

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ РОБОТИ МЕТАЛЕВОГО АРОЧНОГО МОСТА ЧЕРЕЗ Р. СТАРИЙ ДНІПРО У МІСТІ ЗАПОРІЖЖЯ

У статті на прикладі існуючого металевого арочного моста у м. Запоріжжя розглянуто застосування методики «пружних моделей» при розрахунках на коливання та стійкість подібних конструкцій. Власні вертикальні коливання арочної прогонової будови знаходяться у не рекомендованому нормами діапазоні періоду коливань (0,45...0,60 с.). На підставі розрахунків по наведеній методиці та аналізу результатів зроблено висновки щодо можливості стабілізації арочної прогонової будови.

В статье на примере существующего металлического арочного моста в г. Запорожье рассмотрено использование методики «упругих моделей» при расчетах на колебания и устойчивость подобных конструкций. Собственные вертикальные колебания арочного пролетного строения находятся в не рекомендованном нормами диапазоне периода колебаний (0,45...0,60 с.). На основании расчетов по приведенной методике и анализа результатов сделан вывод о возможности стабилизации арочного пролетного строения.

The article, based on the example of an existing metal arch bridge in Zaporozhye, considers application of the «resilient models» technique in calculations of oscillations and stability of such structures. The own free vertical oscillations of the arch span of the bridge were found to be in a forbidden range (0.45 to 0.60 sec). Based on the presented technique, recommendations have been developed on reconstruction and dynamic stabilization of the arch span structure.

У роботах [1; 11] наведена загальна методика застосування «пружних моделей» при розрахунках складних мостових споруд на коливання та стійкість. Ця методика опрацьована при розрахунках вільних коливань висячих і вантових мостів [2; 3; 12], арочних віадуків [9], системи «гнучка арка» з балкою жорсткості [12], ферм [7; 8], балок проїжджої частини залізничних мостів [13] та ін.

Всі приклади застосування методики перевірені численними розрахунками (в тому числі і іншими методами) та підкріплені натурними експериментами.

У роботі [4] автор доводить перевагу таких моделей особливо при проектуванні, зв'язуючи безпосередньо проектування таких складних споруд з обмеженими нормами [14] періодом їх вільних коливань. Взагалі ж пропонується проектування складних мостових споруд починати не з вибору жорсткісних параметрів споруди, а з періоду вільних коливань і далі, ув'язуючи жорсткісні та вагові характеристики споруди з періодом вільних коливань таким чином, щоб автоматично виконувалась вимога норм [14, п. 1.48].

Металевий міст, що розглядається у даній роботі, має загальну довжину 320 м і арку з їздою верхом довжиною 195,6 м побудовано у 1975 р. При випробуваннях після закінчення будівництва виявилось, що період вільних коливань трьох перших форм співпав, або був

близький до періоду, що не рекомендується нормами [14] ( $T = 0,45 \dots 0,60$  с у вертикальній площині та  $T = 0,9 \dots 1,2$  с – у горизонтальній). Ця обставина була відмічена у звіті [15], оскільки під час руху колони випробувальних машин спостерігались значні коливання прогонової будови, і було рекомендовано конструкцію якимось чином підсилити, щоб змінити період вільних коливань і вивести з nereкомендованого діапазону.

На момент написання цієї статті рух транспортних засобів по мосту закрито з приводу неможливості його експлуатації саме з причини значних коливань. Для розробки пропозицій та можливих заходів щодо зміни періоду вільних коливань використана вже опрацьована методика [4]. Однак, маючи додатково експериментальні дані по частотах вільних коливань для перших трьох форм ( $\nu_1 = 1,47$  Гц,  $\nu_2 = 1,80$  Гц та  $\nu_3 = 2,70$  Гц), беремо їх за основу і далі ведемо розрахунки від цих величин як вихідних даних для цієї конструкції.

На підставі раніше виконаних досліджень арочних систем [1; 9; 11] приймаємо розрахункову схему для обчислення частот у вигляді нерозрізної балки на пружних опорах. Пружними опорами для балки жорсткості у даній схемі є стояки разом з аркою. Кількість прого-

нів нерозрізної балки  $n=16$  приймаємо по кількості панелей арки (рис. 1).

Запишемо далі загальновідому формулу для обчислення частот вільних коливань будь-якої конструкції:

$$v_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi\ell^2} \sqrt{\frac{EI}{\mu}}, \quad (1)$$

де  $E$  – модуль пружності металу, кПа;  $\mu$  – погонна маса споруди;  $I$  – момент інерції нерозрізної балки,  $\text{м}^4$ ;  $v_i$  – частота вільних коливань по  $i$ -й формі, Гц;  $\ell$  – відстань між стояками арки (панель), м;  $\lambda_i$  – частотний параметр, який, в свою чергу, обчислюється з рівняння частот для системи регулярна балка на пружних опорах [1].

$$\frac{sh\lambda_i}{ch\lambda_i - \cos\frac{\pi}{n} \cdot i} - \frac{\sin\lambda_i}{\cos\lambda_i - \cos\frac{\pi}{n} \cdot i} = \frac{2\lambda_i^3}{c'}, \quad (2)$$

де  $n$  – кількість прогонів нерозрізної балки ( $n=16$ );  $i$  – номер форми коливань ( $i=1, 2, 3 \dots n$ );  $c'$  – відносна пружність опори

$$c' = \frac{c_0 \ell^3}{2EI}, \quad (3)$$

де  $c_0$  – пружність проміжної опори, кН/м;

Далі маємо таку систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i^4 &= \frac{\mu \varpi_i^2 \ell^4}{EI} \\ c' &= \frac{c_0 \ell^3}{2EI} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

з якої найдемо залежність відносної пружності опори  $c'$  від частотного параметра  $\lambda_i$ , враховуючи, що всі інші параметри відомі:

$$c' = \left( \frac{\lambda_i^2}{2\pi} \right) \cdot \frac{c_0 g}{2lv_i^2 q}. \quad (5)$$

Скористаємось результатами статичних випробувань даної конструкції [15] і знайдемо пружність опор розрахункової схеми:

$$c_0 = \frac{q_b L}{f_b}$$

та параметр

$$A_i = \frac{c_0 g}{2lv_i^2 q},$$

де  $q_b$  – інтенсивність випробувального навантаження, що дорівнює 4,07 кН/м;  $f_b$  – прогин від випробувального навантаження ( $f_b=0,142$  м);  $L$  – довжина розподілу випробувального навантаження ( $L=51,2$  м).

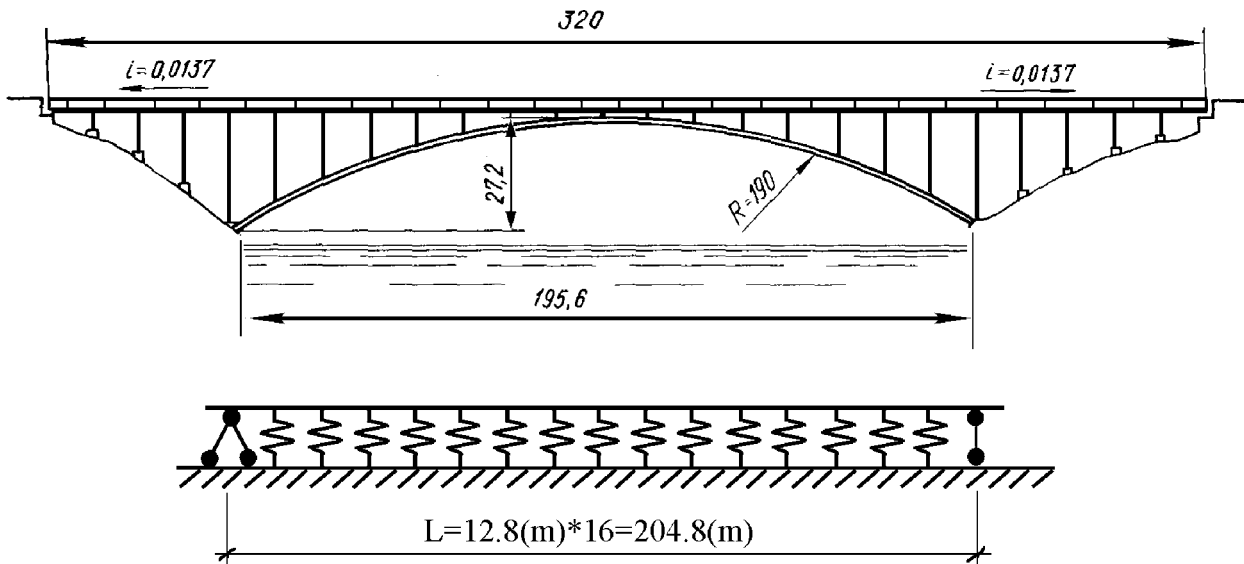


Рис. 1. Розрахункова схема

Слід відзначити, що величина  $c_0$  є завищеною, бо при випробуваннях крім арки якусь частку навантаження сприймала балка жорст-

кості, і ця частка в подальших розрахунках повинна бути виключена.

За цих даних маємо  $c_0 = 1467,5$  кН/м та три значення (по кількості частот) параметру  $A_i$ :

$$A_1 = 22,58; \quad A_2 = 15,265; \quad A_3 = 6,78.$$

Таким чином, маємо три значення залежностей:

$$\lambda_1^4 = 1,717 \cdot c';$$

$$\lambda_2^4 = 2,584 \cdot c'; \quad \lambda_3^4 = 5,813 \cdot c'. \quad (6)$$

Далі скористаємось рівнянням (2) і перепишемо його у вигляді залежності  $c'$  від  $\lambda_i$ :

$$c' \cdot \lambda_i = \frac{2\lambda_i^4}{\frac{sh\lambda_i}{ch\lambda_i - \cos\frac{\pi}{16} \cdot i} - \frac{\sin\lambda_i}{\cos\lambda_i - \cos\frac{\pi}{16} \cdot i}}. \quad (7)$$

З урахуванням залежностей (6) знаходимо для трьох форм коливань частотний параметр  $\lambda_i$ :

$$\lambda_1 = 0,470; \quad \lambda_2 = 0,570; \quad \lambda_3 = 0,654.$$

На підставі вже виконаних досліджень була перевірена можливість використання більш простої розрахункової схеми – балки на пружній основі, рівняння коливань якої має дуже простий і зручний для аналізу вигляд:

$$\lambda_i^4 - \frac{\pi^4}{n^4} \cdot i^4 = 2c'. \quad (8)$$

Знову скориставшись залежністю (6) знаходимо частотні параметри  $\lambda_i$ :

$$\lambda_1 = 0,466; \quad \lambda_2 = 0,569; \quad \lambda_3 = 0,654.$$

Практично абсолютне співпадіння параметрів по двох розрахункових схемах дає нам підставу використати для подальших розрахунків та аналізу більш просту залежність (8).

Запишемо вираз (8) у розгорнутому вигляді з урахуванням загальновідомих залежностей:

$$c' = \frac{c_0 \ell^3}{2EI}; \quad \lambda_i^4 = \frac{v_i^2 (2\pi)^2 \ell^4 q}{EIg}; \quad v_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi \ell^2} \cdot \sqrt{\frac{EIg}{q}}.$$

Після спрощення маємо таке рівняння:

$$\frac{v_i^2 (2\pi)^2 \ell q}{g} = c_0 + \frac{\pi^4 i^4}{n^4} \cdot \frac{EI}{\ell^3}. \quad (9)$$

Підставивши у рівняння (9) відомі параметри для трьох форм коливань, маємо систему трьох рівнянь з двома невідомими  $c_0$  та  $I$

$$\begin{cases} 1281,6 = c_0 + 14,85 \cdot I; \\ 1395,7 = c_0 + 237,6 \cdot I; \\ 4265,3 = c_0 + 1203,1 \cdot I. \end{cases} \quad (10)$$

Розв'язавши систему рівнянь, знаходимо значення  $c_0$  та  $I$ . Результати розрахунків наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри	Значення параметрів $c_0$ та $I$ при формах коливань			
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	Середня величина
Пружність проміжної опори $c_0^{(i)}$ , т/м	1241,7	1312,4	1240,6	1264,9
Момент інерції балки жорсткості $I_i$ , м <sup>4</sup>	2,5152	2,4543	2,7563	2,5753

Перевірка значень частот по знайдених середніх величинах  $c_0$  та  $I$  підтверджує правильність розрахункової схеми і можливість її використання для подальшого аналізу.

Порівняння експериментальних та розрахункових частот виконано в табличній формі і наведено в табл. 2.

Таблиця 2

$i$	$\lambda_i$	$v_i$ , Гц		Розходження
		Експеримент	Розрахунок	
1	0,4742	1,48	1,49	0,67
2	0,5192	1,80	1,79	0,56
3	0,6412	2,70	2,73	1,10

Таким чином, для зміни частот (періодів) вільних коливань з метою стабілізації динамічної стійкості конструкції, скориставшись методикою даної роботи, можна констатувати і одноразово рекомендувати.

1. Оскільки найбільший вплив на частоту коливань має жорсткість пружних опор (пружної основи) тобто арки, то її підсилення призведе до зміни частоти у бік збільшення (тобто зменшення періодів), що небажано, бо у такому випадку вони ще ближче будуть до не рекомендованого нормами діапазону.

2. Дещо ефективнішим буде підсилення самої балки, оскільки це приведе до збільшення

виразу під коренем у формулі для частоти, але в той же час – до зменшення  $\lambda_i$ . Ефект від такого заходу буде значно менший, ніж бажано.

3. Однозначно можна рекомендувати при проектуванні металевих арок з їздою верхом ретельно підбирати співвідношення арки (повинна бути більш гнучка) та балки жорсткості, яка повинна бути більш жорстка.

З подальшим використанням методики обчислення форм коливань при відомих значеннях ( $n, i, \lambda_i, \ell$ ), побудовані три перші форми коливань, які співпадають з експериментальними по основних ординатах.

Ордината форми коливань у  $k$ -му вузлі  $y_k$  та кут нахилу у тому ж вузлі  $\varphi_k$  обчислюються за формулами:

$$\varphi_k = \frac{m_i}{l} \cdot \cos \frac{k\pi}{n}; \quad y_k = \sin \frac{k\pi}{n}, \quad (11)$$

де  $k$  – номер вузла;  $m_i$  – параметр форми коливань, який має для перших трьох форм такі значення:

$$m_1 = 0,1966; \quad m_2 = 0,3922; \quad m_3 = 0,5891$$

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Солдатов К. И. Свободные колебания регулярных балок и некоторых мостовых конструкций на упругих опорах. Дис. ... канд. техн. наук. – Д., 1971. – 220 с.
2. Солдатов К. И., Казакевич М. И. Определение собственных частот колебаний однопролётных внешне распорных радиально-вантовых систем // Межотраслевые вопросы строительства: Реф. сб., – М., 1970. № 8. – С. 190–193.
3. Солдатов К. И. Приближённый метод определения собственных частот колебаний висячих мостов: Тезисы доклада на Всесоюзной конференции. МИСИ, – М., 1974. – 4 с.
4. Солдатов К. И. Некоторые вопросы определения собственных частот колебаний мостов применительно к проектированию // Вопросы статистики и динамики мостов: Межвуз. сб. науч. тр. ДИИТа. – Д., 1987. – С. 94–103.
5. Солдатов К. И. Устойчивость сжатого пояса открытого моста // Динамика мостов и теория

- колебаний: Сб. науч. тр. ДИИТа. – Д., 1975. Вып. 157. – С. 101–105.
6. Солдатов К. И., Бездетко П. В. Экспериментально-теоретическое исследование статической и динамической работы неразрезного сталежелезобетонного пролётного строения автодорожного моста // Вопросы прикладной механики мостов. Сб. науч. тр. ДИИТа. – Д., 1969. – С. 120–128.
  7. Солдатов К. И., Распопов А. С. Об одном подходе к определению параметров свободных колебаний пролётных строений со сквозными фермами // Вопросы статической и динамической работы мостов: Межвуз. сб. науч. тр. / ДИИТ. – Д., 1989. – С. 54–56.
  8. Солдатов К. И., Распопов А. С. Свободные колебания неразрезных ферм железнодорожных мостов // Вопросы прикладной механики мостов: Сб. науч. тр. ДИИТа. – Д., 1969. – С. 47–53.
  9. Яковлев Г. Н., Солдатов К. И., Галушко В. Г. К вопросу о свободных пространственных колебаниях виадуков // Динамика мостов и теория колебаний: Сб. науч. тр. ДИИТа. – Д., 1975. Вып. 157. – С. 52–56.
  10. Солдатов К. И., Кисляк В. П. Исследование динамической работы временных железнодорожных мостов // Вопросы динамики мостов и теории колебаний: Межвуз. сб. науч. тр. / ДИИТ. – Д., 1979. Вып. 220/23. – С. 117–122.
  11. Солдатов К. И. Регулярные упругие модели в задачах динамики и устойчивости мостовых конструкций. Дис. ... д-р техн. наук в форме научного доклада. – Д., 1993. – 73 с.
  12. Солдатов К. И. К вопросу о собственных колебаниях мостовых конструкций на упругих опорах // Вопросы прикладной теории колебаний: Сб. науч. тр. ДИИТа. – Д., 1972. – С. 97–119.
  13. Солдатов К. И., Распопов А. С. Об одной модели динамического расчёта балок проезжей части железнодорожных мостов // Вопросы статической и динамической работы мостов: Межвуз. сб. науч. тр. / ДИИТ. – Д., 1987. – С. 39–45.
  14. Мосты и трубы. СНиП 2.05.03-84, – М., Государственный комитет по делам строительства, 1985. – 199 с.
  15. Обследование и испытания автодорожного моста через р. Старый Днепр в г. Запорожье. Отчет по НИР, – Д., 1975. – 128 с.

Надійшла до редколегії 26.11.03.