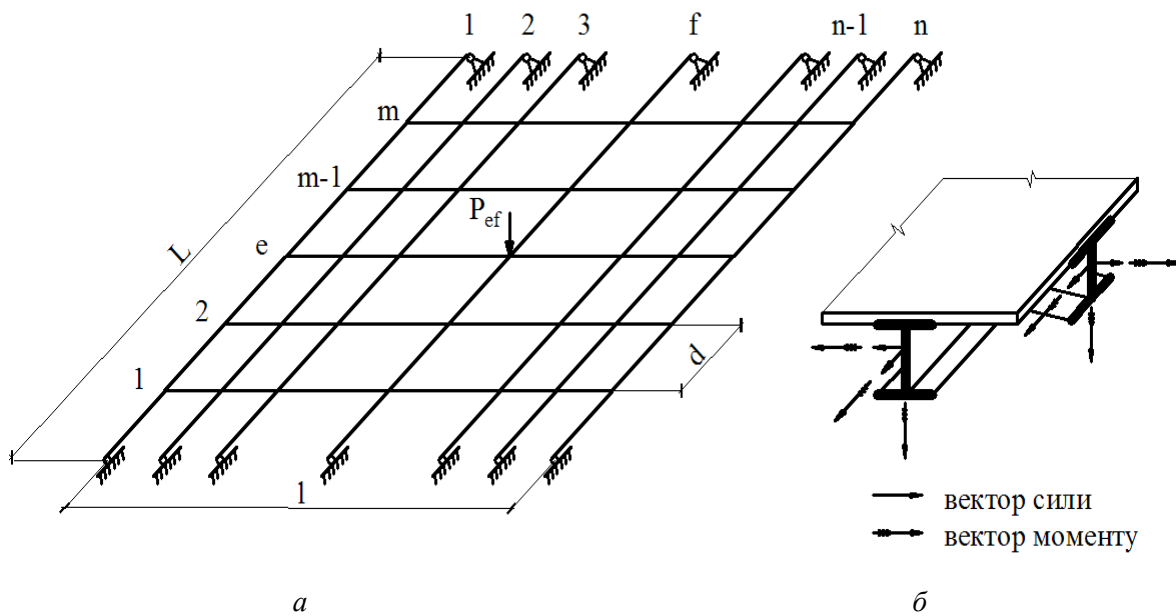
$$\frac{d\Phi}{dx} = -\frac{M_t}{GJ_t}. \quad (3)$$

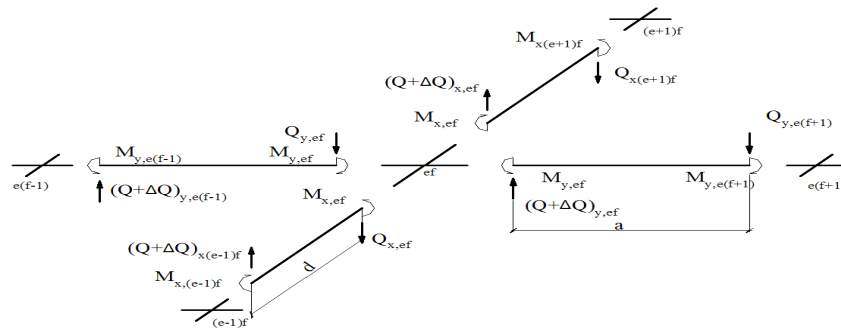
Наведені залежності зводять до шести силових факторів у перерізі стержня  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $Q_x$ ,  $Q_y$ ,  $M_t$ .

З іншого боку, напружений стан стержня визначено повністю, якщо відомі переміщення його кінців – три лінійних і три кутових на кожному кінці. Вибір розрахункової схеми та основної системи – відповідальна задача, яка визначається особливостями споруди.

У розрахунку автодорожніх мостів, у тому числі і сталезалізобетонних, теорія стержневих систем і сьогодні залишається однією з найпопулярніших [1 – 5 та ін.], особливо для мостів, які перебували 30...40 років у експлуатації. Ця методика здатна урахувати пошкодження і дефекти несних конструкцій та виниклі у цьому зв'язку перерозподіли внутрішніх зусиль.

Несна система автодорожнього моста являє собою перехресну систему простих балок, які знаходяться у одній площині та перетинаються під прямим кутом. Для розрахунку такої системи зручно використання змішаного методу, коли за основні невідомі приймають вертикальні переміщення (прогини  $W$ ) вузлів і вузлові згинальні моменти: у балках напрямку  $x$  –  $M_x$  та у балках напрямку  $y$  –  $M_y$  (рис. 1).





2

*а – схема перехресно-ребристої системи;*

*б – схема зусиль в ребрах сталезалізобетонних прогонових будов;*

*в, г – схема визначення рівноваги вузлів і стержнів.*

**Рисунок 1** – Розрахункові схеми до просторового розрахунку перехресно-ребристих прогонових будов

Приклад розрахунку цим методом перекриття, складеного з чотирьох балок наведено у роботі [5], а моделей моста – у роботах [2, 4].

При розрахунках моста після тривалої експлуатації жорсткість конструкцій з тріщинами та іншими ушкодженнями на момент досліджень приймають за даними, отриманими після реальних обстежень. При цьому керуються вказівками додатків Ф, G, L і N чинних норм [6] і рекомендаціями настанов [7].

Порівняння результатів експериментів, виконаних на різних моделях прогонових будов мостів, з розрахунковими даними за теорією стержневих систем, свідчить про задовільну збіжність [1, 4].

Теорію тонкостінних стержнів з жорстким контуром поперечного перерізу широко використовують у мостобудуванні. Тут виділяють три типи перерізів, для яких теорія має свої особливості. Найбільш чітко цю теорію обґрунтовано для відкритого контуру, який часто зустрічається у головних сталевих балках сталезалізобетонних мостів. Для такого контуру мають місце рівняння обмеженого крутіння.

$$EJ_{\omega} \Phi^{IV}(Z) - GJ_t \Phi^I(Z) = -m(Z). \quad (4)$$

Теорію тонкостінних стержнів замкнутого контуру описують рівнянням

$$\Phi^{IV}(Z) - k^2 \Phi^{II}(Z) = -\frac{\mu m(Z)}{EJ_{\omega}} + \frac{m^{II}(Z)}{GJ_t} \quad (5)$$

при 
$$k = \sqrt{\frac{\mu GJ_t}{EJ_{\omega}}}; \quad \mu = 1 - \frac{J_t}{J_c}. \quad (6)$$

У формулах (1)...(6):

$N, M, m$  – нормальна сила, згинальний та розподілений моменти у перерізі;

$E, G$  – модуль пружності та модуль зсуву матеріалу;

$M_t$  – крутний момент;

$J, J_b, J_\omega, J_c$  – відповідно, момент інерції при згині, крутінні, відносно головної секторіальної площі та направлений полярний момент інерції перерізу.

Теорія тонкостінних стержнів дозволяє ефективно і достатньо точно розраховувати складні поперечні перерізи сталезалізобетонних мостів та отримувати задовільні результати [8]. Однак цим методом неможливо враховувати деформації контуру поперечного перерізу та нерівномірність розподілення напружень за шириною поперечного перерізу при систематичному навантаженні.

Теорія плитно-балкових конструкцій базується на рішеннях прикладної теорії пружності, а саме пластин і оболонок. Теорія дозволяє достатньо повно виявити роботу усіх елементів прогонової будови – головних балок і плит. Однак ця теорія не враховує змінювання перерізу за довжиною та граничних умов у складних системах.

Метод скінченних елементів (МСЕ) набув широкого розповсюдження завдяки своїй універсальності. Цей чисельний метод, заснований на умовному розділенні пружного тіла (конструкції) на низку елементів, для яких рішення мають просту форму, а у деяких випадках – елементарну. Елементи об'єднують у вузлах, для яких задовольняються умови нерозривності переміщень та умови рівноваги.

У МСЕ усі переміщення задають у кожному вузлі, а елементи зв'язані між собою тільки вузлами, що призводить до стрічкової матриці коефіцієнтів.

Якщо вибраний скінченний елемент має  $n$  переміщень, а  $U(x, y)$  – узагальнений вектор переміщень і  $\delta$  – вектор вузлових переміщень, то за допомогою обраної функції  $F(x, y)$  переміщення у полі скінченного елемента виражають через вектор вузлових переміщень

$$U(x, y) = F(x, y) \delta. \quad (7)$$

Розглядають п'ять основних етапів рішення задач з МСЕ: членування системи на скінченні елементи (СЕ) та вибір координатних функцій; побудова матриць жорсткості та приведення місцевого навантаження до вузлового для кожного СЕ; визначення ступенів свободи; визначення компонентів напружено-деформованого стану (переміщень, напружень) по області елемента або усієї системи.

Найбільш важливим моментом є отримання матриці жорсткості елемента, яка необхідна для складання систем канонічних рівнянь метода переміщень для розглядуваної конструкції.

Матриці жорсткості містять інформацію про наявні фізико-механічні властивості матеріалів та геометричні параметри перерізів: товщину, ширину, довжину.

Матриці жорсткості, а також вузлові зусилля і переміщення дозволяють перейти з місцевої системи координат у загальну, відносно якої складають матрицю жорсткості, за допомогою матриць напрямних косинусів.

Найбільш розповсюдженими програмними комплексами є розроблені та сертифіковані в Україні ПК ЛРА і SCAD.

ПК ЛРА призначено для чисельного дослідження міцності та стійкості широкого класу будівельних конструкцій, зокрема мостобудування, починаючи від прогонових будов будь-яких систем до фундаментів усіх типів.

Велика бібліотека скінченних елементів (СЕ), досконалі швидкодійні алгоритми розв'язку систем рівнянь та визначення власних чисел, застосування технології суперелементів дають можливість досліджувати конструкції будь-яких типів з високою точністю при мінімальних витратах машинного часу.

Інтегрована система SCAD Office призначена для чисельного дослідження міцності та стійкості широкого класу конструкцій об'єктів будівництва, дозволяє визначати напружено-деформований стан конструкцій від статичних і динамічних впливів, а також виконувати низку функцій проектування конструкцій.

Бібліотека СЕ містить різні види стержневих, пластинчастих елементів, елементів балкового ростверку на пружній основі, оболонки і балок-стінок, різні види об'ємних елементів, набір багатоплощадних і осесиметричних скінченних елементів, а також спеціальні елементи для моделювання пружних в'язей скінченної жорсткості. Цей неповний перелік демонструє можливості аналізу будь-яких конструкцій з урахуванням будь-яких властивостей матеріалів.

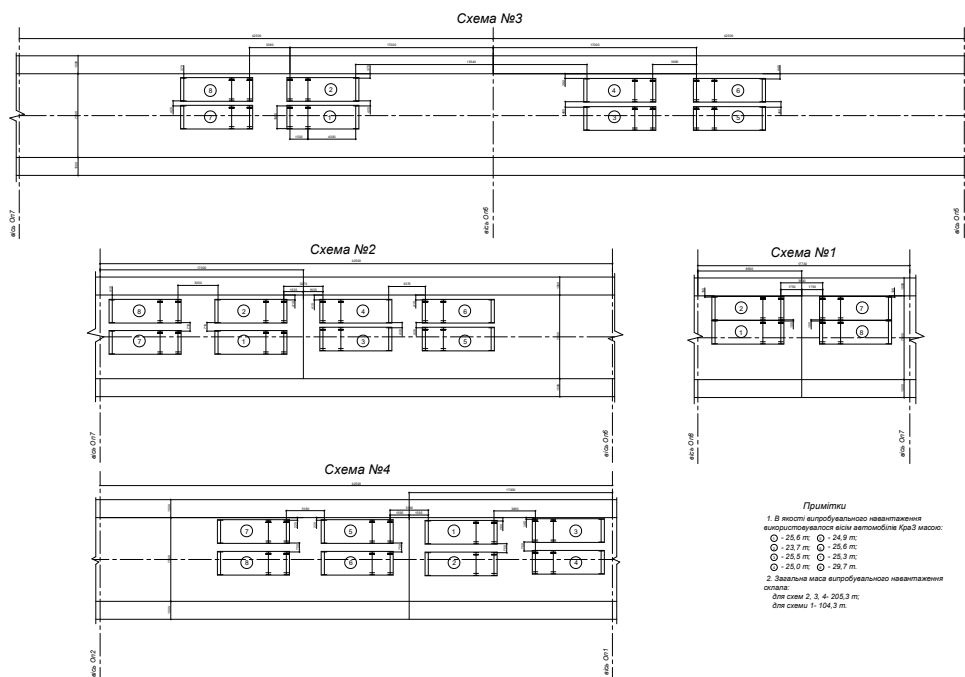
Досить детальне описування можливостей і техніки використання програмних комплексів ЛРА і SCAD з прикладами розрахунку мостових конструкцій можна знайти у [9]. За допомогою ПК ЛРА (версія 8.2) було виконано статичні та динамічні розрахунки прогинів і напружень та встановлені рівні навантаження прогонових будов двох мостів, які перебували у тривалій експлуатації понад 50 років [10, 11].

Обидва залізобетонних моста, які підлягали обчисленням, через Дністер на км 448+0,76 біля с. Звеничин та на км 303+990 були побудовані у 1956 р. за проектами Київського філіалу проектного інституту "Союздорпроект".

Перший міст має схему  $17,4+6\times 42,5+17,4$  м, другий складається з п'яти прольотів за нерозрізною схемою  $5\times 47,7$  м. Прогонова будова в обох мостів складається із залізобетонної плити товщиною 150 і 200 мм та головних металевих балок, розташованих на відстані 2,8 м і 5 м. Балки влаштовано із складеного двотавра висотою відповідно 2200 і 3060 мм.

Перед розрахунками були виконані обстеження та статичні і динамічні випробування конструкцій мостів для визначення їх фактичних характеристик міцності та деформативності, вантажності, динамічних характеристик прогонових будов і призначення режимів експлуатації.

Порівняння результатів досліджень з розрахунковими даними, отриманими з використанням ПК ЛРА, показують задовільну відповідність. У процесі проведення досліджень були використані різні найнесприятливіші схеми навантажень (рис. 2).



**Рисунок 2** – Випробувальні схеми. Стале завантаження залізобетонного моста через р. Дністер біля с. Атаки

При порівнянні даних експериментальних досліджень з результатами просторових розрахунків виявлено, що розбіжність між експериментальними та теоретичними даними не перевищує 10 % (табл. 1). При цьому, як видно з табл. 1, розрахункові значення прогинів за абсолютною величиною більші за дослідні, що свідчить про прийнятність способу розрахунку.

**Таблиця 1** – Порівняння розрахункових прогинів балки БЗ з експериментальними

№№ п/п	Схема навантаження	Розрахункові величини прогинів, <i>f</i> , мм у перерізі			Експериментальні значення	
		$\frac{4-5}{3-4}$	$\frac{5-6}{2-3}$	$\frac{6-7}{1-2}$	Максимальні прогини	
1	№ 2	$\frac{-1,176}{-}$	$\frac{7,024}{-}$	$\frac{-26,364}{-}$	-25,8	2,2 %
2	№ 3	$\frac{2,126}{-}$	$\frac{-9,446}{-}$	$\frac{-12,824}{-}$	-11,7	9,6 %
3	№ 4	$\frac{-}{-1,442}$	$\frac{-}{7,771}$	$\frac{-}{25,185}$	-22,93	9,8 %

**Примітки:** 1. Схеми навантаження, а також позначення номерів перерізів див. [10].  
2. Усі розрахункові та експериментальні перерізи визначено посередині прольотів.

У роботах [10, 11] виконано розрахунки величин напружень, форми коливань металевої прогонової будови моста, перевірені резонансні частоти за формами коливань.

Як початкові дані для розрахунків усіх параметрів використано результати обстежень мостів, які встановили дійсні характеристики матеріалів і стан конструкцій на момент досліджень.

Порівняння експериментальних і теоретичних результатів показали прийнятну збіжність, що свідчить про надійність розрахункового апарата, закладеного у ПК ЛПРА.

Наприкінці аналізу сучасних способів розрахунку прогонових будов сталезалізобетонних мостів треба зупинитися на деформаційному методі розрахунку, який інтенсивно розвивається у останні роки [12, 13, 14] і пропонується для використання у розроблюваних нових нормативних документа Державних будівельних норм (ДБН) України.

У зазначеному методі розглянуто розрахунок на основі дійсних діаграм деформування сталі та бетону. Для визначення напружено-деформованого стану сталезалізобетонного (або сталебетонного) перерізу сталеву частину розбивають на смужки, у межах висоти яких напруження вважають постійними. Такий спосіб представлення розрахункової моделі сталебетонного перерізу аналогічний відомому способу розрахунку залізобетонного перерізу з багаторядним армуванням [14].

Залежність, яка описує діаграму для бетону  $\sigma_b - \varepsilon_b$ , приймають у вигляді поліному [12, 15] п'ятого ступеня

$$\sigma_b = R_b \sum_{k=1}^5 a_k \left( \frac{\varepsilon_{b1}}{\varepsilon_{bk}} \right)^k. \quad (8)$$

Коефіцієнти полінома  $a_k$  визначено та статистично обґрунтовано численними роботами, проведеними у НДІБК, і наведено, зокрема у [15].

Діаграму  $\sigma_s - \varepsilon_s$  для сталі, яка має фізичну межу текучості, описують трьома рівняннями [12]:

$$\text{при } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{so} = \frac{R_s}{E_s} \quad \sigma_s = E_s \varepsilon_s; \quad (9)$$

$$\text{при } \varepsilon_{so} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{st} \quad \sigma_s = R_s; \quad (10)$$

$$\text{при } \varepsilon_s > \beta_s \varepsilon_{so} \quad \beta_s = a_1 \varepsilon_s + a_2 \varepsilon_s^{\frac{1}{2}} + a_3 \varepsilon_s^{\frac{1}{3}}. \quad (11)$$

У формулах (8)... (11):

$\varepsilon_{so}$  – пружні деформації сталі;

$\varepsilon_{st}$  – деформації текучості сталі;

$\beta_s$  – дослідний коефіцієнт.

Напружено-деформований стан перерізу описують системою рівнянь

$$\left. \begin{aligned} F(x_1, \varepsilon_1) &= 0; \\ \Phi(x_1, \varepsilon_1) - M &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де  $x = \frac{1}{r} = \frac{\varepsilon_{b1} - \varepsilon_{b2}}{h}$  – кривизна зігнутої осі у перерізі;

$\varepsilon_{b1}, \varepsilon_{s2}$  – відповідно деформації стиснутої фібри бетону та розтягнутої фібри сталі;

$h$  – висота складеного перерізу.

У загальному вигляді функції  $F(x_1, \varepsilon_1)$  і  $\Phi(x_1, \varepsilon_1)$  записують таким чином

$$\left. \begin{aligned} F(x_1, \varepsilon_1) &= \int_{A_b} \sigma_b(x) dA_b + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si}; \\ \Phi(x_1, \varepsilon_1) &= \int_{A_b} \sigma_b(x) x dA_b + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} Z_i. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Систему нелінійних алгебраїчних рівнянь (13) розв'язують методом добору. Визначення у роботі [16] міцності сталобетонних балок зроблено за допомогою ЕОМ та співставлено з отриманими автором дослідними результатами. Співпадіння відношення теоретичного руйнівного моменту до експериментального знаходилося у межах 0,82...0,94.

Аналогічним способом було вирішено задачу про несну здатність пошкоджених корозією залізобетонних балок [17]. У цьому випадку пошкоджені шари конструкції приймали за фактичними площами та реальними фізико-механічними властивостями матеріалів (бетону і арматури) з урахуванням ступеня пошкоженості.

## Висновки

Проведені дослідження показали, що як початкові вихідні дані для розрахунків необхідно використовувати результати обстежень мостів, які дозволяють встановити дійсні характеристики матеріалів і стан конструкцій тривалої експлуатації на момент досліджень. Ці результати досліджень мають бути враховані при створенні розрахункових схем мостів в програмних комплексах. Порівняння експериментальних і теоретичних результатів показали прийнятну збіжність, що свідчить про надійність розрахункового апарата та правильні підходи, які розроблені для конструкцій, що мають тривалий термін експлуатації.

## Література

1. Коваль П.М. Разработка, экспериментальное исследование и опытное применение эффективных конструкций уширения автодорожных мостов. Дис. ... канд. техн. наук – Львов: Львовский политехнический институт, 1987. – 246 с.



2. Кваша В.Г., Ярёмченко А.Ф., Филин О.В. Расчёт перекрёстно-ребристых несущих систем автодорожных мостов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2003. – Вип. 10. – С. 90-103.
3. Кваша В.Г., Ярёмченко А.Ф., Филин О.В. Расчёт однопролётных и неразрезных строений железобетонных автодорожных мостов // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – Науково-техн. зб. – Київ, НТУ, 2004. – № 69. – С. 81-87.
4. Кваша В.Г. Эффективные системы расширения и усиления балковых пролётных будов автодорожных мостов. Дис. ... докт. техн. наук, Львів, 2000. – 319 с.
5. Nowacki W. Mechanika budowli. Warszawa: PWN, 1967. – Том II – 844 s.
6. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости і труби. Правила проектування. – Київ: Мінбуд України, 2006. – 359 с.
7. Настанови з визначення технічного стану мостів. – ТАУ. – К.: Логос, 2002. – 117 с.
8. Потапкин А.А. Проектирование стальных мостов с учётом пластических деформаций. – М.: Транспорт, 1984. – 200 с.
9. Лучко Й.Й., Коваль П.М., Корнієв М.М., Лантух-Лященко А.І., Хархаліс М.Р. Мости: конструкції та надійність / За ред. В.В.Панасюка і Й.Й.Лучка. – Львів: Каменяр, 2005. – 989 с.
10. Технічний звіт. Статичні та динамічні випробування моста через р. Дністер км 303+169 (с. Атаки) на автомобільній дорозі державного значення Н-03 Житомир – Чернівці / ДерждорНДІ ім. П.П.Шульгіна. – Договір № 61-07. – Кер. роботи П.М.Шашук, 2007. – 60 с.
11. Технічний звіт з випробування моста через р. Дністер на км 448+076 (с. Звенячин) на автомобільній дорозі державного значення Доманове (на Брест) – Ковель – Чернівці – Треблечне (на Бухарест) з об'їздом м. Чернівці / ДерждорНДІ ім. М.П.Шульгіна. – Кер. роботи Р.І.Полюга, 2007. – 63 с.
12. Бамбура А.И. К оценке прочности железобетонных конструкций на основе деформационного подхода и реальных диаграмм деформирования бетона и арматуры // Бетон и железобетон на рубеже третьего тысячелетия / Материалы 1й Всероссийской конференции по проблемам бетона и железобетона. – Москва: Готика, 2001. – С. 750-752.
13. Барашиков А.Я. Деформаційні методи розрахунку згинальних залізобетонних елементів згідно з проектом нових норм України // Вісник Криворізького технічного університету. Зб. наук. праць. – Кривий Ріг: КТУ, 2006. – С. 159-161.
14. Бамбура А.М., Барашиков А.Я., Гурківський О.Б. Основні положення розрахунку бетонних та залізобетонних конструкцій по національному нормативному документу, що розробляється // Будівельні конструкції. Зб. наук. праць у 2-х томах. – К.: НДІБК, 2005. – Том I. – С. 36-43.
15. Методические рекомендации по уточнёному расчёту железобетонных элементов с учётом полной диаграммы сжатия бетона / А.Н.Бамбура, В.Я.Бачинский, Н.В.Журавлёва, И.Н.Пешкова. – К.: НИИСК, 1987. – 25 с.
16. Kuznetsov V.M., Tseitlin G., Hitrov V., Zaitchik I., Brodski G., Brodskaia E., Enutin Y., Shesterikov V. Bridge Management System for City of Moscow. – 9th International Bridge Management Conference. – Orlando, Florida, USA, 2003. – P.P. 96-101.
17. Бліхарський З.Я. Напружено-деформований стан залізобетонних конструкцій у агресивному середовищі при дії навантаження. Дис. ... докт. техн. наук. – Львів, 2005. – 348 с.
18. Звіт з обстеження та випробування нового моста через р. Західний Буг біля с. Ягодина Волинської області / “Тріада”. – Договір № П 02-08. – Кер. роб. П.М.Коваль, 2002 – 88 с.