

## ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ МОСТОВ

**Балабух Я.А.**

*Львівський регіональний науково-технічний центр ДерждорНДІ*

---

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 розглянуті особливості та принципи розрахунку при використанні тих або інших теорій та методів.

Класична теорія стержневих систем у канонічній формі вельми 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, 2, 3, 4, 5 та ін.], особливо для мостів, які перебували 30...40 років у експлуатації. Ця методика здатна врахувати пошкодження і дефекти несних конструкцій та виникаючі у цьому зв'язку перерозподіли внутрішніх зусиль.

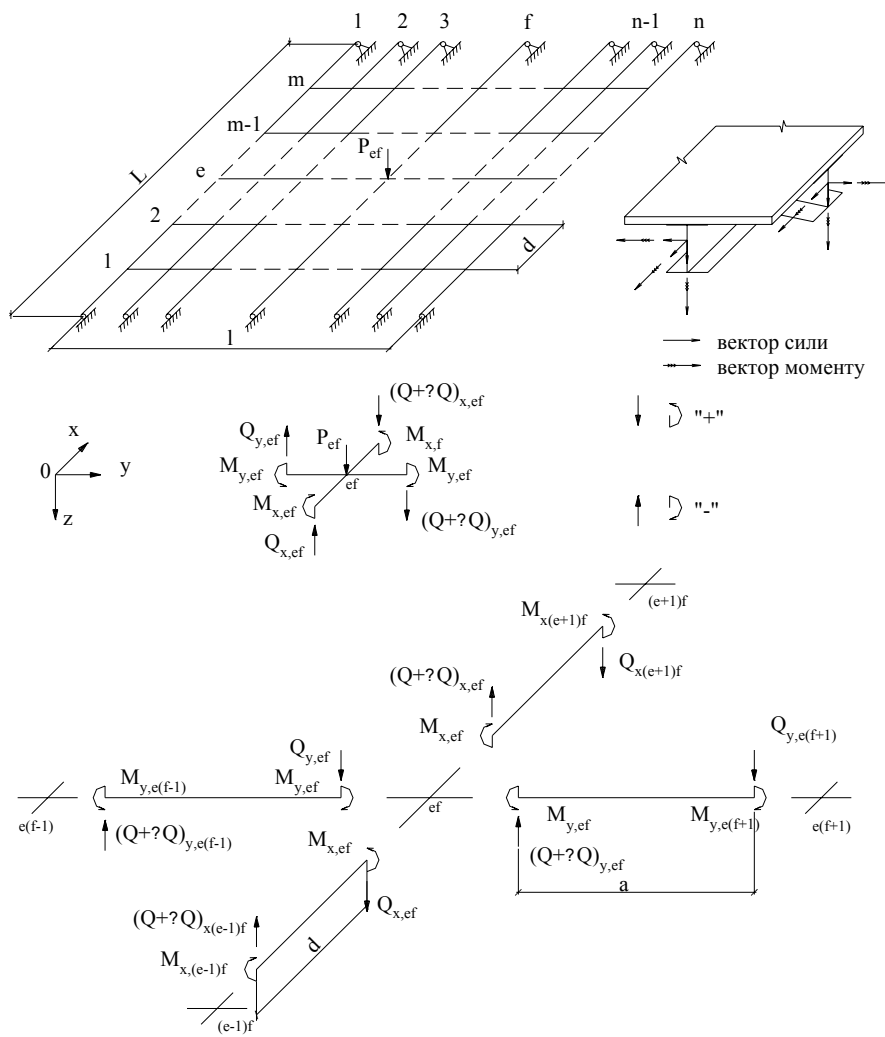
Несна система автодорожнього моста являє собою перехресну систему простих балок, які знаходяться у одній площині та перетинаються під прямим кутом. Для розрахунку такої системи зручно використання змішаного методу, коли за основні невідомі приймають вертикальні переміщення (прогини  $W$ ) вузлів і вузлові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

перекрыття, складеного з чотирьох балок, наведений 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].

Теорія тонкостінних стержнів з жорстким контуром поперечного перерізу широко використовують у мостобудуванні. Тут виділяють три типи перерізів, для яких теорія має свої особливості.



- a* – схема перехресно-ребристої системи;
- б* – схема зусиль в ребрах сталезалізобетонних прогонових будов;
- в, г* – схема визначення рівноваги вузлів і стержнів

Рис. 1. Розрахункові схеми до просторового розрахунку перехресно-ребристих прогонових будов

Найбільш чітко ця теорія обґрунтована для відкритого контуру, який часто зустрічається у головних сталевих балках сталезалізобетонних мостів. Для такого контуру мають місце рівняння стисненого крутіння

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

Теорія 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 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 урахувати деформації контуру поперечного перерізу та нерівномірність розподілення напружень за шириною поперечного перерізу при навантаженні.

Теорія плитно-балкових конструкцій базується на розв'язках прикладної теорії пружності, а саме, пластин і оболонок. Теорія дозволяє достатньо повно виявити роботу усіх елементів прогонової будови – головний 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 розв'язки 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 зводить 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 величин 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 переводять 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 ЛПА і SCAD.

ПК ЛПА призначений 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'язання систем рівнянь та визначення власних чисел, застосування технології суперелементів дають можливість досліджувати конструкції будь-яких типів з високою точністю при мінімальних витратах машинного часу.

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

Бібліотека СЕ містить різні види стержньових, пластинчастих елементів, балочного розтертку на пружній основі, оболонки і балок-стінок, різні види об'ємних елементів, набір багатопарових 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 ЛПА і SCAD з прикладами розрахунку мостових конструкцій можна знайти у [9].

За допомогою ПК ЛПА (версія 8.2) були виконані 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 р. Дністер на км 448+0,76 біля с. Звенячин та на км 387+990 були побудовані у 1956 р. за проектами Київського філіалу проектного інституту "Союздорпроект".

Перший міст має схему 17,4+6×42,5+17,4 м, другий складається з п'яти прольотів за нерозрізною схемою 5×47,7 м. Прогонова будова у обох мостів складається із залізобетонної плити товщиною 150 і 200 мм та головних металевих балок, розташованих на відстані 2,8 м і 5 м. Переріз балок – складений двотавр 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, динамічних характеристик прогонових будов і призначення режимів експлуатації.

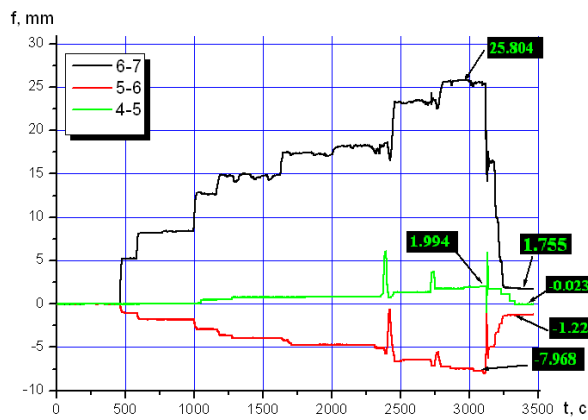
Порівняння результатів досліджень з розрахунковими, отриманими з використанням ПК ЛПА, показують задовільну збіжність. Для прикладу на рис. 2 наведено експериментальні та теоретичні оцінки балок сталезалізобетонних прогонових будов. У процесі проведення досліджень були використані різні найнесприятливіші схеми навантажень (рис. 2,а). При порівнянні 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

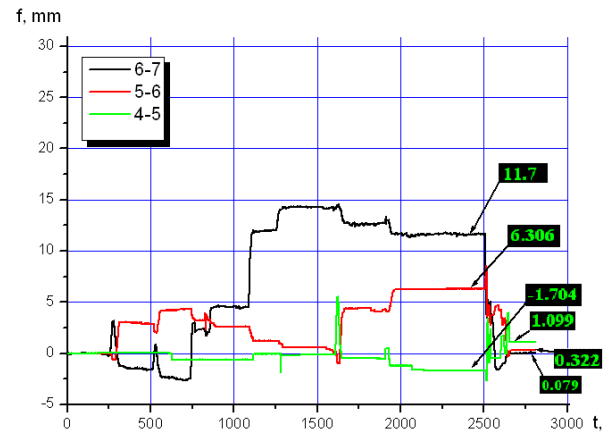
№№ п/п	Схема навантаження	Розрахункові величини прогинів, $f$ , мм у перерізі			Експериментальні значення	
		$\frac{4-5}{3-4}$	$\frac{5-6}{2-3}$	$\frac{6-7}{1-2}$	Максимальні прогини	
1	№ 2	$\frac{-1,176}{-}$	$\frac{7,024}{-}$	$\frac{-26,364}{-}$	-25,8	2,2 %
2	№ 3	$\frac{2,126}{-}$	$\frac{-9,446}{-}$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

Примітка 1. Схеми навантаження, а також позначення номерів перерізів – див. роботу [126].

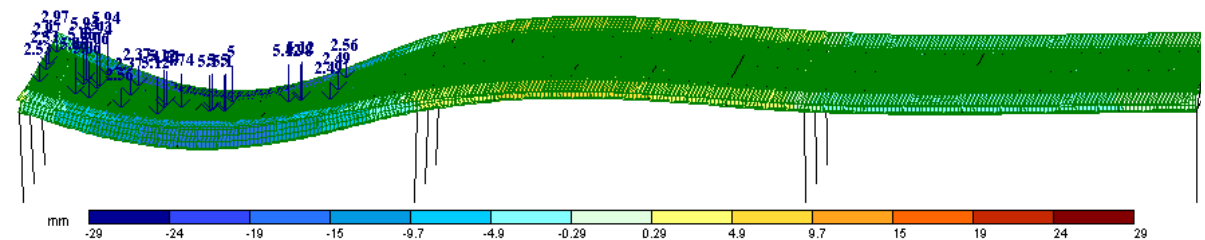
Примітка 2. Усі розрахункові та експериментальні перерізи знаходяться посередині прольотів.



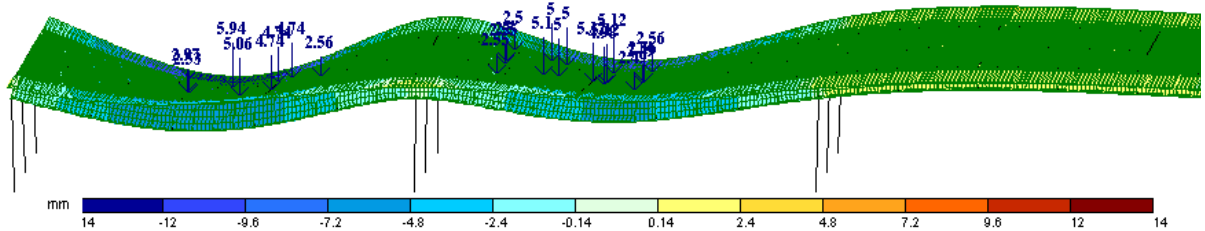
а



б



а



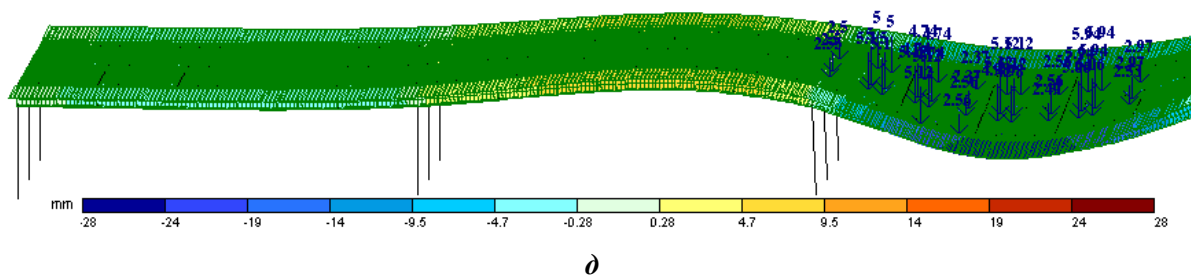


Рис. 2. Графіки прогинів балки Б-3 прогонових будов 4-5, 5-6, 6-7 від випробувального навантаження при схемах № 2 (а) і № 3 (б); епюри прогинів конструкції прогонової будови при випробувальних схемах завантаження № 2 (в), № 3 (г), № 4 (д)

У роботах [10, 11] виконано розрахунки величин напружень, форми коливань металевої прогонової будови моста, перевірено 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 ЛПА.

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 сталобетонного) перерізу сталеву частину розбивають на смужки, у межах висоти яких напруження вважають постійними (рис. 1). Такий спосіб представлення розрахункової моделі сталобетонного 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 степеня

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

Коефіцієнти полінома  $a_k$  визначені та статистично обґрунтовані численними роботами, проведеними у НДІБК, і наведені, зокрема у [15].

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

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

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

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

У формулах (9) (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;

$\varepsilon_{b1}, \varepsilon_{b2}$  – 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 підбору. Визначення у роботі [17] міцності сталобетонних балок визначено за допомогою ЕОМ та співставлено з отриманими автором дослідними результатами. Збіг 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 [18]. У цьому випадку пошкоджені шари конструкції приймали за фактичними площами та реальними фізико-механічними властивостями матеріалів (бетону і арматури) з урахуванням ступеня пошкодженості.

Висновки: Для просторових розрахунків сталезалізобетонних прогонових будов мостів доцільно використовувати програмні комплекси ЛИРА і SCAD. Необхідно впроваджувати при розрахунках сталезалізобетонних перерізів деформаційний метод розрахунку, який оснований на дійсних діаграмах деформування сталі та бетону.

## 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 // Ресурсоэкономні 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. Ефективні системи розширення і підсилення балкових прольотних будов автодорожніх мостів. Дис. ... докт. техн. наук, Львів, 2000. – 319 с.
5. Nowacki W. *Mechanika budowlana*. 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 1<sup>й</sup> 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. 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.
17. Kuznetsov V.M., Tseitlin G., Hitrov V., Zaitchik I., Brodski G., Brodskaiia E., Enutin Y., Shesterikov V. Bridge Management System for City of Moscow. – 9<sup>th</sup> International Bridge Management Conference. – Orlando, Flodida, USA, 2003. – P.P. 96-101.
18. Бліхарський З.Я. Напружено-деформований стан залізобетонних конструкцій у агресивному середовищі при дії навантаження. Дис. ... докт. техн. наук. – Львів, 2005. – 348 с.