

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК: 624.21.059.1/624.012.35

П. М. СТАШУК<sup>1\*</sup>, Р. І. ПОЛЮГА<sup>2</sup>, А. Р. БУГЕРА<sup>3</sup>, О. В. ТАНСЬКИЙ<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> ТОВ «НВП Мостовий центр», вул. Кудрявська, 3/5, Київ, Україна, 04053, тел./факс +38 (044) 272 08 29, ел. пошта p.stashuk@mostcenter.com.ua

<sup>2</sup> Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна (ДерждорНДІ), пр. Перемоги, 57, Київ, Україна, 03113, тел./факс +38 (044) 456 34 15, ел. пошта spogudy@meta.ua

<sup>3</sup> ПАТ «Київсоюзшляхпроект», вул. Кудрявська 3/5, Київ, Україна, 04053, тел./факс +38 (044) 272 08 29, ел. пошта anatol102@meta.ua

<sup>4</sup> ПАТ «Київсоюзшляхпроект», вул. Кудрявська 3/5, Київ, Україна, 04053, тел./факс +38 (044) 272 08 29, ел. пошта o.tanskyu@mostcenter.com.ua

### ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КОНСТРУКЦІЙ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ЕСТАКАДИ

**Мета.** Визначення фактичного напружено-деформованого стану прогонових будов естакади нової конструкції, оцінка їх жорсткості та вантажопідйомності. **Методика.** Натурні вишукування. **Результати.** Випробування показали, що збудована сталезалізобетонна естакада індивідуальної конструкції здатна сприймати проектні навантаження А-11 і НК-80. **Наукова новизна.** Випробування моста, проведені з використанням методу акустичної емісії показали, що при випробувальному навантаженні в ньому не виникають дефекти, розвиток яких є небезпечним для конструкцій прогонових будов моста. **Практична значимість.** Задовільна збіжність теоретичних та експериментальних результатів свідчать про достовірність виконаних розрахунків прогонової будови моста.

*Ключові слова:* обстеження і випробування моста; динамічні характеристики; акустична емісія; випробувальне навантаження

#### Вступ

Сучасні тенденції мостобудування пов'язані із широким впровадженням нових високоміцних матеріалів, удосконалюванням конструктивних форм та методів розрахунків [1]. У зв'язку з цим підвищилась роль натурних випробувань мостів. Випробування проводять для встановлення характеру і величини навантажень на конструкції моста, визначення дійсного рівня напружень в елементах.

Працівниками ТОВ «НВП Мостовий центр» у 2012 році було виконано випробування нової сталезалізобетонної естакади в м. Києві (проект ТОВ «Мостпроект», Київ).

#### Мета

Мета дослідження – визначення фактичного напружено-деформованого стану конструкцій моста нової конструкції, оцінка його жорсткості та вантажопідйомності.

#### Методика

Прогонова будова моста складається з двох сталезалізобетонних нерозрізних частин влаштованих за схемою: в прогонах 1-7 –  $L = 30$  м +  $4 \times 36$  м + 30 м (по осі моста); в прогонах 7-9 –  $L = 2 \times 36$  м (по осі моста). Схема естакади – балочна нерозрізна. В плані прогонові будови 1-2, 3-4, 6-7, 7-8 розташовані на прямій, нерозрізні прогонові будови в 2-3, 4-5, 5-6 вписані у дві горизонтальні криві із радіусом по осі прогонової будови 65 м, з центром кривих що розташований праворуч від осі моста. Прогін 8-9 вписаний у горизонтальну криву із радіусом по осі прогонової будови 65 м, з центром кривої що розташований ліворуч від осі моста. Проміжні опори 7, 8, 9 розташовані під кутом  $60^\circ$  до осі прогонової будови.

Профіль мосту по довжині має висхідні ухили до 77 %, поперечні ухили односторонні в напрямку центру кривих, до 38 %. Габарит проїзної частини моста Г-5,5+2×0,75. Кількість смуг руху – 1. Дорожній одяг проїзної частини

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

є двошаровою конструкцією асфальтобетонного покриття (гусасфальт) загальною товщиною 60 мм. Ширина службових проходів що влаштовані по боках проїзної – 0,75 м. Службові проходи виконані в одному рівні із проїзною частиною. Загальна ширина моста – 8,32 м. Проектні навантаження – А-11, НК-80.

Прогони перекриті двома сталевими балками. Висота стінок балок не змінна і становить 1,62 м. Нижні пояса балок а прогонах 4-5, 5-6, 8-9 об'єднані між собою сталевую ортотропної плитою, утворюючи замкнуту коробчасту конструкцію. Відстань в плані між балками становить 5,57 м. Стінки балок, а також їх нижні пояса укріплені системою поздовжніх та поперечних ребер. Поперечні та поперечні ребра пласки. Матеріал сталевих конструкцій прогонових будов – сталь марки 10ХСНД. Головні балки прогонових будов по верху між собою

об'єднані монолітною залізобетонною плитою товщиною 0,315 м, та системою поперечних балок. Над опорами головні балки об'єднані додатково сталевую діафрагмою по всій висоті стінки балок. Залізобетонна плита поєднується із сталевими головними і поперечними балками за допомогою гнучких упорів  $\varnothing 22$  мм довжиною 0,25 м. Сталь гнучких упорів S235J2G3+C450. Бетон плити прогонової будови В40.

Робоче армування плити - арматура періодичного профілю класу А-III, конструктивне армування – арматура періодичного профілю класу А-I.

Конструкцію прогонової будови виготовлено згідно патентів на винахід UA 68564 А та UA 68566 А.



Рис.2. Загальний вигляд естакади.

Перед початком випробувань було проведено візуальний огляд конструкцій шляхопроводу та виконано дослідження матеріалів елементів споруди неруйнуючими методами з використанням ультразвукових, магнітних та механічних методів.

В якості випробувального навантаження використовували три автомобілі завантажених баластом (два автомобілі МАЗ 551605 вагою 25 т і один автомобіль МАЗ 551605 вагою 33 т). Загальна вага випробувального навантаження становила 83 т. Відповідно до програми статичних випробувань реалізовано дванадцять схем навантаження прогонових будов:

Схема № 1 (завантаження прогону 8-9) – встановлення колоною по осі прогонової будови двох автомобілів вагою по 25 т в прогоні 8-9;

Схема № 2 (завантаження прогону 7-8) – встановлення колоною по осі прогонової будови двох автомобілів вагою по 25 т в прогоні 7-8;

Схема № 3 (завантаження опори 8) – встановлення колоною по осі прогонової будови двох автомобілів вагою по 25 т в прогоні 7-8, та одного автомобіля вагою 33 в прогоні 8-9;

Схема № 4 (завантаження прогону 6-7) – встановлення колоною по осі прогонової будови

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ви двох автомобілів вагою по 25 т в прогоні 6-7;

Схема № 5 (завантаження прогону 5-6) – встановлення колоною по осі прогонової будови двох автомобілів вагою по 25 т в прогоні 5-6;

Схема № 6 (завантаження опори 6) – встановлення колоною по осі прогонової будови двох автомобілів вагою по 25 т в прогоні 5-6, та одного автомобіля вагою 33 в прогоні 6-7;

Схема № 7 (завантаження прогону 4-5) – встановлення колоною по осі прогонової будови двох автомобілів вагою по 25 т в прогоні 4-5, та одного автомобіля вагою 33 в прогоні 6-7;

Схема № 8 (завантаження опори 5) – встановлення колоною по осі прогонової будови двох автомобілів вагою по 25 т в прогоні 4-5, та одного автомобіля вагою 33 в прогоні 5-6;

Схема № 9 (завантаження прогону 3-4) – встановлення колоною по осі прогонової будови двох автомобілів вагою по 25 т в прогоні 3-4, та одного автомобіля вагою 33 в прогоні 5-6;

Схема № 10 (завантаження прогону 2-3) – встановлення колоною по осі прогонової будови двох автомобілів вагою по 25 т в прогоні 2-3, та одного автомобіля вагою 33 в прогоні 5-6;

Схема № 11 (завантаження прогону 1-2) – встановлення колоною по осі прогонової будови двох автомобілів вагою по 25 т в прогоні 1-2, та одного автомобіля вагою 33 в прогоні 5-6;

Схема № 12 (завантаження опори 2) – встановлення колоною по осі прогонової будови двох автомобілів вагою по 25 т в прогоні 1-2, та одного автомобіля вагою 33 в прогоні 2-3.

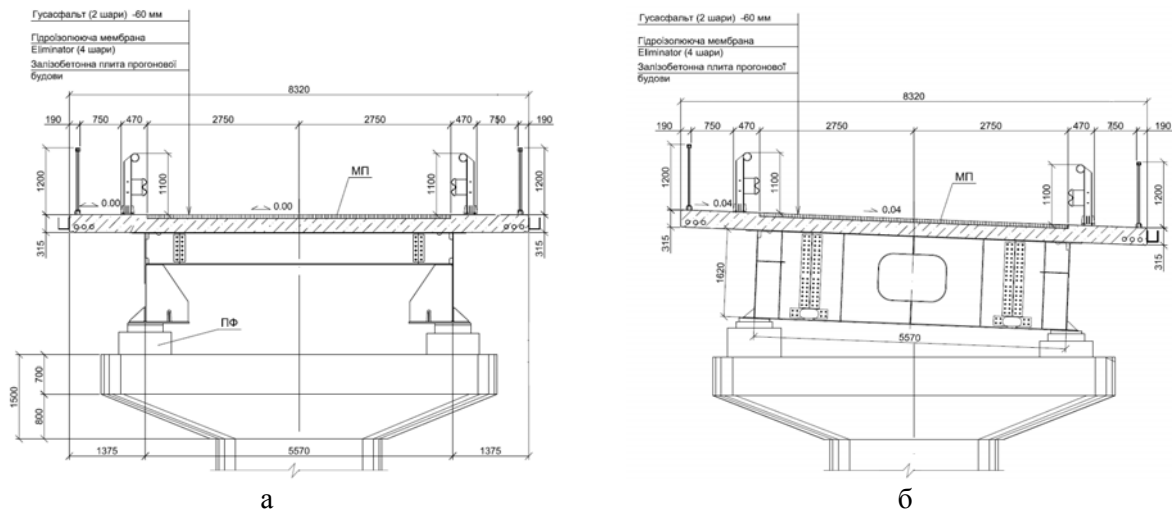


Рис. 1. а – поперечний розріз прогонових будов 1-2, 2-3, 3-4, 6-7, 7-8;  
б – поперечний розріз прогонових будов 4-5, 5-6, 8-9.

Під час статичних випробувань виконувалися заміри прогинів, напружень в металевих балках та виконували реєстрацію сигналів акустичної емісії ПТК «АКЕМ-3к» на базі персонального комп'ютера з використанням технології «PCLabCard».

Для виявлення величин динамічного впливу, що створюються реальним рухомих навантаженням та визначення динамічних характеристик прогонової будови шляхопроводу (частоти і форми власних коливань конструкції, характеристики затухання коливань, величин динамічних коефіцієнтів) проведені динамічні ви-

пробування. Динамічне навантаження на прогонову будову шляхопроводу створювалось проїздом завантаженого автомобіля МАЗ 551605 вагою 330 кН із швидкістю 10 км/год. Для реєстрації та аналізу динамічних характеристик прогонової будови шляхопроводу використовували датчик для реєстрації механічних коливань ПТК «FREQS-2». Датчики для реєстрації коливань ПТК «FREQS» при динамічних випробуваннях встановлювали по середині кожного прогону з боку правого тротуару на поверхні покриття проїзної.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Для визначення розрахункових величин прогинів, напружень прогонової будови моста та динамічних характеристик, проводили статичний і динамічний розрахунок з використання програмного комплексу «Ліра 9.6».

Максимальна інтенсивність випробувального навантаження по відношенню до норматив-

ного навантаження А-11 для середини прогонових будов становила 82 %, для над опорних перерізів – 93 %.

Приведене до нормативного навантаження максимальні значення прогинів для прогонів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

## Значення експериментальних прогинів прогонових будов приведені до нормативного навантаження

| № п/п | Схема завантаження | Коефіцієнт приведення, $K_p$ | Максимальний вимірний прогин, $f_e$ , мм | Вимірні приведені прогини, $f_e / K_p$ | $f_{el} / \ell_p$ |
|-------|--------------------|------------------------------|--|--|-------------------|
| 1     | № 11 (1-2)         | 0,78                         | 3,7                                      | 4,7                                    | 1/6324            |
| 2     | № 10 (2-3)         | 0,68                         | 5,5                                      | 8,1                                    | 1/4451            |
| 3     | № 9 (3-4)          | 0,7                          | 4,8                                      | 6,9                                    | 1/5250            |
| 4     | № 7 (4-5)          | 0,81                         | 3,3                                      | 4,1                                    | 1/8836            |
| 5     | № 5 (5-6)          | 0,81                         | 5,3                                      | 6,5                                    | 1/5502            |
| 6     | № 4 (6-7)          | 0,82                         | 3,9                                      | 4,8                                    | 1/6308            |
| 7     | № 2 (7-8)          | 0,67                         | 5,6                                      | 8,4                                    | 1/4307            |
| 8     | № 1 (8-9)          | 0,74                         | 4,5                                      | 6,1                                    | 1/5920            |

$f_e$  – значення вимірного прогину [мм];  $\ell_p$  – розрахункова довжина прогону

Вимірні приведені прогини менші  $1/400 \ell_p$ , які допускаються нормами проектування [3].

Одним з критеріїв оцінки моста за результатами статичних випробувань, згідно з ДБН В. 2. 3- 14:2006, є співвідношення вимірних пружних і залишкових деформацій, що виражається показником роботи конструкції  $\alpha$  (табл. 2).

Згідно ДБН В.2.3-6-2002 значення показника роботи конструкції  $\alpha$  для металевих та залізобетонних мостів закінчених будівництвом може досягати 0,15. Експериментальне значення показника роботи конструкції  $\alpha$  приймає значення від 0 - 0,15, що свідчить про задовільну роботу прогонової будови.

При статичних випробуваннях моста тріщиностійкість його конструкцій досліджували із використанням методу акустичної емісії [6]. Перший датчик АЕ був розміщений на поверхні металу головної балки посередині прогону 7-8, другий датчик розташовувався посередині прогону 6-7. Перед встановленням датчика АЕ на металі, здійснювалося очищення поверхні конструкції від фарби площею 4 см<sup>2</sup>. Після нанесення шару акустично-прозорої мастики

«Рамзай» датчик притискали до поверхні за допомогою магнітного тримача. Реєстрація та аналіз сигналів АЕ під час статичних випробувань проводилась із моменту зупинки автомобілів в місцях, визначених схемами випробувань. Інформація реєструвалась протягом 40...60 с.

Обробка критеріальної оцінки виявлення сигналів АЕ від тріщин проводилась відповідно за коефіцієнтом  $K_p$  [5].

Згідно з теоретичними положеннями параметр  $K_p$  характеризує степінь зміни густини енергії в зареєстрованому сигналі АЕ та використовується для виявлення сигналів від тріщин.

Для його визначення використовують формулу:

$$K_{pj} = \lg(E_{cj} / \tau_j^2) \quad (1)$$

де  $E_{cj}$  – енергія від  $j$ -го зареєстрованого сигналу АЕ;  $\tau_j$  – тривалість зареєстрованого сигналу АЕ.

Показник роботи конструкції  $\alpha$ 

| № п/п | Схема завантаження (переріз)    | Максимальне значення пружних вимірних напружень, $\sigma_{el}$ , кг/см <sup>2</sup> | Максимальне значення залишкових вимірних напружень, $\sigma_r$ , кг/см <sup>2</sup> | $\alpha$ ,<br>( $\sigma_r / \sigma_{el}$ ) |
|-------|---------------------------------|---|---|--|
| 1     | № 4 (середина 6-7, нижній пояс) | -87   | -3  | 0,03                                       |
| 2     | № 5 (середина 5-6, нижній пояс) | -93   | -10   | 0,11                                       |
| 3     | № 6 (опора 6, верхній пояс)     | +87   | +13   | 0,15                                       |
| 4     | № 7 (середина 4-5, нижній пояс) | -93   | -7  | 0,08                                       |
| 5     | № 8 (опора 5, верхній пояс)     | +52   | -5  | -0,10                                      |
| 6     | № 9 (середина 3-4, нижній пояс) | -124  | 0   | 0,00                                       |

При встановленні датчика АЕ на поверхні металу значення критерію виділення сигналів АЕ від тріщин параметр  $K_p$  враховуючи прийняті параметри порогу дискретизації становить 4.

Оцінка небезпеки процесів руйнування, що відбуваються в структурі матеріалів об'єктів при навантаженні, здійснюється по аналізу кінетики розвитку випромінювання АЕ з використанням спільного аналізу даних, отриманих на етапах витримки під навантаженням [5]. Для порівняння та узагальнення результатів, незалежних від розмірності аналізованих параметрів, використовують їх формалізацію із нормуванням шкал до одиничної:

$$\bar{E}_n = f(\bar{P}), \quad (2)$$

де

$$\bar{E}_n = E_i / E_{i\max}$$

$$\bar{P}_n = P_i / P_{i\max}$$

$E_i$  – значення накопичення енергії сигналів АЕ під час витримки на ступенях навантаженням у обраному часовому перерізі;  $P_i$  – значення навантаження на досліджуваній об'єкт;

$E_{i\max}$  – максимальне значення накопичення енергії сигналів АЕ під час витримки під навантаженням на ступенях у обраному часовому перерізі;  $P_{i\max}$  – максимальне значення навантаження на об'єкт дослідження при випробуванні. Проведення аналізу із апроксимацією експериментальних даних у відповідності до попередньо описаного виконують за формою:

$$\bar{E}_n = a\bar{P}^b, \text{ при } ti = const,$$

де  $a, b$  – константи;  $ti$  – часовий переріз реєстрації сигналів АЕ.

Абсолютне значення показника степені  $b < 3$  свідчить, що дефекти, котрі розвиваються в структурі матеріалу не є небезпечними. При значенні показника степені  $b \geq 3$  розвиток дефектів є небезпечним.

Дослідження моста методом акустичної емісії показало, що при статичних випробуваннях фіксуються сигнали акустичної емісії, які свідчать про наявність мікродефектів в матеріалі балок прогонової будови (рис. 3). Але аналіз розвитку процесів руйнування у структурі матеріалу показав, що вони не мають тенденції до розвитку.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

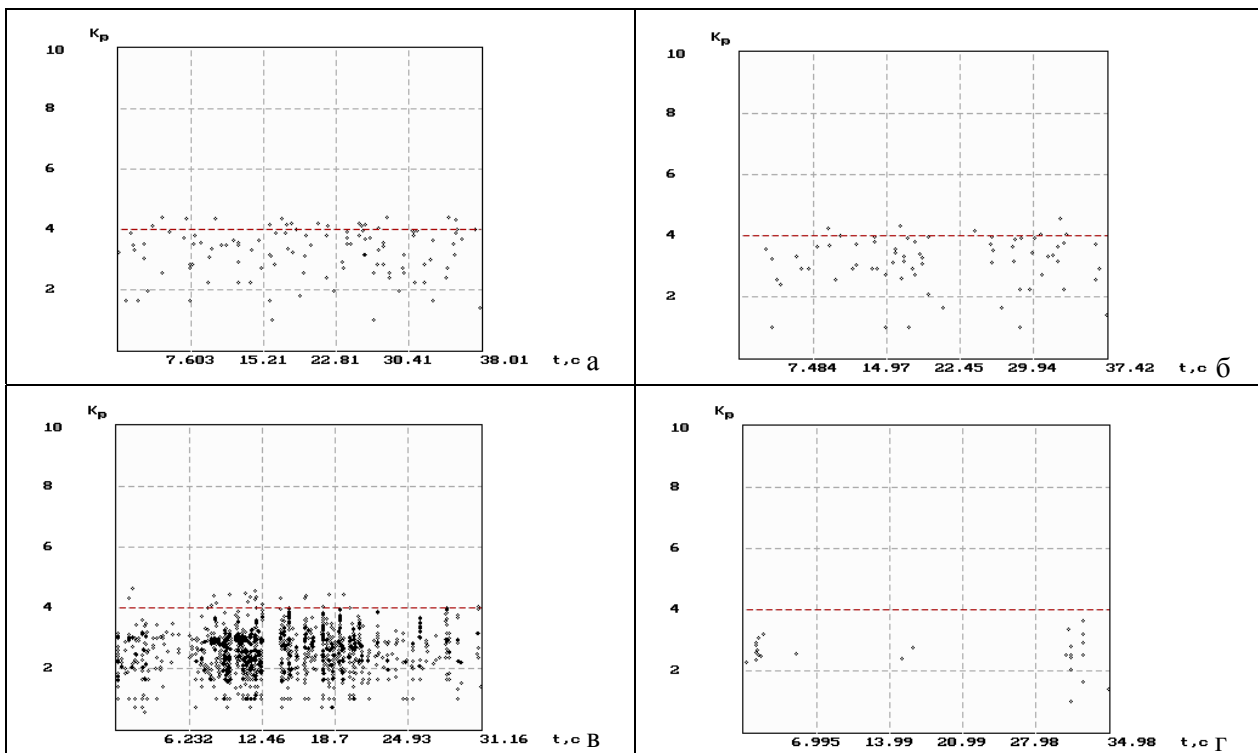


Рис. 3. Зміна коефіцієнту  $K_p$  сигналів АЕ зафіксованих при випробуванні прогонової будови моста:  
 а – ПАЕ-1 за схемою № 2, тимчасове навантаження на прогонову будову 33 т; б – ПАЕ-2 за схемою № 4, тимчасове навантаження на прогонову будову 33 т; в – ПАЕ-2 за схемою № 6, тимчасове навантаження на прогонову будову 33 т; г – ПАЕ-2 за схемою № 10, тимчасове навантаження на прогонову будову 33 т

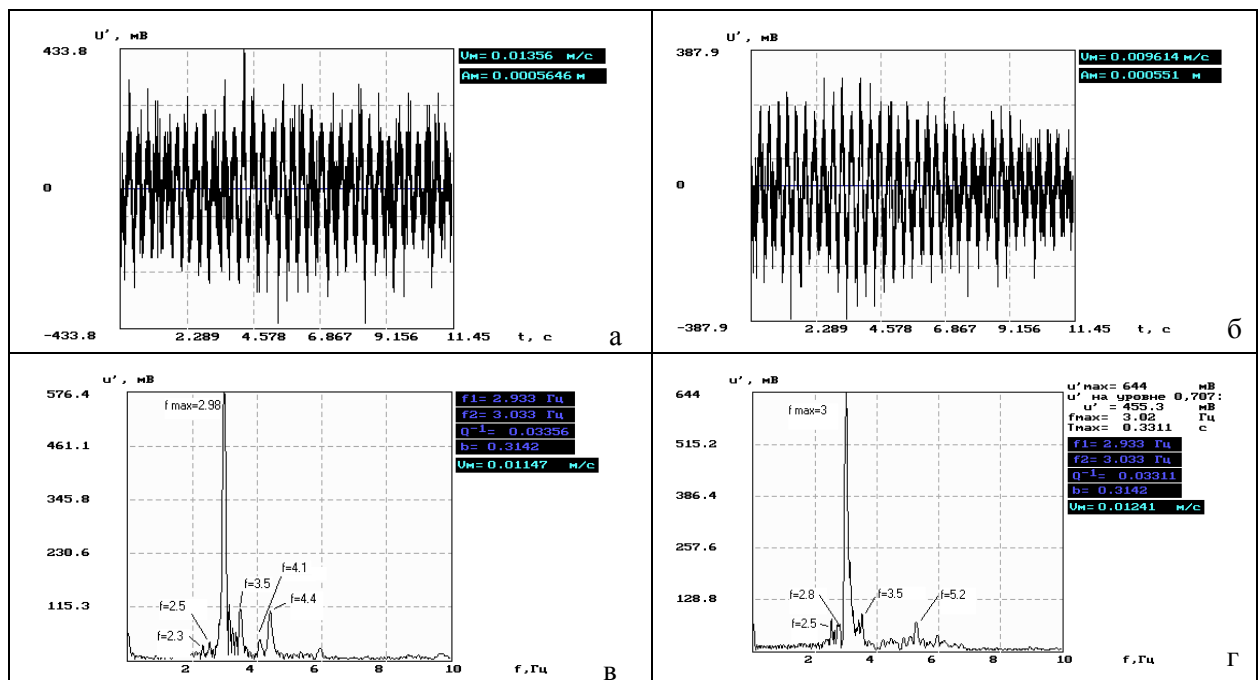


Рис.4. Загальний вигляд механічних коливань прогонових будов – а, б, та амплітудні спектри механічних коливань прогонової будови – в, г. Прогонова будова 1-2 – а, в; 2-3 – б, г.

## МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Параметри коливань прогонової будови, що виникають від руху автомобілів представлено на рис. 4.

**Висновки**

Випробування показали, що збудована сталезалізобетонна естакада індивідуальної конструкції здатна сприймати проектні навантаження А-11 і НК-80. Задовільна збіжність теоретичних та експериментальних результатів свідчать про достовірність виконаних розрахунків прогонової будови моста. Випробування моста, проведені з використанням методу акустичної емісії показали, що при випробувальному навантаженні в ньому не виникають дефекти, розвиток яких є небезпечним для конструкцій прогонових будов моста. Виконані динамічні випробування показали, що динамічні характеристики прогонової будови є задовільними і відповідають вимогам норм.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bien, J. Dynamic load tests in bridge management [Text] / J. Bien, J. Krzyzanowski, P. Rawa, J. Zwolski // 9-th Int. Bridge management Conf. (April 28-30, 2003, Orlando, USA).-IBMC03-20. – 18 p.
2. Мости: конструкції та надійність [Текст] / Й. Й. Лучко, П. М. Коваль, М. М. Корнієв та ін. – Львів : Каменяр, 2005. – 989 с.
3. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст]. – Чинні від 2007-02-01. – Київ : Мін. буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
4. ДБН В.2.3-6:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження і випробування [Текст]. – Чинні від 2010-03-01. – Київ : Мін регіон буд. України, 2009. – 42 с.
5. Филоненко, С. Ф. Акустическая эмиссия. Измерение, контроль, диагностика [Текст] / С. Ф. Филоненко. – Киев : Изд-во КМУГА, 1999. – 305 с.
6. Метод акустико-емісійного діагностування технічного стану мостів при статичних випробуваннях МВВ 218-03450778-240-2004 [чинний від 01.01.2005]. Укравтодор, 2004. – 23 с.

П. М. СТАШУК<sup>1\*</sup>, Р. И. ПОЛЮГА<sup>2</sup>, А. Р. БУГЕРА<sup>3</sup>, А. В. ТАНСКИЙ<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> ООО «НВП Мостовой центр», ул. Кудрявская, 3/5, Киев, Украина, 04053, тел./факс +38 (044) 272 08 29, эл. почта p.stashuk@mostcenter.com.ua

<sup>2</sup> Государственный дорожный научно-исследовательский институт имени М. П. Шульгина (ГосдорНИИ), пр. Победы, 57, Киев, Украина, 03113, тел./факс +38 (044) 456 34 15, эл. почта srogudy@meta.ua

<sup>3</sup> ПАО «Киевсоюздорпроект», ул. Кудрявская 3/5, Киев, Украина, 04053, тел./факс +38 (044) 272 08 29, эл. почта anato1102@meta.ua

<sup>4</sup> ПАО «Киевсоюздорпроект», ул. Кудрявская 3/5, Киев, Украина, 04053, тел./факс +38 (044) 272 08 29, эл. почта o.tansky@mostcenter.com.ua

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИЙ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ЭСТАКАДЫ

**Цель.** Определение фактического напряженно-деформированного состояния пролетных строений эстакады новой конструкции, оценка их жесткости и грузоподъемности. **Методика.** Натурные изыскания. **Результаты.** Испытания показали, что построенная сталезалезобетонных эстакада индивидуальной конструкции способна воспринимать проектные нагрузки А-11 и НК-80. **Научная новизна.** Испытания моста, проведенные с использованием метода акустической эмиссии показали, что при испытательном нагрузке в нем не возникают дефекты, развитие которых является опасным для конструкций пролетных строений моста. **Практическая значимость.** Удовлетворительная сходимость теоретических и экспериментальных результатов свидетельствуют о достоверности выполненных расчетов пролетного строения моста.

**Ключевые слова:** обследование и испытание моста; динамические характеристики; акустическая эмиссия; испытательная нагрузка

P. STASHUK<sup>1\*</sup>, R. POLYUGA<sup>2</sup>, A. BYGERA<sup>3</sup>, A. TANSKYI<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> Company bridge center, 3/5 Kudryavskaya Str., Kiev, Ukraine, 04053, tel./fax + 38 (044) 272 08 29,  
e-mail p.stashuk@mostcenter.com.ua

<sup>2</sup> State Road Research Institute named after M. P. Shulgin, 57 Pobedy ave., Kiev, Ukraine, 03113, tel./fax +38 (044 )456 34 15,  
e-mail sporudy@meta.ua

<sup>3</sup> Corporation «Kievsoyuzdorproekt», 3/5 Kudryavskaya str., Kiev, Ukraine, 04053, tel./fax + 38 (044) 272 08 29,  
e-mail anatol102@meta.ua

<sup>4</sup> Corporation «Kievsoyuzdorproekt», 3/5 Kudryavskaya str., Kiev, Ukraine, 04053, tel./fax + 38 (044) 272 08 29,  
e-mail o.tanskyi@mostcenter.com.ua

## STUDY DESIGN WORK COMPOSITE OF OVERPASS

**Purpose.** Scientific research of life cycle prediction model of road bridges. **Methodology.** Full-scale surveys. **Findings.** Tests showed that the overpass was built stalezalizobetonna individual design is able to perceive the design load A-11 and НК-80. **Originality.** Tests bridge conducted using acoustic emission method showed that at the test load, it does not appear defects whose development is threatening structures span bridge. **Practical value.** Satisfactory convergence of theoretical and experimental results indicate the reliability of the calculations span bridge.

*Keywords:* bridge inspection and testing, dynamic characteristics, acoustic emission, testing load.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А. І. Лантухом-Лященко (Україна), д.т.н., проф. О. С. Распоповим (Україна).*

Надійшла до редколегії 28.06.2014.

Прийнята до друку 02.07.2014.