

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.09.012.45.042.8:629.4.016.5

О. Г. МАРИНІЧЕНКО*

* Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (063) 183 96 31, ел. пошта aleksey.marinichenko@gmail.com

ДИНАМІЧНИЙ ВПЛИВ ШВИДКІСНОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХУ НА РОЗРІЗНІ ЗАЛІЗОБЕТОННІ ПРОГОНОВІ БУДОВИ

Мета. Порівняння динамічного впливу пасажирського швидкісного потягу на розрізні залізобетонні прогонові будови різних прольотів під впливом залізничного руху. **Методика.** Моделювання процесів взаємодії рухомого навантаження і пружної стержневої системи за допомогою моделі, яка описує динамічну роботу стержневої системи, яка володіє інерцією, при взаємодії з групою силових факторів. Для динамічного розрахунку прогонових будов мостів на ВСМ застосовується метод прямого інтегрування, який дозволяє визначити не тільки основні параметри напружено-деформованого стану споруди в даний момент часу, але і встановити «критичні» швидкості руху навантаження. Цей метод називається розрахунком у часовій області. **Результати.** Швидкість руху пасажирського потягу в межах досліджуваних швидкостей (до 200 км/год) не має значного впливу на величину прогину прогонової будови. Збільшення швидкості призводить до зростання величини прискорень переміщень прогонової будови. **Наукова новизна.** Досліджено вплив високошвидкісних пасажирських потягів за сучасними європейськими нормами на типові залізобетонні прогонові будови. **Практична значимість.** Визначено можливість і перспективи впровадження швидкісного руху на існуючих штучних спорудах.

Ключові слова: динаміка мостів; залізобетонні мости; розрізні прогонові будови; високошвидкісний рух

Вступ

На даний час в Україні швидкість руху пасажирських потягів не перевищує 160 км/год (швидкісні поїзди «Інтерсіті+»: «Hyundai» і «Skoda»), а вантажних – 100 км/год [8]. З розвитком і модернізацією транспортної мережі, впровадженням нових технологій швидкість руху буде поступово збільшуватись [3]. У зв'язку з цим постає питання допустимої швидкості руху по інженерним спорудах, яка не буде викликати негативних наслідків (резонанс, вихід за допустимі межі прискорення мостового настилу та інші динамічні впливи).

Мережа УЗ складається з ліній, що побудовані та експлуатуються відповідно до нормативів СНД і має за основу режим експлуатації залізниць колишнього Радянського Союзу. Майже всі основні магістралі мережі електрифіковані, як правило, повітряними лініями змінного струму 25кВ, хоча мережі на Сході на Донецькій та Південній залізницях електрифіковані контактною мережею постійного струму 3000В, щоб відповідати стандартам електрифікації Росії, які використовуються для сусідніх

залізниць. Така ж система 3000 В постійного струму застосовується на Львівській залізниці на маршрутах від Львова до Польщі та Словаччини відповідно до мереж сусідніх залізниць.

Майже всі залізничні колії в Україні прокладені широкою колією СНД (1520 мм), а не стандартною європейською шириною колії 1435 мм (хоча 120 км колії стандартної ширини є на заході України). Кілька сусідніх ліній в Польщі, до Катовіце, та Словаччині до Кошице, також прокладені широкою колією, але усі інші лінії у цих країнах прокладені з дотриманням розмірів стандартної колії.

Максимально допустиме навантаження на вісь основних ліній УЗ становить 22 тонни, що майже дорівнює найважчому допустимому навантаженню на вісь – 22,5 тонни на більшості залізниць ЄС. Максимальна швидкість лінії на основних магістральних коридорах становить до 120 км/год для пасажирських поїздів та 90 км/год для вантажних перевезень. За західноєвропейськими стандартами ця максимальна швидкість пасажирських потягів є порівнянною із другорядними магістралями, а не з класич-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ними основними магістралями, де максимальна швидкість лінії зазвичай становить близько 160 км/год.

На високошвидкісних лініях максимальний розмір поїздів – 400 метрів завдовжки, вагою 1,000 тонн бруто (відповідно до ТСЕС (інфраструктура – 2008/217/ЕС), які набрали чинності з 1 липня 2008 року) [9].

Штучні споруди є невід’ємною і важливою складовою транспортної мережі країни. На даний час в Україні відсутні чіткі рекомендації по визначенню швидкісних режимів руху потягів. Більше 12 % залізничних мостів України через наявність дефектів і невідповідність вимогам ДБН є «бар’єрними» об’єктами, що змушує експлуатаційні служби вводити відповідні обмеження швидкості, що суттєво зменшує об’єми вантажних і пасажирських перевезень.

Динаміка прогонових будов залізничних мостів визначається як динамічними характеристиками самих прогонових будов, конструкцією і станом верхньої будови колії на мостах, так і швидкістю руху і параметрами рухомого складу.

В плані динаміки, нерозрізні прогонові будови мають певні переваги перед розрізними: крім більшої вертикальної і горизонтальної жорсткості, нерозрізними прогоновими будовами створюється більш плавний обрис кривої прогину під тимчасовими навантаженнями [2].

Нерозрізні прогонові будови мостів, особливо великих прольотів, займають окреме місце серед стержневих будівельних конструкцій. Являючи собою статично невизначені системи, нерозрізні прогонові будови досить чутливі до нерівномірного вертикального переміщення опор, особливо різко це проявляється в мостах з відносно невеликими прольотами. Але для таких конструкцій відмічається плавність епюр згинальних моментів в місцях переломів на проміжних опорах, що підвищує комфорт їзди в порівнянні зі звичайними розрізними балками.

Динамічна робота нерозрізних прогонових будов мостів вивчена ще не в повному обсязі. Поява локальних тріщин в елементах сталених ферм, виникнення ексцентриситетів мостового полотна, зниження загальної вантажопідйомності проговоної будови з високою вірогідністю можна вважати наслідком динамічних навантажень [4].

Для вивчення динамічного впливу навантаження на мости необхідне вивчення параметрів

вільних коливань прогонових будов. Випробування рухомим навантаженням для дослідження просторових коливань і амплітуд горизонтальних коливань металевих мостів з нерозрізними прогоновими будовами описані в [5, 6].

Основними формами поперечних коливань нерозрізних прогонових будов є вертикальні, горизонтальні і крутильні коливання, аналогічні коливанням розрізних прогонових будов. Вертикальні коливання в більшості дослідів супроводжувались незначними горизонтальними переміщеннями або закручуванням прогової будови [5]. Основними факторами, визначаючими величину горизонтальних переміщень, є конструктивні і якісні характеристики рухомого складу. Величини горизонтальних переміщень прогонових будов залежать від швидкості руху навантаження по мосту. При певних швидкостях спостерігаються резонансні явища, коли амплітуди вимушених горизонтальних коливань досягають максимального значення [6].

Важливий вплив на роботу конструкції має кількість прольотів нерозрізної прогової будови. Дослідження власних коливань несиметричних нерозрізних прогонових будов наведено в [7]. У роботі на прикладі нерозрізних прогонових будов мостів досліджено вплив несиметричності схеми на частоти і форми власних коливань. Показано, що за певних довжин прогонів регулярних схем можливе їх використання для визначення частот прогонових будов.

Динамічні характеристики прогонових будов потрібно назначати так, щоб виключити вірогідні резонансні коливання прогонових будов при високих швидкостях руху потягів.

Резонанс може призводити до тріщиноутворення в бетоні; стирання, зношення баласту внаслідок високим прискоренням; нерівностям верхньої будови колії.

Найголовнішими чинниками, що впливають на динамічну поведінку, є такі [1]:

- 1) швидкість руху по мосту;
- 2) довжина прогону L елемента і вплив довжини на прогин розглядуваного елемента;
- 3) маса конструкцій;
- 4) власні частоти конструкції в цілому і визначальних елементів моста, а також відповідні форми коливань (власні форми) по довжині моста;
- 5) кількість осей, осьові навантаження і відстані між осями;

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- 6) демпфування конструкцій;
- 7) вертикальні нерегулярності рейкової колії;
- 8) характеристики ресор і конструкція підвісок транспортних засобів;
- 9) наявність регулярно розташованих опор плити і колії (поперечні балки, шпали та ін.);
- 10) недосконалості рухомого складу (плоскі ділянки, відхилення від кругової форми, дефекти підвіски і т. ін.);
- 11) динамічні характеристики колії (баласту, шпал. компонентів рейкової колії і т. ін.).

Мета

Метою даної статті є порівняння динамічної поведінки розрізних прогонових будов різних прольотів під впливом залізничного навантаження, що рухається із різною швидкістю.

Методика

Основою для розвитку динаміки мостів є наукові дослідження, пов'язані з моделюванням процесів взаємодії рухомого навантаження і пружної стержневої системи. Узагальнюючи результати цих досліджень, умовно можна виділити чотири групи динамічних моделей. В моделях першої групи стержнева система і навантаження приймаються безінерційними, тобто враховуються тільки пружні властивості основи. В моделях другої групи стержнева система не володіє інерцією, але інерційні властивості має об'єкт, моделюючий зовнішній вплив (в простому випадку маса рухається по балці). Моделі третьої групи описують динамічну роботу стержневої системи, яка володіє інерцією, при взаємодії з групою силових факторів. В моделях четвертої групи всі взаємодіючі елементи володіють інерцією. В загальному випадку, питання вибору динамічної моделі залежить від співвідношення мас її елементів, а також цілей випробування. Динамічні моделі взаємодії залізничного потягу з прогоновими будовами, прийняті в цій роботі, відповідають моделям третьої групи.

Для вибору параметрів прогонової будови для дослідження було проаналізовано нижче наведені рекомендації по проектуванню нерозрізних залізобетонних прогонових будов.

У залізобетонних залізничних мостах влаштовують дво-, три- і багатопрогонові нерозрізні балки. Два прольоти переважно роблять одна-

ковими. При більшій кількості прогонів, крайні доцільно виконувати дещо коротшими від середніх. Зазвичай крайні прогони беруть у межах 0,7...0,8 довжини середніх. Нерозрізною системою перекривають прогони довжиною 50...60 м, в окремих випадках до 100 м і більше. Поперечний переріз великих прогонів часто виконують коробчастим. Висота головних балок складає 1/16...1/20 від довжини прогону. На середніх опорах висота балок традиційно збільшується на 20...40 % проти висоти посередині прольоту за допомогою влаштування вутів з нахилом не більше 1:3, а для великих прогонів нижній грані балок надають криволінійного обрису. Над проміжними опорами нижня грань балки повинна мати горизонтальні площини довжиною 0,6...1,0 м для розміщення опорних частин.

Розрахунок виконується для моделі потягу HSLM-A (рис.1) згідно з Єврокодом [1].

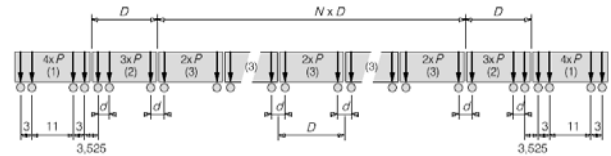


Рис. 1. Модель HSLM-A для динамічного розрахунку

Характеристики моделі наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики моделі HSLM-A1

Універсальний потяг	Кількість проміжних вагонів N	Довжина вагона D [м]	Відстань між осями візка d [м]	Зосереджена сила P [кН]
A1	18	18	2,0	170

Складання динамічної розрахункової моделі прогонової будови.

Методи динамічного розрахунку можна розділити на два класи: методи, засновані на прямому інтегруванні рівнянь руху (методи центральних різниць, Хаболта, θ -метод Вілсона, Ньюмарка та ін.) і методи розкладання за власними формами (гармонічний аналіз) [10]. Методи другого класу мають велику перевагу по кількості обчислювальних операцій, швидкості розрахунку, об'ємах займаємої оперативної пам'яті комп'ютера і простоті алгоритму. Крім того, на більшість будівельних конструкцій, будівель і споруд мають вплив постійні і

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

довготривалі навантаження, які можуть бути враховані в моделі у вигляді приєднаних мас. Це пояснює причину переважної реалізації методів розкладання за власними формами у багатьох сучасних програмних комплексах.

Але для нерозрізних прогонових будов, що працюють в умовах складного динамічного навантаження, особливо під дією рухомих навантажень, застосування гармонічного аналізу викликає суттєві складності, а в деяких випадках й узагалі є неможливим. Для динамічного розрахунку прогонових будов мостів на ВСМ більш ефективними є методи прямого інтегрування, які дозволяють визначити не тільки основні параметри напружено-деформованого стану споруди в даний момент часу, але і встановити «критичні» швидкості руху навантаження. Цей метод називається розрахунком у часовій області [10].

В дискретній стержневій системі усі розподілені силові фактори зводяться до характерних вузлових точок, а силові і кінематичні параметри передаються від одного вузла до іншого за допомогою зв'язуючих елементів – стрижнів. Для виконання розрахунку такої системи спочатку визначають зусилля і деформації в кінцевих перерізах окремих стрижнів (перший етап), після чого вирішують систему рівнянь руху інерційних елементів (другий етап). При цьому перший етап є статичним розрахунком, а динамічна система – миттєво нерухою.

Для розрахунку були обрані розрізні прогонові будови з прогоном 23,6, 32,3 і 50 м. Геометричні характеристики перерізів вказаних прогонових будов наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристики перерізів прогонових будов

Схема прогонової будови, м	Приведена площа, м ²	Приведений момент інерції I _y , м ⁴
23,6	2,34	2,98
32,3	2,51	3,12
50	5,127	4,47

Розглянемо конструкцію збірної балочної прогонової будови залізничного мосту з попередньо напруженого залізобетону розрахунковою довжиною 22,9 м за проектом Ленгіпротрансмосту, 1975 р. (рис. 2).

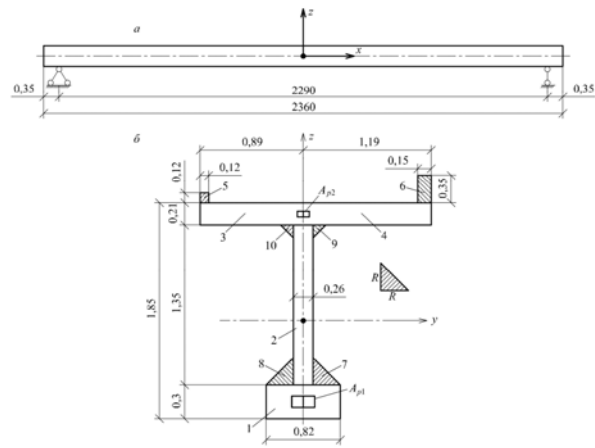


Рис. 2. Конструкція залізобетонної прогонової будови розрахунковою довжиною 22,9 м:
а – загальні розміри; б – переріз (1 – нижній пояс; 2 – головна балка; 3, 4 – плита баластного корита; 5, 6 – бортики; 7-10 – вути)

Прогонова будова має повну довжину 23,6 м і в поперечному перерізі складається з двох симетричних блоків висотою 1,85 м. Ширина блоку на ділянках біля центрів опирання – 82 см, в середині прогонової будови – 26 см, відстань між блоками – 1,8 м. Плита баластного корита має товщину 21 см і з'єднується з головною балкою радіальними вутами радіусом 30 см. Прогонова будова армована звичайною арматурою класів АІ, А-ІІ і пучками високоміцного дроту класу В-ІІ. Об'єм бетону конструкції – 64,3 м³. Кількість попередньо напруженої арматури в середині прогонової будови становить 21 пучок. При моделюванні залізобетонні вути, розташовані у верхньому і нижньому поясах прогонової будови, замінюються трикутними елементами, а зовнішній і внутрішній бортики плити – прямокутними.

Результати

Проведемо розрахунок за наведеною у відповідному розділі методикою з кількістю мас $n=5$, які інтегруються з кроком 10^{-3} с. Результати розрахунку вільних коливань прогонової будови представлені на рис. 3. Далі шляхом динамічного розрахунку отримані максимальні переміщення і прискорення середини прогонової будови для різних довжин прогонів. Результати наведені на рис. 4 і рис. 5.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

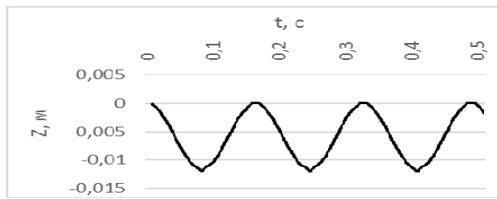


Рис. 3. Графік коливання прогонової будови

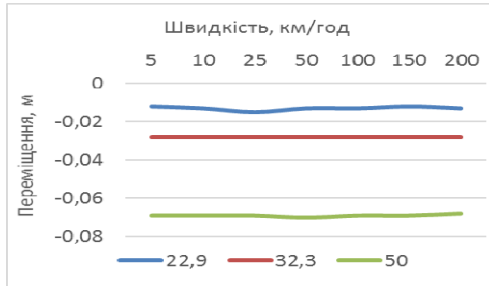


Рис. 1. Максимальне переміщення середини прогону в залежності від швидкості руху потягу для прогонів 22,9; 32,3 і 50 м

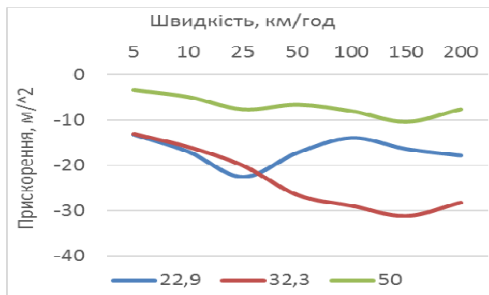


Рис. 2. Максимальне прискорення середини прогону в залежності від швидкості руху потягу для прогонів 22,9; 32,3 і 50 м

Наукова новизна і практична значимість

Досліджено вплив високошвидкісних пасажирських потягів за сучасними європейськими нормами на типові залізобетонні прогонові будови. Визначено можливість і перспективи впровадження швидкісного руху на існуючих штучних спорудах

Висновки

В результаті аналізу динамічного впливу швидкісного руху на різні схеми прогонів мосту встановлено наступне:

1. Швидкість руху пасажирського потягу в межах досліджуваних швидкостей (до 200 км/год) не має значного впливу на величину прогину прогонової будови.

2. Збільшення швидкості призводить до зростання величини прискорень переміщень прогонової будови.

3. Розрізні прогонові будови різної довжини мають достатню жорсткість для пропуску високошвидкісних пасажирських потягів в межах досліджених швидкостей (до 200 км/год).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ-Н Б EN 1991-2:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 2. Рухомі навантаження на мости (EN 1991-2:2003, IDT) [Текст]. – Надано чинності 2010-27-12. – Київ : Мінрегіонбуд, 2010. – 207 с.
2. Костюк, М. Д. Будівництво та реконструкція залізничної мережі України для збільшення пропускної спроможності та запровадження швидкісного руху поїздів [Текст] / М. Д. Костюк, В. В. Козак, В. О. Яковлев та ін. – Київ : ІЕЗ ім. С. О. Патона. – 2010. – 216 с.
3. Бреслер, М. М. Взаимодействие неразрезного пролетного строения с подвижным составом [Текст] / М. М. Бреслер, Ю. А. Радзиховский, З. Г. Ройтбурд, Э. М. Тененбаум // Вопросы динамики мостов и теории колебаний. – Днепропетровск, 1982. – Вып. 222/26. – С. 90-104
4. Артемов, В. Е. Гармонический анализ изгибных колебаний неразрезных пролетных строений мостов [Текст] / В. Е. Артемов, И. Г. Мудрая // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Вып. 31. – 2010. – С. 157-160.
5. Запорожец, Д. К. Исследования пространственных колебаний металлических мостов с неразрезными пролетными строениями [Текст] / Д. К. Запорожец // Теория колебаний и динамика мостов. – Днепропетровск, 1969. – Вып. 89. – С. 101-112.
6. Запорожец, Д. К. Амплитуды горизонтальных колебаний мостов с неразрезными пролетными строениями [Текст] / Д. К. Запорожец // Теория колебаний и динамика мостов. – Днепропетровск, 1969. – Вып. 89. – С. 112-119
7. Солдатов, К. І. Дослідження динаміки нерегулярних по довжинах прогонів мостових конструкцій [Текст] / К. І. Солдатов, Г. С. Железняк, К. В. Гуржий // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2004. – Вып.4. – С. 221-226
8. Наказ № 436/Н від 06.08.2013. Про встановлення допустимих швидкостей руху поїздів на Придніпровській залізниці [Текст].
9. Підтримка інтеграції України до Трансєвропейської транспортної мережі ТЕМ-Т: РК.2 Швидкісний залізничний транспорт. Заключний звіт 2.1, 2010 рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ten-t.org.ua/ua/>

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

10. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов [Текст] / К. Бате, Е. Вилсон. – Москва : Стройиздат. – 1982. – 448 с.
11. Fryba, L. Dynamics of Railway Bridges [Text] / L. Fryba. – Prague : Academia Prague. – 1996. – 330 p.
12. Fryba, L. Vibration of Solids and Structures Under Moving Loads [Text] / L. Fryba. – Prague : Academia Prague. – 1972. – 484 p.
13. O'Connor, C. Bridge Loads [Text] / C. O'Connor, P. A. Show. – London: Spon Press, 11 New Fetter Lane, EC4P 4EE. – 2000. – 350 p.
14. Paoluzzi, A. Geometric Programming for Computer-Aided Design [Text] / A. Paoluzzi. – England, West Sussex: PO19 8SQ, Wiley & Sons Ltd, 2003. – 799 p.
15. Garg, V. K. Dynamics of railway vehicle systems [Text] / V. K. Garg, R. V. Dukkipati. – Toronto : Academic Press, 1984. – 390 p.

А. Г. МАРИНИЧЕНКО*

* Кафедра «Мосты и туннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (063) 183 96 31, эл. почта aleksey.marinichenko@gmail.com

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ СКОРОСТНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА РАЗРЕЗНЫЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ПРОЛЕТНЫЕ СТРОЕНИЯ

Цель. Сравнение динамического воздействия пассажирского скоростного поезда на разрезные железобетонные пролетные строения различных пролетов под влиянием железнодорожного движения. **Методика.** Моделирование процессов взаимодействия подвижной нагрузки и упругой стержневой системы с помощью модели, описывающей динамическую работу стержневой системы, которая обладает инерцией, при взаимодействии с группой силовых факторов. Для динамического расчета пролетных строений мостов на ВСМ применяется метод прямого интегрирования, который позволяет определить не только основные параметры напряженно-деформированного состояния сооружения в данный момент времени, но и установить «критические» скорости движения нагрузки. Этот метод называется расчетом во временной области. **Результаты.** Скорость движения пассажирского поезда в пределах исследуемых скоростей (до 200 км / ч) не имеет значительного влияния на величину прогиба пролетного строения. Увеличение скорости приводит к росту величины ускорений перемещений пролетного строения. **Научная новизна.** Исследовано влияние высокоскоростных пассажирских поездов по современным европейским нормам на типовые железобетонные пролетные строения. **Практическая значимость.** Определена возможность и перспективы внедрения скоростного движения на существующих искусственных сооружениях

Ключевые слова: динамика мостов; железобетонные мосты; разрезные пролетные строения; высокоскоростное движение

О. G. MARINICHENKO*

* Department «Bridges and tunnels», of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., 49010, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (063) 183 96 31, e-mail aleksey.marinichenko@gmail.com

DYNAMIC EFFORTS OF HIGH SPEED TRAINS ON SIMPLE SPAN CONCRETE BRIDGES

Purpose. Comparison of the dynamic effects of high-speed passenger train on the cutting reinforced concrete spans different length under the influence of railway traffic. **Methodology.** Modeling of processes of interaction of the moving load and the elastic rod system with the help of the model describing the dynamic performance of the system core, which has inertia, when interacting with a group of power factors. For dynamic analysis of bridge spans on the high-speed railway applies the method of direct integration, which allows to determine not only the basic parameters of the stress-strain state of the structure at this point in time, but also to establish "critical" load speed. This method is called time-domain calculation. **Findings.** Speed passenger train in motion within the test speeds (up to 200 km/h) has no significant impact on the value of the span deflection. The increase in speed leads to

© О. Г. Мариниченко, 2016

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

an increase in the value of the acceleration displacement of the superstructure. **Originality.** The effect of high-speed passenger trains on modern European standards on typical reinforced concrete spans. **Practical value.** The possibility and prospects of implementation of high-speed traffic on the existing artificial structures/

Keywords: dynamics of bridges; Reinforced concrete bridges; Split span structures; High-growth movement

REFERENCES

1. DSTU-N B EN 1991-2:2010. *Jevrokod 1. Diji na konstrukciji. Chastyna 2. Rukhomi navantazhennja na mosty (EN 1991-2:2003, IDT)*[EN 1991-2:2003 Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges]. Kyiv, Minrehionbud Ukrayiny Publ., 2010, 207.
2. Kostyuk M. D., Kozak V. V., Yakovlev V. O. and others. *Budivnyctvo ta rekonstrukcja zaliznichnoyi merezhi Ukraini dlya zbilshennya propusknoyi spromozhnosti ta zaprovadzhennya shvidkysnogo ruhu poyzivdiv* [Construction and reconstruction of railway network of Ukraine for increasing of carrying capacity and implementation of high-speed movement]. Kyiv, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine Publ., 2010. 216 p.
3. Bresler M. M., Radzykhovskiy Y. A., Roytburd Z. G., Tenenbaum E. M. *Vzaimodejstvie nerazreznogo proletnogo stroenija s podvizhnym sostavom* [The interaction of continuous span with moving stock]. *Voprosy dinamiki mostov i teorii kolebanij – Problems of bridge dynamics and vibration theory*, 1982, vol. 222/26, pp. 90-104.
4. Artimov V. E., Mudraya I. G. *Garmonicheskij analiz izgibnyh kolebanij nerazreznih proletnyh stroenij mostov* [Harmonic analysis of bending vibrations of continuous bridge spans]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana*. [Bulletin of Dniepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, vol. 31, - pp. 157-160.
5. Zaporozhec D. K. *Issledovanija prostranstvennyh kolebanij metallicheskih mostov s nerazreznymi proletnymi stroenijami* [Research of spatial vibrations of metal bridges with continuous beams]. *Teoriya kolebanij i dinamika mostov- Vibration theory and bridge dynamics*, 1969, vol. 89, pp.101-112.
6. Zaporozhec D. K. *Amplitudy gorizontol'nyh kolebanij mostov s nerazreznymi proletnymi stroenijami* [Amplitudes of horizontal vibrations of bridges with continuous spans]. *Teoriya kolebanij i dinamika mostov – Vibration theory and bridge dynamics*, 1969, vol. 89, pp. 112-119.
7. Soldatov K. I., Zhelezniak H. S., Hurzhiy K.V. *Doslidzhennja dinamiki nereguljarnih po dovizhinah pragoniv mostovih konstrukcij* [Research of dynamics of lengthwise irregular spans of bridge structures]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana*. [Bulletin of Dniepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2004, vol. 4, pp. 221-226.
8. Nakaz № 436/N ot 06.08.2013. *Pro vstanovlennja dopustimih shvidkостей ruhu poizdiv na Pridniprovs'kij zaliznici* [Order № 436/H form 06.08.2013. About establishing of allowed movement speeds for trains of Pryndiprovsk railway].
9. *Pidtrimka integracii Ukraini do Trans-Evropejs'koï transportnoi merezhi TĈM-T. RK 2. Shvidkis-nij zaliznichnij transport. Zakljuchnij zvit 2.1. Gruden' 2010 roku* [Support of Ukrainian integration into trans-European transport network TETN. PK2. High-speed railway transport. Final report 2.1. December 2010] Available at: <http://www.ten-t.org.ua/ua/>
10. Bate K., Wilson E. *Chislennye metody analiza i metod konechnyh elementov* [numerical methods of analysis and finite-element method], Moskow, Stroyizdat Publ., 1982. 448 p.
11. Fryba, L. *Dynamics of Railway Bridges*. Prague, Academia Prague Publ., 1996. 330 p.
12. Fryba, L. *Vibration of Solids and Structures Under Moving Loads*. Prague, Academia Prague Publ., 1972. 484 p.
13. O'Connor C., Show P. A. *Bridge Loads*. London, Spon Press, 11 New Fetter Lane, EC4P 4EE. 2000. 350 p.
14. Paoluzzi A. *Geometric Programming for Computer-Aided Design, England*. West Sussex: PO19 8SQ, Wiley & Sons Ltd, 2003. 799 p.
15. Garg V. K., Dukkipati R. V. *Dynamics of railway vehicle systems*. Toronto, Academic Press Publ., 1984. 390 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н, проф. В. Д. Петренко (Україна), д.т.н., проф. А. А. Плуґиним (Україна).

Надійшла до редколегії 29.08.2016.

Прийнята до друку 26.09.2016.