

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ С ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОМ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ

Запропоновано математичну модель для врахування ексцентриситету рейкової колії на прогонових будовах залізничних мостів. Досліджено вплив ексцентриситету колії на характер коливань прогонових будов при різних швидкостях руху одиночного локомотива.

Ключові слова: залізничний міст, коливання прогонових будов, ексцентриситет рейкової колії, рух одиночного локомотива

Предложена математическая модель для учета эксцентриситета рельсового пути на пролетных строениях железнодорожных мостов. Исследовано влияние эксцентриситета пути на характер колебаний пролетных строений при различных скоростях движения одиночного локомотива.

Ключевые слова: железнодорожный мост, колебания пролетных строений, эксцентриситет рельсового пути, движение одиночного локомотива

The mathematical model of taking the account of eccentricity of a railway track on the span of railway bridges is proposed. The significant effects of the railway track eccentricity on the character of railway spans vibrations at different speeds of moving a locomotive are investigated.

Keywords: railway bridge, vibrations of spans, railway track eccentricity, motion of single locomotive

Во время эксплуатации железобетонные пролетные строения с балластным мостовым полотном подвержены различного рода дефектам, приводящим к возрастанию нагрузки на отдельные несущие элементы конструкции, среди которых одним из наиболее распространенных является смещение оси рельсового пути относительно оси моста (эксцентриситет).

В научной литературе практически отсутствует информация о динамической работе таких пролетных строений, что требует проведения дополнительных исследований. В данной статье приведен алгоритм расчета с использованием метода конечных элементов и уравнений динамики твердого тела, а также отмечены

особенности пространственных колебаний мостов с эксцентриситетом рельсового пути.

Для построения расчетной модели балочного пролетного строения с эксцентриситетом рельсового пути выделим из общей структуры стержень, соединяющий узлы конструкции $i = 1, 2$, в пределах длины которого с заданной постоянной скоростью движется обобщенный сосредоточенный силовой фактор $F_p = \{F_x F_y F_z M_x M_y M_z\}$ (рис. 1).

Траектория движения силового фактора представляет собой прямую линию, которая, в общем случае, не совпадает с осевой линией стержня [2].

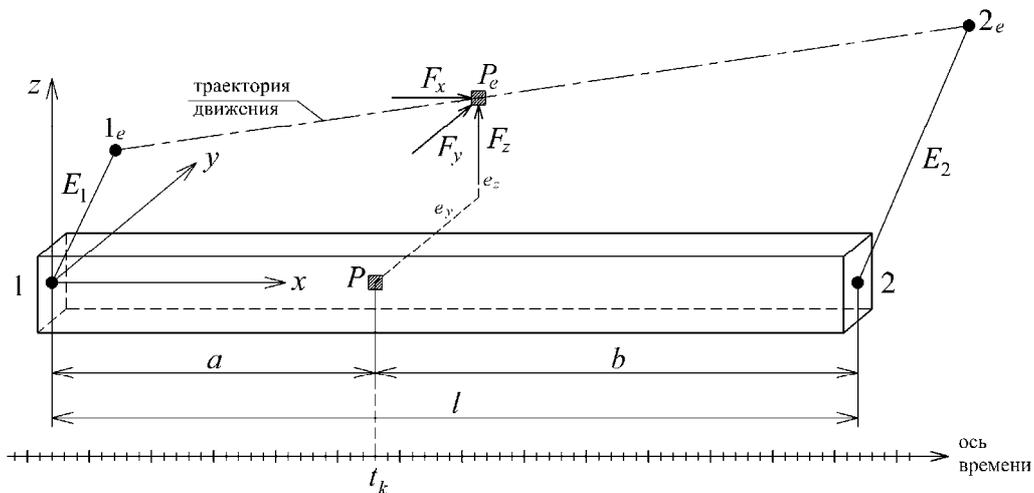


Рис. 1. Нагрузка на стержень с эксцентриситетом

Узловые точки траектории $1_e, 2_e$ смещены от базовых узлов конструкции $i=1, 2$ на расстояния, соответствующие пространственным векторам \bar{E}_1, \bar{E}_2 . В фиксированный момент времени t_k силовой фактор займет положение в некоторой точке P_e , координаты которой известны из его закона движения. Передачу усилия на стержень в точке P заменим совокупностью эквивалентных силовых факторов с учетом эксцентриситета \bar{e} , представленного в координатной форме (1):

$$\begin{cases} F_{x,P} = F_x; \\ F_{y,P} = F_y; \\ F_{z,P} = F_z; \end{cases} \begin{cases} M_{x,P} = M_x + F_z e_y - F_y e_z; \\ M_{y,P} = M_y - F_z e_x + F_x e_z; \\ M_{z,P} = M_z + F_y e_x - F_x e_y. \end{cases} \quad (1)$$

После нахождения точки приложения нагрузки P , расположенной на осевой линии стержня, компоненты силы (1) включаем в состав общего вектора внешних нагрузок F_0 [4]. В качестве примера рассмотрим движение по пролетному строению моста локомотива ВЛ8. С учетом [3] для продольных, поперечных и вертикальных сил контакта между колесными парами локомотива ВЛ8 и пролетным строением, имеем:

$$\begin{cases} F_{x,P} = F_{rf}^{(v)} - F_{tr}^{(v)}; \\ F_{y,P} = 0,5P_{1,y} (1 + \cos(2\pi v_y t + \varphi_y)); \\ F_{z,P} = P_{1,z} (1 + A_{1,z} \cos(2\pi v_{1,z} t) + A_{2,z} \cos(2\pi v_{2,z} t)); \\ M_{x,P} = M_x + P_{1,z} (1 + A_{1,z} \cos(2\pi v_{1,z} t) + A_{2,z} \cos(2\pi v_{2,z} t)) e_y - 0,5P_{1,y} (1 + \cos(2\pi v_y t + \varphi_y)) e_z; \\ M_{y,P} = M_y - (P_{1,z} (1 + A_{1,z} \cos(2\pi v_{1,z} t) + A_{2,z} \cos(2\pi v_{2,z} t))) e_x + (F_{rf}^{(v)} - F_{tr}^{(v)}) e_z; \\ M_{z,P} = M_z + 0,5P_{1,y} (1 + \cos(2\pi v_y t + \varphi_y)) e_x - (F_{rf}^{(v)} - F_{tr}^{(v)}) e_y. \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом, воздействие локомотива на пролетное строение моста моделируется компонентами усилий $F_{1,x}, F_{1,y}, F_{1,z}$. При входе локомотива на пролетное строение (шаг расчета t_k) эти усилия инициируют переход пролетного строения в напряженно-деформированное состояние, параметры которого могут быть определены с помощью метода конечных элементов [4]. Законы пространственного движения узлов пролетного строения установлены на ос-

нове нелинейных дифференциальных уравнений Эйлера-Лагранжа [5].

Расчетную схему железобетонного пролетного строения расчетной длиной 22,9 м принимаем в виде пространственной стержневой системы, состоящей из 13 стержней и 10 узлов (42 степени свободы, 120 дифференциальных уравнений движения), которая может совершать вертикальные, поперечные, продольные и крутильные колебания (рис. 2). Шаг интегрирования 10^{-4} с.

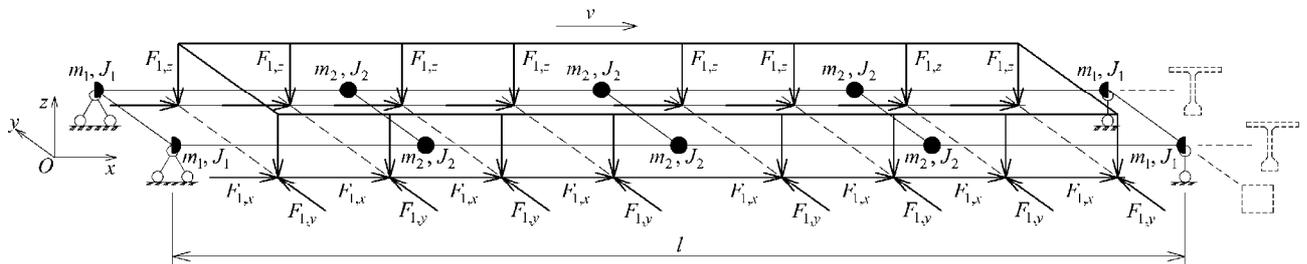


Рис. 2. Пространственная расчетная схема пролетного строения

Жесткостные и инерционные характеристики модели пролетного строения показаны в табл. 1.

Рассмотрим вариант равномерного смещения рельсошпальной решетки в поперечном

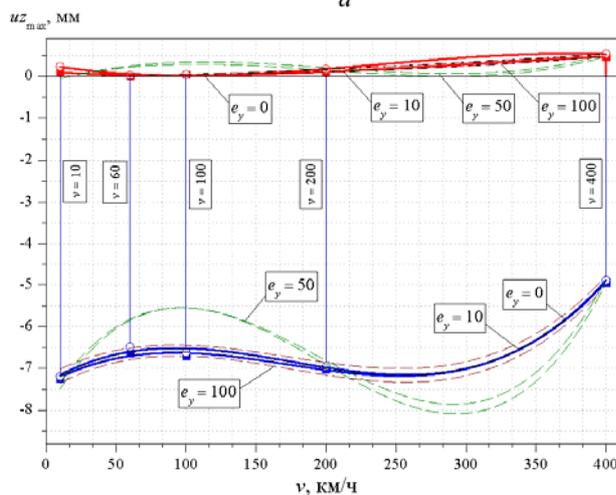
направлении. В этом случае горизонтальный эксцентриситет $e_y^{(1)}, e_y^{(2)}$ на балках Б1, Б2 будет одинаковым (рис. 3). Величину эксцентриситета принимаем равной $e_y = 0; 10; 50; 100$ мм [1].

Таблица 1

Жесткостные и инерционные характеристики элементов пролетного строения

№	Характеристика	Ед. изм.	Значение, для элемента	
			балки	диафрагмы
1	2	3	4	5
1	Площадь приведенного сечения A_{red}	м ²	1,3	0,2
2	Момент инерции на кручение $J_{red,x}$	м ⁴	0,07	0,003
3	Момент инерции на изгиб $J_{red,y}$	м ⁴	0,59	0,015
4	Момент инерции на изгиб $J_{red,z}$	м ⁴	0,25	0,0008

а



б

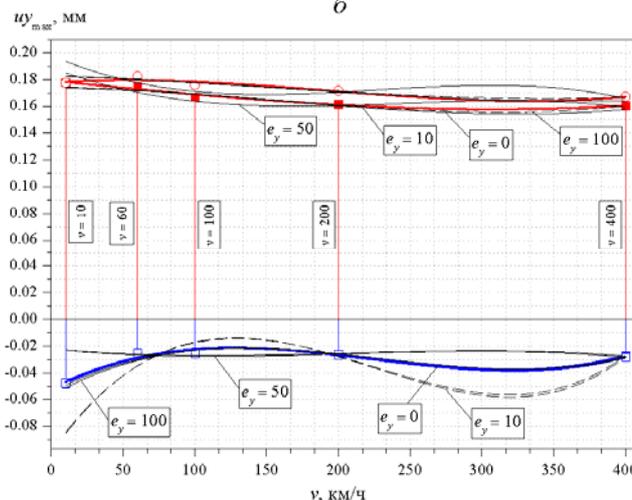


Рис. 4. Экстремумы вертикальных (а) и поперечных (б) перемещений пролетного строения

Полученные результаты свидетельствуют о том, что вертикальные перемещения uz пролетного строения (прогибы) при одновременном учете пространственной работы конструкции и скорости движения нагрузки нелинейно зависят от величины эксцентриситета рельсового пути (рис. 4, а). Во всех расчетах относительно высокие перемещения получены при скорости движения нагрузки $v = 200$ км/ч. Наибольший размах экстремумов вертикальных перемещений наблюдается при эксцентриситете $e_y = 50$ мм; в остальных случаях колебания

1	2	3	4	5
5	Момент инерции массы J_{xx}	кг · м ²	7840	74
6	Момент инерции массы J_{yy}	кг · м ²	20090	319
7	Момент инерции массы J_{zz}	кг · м ²	16660	245

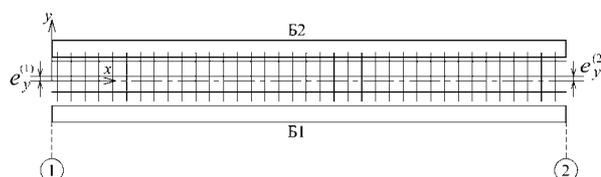


Рис. 3. Схема горизонтального эксцентриситета на пролетном строении моста

С целью определения влияния эксцентриситета пути на характер колебаний пролетного строения каждое значение e_y анализируем при скорости движения нагрузки $v = 10 \dots 400$ км/ч (рис. 4, 5).

величины uz имеют сравнительно невысокие амплитуды. Поперечные перемещения uy пролетного строения максимальны при смещении рельсового пути на величину $e_y = 10$ мм.

Размах максимальных перемещений в продольном направлении при скорости движения нагрузки $v = 10 \dots 100$ км/ч может считаться постоянным. Дальнейшее увеличение скорости (до $v = 260 \dots 270$ км/ч) сопровождается существенным увеличением перемещений ix и продольными колебаниями конструкции с максимальной амплитудой (рис. 5, а). Порядок пе-

ремещений снижается и достигает первоначальных значений при скорости $v = 400$ км/ч. В целом, величина эксцентриситета пути практи-

чески не влияет на продольные и крутильные колебания пролетного строения балочного моста.

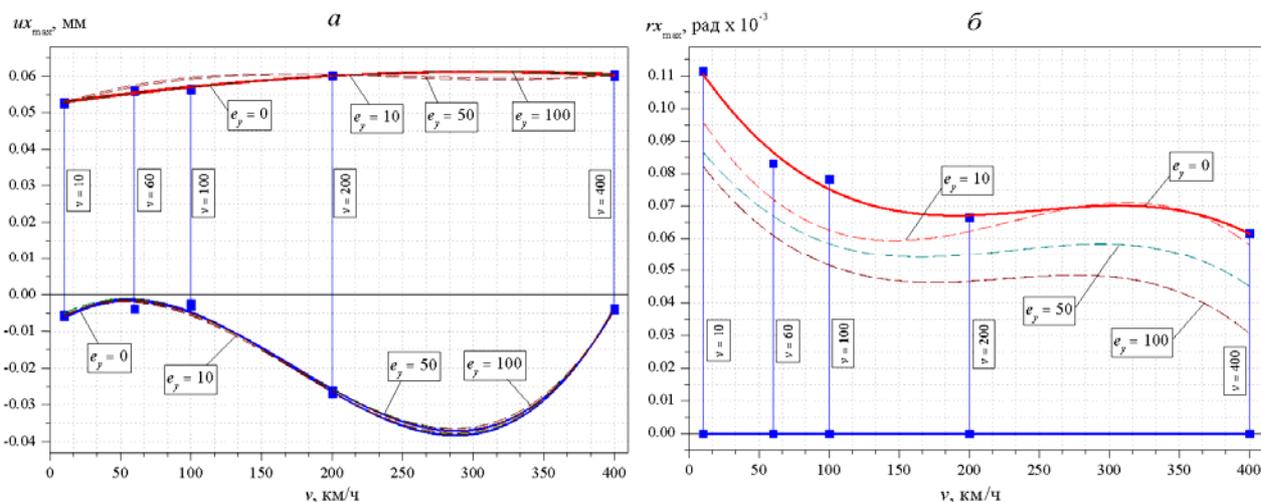


Рис. 5. Экстремумы продольных (а) и крутильных (б) перемещений пролетного строения

Совместное использование в динамических расчетах метода конечных элементов и уравнений динамики твердого тела позволяет оценить влияние эксцентриситета рельсового пути на пространственные колебания железобетонных пролетных строений мостов. Отмеченные особенности проявляются при движении одиночного локомотива со скоростью свыше $v = 200$ км/ч. В дальнейших исследованиях планируется провести анализ динамической работы железобетонных и металлических пролетных строений с эксцентриситетом пути при движении по ним грузового и пассажирского подвижного состава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борщов, В. І. Правила визначення вантажопідйомності балкових залізобетонних прогонових будов залізничних мостів [Текст] / В. І. Борщов, К. І. Солдатов, В. П. Тарасенко. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 404 с.
2. Распопов, А. С. К вопросу компьютерного моделирования движения поезда по мосту [Текст] / А. С. Распопов, С. П. Русу, В. Е. Артемов // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту. – 2007. – Вип. 8. – С. 133-139.

3. Распопов, А. С. Применение топологических моделей в задаче динамического взаимодействия системы твердых тел [Текст] / А. С. Распопов, С. П. Русу, В. Е. Артемов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 30. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 198-203.
4. Распопов, О. С. Динаміка балкових конструкцій мостів під рухомим навантаженням [Текст] / О. С. Распопов, В. Є. Артьомов, С. П. Русу // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій : зб. наук. статей / за заг. ред. Й. Й. Лучка. – Вип. 8. – Львів: Камеяр, 2009. – С. 712-721.
5. Распопов, А. С. Применение уравнений Эйлера-Лагранжа к решению задачи динамики системы «мост-поезд» [Текст] / А. С. Распопов, С. П. Русу, В. Е. Артемов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 16. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 109-114.

Поступила в редколлегию 06.04.2010.
Принята к печати 23.04.2010.