

К. І. СОЛДАТОВ, А. Г. КРЮК,
В. І. БОРЩОВ, В. І. МАДАТОВ, **Д. К. ЗАПОРОЖЕЦЬ** (ДІІТ)

ВИПРОБУВАННЯ МЕТАЛЕВОГО АРОЧНОГО МОСТА ЧЕРЕЗ РІКУ СТАРИЙ ДНІПРО У ЗАПОРІЖЖІ

Наведено методику та результати статичних і динамічних випробувань металевого арочного моста через ріку Старий Дніпро у Запоріжжі, що були виконані ГНДЛ динаміки мостів ДІІТу в 1975 р. Проведено аналіз результатів випробувань, з метою використання результатів в теоретичних дослідженнях.

Приведена методика и результаты статических и динамических испытаний металлического арочного моста через реку Старый Днепр в Запорожье, выполненные ОНДЛ динамики мостов ДИИТа в 1975 г. Проведен анализ результатов испытаний, с целью использования результатов в теоретических исследованиях.

The article describes the method and elists the results of static and dynamic tests of the metal arch bridge over the river Dnepr in the city of Zaporozhye that were executed by the Laboratory of Bridge Dynamics of Dnepropetrovsk Institute of Railway Transport Engineering in 1975. An analysis of the test results has been made, with the aim of use in theoretical research.

Міський міст через ріку Старий Дніпро у Запоріжжі з'єднує правобережну частину міста з центром, розташованим на лівому березі Дніпра. Сприятливі геологічні та топографічні умови переходу визначили вибір арочної системи. Балка жорсткості виконана нерозрізною по всій довжині (естакад підходів та арки). Загальна довжина нерозрізної балки 320 м (12,8×25 м). Балка жорсткості – це сталезалізобетонний балочний ростверк, що має у поперечному перерізі чотири балки, які спираються на два (в поперечному перерізі) стояки підходів та арок. Сама прогонова будо-

ва моста комбінованої системи з їздою верхом складається з металеві балки, об'єднаної з залізобетонною плитою проїжджої частини за допомогою упорів (болти).

У русловому прогоні балка підпружена гнучкою металеві аркою прогоном 196 м. Профіль арки прийнято по колу радіусом 190 м. Відстань між осями арок 7,5 м. Арки складені прямолінійними відрізками розмірами 12 910 і 13 810 мм. Стик елементів суміщений з кріпленням надарочних стояків. Переріз арок Н-образний. Схема моста наведена на рис. 1.

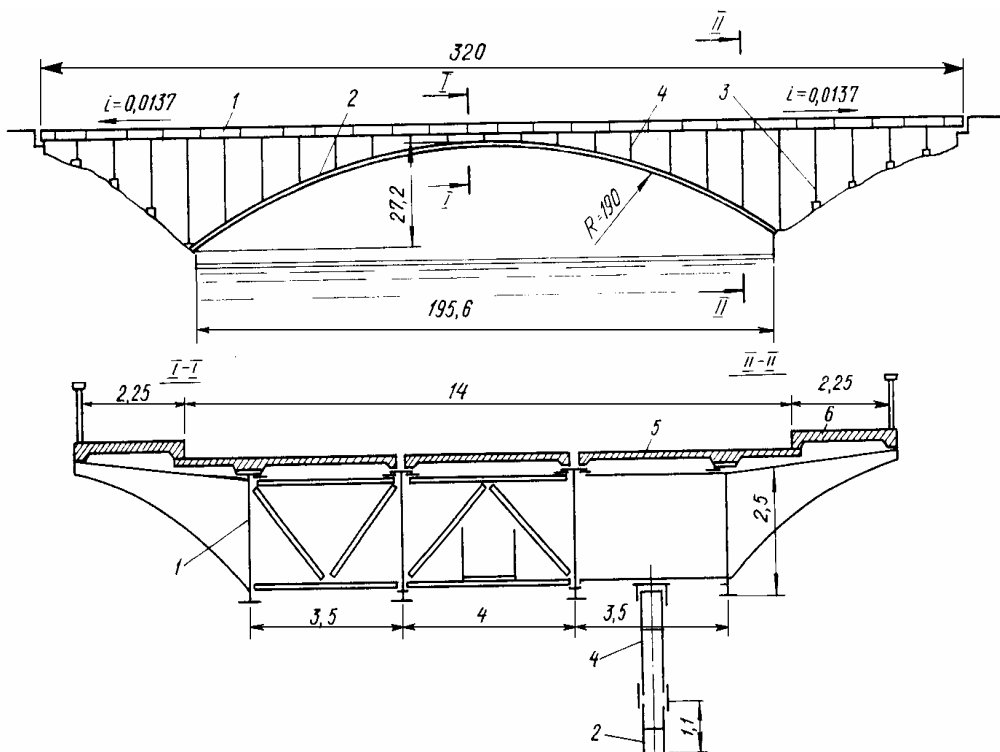


Рис. 1. Схема мостового переходу та переріз балки жорсткості

Опорні частини балки жорсткості, розміщені на стояках, рухомі коткового типу. Опорні частини п'ят арок балансируного типу з шарніром для можливості регулювання їх положення.

Матеріал головних балок – сталь 10Г2С1Д, арок – сталь 16Г2АФ, в'язів по балках і арках – сталь М16С. Проїжджа частина моста з збірного залізобетону (бетон марки 400, клас В35). Плита попередньо стиснута вздовж моста зусиллям 24000 кН. Більш детальна інформація по об'єкту міститься у [1].

Випробування моста було проведено галузевою науково-дослідною лабораторією динаміки мостів ДПТУ згідно з чинними нормами вводу в експлуатацію великих мостів і мостів індивідуального проектування по програмі, розробленій ДПТом, узгодженій автором проекту та затвердженій замовником.

Програмою статичних та динамічних випробувань передбачалось визначити:

- якість змонтованих конструкцій;
- дійсну вантажопідйомність, деформативність і стійкість елементів моста та моста в цілому;

– динамічні характеристики моста (періоди, частоти і декременти коливань, динамічні коефіцієнти).

Статичним випробуванням піддавались: арочний прогін і два прогони правобережної естакади. Як випробувальне навантаження використовувались навантажені самоскиди КрАЗ, вага яких становила 250...260 кН. Кількість автомобілів і розміщення їх в колоні для завантаження моста, визначались розрахунком, але було близьке до нормативного Н-30 на одну арку, що досягалося при завантаженні трьох смуг арочного прогону моста з встановленням автомобілів в смузі через 12,8 м. Розміщення автомобілів по довжині моста з кроком, який дорівнює довжині панелі (12,8 м), забезпечувало симетричне завантаження стояків і опорних вузлів арки.

Оскільки при монтажі арки підвішувались до балочного ростверку, то першим етапом випробувань було визначення деформацій (напруг в декількох перерізах по довжині арки та стояках, прогонів у середині та чверті арки, прогонів балочного ростверку відносно арки). Схема розміщення приборів при цьому випробуванні наведена на рис. 2.

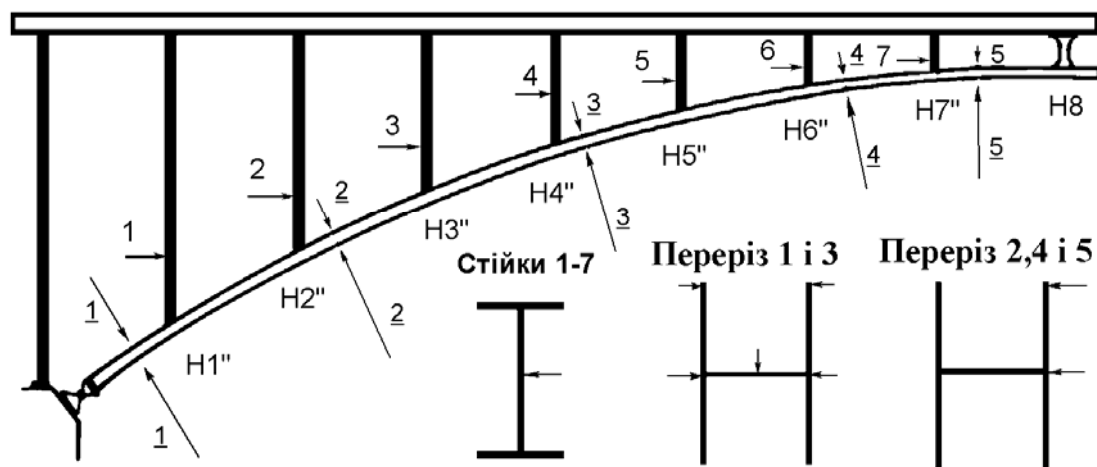


Рис. 2. Схема розміщення приборів при першому етапі випробувань

Вихідними параметрами стану конструкції на момент випробувань були:

- ростверк спирався на дві постійні берегові опори (5 та 6) та на дві тимчасові (під аркою);
- у панелях 2-3-4 знаходився візок вагою 300 кН;
- арки були частково стиснуті домкратами зусиллям 4 000 кН (75% власної ваги арки сприймали опори 5 та 6, а 25 % – ростверк);
- над арочні стояки розтягнуті тільки силою власної ваги.

– Після опускання балочного ростверку з'ясувалось, що:

- прогин замкового перерізу арки склав 110 мм;
- напруги в перерізах арки та стояках незначно відрізнялись від розрахункових (до 15 %).

Схеми навантаження для отримання найбільших прогинів, напруг та згинаючих моментів у перерізах арки і балок ростверку наведені на рис. 3.

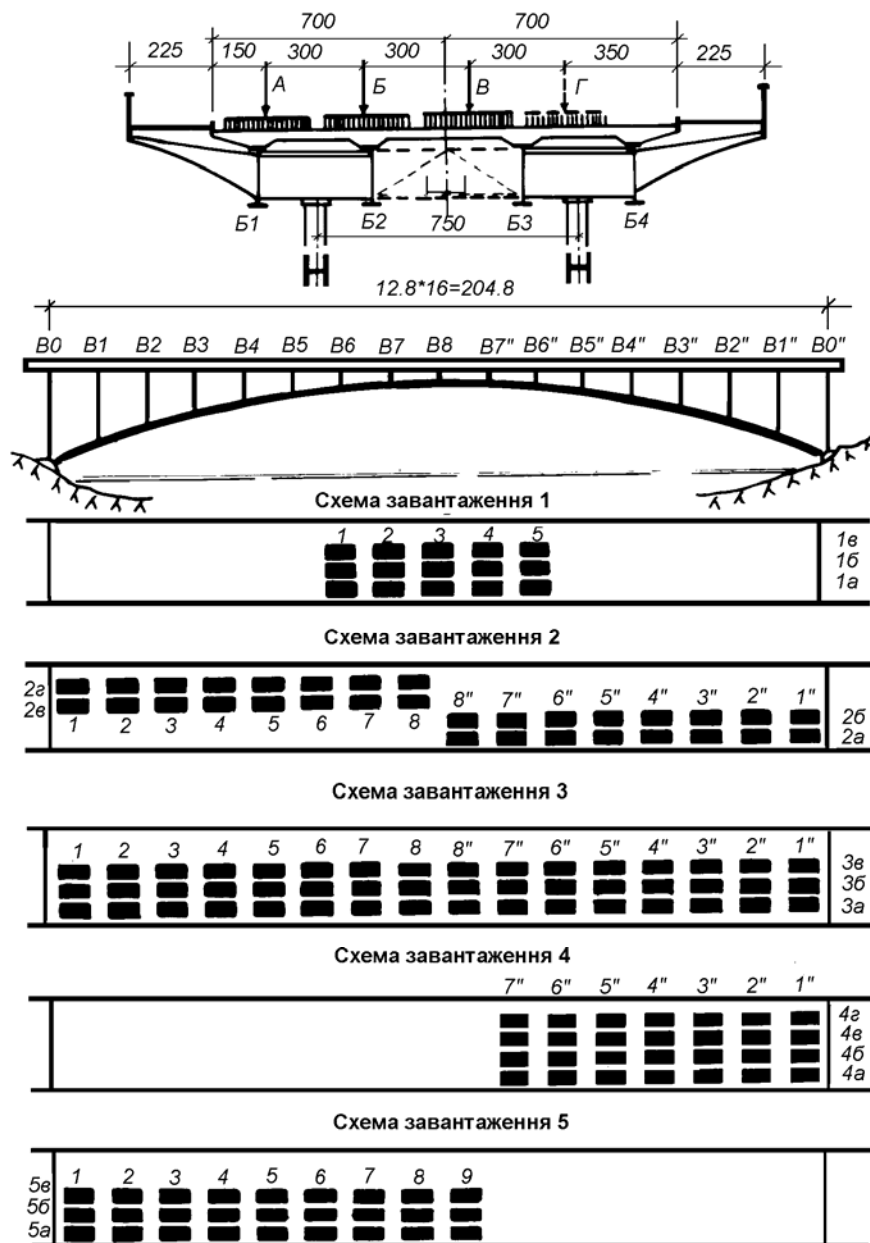


Рис.3. Схеми завантажень при статичних випробуваннях

У процесі проведення статичних випробувань вимірювались такі величини:

- прогини обох арок у середині і у чверті прогону (у вузлах Н8 та Н4);
- прогини балок ростверку у середині панелі В4"-В5" арки і у середині прогонів 9-10, 10-11 правобережної естакади;
- прогини автопроїзду по верховому бордюру;
- напруження в елементах верхової арки оп. 6-Н1", Н2"-Н3", Н4"-Н5" та Н7"-Н8" і стояках надарочної конструкції;
- напруження в поясах (верхньому та нижньому) балок Б2 і Б3 ростверка в панелі В3"-В4" арочного прогону, над опорою № 6 і в прогонах 9-10, 10-11 правобережної естакади;

– поздовжні переміщення кінців балочно-го ростверку на опорах № 1 та 11.

Прогини арок, балок ростверка і переміщення кінців прогонувої будови вимірювались прогиномірами типу ПМ-3 з ціною поділки 0,1 мм, прогини автопроїзду – нівеліром НВ-1 з встановленням рейки на верховому бордюрі напроти стояків надарочної конструкції. Напруження в перерізах арок і в балці ростверку вимірювались механічними тензодатчиками Аістова та електричними приладами – тензодатричною установкою з дрютяними датчиками опору.

Схема встановлення приладів і їх розташування на поперечних перерізах елементів моста наведені на рис 4.

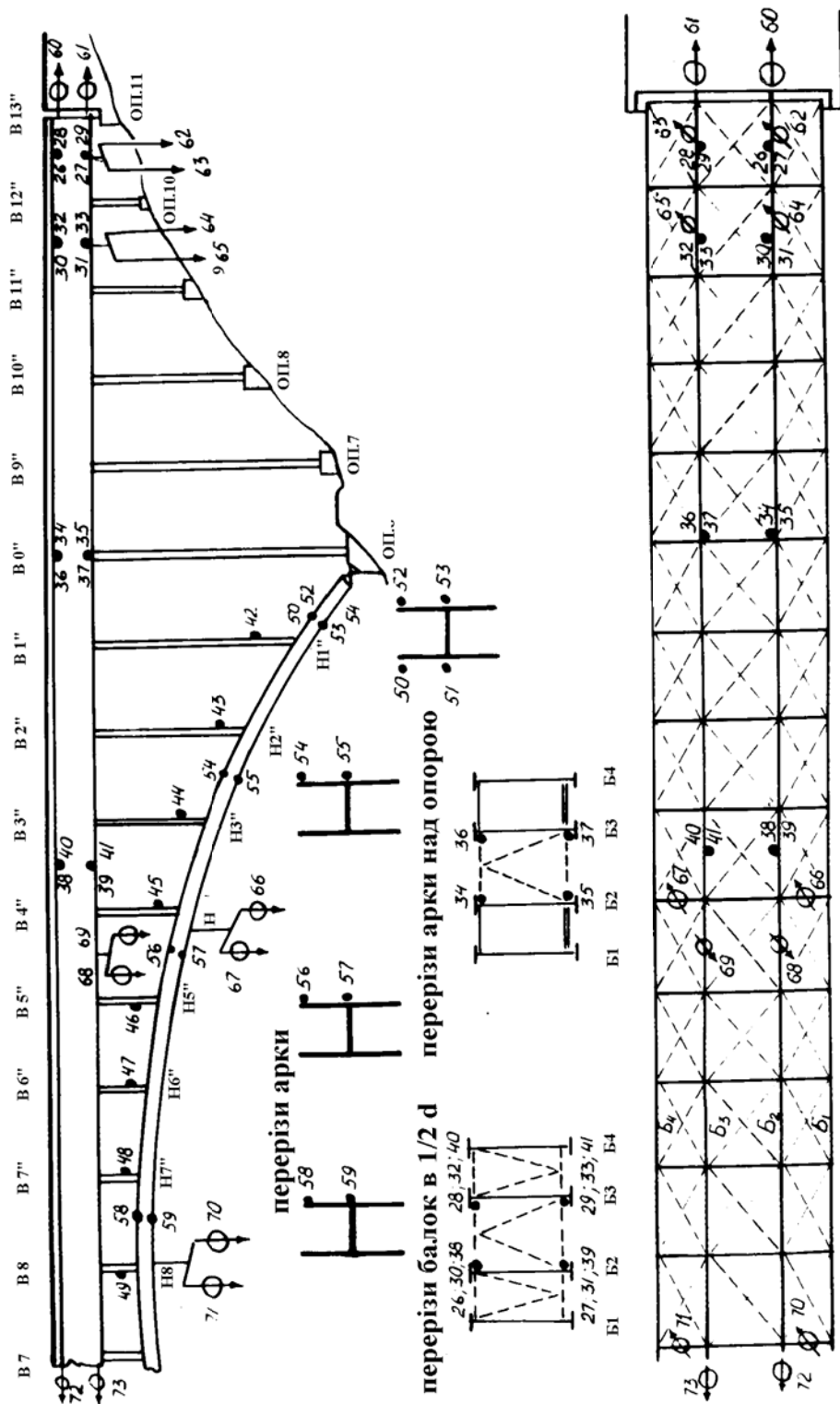


Рис. 4. Схема розміщення приборів при статичних випробуваннях

Для уточнення коефіцієнта поперечного встановлення навантаження і виявлення напруженого стану і деформативності арочної прогонової будови при різних положеннях навантаження поперек мосту, завантаження по кожній з вказаних на рис. 3 схемах проводилось

послідовно(посмужно) і після навантаження – розвантаження кожної смуги брались відліки по приладах.

Форма і величини прогинів арочної прогонової будови, виміряні по верхньому бордюру автопроїзду, наведені на рис. 5.

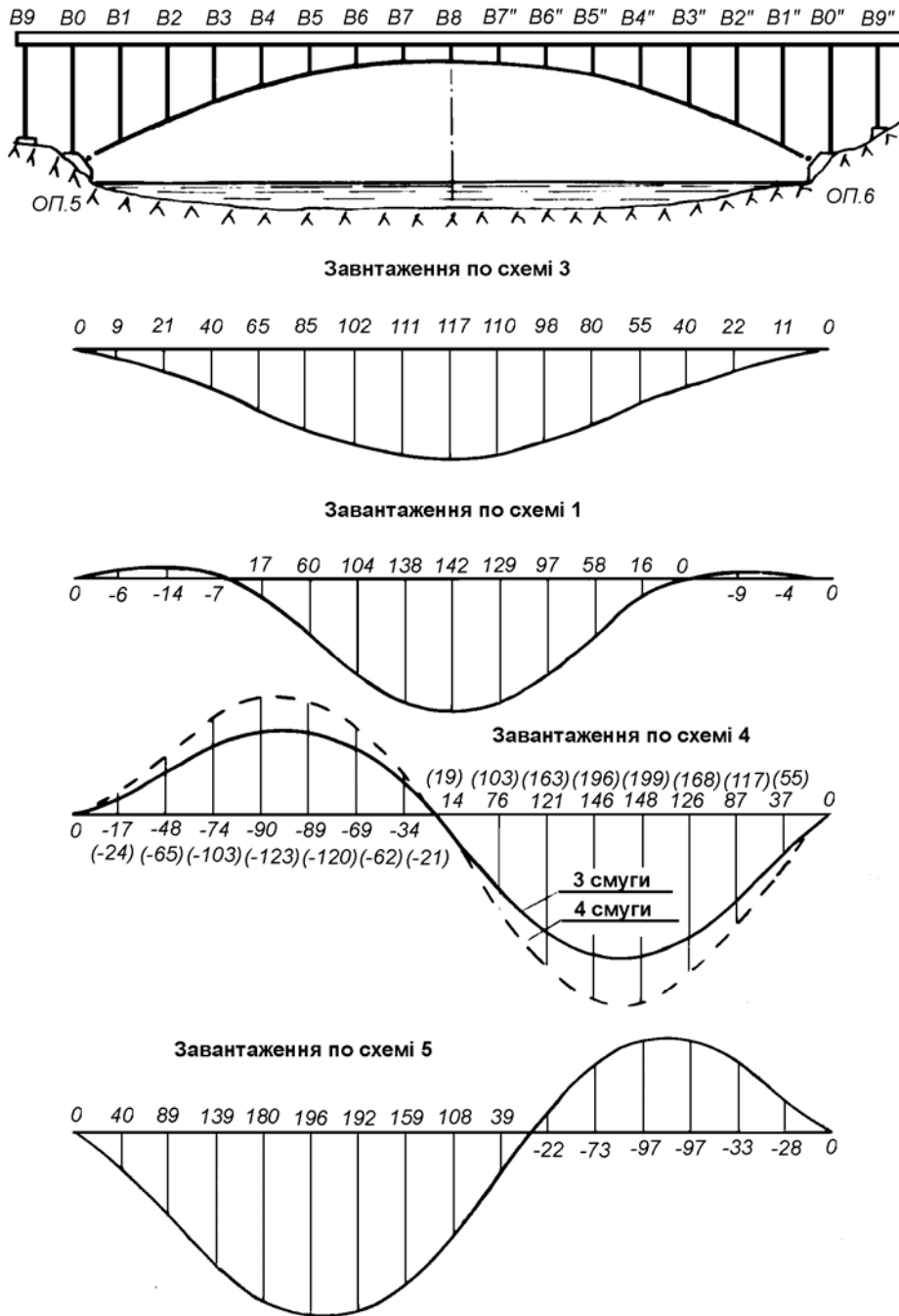


Рис. 5. Форми та величини прогинів арки при різних схемах навантажень

Поздовжні переміщення кінців балок ростверку на опорі № 11, при завантаженні по схемі 3 (див. рис. 5) не перевищують 24 мм, при завантаженні по схемі 4...23,5 мм і по схемі 5...18 мм.

Під час завантаження моста в прогонах 9–10 і 10–11 випробувальним навантаженням напруження у верхніх поясах балок не перевищували

100 кг/см², а в нижніх – 160 кг/см². Виміряні прогини балок в прогоні 10–11 від випробувального навантаження не перевищували 1,5 мм.

Враховуючи унікальність споруди, більш важливими слід вважати динамічні випробування.

Результати статичних випробувань наведені у табл. 1.

Напруження в перетинах арок, надарочних стояках і балках ростверку (кПа)

Найменування елемента конструкції	Шифр елемента	№ точок	Схеми навантаження				
			№ 1	№ 3	№ 4		№ 5
					3 смуги	4 смуги	
Балки ростверку	B0"	34	-2 100	0	+9 300	+18 500	-6 700
		35	+18 900	-10 500	-63 000	-84 000	+53 600
		36	-1 800	+2 700	+7 400	+14 900	-4 100
		37	+25 200	-8 400	-50 400	-74 500	+46 300
	B3"-H4"	38	+3 400	+2 700	-1 300	-1 800	+3 400
		39	-43 000	-10 100	+71 400	+96 600	-84 000
		40	+4 300	+1 300	-2 300	-2 100	+1 900
		41	-42 000	-9 500	+68 500	+95 600	-79 800
		42	-9 300	-8 400	-	-7 400	-13 700
Надарочні стояки	B2"-H2"	43	-	-	-	-	-
	B3"-H3"	44	-14 700	-17 800	-	-10 500	-24 200
	B4"-H4"	45	-18 900	-20 000	-	-	-
	B5"-H5"	46	-22 000	-	-	-23 100	-31 500
	B6"-H6"	47	-29 400	-40 000	-	-24 100	-18 900
	B7"-H7"	48	-16 800	-50 000	-	-36 100	-12 600
	B8"-H8"	49	-	-26 300	-	-31 500	-
	50	-10 500	-69 300	-62 000	-71 400	-9 500	
Арки	Op.6-H1"	51	-21 000	-53 600	-34 700	-36 800	-19 400
		52	-12 600	-70 300	-58 800	-70 400	-11 600
		53	-22 000	-69 000	-34 700	-39 900	-16 300
		54	-18 900	-46 200	-44 100	-49 400	-10 500
Арки	H2"-H3"	55	-21 000	-56 700	-3 600	-34 700	-27 300
		56	-21 000	-62 000	-49 300	-54 600	-31 500
	H4"-H5"	57	-15 700	-57 800	-34 700	-37 800	-35 700
		58	-38 800	-58 800	-30 500	-58 800	-49 400
		59	-27 300	-54 600	-26 300	-28 300	-33 600

Випробуванням піддавалась аркова прогонова будова, при цьому вимірялись такі динамічні характеристики:

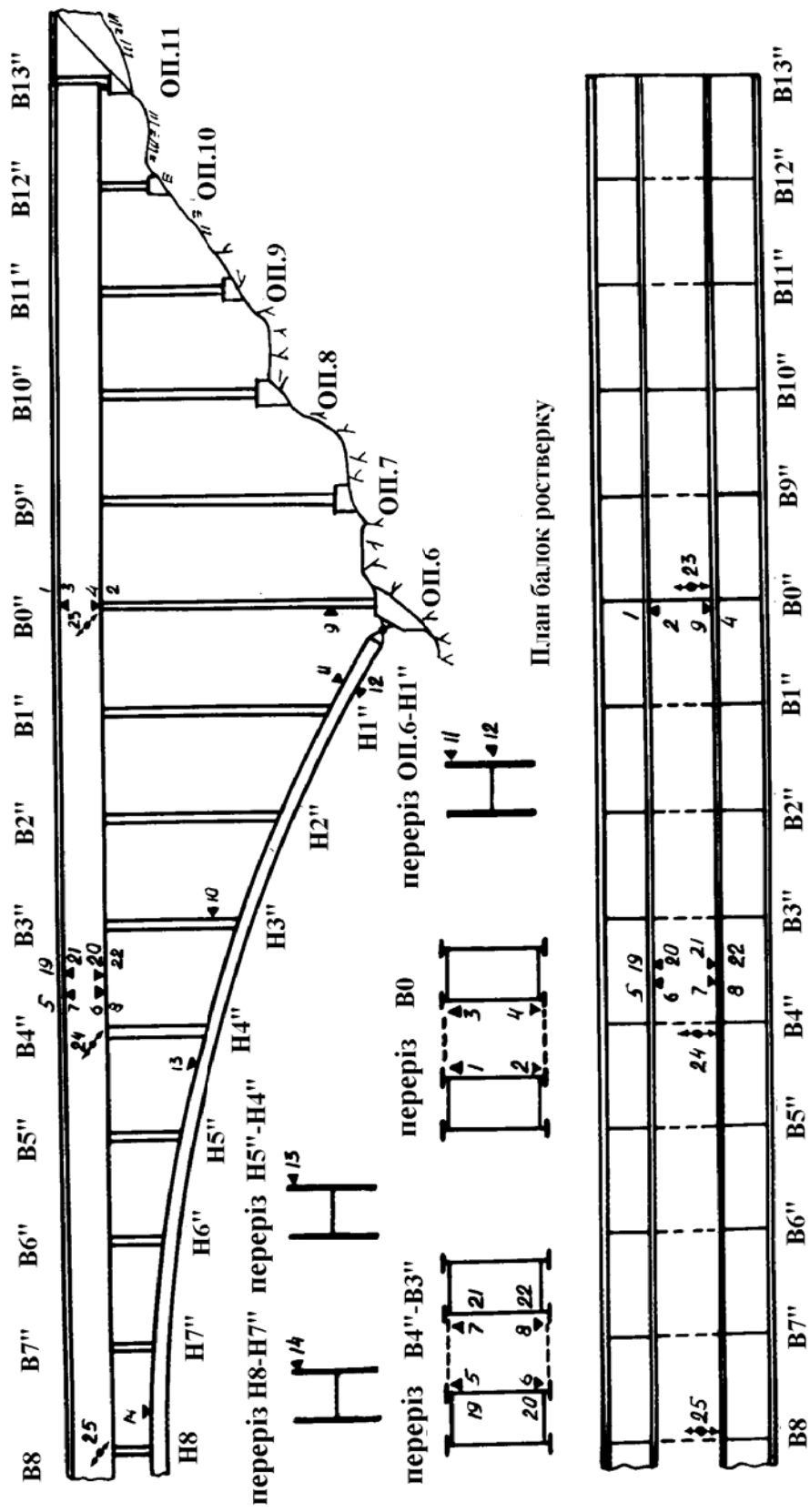
- частоти і форми вільних та вимушених просторових(горизонтальних, вертикальних і крутильних) коливань;
- декременти коливань;
- амплітуди вимушених горизонтальних коливань;
- динамічні коефіцієнти елементів прогонової будови (арки, балки ростверку, стояків надарочної будови).

Для виявлення динамічних характеристик від дії рухомого випробувального навантаження, за допомогою тензOMETричної установки на плівку осцилографів записувались напруження в елементах прогонової будови:

- верхової арки (оп. 6-H1", H4"-H5", H7"-H8");

- у поясах головних балок ростверка в панелі B3"-B4" та в перерізі B0 над опорою 6;
- в одному (верховому) стояку опори 6;
- у надарочному стояку H4"-B4";
- та амплітуди вертикальних та горизонтальних коливань прогонової будови:
- у середині арочного прогону (над стояком № 8);
- у чверті прогону(над стояком № 4);
- на кінці прогону(над опорою № 6).

Всі динамічні процеси реєструвались тензOMETричною установкою на фотоплівці у вигляді осцилограм. Динамічні горизонтальні переміщення прогонової будови реєструвались установкою з інерційним маятником. Схема встановлення пристроїв на прогонової будові під час динамічних випробуваннях наведена на рис. 6.



Позначення:

◀ - датчики спротиву

↔ - інерційні маятники

Рис. 6. Схема розміщення пристроїв для реєстрації динамічних процесів

Як випробувальне динамічне навантаження використовувалось те ж саме навантаження (автомобілі), що й під статичних випробувань. Досвід випробувань автодорожніх мостів з багатосмуговим автопроїздом показав, що найбільші динамічні деформації елементів прогонових споруд моста виникають під час руху по одній з смуг автопроїзду одиночних машин або колон автомобілів при статично завантажених суміжних смугах проїзду. Аналогічний спосіб випробувань був використаний і для оцінки динамічного впливу навантаження на арокну будову. При цьому дві смуги автопроїзду по всій довжині арконого прогону були завантажені автомобілями по схемі 3 (див. рис. 2), а по незавантаженій смузі пропускалася колона з 16 навантажених автомашин КрАЗ з різними

швидкостями (10...70 км/год). Кількість таких дослідів визначалось можливістю використання статистичного метода обробки результатів випробувань. Частина дослідів проведена з проїздом автомобіля через перешкоди (поріжки) висотою 4 см, що укладені поперек автопроїзду в чверті і середині арконого прогону на відстані 100 см одна від одної. Для виявлення характеристик власних коливань прогонової будови (частот, форм і декрементів) проведений ряд досліджень з проїздом по мосту одиночного навантаженого автомобіля з різними швидкостями при незавантаженому арконому прогоні.

Основні динамічні характеристики арконогої прогонової будови, отримані під час обробки експериментальних даних динамічних випробувань, наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Експериментальні значення основних динамічних характеристик арконогої прогонової будови

Найменування характеристик	Вимірник	Величина
Частоти основних тонів вільних коливань:		
горизонтальні	Гц	0,43
крутильні	Гц	0,86
вертикальні – $i = 1$	Гц	1,48
вертикальні – $i = 2$	Гц	1,80
вертикальні – $i = 3$	Гц	2,70
Періоди основних тонів вільних коливань:		
горизонтальні	С.	2,32
крутильні	С.	1,16
вертикальні – $i = 1$	С.	0,68
вертикальні – $i = 2$	С.	0,56
вертикальні – $i = 3$	С.	0,37
Характерні частоти примусових коливань завантаженого прогону	Гц	0,8...2,50
Декременти коливань	–	0,029...0,037
Найбільші значення динамічного коефіцієнта для балок та арок	–	1,045

Частоти вільних коливань досліджуваної прогонової будови, наведені в цій же таблиці, визначались по осцилограмах на ділянках, записаних після сходу випробувального навантаження з моста (по «хвостах» осцилограм).

При цьому було встановлено, що на цих ділянках осцилограм мали місце складні, зв'язані, багаточастотні форми коливань, для виявлення яких проводився гармонічний аналіз з використанням ЕОМ. Характерні значення частот вимушених коливань, наведених в табл. 3, виявлені на осцилограмах записаних у момент проїзду по мосту колони автомобілів при завантажених двох смугах в арконому прогоні по схемі 3 (див. рис. 3).

При цьому вибирались ділянки осцилограм, де мали місце найбільші амплітуди коливань (найбільші динамічні коефіцієнти).

Динамічні коефіцієнти визначались за загальновідомою формулою [1]

$$1 + \mu = \frac{f_{\max}}{f_{st}}, \quad (1)$$

де μ – експериментальне значення динамічної добавки; f_{\max}, f_{\min} – найбільша і найменша ординати динамічних напружень, виміряні на осцилограмі на ділянці одного періоду коливань.

Результати статичних і динамічних випробувань моста дозволили перевірити якість виконаних будівельно-монтажних робіт по спорудженню моста, встановити його несучу здатність, визначити напружений стан і деформативність моста, а також уточнити розрахункові припущення та деякі нормативні дані, прийняті під час проектування моста.

Статичні випробування:

1. Послідовне завантаження випробувальним навантаженням смуг автопроїзду за схемами 3 і 4 (див. рис. 3) зі зняттям відліків по приладах після завантаження–розвантаження кожної смуги дозволило встановити залежності

величин напружень в елементах арки і надарочної конструкції від положення навантаження поперек моста. При цьому було встановлено, що експериментальні значення коефіцієнтів поперечного встановлення суттєво відрізняються від прийнятих у розрахунках.

2. Для оцінки класу прийнятого проектом розрахункового тимчасового навантаження і інтенсивності випробувального навантаження, якою був випробуваний міст, проводився перерахунок з урахуванням експериментального значення коефіцієнта поперечного встановлення. Результати перерахунку наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Тимчасове рухоме навантаження на одну арку

Найменування навантаження	Вимірювач	Навантаження		Різниця	
		Повірочний розрахунок	По проекту	в т/м	в %
Розрахункове навантаження	т/м	5,46	7,07	1,61	29
Нормативне навантаження з динамічним коефіцієнтом	т/м	3,90	5,05	1,15	29
Випробувальне навантаження	т/м	4,06	4,90	0,84	20

З порівняння наведених в табл. 3 даних видно, що прийняте проектом тимчасове рухоме навантаження, яке припадає на одну арку, перевищує розрахункове Н-30 на 29 %.

Випробувальне навантаження під час завантаження за схемою 3 складало 102 % від нормативної Н-30 з врахуванням динамічного коефіцієнта.

3. Оцінюючи отримані результати, дійшли висновку, що найбільші напруження у арці і мінімальні в балках ростверку мали місце під час завантаження за схемою 3. При цьому в арці виникали, в основному, стискаючі зусилля і незначні згинаючі моменти. Найбільші напруження в перерізах головних балок (у нижніх їх поясах) і значні напруження в арці від згинання виникали при навантаженні половини прогону за схемами 3 та 4. Напруження у верхніх поясах головних балок у декілька разів менше ніж напруження у нижніх поясах, що свідчить про надійне включення плити проїжджої частини у сумісну роботу з головними балками.

4. Прогин прогонової будови в арочному прогоні і напруження в балках та арці, виміряні від випробувального навантаження (близького до нормативного Н-30) значно меншого від розрахункових їх значень від прийнятого в проекті навантаження без коефіцієнта перевантаження. Суттєва різниця між розрахунковими і експериментальними значеннями прогинів та

напружень вказують на невідповідність деяких розрахункових припущень про дійсну роботу дослідженої конструкції прогонової будови. Ця невідповідність в свою чергу вказує на наявність деякого (суттєвого) резерву несучої здатності основних конструктивів моста (арок, стояків надарочної будови і балок ростверку). Вказані запаси несучої здатності частково вичерпані збільшенням власної ваги конструкції (перевищення у порівнянні з проектом товщини слою асфальтного покриття автопроїзду та тротуарів).

Динамічні випробування:

1. Рух по мосту колони і одиночних автомобілів при завантаженому та незавантаженому арочному прогоні супроводжувався багаточастотними зв'язаними просторовими (горизонтальні, вертикальні, крутильними) формами коливань.

2. Гармонічний аналіз динамічних процесів незавантаженої прогонової будови (власних коливань), записаних маятниками (горизонтальні і крутильні коливання), і вимірювальними мостами (вертикальні і крутильні коливання), дозволили встановити частотні характеристики основних тонів горизонтальних, вертикальних і крутильних коливань.

3. Згідно з пунктом СНиП [3]: у прогонових будовах пішохідних та міських мостів періоди власних коливань по двох нижчих формах не повинні бути 0,45...0,60 с – в вертикальній і 0,9...1,2 с – в горизонтальній площинах.

Проаналізувавши результати динамічних випробувань моста, можна зробити висновок, що період вертикальних власних коливань по другій формі ($T = 0,56$ с) знаходиться у діапазоні не рекомендованому вищезазначеним пунктом СНиП [3].

4. Найбільші амплітуди вимушених коливань завантаженої прогонової будови мали місце під час коливання з частотами 2,50...0,8 Гц. Під час коливання в цьому діапазоні мали місце найбільші динамічні коефіцієнти, але величини яких добре співвідносяться з нормативними за СН [3] та СНиП [2].

Для порівняння та детального аналізу був проведений розрахунок конструкції як регулярної балки на пружних опорах та за методом скінченних елементів (МСЕ).

Результати розрахунків будуть наведені у наступній публікації.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Баренбойм И. Ю. Индустриальное строительство мостов / И. Ю. Баренбойм, М. Е. Карасик // Будівельник. – К., 1978.
2. СНиП 2.05.03-84 «Мости и трубы».
3. СН 200-62.

Надійшла до редколегії 25.11.2005.