

## К ВОПРОСУ УЧЕТА СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ БАЛОЧНЫХ МОСТОВ

Предложено методику приближенного учета скорости движения поездов по мостам разрезной балочной системы. Определены коэффициенты учета скорости движения, которые могут быть использованы в практических инженерных расчетах мостовых конструкций.

*Ключевые слова:* мост, поезд, железная дорога, скорость движения, колебания

На железных дорогах Украины эксплуатируется около 20 тыс. искусственных сооружений общей протяженностью более 600 км, основная часть из которых сосредоточена на Львовской, Юго-Западной и Одесской железных дорогах. Количество пролетных строений, эксплуатируемых от 50 до 100 лет, превышает 5000 шт., при этом более 20 % железнодорожных мостов в Украине имеют различные дефекты. Ежегодно Укрзалізниця выдает предупреждения об ограничениях скорости движения поездов по тем или иным искусственным сооружениям, снижая экономические показатели грузоперевозок.

Максимальная скорость движения пассажирских поездов в Украине – 120 км/ч, на отдельных участках – 140 км/ч. Согласно общепринятой в мировой практике классификации пассажирских перевозок, перевозки по обычным дорогам осуществляют на скорости до 160 км/ч, скоростному движению соответствует диапазон 160...250 км/ч, высокоскоростному – свыше 250 км/ч [1]. В Украине соответствующие показатели снижены на 50 км/ч. Следуя «Концепции Государственной целевой программы внедрения на железных дорогах скоростного движения пассажирских поездов на 2005-2015 гг.», предполагается создание сети скоростных железнодорожных магистралей для соединения столицы Украины с крупными областными и промышленными центрами Украины и странами Западной Европы и СНГ [1, 2]. Реализация данной программы связана с улучшением и развитием существующей инфраструктуры, в том числе реконструкцией искусственных сооружений и строительством новых железнодорожных мостов с учетом скоростей движения экипажей, близких к мировым аналогам (до 350 км/ч). В процессе реализации программы предполагается обновление парка пассажирского подвижного состава (например, электровозами типа ДС) и существенная модернизация железнодорожного пути. В частно-

сти, на участках со скоростью движения пассажирских поездов до 140 км/ч считается допустимым также пропуск грузовых экипажей, однако участки железной дороги со скоростью движения свыше 160 км/ч должны освобождаться от грузового подвижного состава с целью снижения нагрузки на путь и обеспечения более длительного срока его эксплуатации. В некоторых случаях это потребует строительства дополнительных специализированных главных путей, выпрямления старого пути, увеличения радиусов кривых, ремонта земляного полотна, мостов, путепроводов, восстановления водопропускных сооружений, устройства путей эстакадного типа на новой оси и др.

Подобные изменения в системе транспорта невозможны без пересмотра традиционных подходов к проектированию мостов. Эта задача является комплексной, и ее решение зависит от многих факторов, например, совершенствования отечественных норм проектирования с учетом новейших критериев и требований, регламентированных в Еврокодах [3]. Важнейшим аспектом является использование в процессе разработки проектов современных систем автоматизированного проектирования, а также тесная интеграция инженерных решений с научными методами расчета мостовых конструкций.

На основе анализа различных научных публикаций, результатов теоретических и экспериментальных исследований в области динамики мостов можно сделать вывод, что добиться дальнейшего качественного улучшения моделей взаимодействующей системы «мост – поезд» возможно, в первую очередь, уточняя параметры нагрузки. Так, влияние на пространственную динамику подвижного состава некоторых особенностей его конструкции, нелинейных фрикционных демпфирующих устройств, неровностей рельсового пути, характерных дефектов рассматривалось в трудах

отечественных ученых В. А. Лазаряна, С. И. Конашенко, В. Ф. Ушкалова, Е. П. Блохина, В. В. Кулябко и др. [4–6]. Некоторые важные результаты этих исследований, например, амплитудно-частотные характеристики колебаний подвижного состава при различных режимах и скоростях его движения, используются в данной работе для моделирования динамического воздействия в системе «мост – поезд».

Проблема учета скорости движения временной нагрузки на мостах неоднократно обсуждалась в научных трудах, например [7–12]. Однако на практике использование сложных научных методик и подходов часто вызывает затруднения. В связи с этим возникает необходимость иметь разработки более простых динамических моделей для учета скорости движения поезда по мосту.

Результаты различных теоретических и экспериментальных исследований [7, 10, 13–15] подтверждают, что несущие элементы пролетных строений мостов при движении по ним железнодорожных экипажей работают в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. Доминирующими для разрезных пролетных строений являются изгибные и продольные колебания. Исходя из этого, введем понятие коэффициента учета скорости  $1 + \psi \geq 1,0$ , который наряду с коэффициентом надежности по нагрузке  $\gamma_f$  может использоваться при определении расчетной интенсивности вертикальной нагрузки от подвижного состава  $v$  (1). При этом роль динамического коэффициента  $1 + \mu$ , который традиционно в расчетах мостовых конструкций зависит только от длины пролета и материала конструкции, упрощается.

$$1 + \psi = 1 + \alpha(v - v_{\min});$$

$$v = v_n \gamma_f (1 + \psi),$$
(1)

где  $\alpha$  – амплитуда изменения напряженно-деформированного состояния элемента конструкции;  $v_{\min}$  – минимальная скорость движения поезда на интервале скоростей, в пределах которого изменение напряженно-деформированного состояния конструкции близко к линейному закону;  $v$  – заданная скорость движения поезда;  $v_n$  – нормативное значение временной эквивалентной нагрузки от подвижного состава.

Величины  $\alpha$ ,  $v_{\min}$  определяются на основании динамического расчета пролетного строения во временной области с учетом динамиче-

ского воздействия поезда [16]. Компоненты  $\psi_x$ ,  $\psi_y$ ,  $\psi_z$ ,  $\psi_p$  учитывают работу пролетного строения соответственно на изгиб в горизонтальной и вертикальной плоскостях, растяжение-сжатие, кручение (табл. 1). В общем случае, внутренние силы, напряжения, деформации в элементах конструкции железнодорожных мостов нелинейно зависят от скорости движения временной нагрузки, поэтому величина коэффициента  $1 + \psi$  различна для каждого диапазона скоростей.

Таблица 1

Значения коэффициента учета скорости

$v_x$ , км/ч	Коэффициент $1 + \psi$			
	$1 + \psi_x$	$1 + \psi_y$	$1 + \psi_z$	$1 + \psi_p$
0	1	1,054	1,125	1,818
60	1,058	1,087	1,114	1,346
100	1,058	1,066	1,102	1,255
200	1,126	1,011	1,136	1,073
300	1,150	1,011	1,080	1,055
400	1,092	1	1	1

В качестве примера, определим коэффициент учета скорости движения поезда по балочному пролетному строению моста. Для этого, рассмотрим конструкцию сборного балочного пролетного строения железнодорожного моста из предварительно напряженного железобетона расчетной длиной 22,9 м (рис. 1).

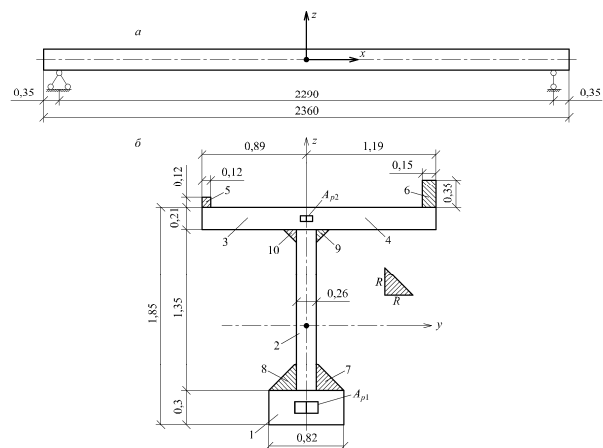


Рис. 1. Конструкция железобетонного пролетного строения 22,9 м:

*a* – общие размеры; *б* – сечение блока

Конструкция имеет полную длину 23,6 м и состоит из двух симметричных блоков высотой 1,85 м (проект Ленгипротрансмоста, 1975 г.). Ширина блока на участках вблизи центров

опирания – 82 см; в середине пролетного строения – 26 см. Расстояние между блоками – 1,8 м. Плита балластного корыта имеет толщину 21 см и соединяется с главной балкой радиальными вутами радиусом 30 см. Пролетное строение армировано обычной арматурой классов АІ, АІІ и пучками высокопрочной проволоки класса ВІІ. Количество предварительно напряженной арматуры в середине пролетного строения составляет 21 пучок. При моделировании

железобетонные вуты, расположенные в верхнем и нижнем поясах пролетного строения, заменяются треугольными элементами, внешний и внутренний бортики плиты – прямоугольными (см. рис. 1, б).

Временную нагрузку на пролетное строение примем в виде грузового подвижного состава, сформированного из локомотива ВЛ8 и 60-ти универсальных крытых вагонов серии 11-066 (рис. 2).

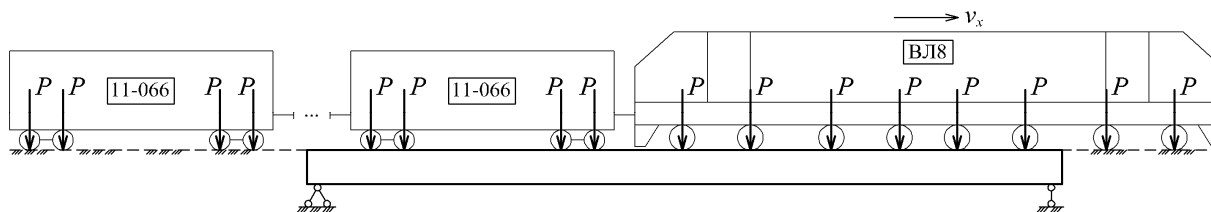


Рис. 2. Схема движения грузового поезда по пролетному строению

На рис. 3 показаны вертикальные колебания середины пролетного строения моста во время движения поезда со скоростью 10...100 км/ч, а также в диапазоне теоретических скоростей 100...400 км/ч. Имеются аналогичные данные для горизонтальных, продольных и крутильных колебаний конструкции (см. табл. 1).

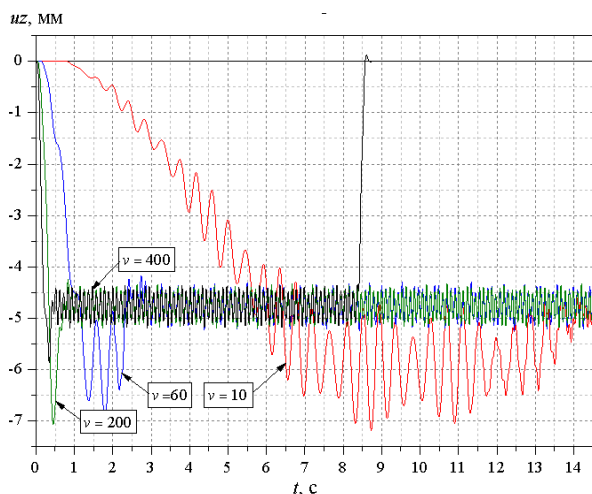


Рис. 3. Вынужденные колебания пролетного строения при движении поезда

К данным табл. 1 применима линейная интерполяция. В целом, совершенствование методов динамического анализа мостовых конструкций может идти по двум направлениям:

– развитие методов по определению параметров напряженно-деформированного состояния мостовых конструкций на основе уравнений динамики твердого тела и метода конечных элементов [16];

– вычисление соответствующих коэффициентов учета скорости движения временной нагрузки для более широкого класса мостовых

конструкций, с последующим введением данной методики в практику проектирования мостов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. – К.: ІЕЗ ім. С. О. Пагона. – 2010. – 216 с.
2. Розпорядження від 31.12.2004р. № 979-р Про схвалення Концепції Державної цільової програми впровадження на залізницях швидкісного руху пасажирських поїздів на 2005-2015 роки / електронна адреса в мережі Інтернет: «www.kmu.gov.ua/kmu/control/uk/cardnpd».
3. European Standard. Eurocode 1: Actions on structures. Part 2 [Text]: Traffic Loads on bridges / European Committee for Standardization. – В-1050, Brussels. – 2002. – 162 p.
4. Кулябко, В. В. Исследование вертикальных колебаний и нагруженности длиннобазных грузовых вагонов [Текст] / В. В. Кулябко. Автореф. дисс. на соис. уч. ст. канд. техн. наук. – Д.: – 1978. – 21 с.
5. Лазарян, В. А. Динамика транспортных средств [Текст]: Избр. тр. / В. А. Лазарян. – К.: Наук. думка. – 1985. – 528 с.
6. Ушкалов, В. Ф. Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств [Текст] / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, В. С. Иккол и др. // Ин-т техн. мех. АН УССР. – К.: Наук. думка. – 1989. – 240 с.
7. Fryba, L. Dynamics of Railway Bridges [Text] / L. Fryba. – Praha: Academia Praha. – 1996. – 330 p.
8. Fryba, L. Vibration of Solids and Structures Under Moving Loads [Text] / L. Fryba. – Prague: Academia Prague. – 1972. – 484 p.

9. O'Connor C. Bridge Loads [Text] / C. O'Connor, P. A. Show. – London: Spon Press, 11 New Fetter Lane, EC4P 4EE. – 2000. – 350 p.
10. Yang, Y. B. Vehicle-Bridge Interaction Dynamics: with Applications to High-Speed Railways [Text] / Y. B. Yang, J. D. Yau, Y. S. Wu // World Scient. Publ. Co. Pte. Ltd. – 5 Toh Tuck Link, Singapore. – 2004. – 564 p.
11. Распопов, О. С. Дослідження динамічної роботи металеві прогону будови моста під впливом рухомого навантаження [Текст] / О. С. Распопов, С. П. Русу, В. Є. Артёмов // Тези доп. 12-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми механіки залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 28-30 квіт., 2008). – Д.: ДНУЗТ. – 2008. – С. 134.
12. Распопов, А. С. Моделирование подвижных нагрузок при расчетах динамики дискретных систем «мост-поезд» в программном комплексе «Belinda» [Текст] / А. С. Распопов, С. П. Русу, В. Е. Артемов // Тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. пам'яті акад. НАН України В. І. Москальського «Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій» (Дніпропетровськ, 17-19 жовт., 2007). – Д.: ДНУ. – 2007. – С. 282-283.
13. Блохин, В. К. Исследование пространственной работы железнодорожных пролетных строений со стальным мостовым полотном, объединенным со сквозными главными фермами [Текст] / В. К. Блохин. Автореф. дисс. на соис. уч. ст. канд. техн. наук. – М. – 1973. – 23 с.
14. Бондарь, Н. Г. Динамика железнодорожных мостов [Текст] / Н. Г. Бондарь, И. И. Казей, Б. Ф. Лесохин и др. – М.: Транспорт. – 1965. – 412 с.
15. Донченко, В. Г. Пространственный расчет балочных автодорожных мостов [Текст] / В. Г. Донченко. – М.: Автотрансиздат. – 1953. – 324 с.
16. Артёмов, В. Є. Удосконалення розрахунку напружено-деформованого стану мостових конструкцій з урахуванням динамічного впливу вантажних поїздів [Текст] / В. Є. Артёмов // Автореф. дис. на здоб. наук. ст. канд. техн. наук. – Д.: – 2011. – 20 с.

Поступила в редколлегию 02.04.2012.  
Принята к печати 23.04.2012.

В. Є. АРТЬОМОВ, О. С. РАСПОПОВ (ДІПТ)

## ДО ПИТАННЯ УРАХУВАННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ПОТЯГА ПРИБРОКОВАНИМ БАЛОЧНИХ МОСТІВ

Запропоновано методику наближеного урахування швидкості руху поїздів на мостах розрізної балкової системи. Визначено коефіцієнти урахування швидкості руху, які можуть бути застосовані в практичних інженерних розрахунках мостових конструкцій.

*Ключові слова:* міст, поїзд, залізниця, швидкість руху, коливання

V. ARTOMOV, A. RASPOPOV (Dniepropetrovsk National University of Railway Transport)

## QUESTION OF TRAIN SPEED ACCOUNT AT DESIGNING OF BEAM BRIDGES

It is offered a technique of the train speed movement approximation for beam bridge systems. Coefficients of accounting of motion speed which can be used in practical engineering calculations of bridge constructions are determined.

*Keywords:* bridge, train, railway, speed of movement, vibrations