

ДИНАМІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ ПРОГІННОЇ БУДОВИ ТИПУ 690/7К

У роботі розглядаються результати динамічних випробувань прогінних будов розрахунковим прогоном 110 м, виготовлених за типовим проектом 690/7К.

В работе рассматриваются результаты динамических испытаний пролетных строений расчетным пролетом 110 м, изготовленных по типовому проекту 690/7К.

The article considers the results of dynamic tests of sectional structures, with 110m rated flight length, manufactured under standard project 690/7К.

В умовах збільшення швидкостей руху поїздів по мостам вкрай необхідно прогнозувати поведінку екіпажів під час їх проходження по прогінних будовах, тобто необхідно розглядати просторові коливання єдиної системи «прогінна будова – поїзд».

При теоретичних дослідженнях неможливо розглядати сумісні просторові коливання прогінних будов і екіпажів, не маючи достовірних відомостей про горизонтальну та вертикальну жорсткість прогінних будов та їх динамічних характеристик у разі вільних коливань або коливань завантаженої прогінної будови.

На поведінку системи «міст-поїзд» великий вплив, крім динамічних характеристик прогінних будов, має і жорсткість колії на мосту.

З метою експериментального дослідження горизонтальної та вертикальної жорсткості колії на мосту, галузевою науково-дослідною лабораторією штучних споруд та галузевою науково-дослідною колієвипробувальною лабораторією ДІТу були виконані спеціальні дослідження.

Для визначення динамічних характеристик металевих прогінних будов розрахунковим прогоном 110 м науково-дослідною лабораторією штучних споруд ДІТу були проведені динамічні випробування з використанням тільки графікових вантажних і пасажирських поїздів. Прогінні будови мосту, виготовлені за типовим 690/7К проектом, і мають 10 панелей по 11 м при теоретичній висоті головних ферм 15 м.

Динамічні випробування прогінних будов проводилися з метою в'ясування їх роботи під впливом рухомих навантажень, визначення резонансних режимів у системі «міст-поїзд» та розробці рекомендацій з безпечного пропуску навантажень, які обертаються на ділянці, в умовах інтенсивного руху поїздів.

У задачі динамічних випробувань входило:

- визначення частот, форм і декрементів вільних просторових коливань прогінної будови;
- визначення прискорень і амплітуд коливань окремих вузлів прогінної будови при вимушених просторових коливаннях системи «міст-поїзд»;
- виявлення можливих резонансних режимів під час руху навантаження по прогінних будовах мосту;
- виявлення динамічних напруг в елементах головних ферм прогінних будов.

Для вирішення поставлених задач при випробуваннях вимірювалися:

- динамічні вертикальні прогини у вузлах Н6 і Н8 лівої і правої ферм прогінної будови;
- амплітуди і прискорення вертикальних вільних і вимушених коливань лівої і правої ферм в середині та чвертях прогону;
- амплітуди і прискорення горизонтальних вільних і вимушених коливань в рівні верхнього і нижнього поясів, в чверті і середині прогону, а також верхнього вузла порталного розкошу;
- поздовжні прискорення нижнього опорного вузла головної ферми на її рухомому кінці;
- динамічні осьові напруги в елементах Н5-Н6, Н7-Н8, Н9-Н10, В5-Н6, Н6-В7, В7-Н8, Н8-В9 і В9-Н10 головних ферм.

Для визначення моментів входу і виходу навантаження на прогінну будову над опорними перерізами встановлювалися відмітки осей поїзда.

Схема розміщення основних приладів на прогінній будові наведена на рис. 1 і 2.

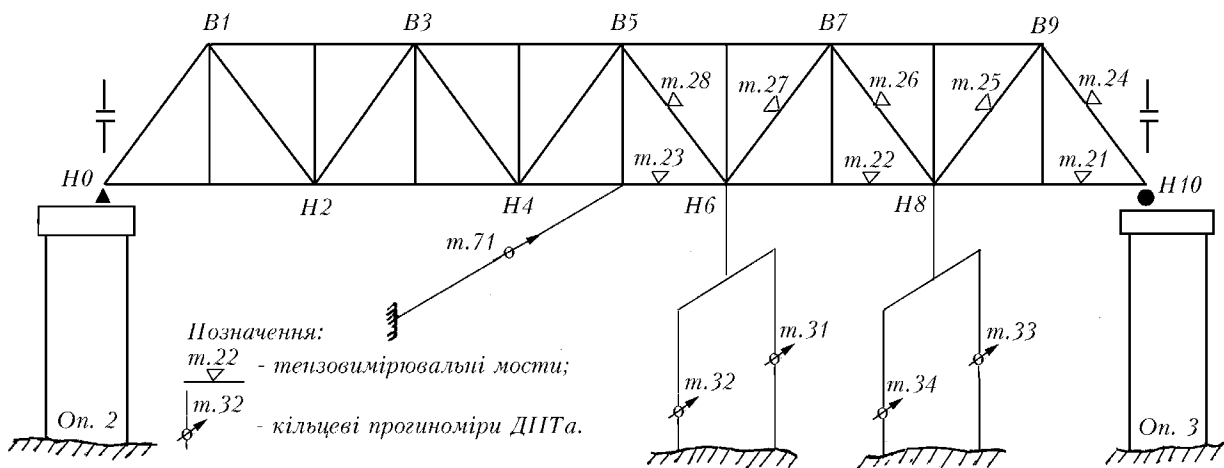


Рис. 1. Схема розміщення тензOMETричних мостів та кільцевих прогиномірів

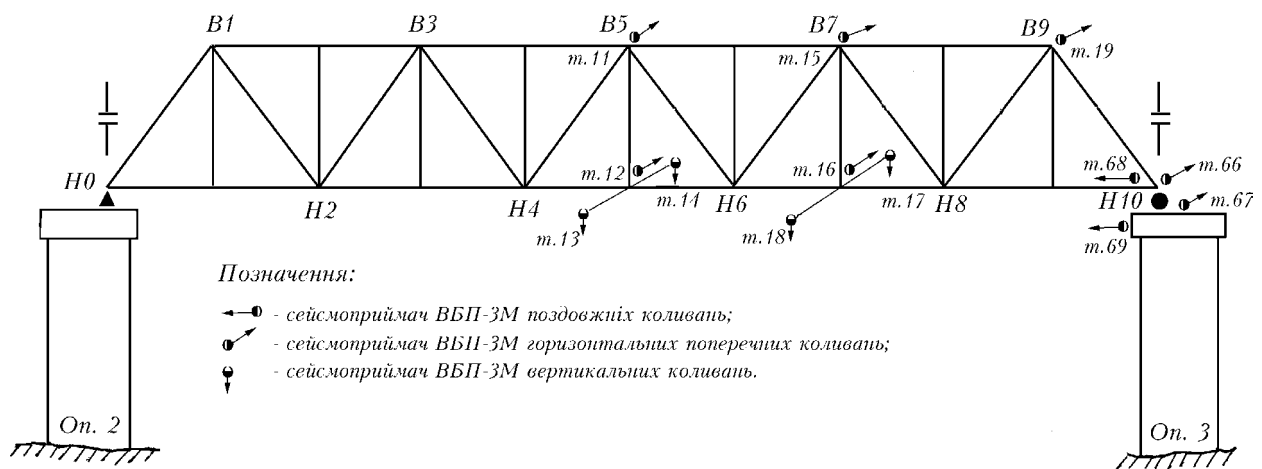


Рис. 2. Схема розміщення сейсмореймачів

Динамічні напруження в елементах прогінної будови визначалися шляхом вимірювань фібрових деформацій за допомогою тензорезисторів марки 2ПКБ-20x200.

Для визначення амплітуд і частот просторових коливань прогінних будов використовувалися сейсмореймачі ВБП-3М. Вимірювання прискорень різних елементів прогінних будов здійснювалося за допомогою вібровимірвальної апаратури з датчиками прискорень ДУ-5С-50.

Для визначення моментів проходу рухомого навантаження через прогінну будову використовувалися магнітні педалі ПМ-56, які встановлювалися біля голівки рейки в опорних перерізах прогінної будови 2–3.

Під час випробувань були зареєстровані динамічні процеси для 296 поїздів, які рухалися по мосту із швидкостями від 30...95 км/год. Особлива увага приділялася реєстрації динамічних процесів під час проходу по мосту однорідних екіпажів, а саме – порожніх піввагонів для перевезення сипучих вантажів, хоперів для перевезення міндобрив, цементу, зерна, дозато-

рів для перевезення баласту та цистерн для перевезення нафтопродуктів.

Динамічні характеристики руслових прогінних будов, а саме періоди, частоти, форми і декременти коливань визначалися шляхом обробки записів реалізацій динамічних процесів в системі «міст-поїзд». При обробці записів реалізацій динамічних процесів було помічено, що вони являють собою накладені одне на одне коливання з різними частотами і перешкоди у вигляді шуму. У зв'язку з цим реалізації динамічних процесів під час руху навантаження по мосту розглядалися як випадкові процеси, які мають гармонічні складові із випадковими амплітудами і фазами. Вважалося, що ці динамічні процеси стаціонарні у смислі Хінчина [2].

З метою визначення частотної структури процесів, які протікають в різних перерізах прогінної будови під час її просторових коливань, проводився спектральний аналіз реалізацій динамічних процесів, які були зафіксовані за допомогою сейсмореймачів, кільцевих прогиномірів і тензорезисторів. Дискретизація реалізацій динамічних процесів проводилася з частотою дискретизації 100 Гц.

лізації динамічних процесів здійснювалась за допомогою дешифратора графіків з кроком квантування 0,02...0,05 с. Для чисельної оцінки спектральної густоти застосовувалося швидке перетворення Фур'є.

Частоти вільних коливань

Як показав аналіз реалізацій вільних коливань три найнижчі головні форми вільних коливань прогонової будови мають частоти 0,95, 2,02 і 2,35 Гц.

Це наочно видно по піках на графіках частотного складу вільних коливань (рис. 3).

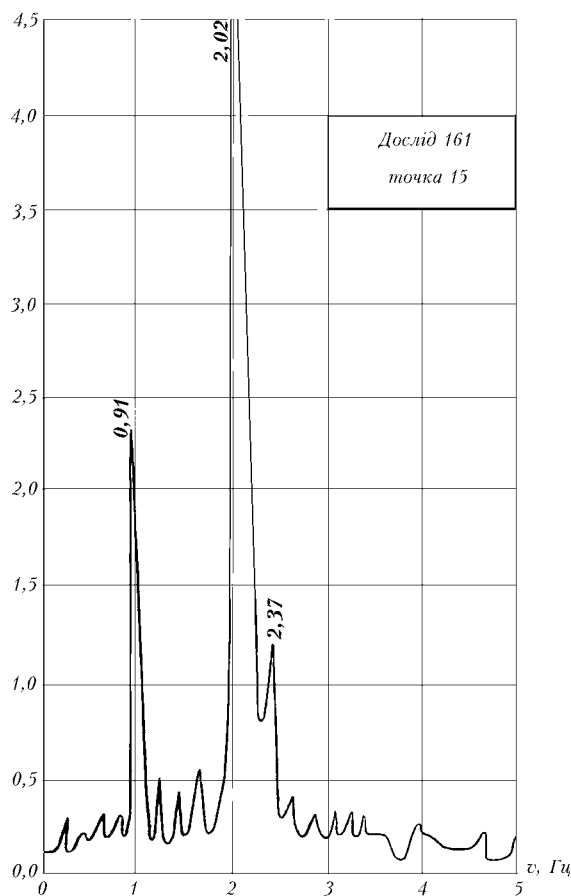


Рис. 3. Частотний склад коливань

Першою формою коливань поперечного перерізу прогінної будови при вільних просторових коливаннях (частота 0,95 Гц) є горизонтальні синфазні коливання поясів прогінної будови. Під час коливань за цією формою нижня і верхня вітрові ферми переміщуються в один і той же бік. Повороти контурів поперечних перерізів у цьому випадку незначні. Іншими словами, першою формою вільних просторових коливань прогінних будов типу 690/7К з розрахунковим прогоном 110 м є горизонтальні поперечні коливання з невеликим закручуван-

ням контура. Період коливань за цією формою становить $T = 1,05$ с.

Друга форма вільних просторових коливань прогінної будови (частота 2,02 Гц) являє собою антифазні горизонтальні поперечні коливання поясів прогінної будови.

У цьому випадку верхня і нижня вітрові ферми переміщуються в різні боки і відбувається поворот всього поперечного перерізу прогінної будови. Частоті вільних коливань 2,02 Гц відповідають крутильні коливання типу «бокової качки», які супроводжуються значними горизонтальними переміщеннями поясів головних ферм. Період вільних коливань прогінних будов при другій формі дорівнює $T = 0,495$ с. Саме ця форма вільних просторових коливань домінує в переважній більшості випадків і особливо сильно проявляється після проходження з великою швидкістю порожнякових составів.

Третя форма коливань (частота 2,35 Гц) являє собою синфазні коливання головних ферм прогінної будови. Під час коливань прогінної будови за цією формою обидві його головні ферми переміщуються в одному напрямку у вертикальній площині. Закручування контуру поперечних перерізів прогінної будови практично не відбувається. Таким чином, третя форма просторових коливань є чисто вертикальними коливаннями. Період вільних просторових коливань для цієї форми дорівнює $T = 0,426$ с.

Інші більш високі форми вільних просторових коливань під час випробувань майже не проявилися.

Для порівняння експериментальні та розрахункові значення частот вільних коливань зведені в табл. 1.

У табл. 1 наведені значення частот, які були підраховані за різними методиками. Досить хороший збіг розрахункових і експериментальних значень періодів і частот горизонтальних і вертикальних вільних просторових коливань прогінної будови. Гірше відповідають експериментальним значенням частоти і періоди крутильних коливань, що були підраховані з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). У цьому випадку розходження становить 16 % і очевидно, вплив того, що вся маса прогінної будови в розрахунку розподілялася по вузлах головних ферм, що призводить до завищеного значення моменту інерції обертання і як наслідок – до більш низького значення крутильної частоти.

Частоти і періоди вільних просторових коливань

Форма	Наближені формули		Теорія ДПТУ		Метод МСЕ		Експеримент	
	ν , Гц	T , с	ν , Гц	T , с	ν , Гц	T , с	ν , Гц	T , с
1	0,90	1,106	1,00	1,000	1,07	0,934	0,95	1,050
2	2,01	0,498	1,71	0,584	1,69	0,592	2,02	0,495
3	–	–	–	–	2,42	0,413	–	–
4	2,34	0,427	2,34	0,427	2,44	0,410	2,35	0,426
5					3,04	0,329	–	–
6					3,77	0,265	–	–

Експериментальні значення частот і періодів вільних просторових коливань прогінних будов мосту відповідають не тільки розрахунковим даним, але і даним, що наведені у [1] для прогінних будов іншого типу з прогоном такої ж довжини.

Логарифмічні декременти коливань і коефіцієнти затухання

На реалізаціях динамічних процесів видно, що затухання вільних коливань прогінних будов

по кожній із головних особистих форм відбувається по-різному.

Так, швидше за інші затухають вертикальні коливання, потім горизонтальні і в останню чергу – крутильні. Відомо, що характеристиками затухання коливань є логарифмічний декремент δ і коефіцієнт затухання ε . Їхні експериментальні значення були отримані по хвостових ділянках записів коливань для кожної із трьох основних форм коливань (табл. 2).

Таблиця 2

Характеристики затухання коливань

Характеристика	Вид вільних коливань		
	горизонтальні	крутильні	вертикальні
Декремент коливань	0,107 (0,120)	0,019 (0,021)	0,113 (0,07...0,14)
Коефіцієнт затухання	0,102 (0,07...0,107)	0,038 (0,049)	0,265 (0,20...0,35)

У табл. 2 у дужках наведені експериментальні значення логарифмічних декрементів і коефіцієнтів коливань, що були отримані для прогінних будов довжиною 110 м, але інших типів. Порівняння показує, що характеристика затухання прогінних будов типу 690/7К практично нічим не відрізняються від характеристик затухання прогінних будов іншого типу з розрахунковим прогоном 110 м.

Вимушені коливання

Частотний склад вимушених просторових коливань системи «міст-поїзд» значно різноманітніший за частотний склад вільних просторових коливань. Спектральний і гармонічний аналіз численних реалізацій вимушених коливань показав що частоти, які з'являються в системі, багато в чому залежать від характеру і виду поїзного навантаження та швидкості його руху. Як приклад на рис. 2 наведені графіки час-

тотного складу реалізацій горизонтальних поперечних коливань середніх вузлів В5, Н5 прогінної будови 2–3 мосту і вертикальних коливань вузла Н5 під час руху по мосту поїзда із порожніх піввагонів із швидкістю 76,8 км/год, а також завантаженого нафтоналивного поїзда під час його руху із швидкістю 78,4 км/год.

На графіках видно, що під час руху поїзда із порожніх піввагонів домінуючою частотою вимушених коливань є частота 1,91 Гц. Ця частота проявляється у вигляді піка на амплітудно-частотних характеристиках як вертикальних, так і горизонтальних коливань різних вузлів прогінної будови. Вимушені коливання системи «міст-поїзд» носять резонансний характер, який супроводжується значним зростанням амплітуд коливань поясів головних ферм і кутів повороту поперечних перерізів прогінної будови. Це явище спостерігається під час руху по мосту составів із порожніх піввагонів із швидкістю 70,0...80,0 км/год. Форма вимуше-

них коливань прогінної будови з частотою 1,9 Гц аналогічна другій власній формі просторових коливань незавантаженої прогінної будови.

Серед різноманітності частотного спектру вимушених коливань системи «міст-поїзд» необхідно також відмітити частоти в діапазонах 0,65...0,80 і 1,7...2,2 Гц, що відповідають горизонтальній і вертикальній власним формам коливань завантаженої прогінної будови. Значення цих частот коливань змінюється залежно від маси поїзда, що рухається по мосту. Із збільшенням маси поїзда частота коливань системи зменшується.

Амплітуди просторових коливань

Амплітуди вимушених просторових коливань вузлів головних ферм суттєво залежать від виду поїздно навантаження і швидкості його руху як кількісна міра динамічних деформацій прогінної будови. У свою чергу великі амплітуди коливань можуть негативно впливати на безпеку руху составів і утруднювати нормальну експлуатацію споруди. Тому виясненню характеру зміни значень амплітуд вимушених коливань вузлів прогінної будови, залежно від швидкості руху і виду поїздів, приділяється велика увага.

Експериментальні значення амплітуд коливань вузлів головних ферм прогінної будови у вертикальному і поперечному горизонтальному напрямках визначалися по реалізаціях, які були отримані за допомогою сейсмоприймачів ВБП-3М і кільцевих прогиномірів ДПТу [1].

Для визначення вірогідних значень амплітуд коливань обробка експериментальних даних виконана методами математичної статистики [2–4] для двох великих груп поїздів залежно від їх виду. До першої групи віднесені состави, які склалися із порожніх чотирирівісних піввагонів, а до другої групи – збірні та пасажирські поїзди. У кожній групі експериментальні дані збиралися в розряди за інтервалами швидкостей руху і зводилися в таблиці розподілення.

Для кожного розряду знаходилися характеристики розподілення амплітуд коливань, як випадкових величин, і визначалися параметри розподілення відповідно до [2; 3].

Значення верхніх довірчих границь для амплітуд поперечних горизонтальних і вертикальних коливань вузлів головних ферм прогінної будови, що були визначені шляхом статистичної обробки експериментальних даних з вірогідностями $P(0,95)$, $P(0,99)$ і $P(0,999)$, наведені в табл. 4 і 5.

Таблиця 3

Вірогідні значення амплітуд коливань прогінної будови під час проходження поїздів із порожніх піввагонів

Вірогідність	Вузли прогінної будови						
	Горизонтальні коливання					Вертикальні	
	B5	H5	B7	H7	B9	H5	H7
$P(0,95)$	13,80	10,69	18,45	11,56	17,03	4,36	2,82
$P(0,999)$	16,21	12,40	21,11	13,38	19,77	5,09	3,29
$P(0,999)$	19,00	14,50	24,21	15,52	22,89	5,97	3,85

Таблиця 4

Вірогідні значення амплітуд коливань прогінної будови під час проходження збірних поїздів

Вірогідність	Вузли прогінної будови						
	Горизонтальні коливання					Вертикальні	
	B5	H5	B7	H7	B9	H5	H7
$P(0,95)$	11,60	9,83	16,38	9,96	15,21	7,33	4,88
$P(0,999)$	13,50	11,03	18,61	11,15	16,96	8,79	5,73
$P(0,999)$	15,90	12,40	20,85	12,54	19,13	10,45	6,75

Під час руху поїзди із порожніх піввагонів викликають амплітуди поперечних горизонтальних коливань вузлів прогінної будови

в 2–3 рази більші, ніж збірні вантажні та пасажирські поїзди. Для зручності порівняння величини і характеру зміни амплітуд коливань

залежно від швидкості руху поїздів на рис. 4 наведені суміщені графіки зміни математичних сподівань і верхні довірчі границі амплітуд горизонтальних коливань середини прогінної будови у вузлах В5 і Н5, а вертикальних коливань у вузлі Н5 – на рис. 5.

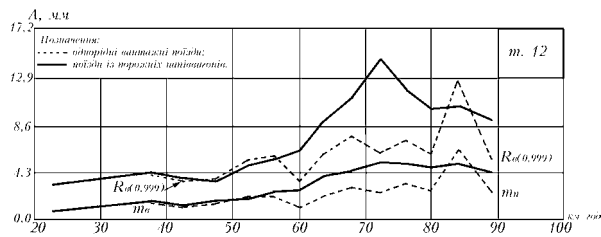


Рис. 4. Довірчі границі амплітуд горизонтальних коливань прогінної будови

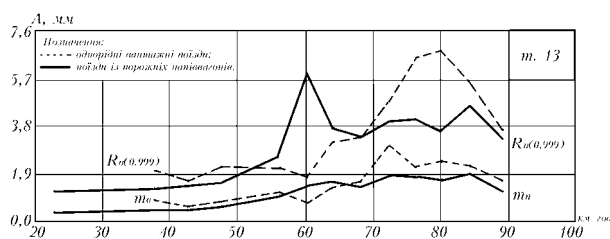


Рис. 5. Довірчі границі амплітуд вертикальних коливань прогінної будови

Слід відмітити той факт, що експериментальні значення амплітуд поперечних горизонтальних коливань прогінних будов іншого типу не перевищували 8 мм [1]. У нашому випадку

маємо значення амплітуд поперечних горизонтальних вдвічі більше, що може призвести до несприятливого впливу на стійкість руху поїзного навантаження, а саме составів із порожніх піввагонів під час їх руху із швидкістю в межах 70...80 км/год.

На рис. 4 видно, що однорідні поїзди із порожніх піввагонів викликають максимальні амплітуди поперечних горизонтальних коливань під час руху із швидкістю 75 км/год, в той час як збірні вантажні і пасажирські поїзди значно менше розгойдують прогінну будову поперечному напрямку. Під час руху цих поїздів максимальне значення амплітуд коливань як у горизонтальній, так і вертикальній площині спостерігається при швидкостях 80,0...85,0 км/год. Однак і в цьому разі величина амплітуд коливань менша, ніж під час руху поїздів із порожніх піввагонів.

Динамічні напруження в елементах головних ферм

Програмою випробувань передбачалося визначення динамічних напруженостей в елементах нижнього поясу і розкосах прогінної будови.

Такі напруження були зареєстровані і оброблені для більшості дослідів. Найбільший інтерес становлять напруження, які виникають в елементах прогінної будови під час проходження по мосту важких екіпажів, а саме у разі пропуску по мосту нафтоналивних поїздів (табл.5).

Таблиця 5

Значення напружень в елементах головних ферм прогінної будови, МПа

Тип навантаження Швидкість руху, км/год	Елементи прогінної будови	Параметри					
		$\sigma_{ст}$	$\Delta\sigma$	σ_{max}	σ_p	σ_{Σ}	$\sigma_{теор}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Нафтоналивний поїзд із чотиривісних цистерн 75,3	Н10-Н8	20,96	1,87	22,83	35,07	57,90	122,44
	Н8-Н6	36,91	3,95	40,86	50,21	91,07	175,29
	Н6-Н4	66,82	8,48	75,30	54,13	129,43	188,97
	Н10-В9	84,74	6,05	90,79	34,33	125,12	119,84
	В9-Н8	59,02	4,54	63,56	48,55	112,21	169,48
	Н8-В7	69,26	8,91	78,17	29,42	107,59	102,69
	В7-Н6	30,31	3,12	33,43	31,97	65,40	111,60
Н6-В5	24,52	4,64	29,16	10,66	39,82	37,20	

1	2	3	4	5	6	7	8
Поїзд із чотиривісних порожніх піввагонів 78,2	H10-H8	5,24	3,14	8,38	35,07	43,45	122,44
	H8-H6	9,48	3,95	13,43	50,21	63,64	175,29
	H6-H4	16,97	7,42	24,39	54,13	78,52	188,97
	H10-B9	21,94	11,35	33,25	34,23	67,58	119,84
	B9-H8	14,38	6,81	21,19	48,55	69,74	169,48
	H8-B7	17,83	10,97	28,80	29,42	58,22	102,69
	B7-H6	6,02	5,57	11,59	31,97	43,56	111,60
	H6-B5	9,94	9,94	19,88	10,66	30,50	37,20

У табл. 5 прийняті такі позначення: $\sigma_{ст}$ – напруження в елементі прогінної будови від статичної дії тимчасового навантаження; $\Delta\sigma$ – динамічна добавка в елементі прогінної будови від динамічної дії тимчасового навантаження; σ_{max} – максимальна величина динамічного напруження в елементі прогінної будови; σ_p – напруження в елементі головної ферми від власної ваги прогінної будови; σ_{Σ} – сумарне напруження в елементі головної ферми від власної ваги прогінної будови і тимчасового навантаження; $\sigma_{теор}$ – напруження в елементі головної ферми від власної ваги споруди і нормативного тимчасового навантаження.

Як видно із табл. 4 динамічні складові $\Delta\sigma$ до напружень під час руху по мосту порожніх піввагонів практично для всіх елементів головної ферми мають більшу величину, ніж під час руху більш важкого нафтоналивного поїзда.

Між тим, максимальне напруження в елементах прогінної будови від дії нафтоналивного поїзда у 2...4 рази більше, ніж для поїзда із порожніх піввагонів, а сумарне напруження від власної ваги прогінної будови і тимчасового навантаження менше, ніж розрахункове. Виняток становить тільки лише для сходних розко-

сів H10-B9, H8-B7 і H6-B5, для яких у разі руху по мосту нафтоналивних поїздів сумарне напруження від власної ваги конструкцій і тимчасового навантаження трохи вище за напруження від власної ваги конструкції і тимчасового нормативного навантаження. І все ж, для цих розкосів сумарне напруження менше за напруження від розрахункової власної ваги і тимчасового розрахункового навантаження для сталі 15ХСНД.

Оскільки поїзди із порожніх піввагонів під час руху по мосту викликають в системі «прогінна будова – поїзд» коливання резонансного характеру, виникло питання про оцінку впливу таких коливань на міцність від утомленості елементів головних ферм.

Відомо [7], що в розрахунках вплив циклічної дії навантаження враховується введенням до розрахункового опору основного металу знижуючого коефіцієнта зменшення γ розрахункового опору основного металу елементів, який залежить від характеристики циклу змінних напружень $\rho = \sigma_{min} / \sigma_{max}$.

У результаті обробки ряду дослідів, у яких спостерігалися коливання резонансного характеру, визначені величини σ_{min} і σ_{max} , а за ними – значення коефіцієнтів γ і ρ .

Результати обробки дослідів наведені в табл. 6.

Таблиця 6

Оцінка міцності від утомленості елементів головних ферм

Елемент	σ_{min} , МПа	σ_{max} , МПа	ρ	γ	Елемент	σ_{min} , МПа	σ_{max} , МПа	ρ	γ
H10-H8	40,77	47,25	0,862	1,0	B9-H8	59,48	67,79	0,877	1,0
H8-H6	58,64	65,11	0,900	1,0	H8-B7	37,02	43,10	0,858	1,0
H6-H4	61,67	67,09	0,922	1,0	B7-H6	39,91	48,08	0,830	1,0
H10-B9	43,28	50,64	0,854	1,0	H6-B5	14,70	22,26	0,660	1,0

Із табл. 6 видно, що коефіцієнт зменшення розрахункового опору основного металу елементів у всіх випадках дорівнює одиниці, тобто такі коливання на утомленість суттєво не впливають.

Динамічні прогини

Реєстрація динамічних прогинів головних ферм проводилася з метою визначення загальної фактичної деформативності прогінної будови під час руху по ній графікових поїздів.

Найбільший прогин 53,5 мм був зареєстрований в середині прогінної будови під час руху по мосту нафтоналивного поїзда із завантажених цистерн із швидкістю 75,3 км/год. Цей прогин становить всього $1/2047$ розрахункового прогону, що набагато менше за гранично допустиму величину для нашого випадку 162 мм або $1/675$ розрахункового прогону [7].

Під час руху по мосту поїзда із порожніх чотиривісних піввагонів із швидкістю 78,2 км/год прогин головних ферм прогінної будови не перевищував 15,5 мм.

Висновки

1. Динамічні характеристики прогінних будов, виготовлених за типовими проектами 690/7 і 690/7К, не відрізняються від динамічних характеристик аналогічних прогінних будов більш ранніх норм проектування.

2. Особливістю даного типу прогінних будов є той факт, що під час руху поїздів із порожніх піввагонів амплітуди горизонтальних по-

перечних коливань прогінних будов значно зростають у порівнянні із аналогічними іншими норм проектування.

Резонансні швидкості зменшуються із 85 до 75 км/год і при цьому спостерігаються крутілі коливання. Ця обставина суттєво не впливає на міцність і стійкість споруди, однак, призводить до розлаштувань в експлуатаційних улаштуваннях і викликає побоювання стосовно забезпечення стійкості коліс порожніх піввагонів проти сходу.

3. Для забезпечення безпеки руху поїздів і достовірної оцінки стійкості піввагонів проти сходу необхідні спеціальні випробування системи «міст-поїзд» з реєстрацією не тільки поведінки прогінної будови під час руху поїзда по мосту, але і одночасною реєстрацією поведінки вагонів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бондарь и др. Динамика железнодорожных мостов. – М.: Транспорт, 1965.
2. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. – М.: Наука, 1971.
3. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1970.
4. Румшисский Л. З. Элементы теории вероятностей. – М.: Наука, 1970.
5. СНиП 2.05.03.84. Мосты и трубы. Госстрой СССР. – М., 1985.

Надійшла до редколегії 10.04.03.