CC BY 4.0

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья
УДК 624.21.09
EDN: https://elibrary.ru/nawjzy
DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-160-168
Научная специальность: 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог; 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Проектирование мостовых переходов с учетом распределения изгибной и крутильной жесткости по высоте пролетного строения

А. А. Локтев, И. В. Шишкина✉

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время развитие транспортных магистралей достаточно строго привязано к городским агломерациям, а также региональным и международным логистическим коридорам, в связи с чем растет актуальность создания многоуровневых транспортных развязок вблизи магистральных узлов и хабов. При этом важным является обеспечение статических и кинематических габаритов в различных уровнях путепроводных и тоннельных развязок. В статье предлагается вместо типового использования балочных, арочных или ферменных пролетных конструкций рассмотреть возможность применения двухопорной пролетной конструкции как элемента, нагрузка на который от транспортного средства прикладывается в среднюю часть по высоте поперечного сечения.
Материалы и методы. Рассмотрены несколько типовых конструкций пролетного строения для автомобильного и железнодорожного видов транспорта, и на основании имеющихся инженерных решений были выработаны предложения по разделению поперечного сечения пролетного строения на верхнюю и нижнюю часть относительно плоскости приложения поездной динамической нагрузки. При этом параметры жесткости пролетного сечения представляются в виде функции от ортогональных пространственных координат. Использован метод линеаризации искомых функций на элементарных временных интервалах, применяемых для решения определяющих дифференциальных уравнений.
Результаты. Получены динамические вертикальные перемещения точек поперечного сечения пролетного строения в зависимости от типа сечения и распределения функции жесткости по высоте. Варьирование геометрическими параметрами поперечного сечения пролетного строения моста в интервале допустимых значений позволяет изменять максимальные перемещения точек сечения для удержания их в коридоре нормативных величин, что может быть востребовано при расчете конструкции по первой и второй группе предельных состояний.
Обсуждение и заключение. Представленная модель является упрощенной и не учитывает ряд факторов, таких как демпфирование в материале конструкции, неровности на поверхности проезжей части и особенности взаимодействия колес подвижного состава с пролетным строением. Дальнейшие исследования в данной области могут быть направлены на разработку более точных математических моделей, учитывающих широкий спектр факторов, влияющих на динамическое поведение мостовых переходов. Также представляется перспективным проведение экспериментальных исследований на реальных конструкциях, что позволит верифицировать полученные расчетные данные и разработать практические рекомендации по оптимизации конструкции мостовых переходов с учетом распределения изгибной и крутильной жесткости по высоте пролетного строения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железная дорога, габариты, двухопорная пролетная конструкция, метод линеаризации, мостовой переход

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Локтев А. А., Шишкина И. В. Проектирование мостовых переходов с учетом распределения изгибной и крутильной жесткости по высоте пролетного строения // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 3. С. 160–168. DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-160-168.

✉ shishkinaira@inbox.ru (И. В. Шишкина)

© Локтев А. А., Шишкина И. В., 2025

CC BY 4.0

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article
UDK 624.21.09
EDN: https://elibrary.ru/nawjzy
DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-160-168
Scientific specialty: 2.9.2. Railway track, survey and design of railways; 2.1.8. Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

Design of bridge crossings with the distribution of bending and torsional stiffness over the height of the superstructure

Alexey A. Loktev, Irina V. Shishkina✉

Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Currently, the development of transport highways is strictly linked to urban agglomerations, regional and international logistics corridors, therefore, the urgency of creating multi-level transport interchanges near main hubs is growing. At the same time, it is important to ensure static and kinematic dimensions at various levels of overpasses and underpasses. The article proposes to avoid default usage of beam, arched or truss superstructures and considers a two-support superstructure as an element on which the load from the vehicle is applied to the middle part of the height of the cross-section.
Materials and methods. Several standard superstructure designs for automobile and railway transport modes were considered. According to the available engineering solutions, proposals were developed for dividing the cross-section of the superstructure into an upper and lower part relative to the plane of application of the train dynamic load. The stiffness parameters of the superstructure section are represented as a function of orthogonal spatial coordinates. Linearisation method is used as the solution method of the desired functions on elementary time intervals in order to solve the defining differential equations.
Results. Dynamic vertical displacements of the superstructure cross-section points are obtained depending on the type of section and the distribution of the stiffness function over height. Variation of the geometric parameters of the bridge span cross-section in the range of permissible values enables to change the maximum movements of the cross-section points to keep them in the line of standard values, which may be in demand during calculation of the structure for the first and second groups of limit states.
Discussion and conclusion. The presented model is simplified and does not consider a number of factors, such as damping in the structural material, irregularities on the surface of the traffic area and the interaction of the rolling stock wheels with the superstructure. Further research may be aimed at developing more accurate mathematical models that take into account a wide range of factors affecting the dynamic behaviour of bridge crossings. It also seems promising to conduct experimental studies on real structures, which would allow to verify the calculated obtained data and develop practical recommendations for optimising the design of bridge crossings with the distribution of bending and torsional stiffness over the height of the superstructure.

KEYWORDS: railway, overall dimensions, two-support superstructure, linearisation method, bridge crossing

FOR CITATION: Loktev A. A., Shishkina I. V. Design of bridge crossings with the distribution of bending and torsional stiffness over the height of the superstructure. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(3):160–168. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-160-168.

✉ shishkinaira@inbox.ru (I. V. Shishkina)

© Loktev A. A., Shishkina I. V., 2025

Введение. В современном проектировании мостовых сооружений наблюдается тенденция к оптимизации конструктивных решений, направленная на снижение материалоемкости и повышение эксплуатационной эффективности. Развитие логистических маршрутов и транспортных коридоров, как правило, привязано к определенным географическим координатам и населенным пунктам. С точки зрения удобства эксплуатации, строительства и ремонта, технологичности, экологической и транспортной безопасности объекты инфраструктуры должны располагаться достаточно плотно в плане, что предполагает пересечение магистралей, дорог, направляющих конструкций на различных уровнях. Важным вопросом при этом является, с одной стороны, обеспечение статических, кинематических и иных габаритных размеров, а с другой стороны — необходимость увязки транспортных сооружений с существующей застройкой, объектами инфраструктуры, древесными насаждениями и т. д. Решение этих вопросов требует более полного использования окологабаритного пространства транспортных средств, т. е. предполагается, что подвижная нагрузка будет передаваться на плоскость в средней части поперечного сечения, а не на верхний или нижний пояс, поскольку такая компоновка пролетного строения, в зависимости от его длины, меньше увеличивает общую высоту транспортной развязки.

Подобные задачи неоднократно рассматривались отечественными и зарубежными учеными и инженерами, в том числе применительно к одиночным пересечениям железнодорожных и водных путей [1–3], железным и автомобильным дорогам [4–6] или к двум железным дорогам [7–10]. Вопрос о габаритном пространстве поднимался в этих работах только применительно к расположенному ниже пути, а также решался ряд сопутствующих задач. Так, в работе [1] авторы рассмотрели влияние высокочастотных динамических воздействий на конструкцию мостового перехода и на материал, из которого были изготовлены основные элементы несущей конструкции. В работе [2] исследованы перспективные конструкции мостовых переходов и путепроводов, а также соотношения соседних длин пролетов в неразрезной мостовой конструкции и возникающих внутренних усилий, включая определение мест концентрации напряжения. Вопросам сопряжения дорожного полотна на искусственном сооружении и земляном полотне посвящена статья [3], в которой также изучены вопросы совместного деформирования различных частей транспортного сооружения. Оптимальные решения для транспортных развязок в области конструктивных решений и используемых материалов, которые могут быть применены для различных условий проектирования, строительства и эксплуатации мостовых переходов, были представлены в работах [4, 5]. Динамические нагрузки высокой интенсивности (аэродинамические, подвижные, перемещающиеся с высокими скоростями, сейсмические и т. д.) проанализированы в работах [6, 7]: предложенные ими подходы в описании основных нагрузок, действующих на элементы искусственного сооружения, позволяют оценить влияние на общую работу конструкции верхнего и нижнего пояса поперечного сечения. В работах [8–10] изучены аспекты влияния на мостовые переходы высокоскоростного движения, которое в том числе приводит и к необходимости проектирования многоуровневых транспортных развязок в одном месте топографической карты местности.

В рассмотренных выше работах были успешно изучены многие частные вопросы проектирования, строительства, эксплуатации и ремонтов искусственных сооружений, однако современное развитие транспортных узлов и развязок заставляет исследователей и инженеров искать пути агрегирования полученных знаний.

В настоящей статье авторы стремятся увязать функционирование нескольких пересекающихся в плане искусственных сооружений при действии на них динамической нагрузки с более полным использованием окологабаритного пространства для железнодорожных транспортных средств. При этом предполагается учет не только поперечного изгиба, но и возможного кручения конструкции при несовпадении осей сооружения и приложения внешних сил.

Материалы и методы. В настоящем исследовании предпринимается попытка расчетно обосновать с помощью методов математического моделирования и декомпозиции многофакторных задач использование при проектировании и строительстве транспортных развязок мостовых переходов с приближением основных несущих конструкций к габаритному пространству.

Такой подход позволяет распределить изгибную и крутильную жесткость по высоте пролетного строения для автомобильного или железнодорожного транспорта и уменьшить геометрические вертикальные размеры поперечного сечения пролетного строения (рис. 1).

Основная нагрузка от железнодорожного подвижного состава передается сверху вниз, а наибольшие величины, характеризующие передачу нагрузки от подвижного состава на элементы конструкции, в традиционных расчетных схемах мостовых переходов возникают на уровне верхнего строения, что связано с решением контактной задачи, позволяющей проследить передачу веса экипажа далее на несущие конструкции, вплоть до опор мостового перехода[1] [1–3].

[1] Динамический расчет зданий и сооружений (Справочник проектировщика) / под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. М.: Стройиздат, 1984. 303 с.

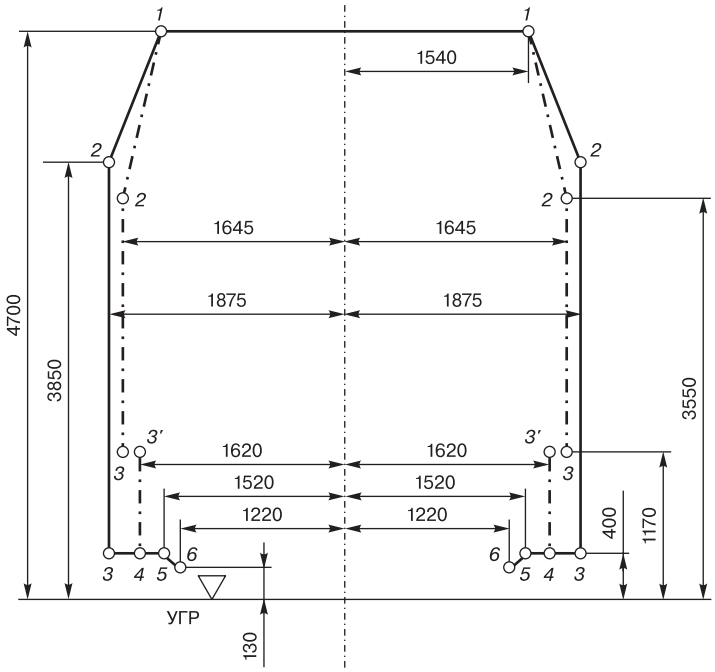

Рис. 1. Габарит подвижного состава ГЦ (GC) и гармонизированный с ним габарит $ГЦ_{ГЦ}$ ($GC_{ГЦ}$)*:
— · — · — — исходное очертание кинематического габарита ГЦ (GC) для высокоскоростной трансъевропейской магистрали железных дорог колеи 1435 мм;
——— — кинематический габарит подвижного состава $ГЦ_{ГЦ}$ ($GC_{ГЦ}$) для высокоскоростных магистралей железных дорог колеи 1520 (1524) мм;
УГР — уровень верха головок рельсов;
точки *1*, *2*, *3*, *4*, *5*, *6*, *3′* определяют конфигурацию границы габаритной зоны на различных высотах от уровня головки рельса
* Источник: ГОСТ 9238–2022. Межгосударственный стандарт. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений

Fig. 1. Size of the rolling stock HZ (GC) and size dimension HZ_{HZ} (GC_{HZ})*:
— · — · — — initial outline of the kinematic dimension HZ (GC) for the high-speed trans-European railway mainline with a 1435 mm gauge;
——— — kinematic dimension of the rolling stock HZ_{HZ} (GC_{HZ}) for high-speed railway lines with a 1520 (1524) mm gauge;
УГР — top of the rail heads;
points *1*, *2*, *3*, *4*, *5*, *6*, *3′* — configuration of the dimensional zone boundary is determined at different heights from the level of the rail head
* Source: GOST 9238–2022. Interstate standard. Dimensions of railway rolling stock and approximations of structures

Выбор типа габарита подвижного состава определяется действующими нормативами, но поскольку в настоящее время активно развивается концепция строительства высокоскоростных автомобильных и железнодорожных магистралей, то нормативно-техническая документация будет еще претерпевать изменения — и скорее всего в сторону увеличения геометрических размеров габаритного пространства [5, 6].

В настоящей работе для описания динамического поведения пролетного строения мостового перехода используется модель шарнирно опертой балки, вертикальные колебания которой представляются следующим дифференциальным уравнением [6, 7]:

$$m\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}+c_{в}\frac{\partial w}{\partial t}+c_i\frac{\partial^4\left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)}{\partial^4 x}+EI\frac{\partial^4\left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)}{\partial^4 x}= =\sum_{j=1}^{N}P[U_j(t,V,L)+U_j(t-t_{c},V,L)], \quad (1)$$

где m — погонная масса балочного строения, кг/м;

w — вертикальное перемещение точек срединной линии балки, м;

$c_{в}$ — коэффициент внешнего вязкого сопротивления;

c_i — коэффициент внутреннего трения;

E — приведенный модуль упругости материала балочного строения, МПа;

I — момент инерции поперечного сечения относительно горизонтальной оси, $м^4$;

t_{c} — временной интервал между наездом на пролетное строение первой колесной пары и съездом с пролета последней колесной пары, с;

t — время как переменная величина, относительно которой происходит дифференцирование и интегрирование, отсчитывается с момента начала приложения внешней нагрузки к конструкции пути, с;

x — координата точки приложения внешних сил, отсчитываемая от начала пролетного строения, м;

N — число колесных пар, воздействующих на пролет, шт.;

j — индекс суммирования;

P — величина внешней сосредоточенной силы, кН;

U_j — функция интенсивности воздействия от j-й колесной пары, кН;

V — скорость движения транспортного средства, м/с;

L — общая длина пролетного строения, м.

Уравнение (1) решается с помощью граничных условий, определяющих тип закрепления пролетного строения искусственного сооружения мостового типа по его концам [6, 7, 9]:

$$\begin{gathered} u(x=0,t)=0, \\ u(x=L,t)=0, \\ EI\,\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x=0,\,t)=0, \\ EI\,\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x=L,\,t)=0, \end{gathered} \tag{2}$$

где u — поперечное перемещение исследуемой точки пролета при действии нагрузки, м.

Также требуются начальные условия, позволяющие понять состояние нагрузки в начальный момент времени в некоторой точке на балке пролетного строения [6–8]:

$$\begin{gathered} u(x,t=0)=0, \\ \frac{du}{dt}(x,t=0)=0. \end{gathered} \tag{3}$$

Рассматривая соотношения (1)–(3) в качестве системы определяющих уравнений, вертикальные перемещения точек балочного пролетного строения можно представить в виде следующего выражения:

$$u(x,t)=\sum_{n=1}^{\infty} q_n(t)\sin\frac{n\pi x}{L}, \tag{4}$$

где $q_n(t)$ — обобщенная координата для формы колебаний порядка n;

n — число интервалов разбиения процесса нагружения, шт.;

π — математическая постоянная, определяющая отношение длины окружности к ее диаметру.

С помощью (4) можно записать определяющее уравнение (1) относительно обобщенных координат:

$$q_n(t)=\frac{1}{m\omega_{nd}}\int_0^t F_n(\tau)\exp(-\xi_n\omega_n(t-\tau))\sin(\omega_{nd}(t-\tau))\,d\tau. \tag{5}$$

Здесь:

$$F_n(\tau)=\sum_{j=1}^{N} P_n[U_j(t,V,L)+U_j(t-t_c,V,L)],$$

$$U_j(t,V,L)=\delta(x-V(t-t_j))\left[H(t-t_j)-H\left(t-t_j-\frac{L}{V}\right)\right],$$

где P_n — сила, передающаяся пролетному строению от колесной пары, порядковым номером n, который рассчитывается в соответствии с очередностью колесных пар от начала пролетного строения, кН;

δ — дельта-функция Дирака;

H — ступенчатая функция Хевисайда;

t_j — время прихода j-й колесной пары на балочный пролет, с;

d — расстояние между колесными парами, м;

ω_{nd} — циклическая частота, учитывающая затухание колебательного процесса, Гц;

ξ_n — коэффициент затухания для формы колебаний порядка n;

F_n — приращение внешней сосредоточенной силы от n-й колесной пары в момент ее прихода в искомую точку пролетной конструкции, кН;

τ — элементарный временной интервал, применяемый для линейной аппроксимации неизвестных искомых функций, с;

ω_n — частота вынужденных колебаний при воздействии n-й колесной пары, Гц.

Вычислительная процедура, используемая для решения определяющих уравнений на электронно-вычислительной машине, предполагает разделение характерного временного интервала (период собственных колебаний для стационарных процессов и время прихода упругой волны в заданную точку конструкции для нестационарных процессов) на k равных частей [8, 9]. Длительность одной такой части (элементарного временного интервала, с) τ выбирается исходя из условия линейности основных искомых функций на каждом элементарном интервале $(k-1)\tau \leqslant t \leqslant k\tau$. Первая производная от перемещения по времени при этом определяется по следующему выражению:

$$\frac{\partial u(k\tau)}{\partial t}=\frac{(u_k-u_{k-1})}{\tau}, \tag{6}$$

где k — текущий порядковый номер элементарного временного интервала, используемого для линеаризации искомых функций.

В формуле (6) вместо u может выступать любое линейное или угловое перемещение, измеряемое в метрах или радианах соответственно, определяемое в процессе решения задачи. Алгоритмы линеаризации искомых функций при достаточно строгой процедуре выбора элементарного временного интервала широко применяются в современных вычислительных комплексах для прямого интегрирования определяющих дифференциальных уравнений движения, позволяя через значения функции в начальной точке интервала вычислить значения функции в конце временного промежутка [10, 11]. Для задания начальных значений искомых функций используются начальные условия уравнения (3).

Скорости и ускорения точки деформируемого элемента конструкции, входящие в уравнение (1), определяются согласно вычислительной схеме в следующем виде:

$$\begin{aligned} \ddot{u}(t) &= \ddot{u}(t_0) + \frac{t-t_0}{\tau}[\ddot{u}(t+t_0) - \ddot{u}(t_0)], \\ \dot{u}(t+\tau) &= \dot{u}(t_0) + \tau[(1-\gamma)\ddot{u}(t) + \gamma\ddot{u}(t+\tau)], \\ u(t+\tau) &= u(t_0) + \tau\dot{u}(t) + \\ &\quad + \tau^2[(0{,}5-\beta)\ddot{u}(t) + \beta\ddot{u}(t+\tau)], \end{aligned} \tag{7}$$

где γ, β — параметры, отвечающие за точность и устойчивость получаемого результата интегрирования, в широком смысле эти величины укладываются в интервалы $0 \leqslant \gamma \leqslant 1$ и $0 \leqslant 2\beta \leqslant 1$;

$\ddot{u}$ — ускорение поперечного перемещения исследуемой точки пролета при действии нагрузки, м;

$\dot{u}$ — скорость поперечного перемещения исследуемой точки пролета при действии нагрузки, м;

t_0 — время прихода в заданную точку колесной пары, отсчитываемое с момента наезда колесной пары на пролетное строение, с.

Подобная схема позволяет из определяющего уравнения получить рекуррентную формулу для определения неизвестных перемещений и их производных по времени в различные последовательные моменты времени $\tau_i = \tau i$ [12, 13], где τ_i — приращение общего времени деформирования конструкции пролетного строения с момента начала динамического воздействия на нее, в виде нарастающего итога от предыдущих интервалов линеаризации; i — порядковый номер элементарного временного интервала, используемого при линеаризации искомой функции.

Определяющее функциональное уравнение (1) предлагается решать в виде разложения типа (4) относительно обобщенных координат (5) для ограничения числа связанных линейных переменных с использованием граничных (2) и начальных (3) условий. После подстановки (4) и (5) в (1) и применения условий (2), (3) требуется использовать вычислительную схему на основе линеаризации искомых функций в виде (6), а их производных — в виде (7). Данную процедуру можно автоматизировать с помощью современных языков программирования или используя один из современных вычислительных комплексов.

Для моделирования приложения внешней нагрузки от подвижного состава предлагается использовать систему сосредоточенных сил [14, 15], соответствующих нагрузке на ось грузового полувагона 22 тс в виде тележки типа 18-9890, имеющей базу 1850 мм, размер пролетного строения 20 м, а скорость движения экипажа — 40 км/ч. При этом предполагается, что центр тяжести вагона не изменяется во время движения и нагрузка на оси колесных пар одинакова, т. е. не учитываются подвижность груза и другие особенности движения состава (например, галопирование, подергивание и т. д.).

На рис. 2 представлены графические зависимости функции вертикальных перемещений от времени для различных значений величины $h_в$, отсчитываемой от верхнего положения полки поперечного сечения пролетного строения. Кривая *1* соответствует $h_в = 0$, кривая *2* — $h_в = 1$ м, кривая *3* — $h_в = 2$ м. Рассматриваемое поперечное сечение находится в середине пролетного строения, т. е. координата $x = l/2$. После определения вертикального перемещения (прогиба) также можно определить внутренние усилия и напряжения в конкретных точках мостового перехода, выполнить проверку несущей способности и т. д. [16, 17]. В настоящей работе предполагается, что для определения динамического состояния и поведения конструкции при действии нагрузки от подвижного состава будет достаточно функции вертикальных перемещений [18, 19].

Неизвестные величины, входящие в определяющие уравнения и описывающие динамическое поведение пролетной конструкции, представляются в виде разложений на ряды, функциональные коэффициенты которых определяются по описанной процедуре. В качестве неизвестных функций чаще всего выступают линейные перемещения в декартовой системе координат. При этом каждое слагаемое степенного разложения должно иметь размерность метра (миллиметра), а поскольку показатель степени времени возрастает с порядковым номером слагаемого, то каждый функциональный коэффициент имеет свою размерность и зависит от сочетания различных геометрических и механических характеристик конструкции и материала, из которого она изготовлена.

Влияние момента инерции поперечного сечения на вертикальный прогиб начинает сказываться со второго слагаемого степенного разложения для вертикального перемещения. Из анализа графиков можно сказать, что в начале перемещения точек пролетного строения локальные экстремумы по времени возникновения практически совпадают для разных поперечных сечений, отличаясь только величиной перемещения, а после в течение ≈1,25 с происходит смещение локальных максимумов и минимумов кривой вертикальных перемещений, что связано с въездом на пролетное строение второй тележки полувагона, после чего происходит не только рост амплитудных значений, но и меняется время возникновения экстремумов. Представленные графики хорошо демонстрируют зависимость вертикальных перемещений точек поперечного сечения медианной оси пролетного строения при изменении жесткости посредством различного положения горизонтального элемента,

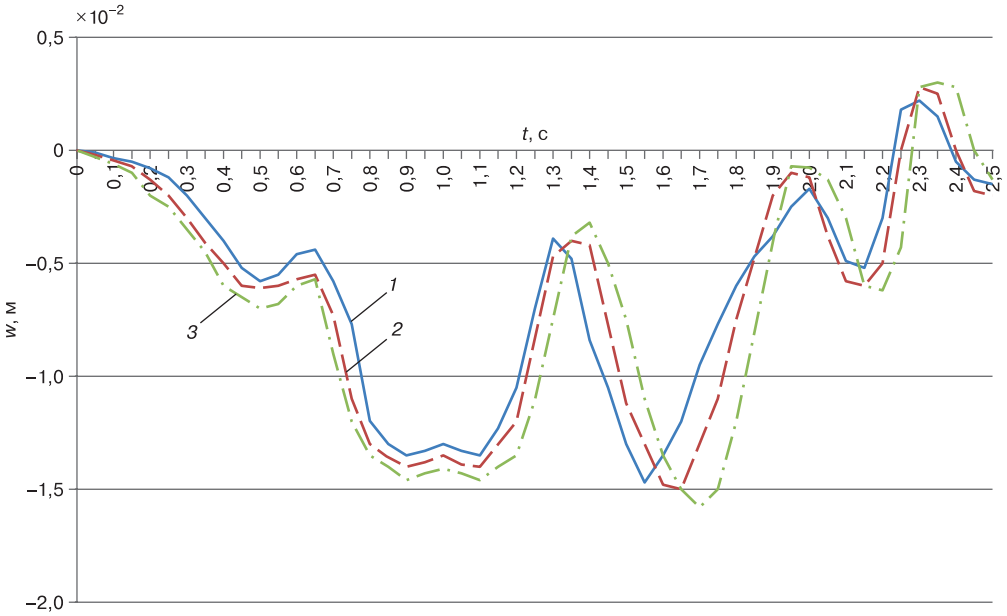

Рис. 2. Зависимость вертикального перемещения средней линии пролетного строения в его середине от времени при движении экипажа с тележкой типа 18-9890*:
по оси абсцисс откладывается время, прошедшее с момента наезда колесной пары на пролетное строение,
по оси ординат — вертикальные перемещения исследуемых точек конструкции
* Источник: данные авторов

Fig. 2. Dependence of the vertical movement of the midline of the superstructure in its middle on the time when moving a carriage with a type 18-9890 bogie*:
abscissa axis shows the time elapsed since the wheel pair hit the superstructure, and ordinate axis shows the vertical movements of the studied points of the structure
* Source: authors' data

к которому непосредственно прикладывается подвижная нагрузка от транспортного средства. Изменение момента инерции в интервале рассмотренных значений приводит к увеличению вертикального прогиба на 15% и смещению времени возникновения экстремума на 0,1–0,2 с.

Результаты. Анализируя полученные графические зависимости, можно отметить изменение характера деформирования пролетного строения, например, возрастание амплитуды вертикальных перемещений выбранной точки балочного пролетного строения при изменении расстояния между горизонтальными плоскостями жесткости поперечного сечения, что будет сказываться при расчете несущей способности мостового перехода, как по первой, так и по второй группе предельных состояний. С точки зрения конструктивных решений это означает необходимость использования окологабаритного пространства в нижней половине от центра тяжести подвижного состава с одновременным ограничением высоты коробчатой части поперечного сечения под плоскостью приложения подвижной нагрузки. Также наблюдается смещение времени возникновения локальных экстремумов функции вертикальных перемещений, что может существенно сказаться на рекомендуемой скорости движения экипажа, исходя из условия соблюдения антирезонансного режима. Предлагаемый подход позволяет на этапе проектирования пролетного строения, изменяя геометрические размеры расположения различных частей поперечного сечения при неизменной его площади, добиться уменьшения максимальных нормальных перемещений на величину до 15%, что, в свою очередь, позволит выполнить требование нормативных документов и обеспечить работу конструкции при увеличении скоростей движения экипажей.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты могут быть востребованы как при проектировании новых мостовых переходов на транспортных магистралях, так и для оптимизации элементов конструкций существующих мостов в условиях увеличения скоростей движения транспортных средств, поскольку время возникновения экстремумов функции динамических вертикальных перемещений зависит от геометрических параметров поперечного сечения пролетного строения.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgements: the authors express gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гридасова Е. А., Никифоров П. А., Локтев А. А., Гришин А. В., Сухорада А. Е. Влияние высокочастотного нагружения на структуру малоуглеродистой стали // Наука и техника транспорта. 2017. № 2. С. 82–91. EDN: https://elibrary.ru/ysphyv.

Gridasova E. A., Nikiforov P. A., Loktev A. A., Grishin A. V., Sukhorada A. E. The effect of high-frequency loading on the structure of low-carbon steel. *Science and Technology in Transport*. 2017;(2):82–91 (In Russ.). EDN: https://elibrary.ru/ysphyv.

2. Loktev A., Korolev V., Shishkina I., Illarionova L., Loktev D., Gridasova E. Perspective Constructions of Bridge Crossings on Transport Lines. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1116:209–218. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_20. EDN: https://elibrary.ru/ynivet.

3. Ланис А. Л., Разуваев Д. А., Ломов П. О. Сопряжение подходных насыпей с мостами и путепроводами // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 2 (48). С. 110–120. EDN: https://www.elibrary.ru/vtnxnz.

Lanis A. L., Razuvaev D. A., Lomov P. O. Conjugation of approach fill with bridge and overbridge. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2016;2(48):110–120. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/vtnxnz.

4. Поляков В. Ю. Синтез оптимальных пролетных строений для высокоскоростной магистрали // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. № 3 (266). С. 35–42. EDN: https://www.elibrary.ru/vzycph.

Polyakov V. Yu. Synthesis of optimal superstructures for a high-speed highway. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2016; 3(266):35–42. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/vzycph.

5. Baragetti S. Notch Corrosion Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V. *Materials*. 2014;7(6):4349–4366. https://doi.org/10.3390/ma7064349.

6. Локтев А. А., Сычев В. П., Поддаева О. И., Потапов А. В., Талашкин Г. Н. Моделирование мостотоннеля для пропуска легкового транспорта через объекты инфраструктуры // Наука и техника транспорта. 2017. № 1. С. 73–78. EDN: https://www.elibrary.ru/yhwpmt.

Loktev A. A., Sychev V. P., Poddaeva O. I., Potapov A. V., Talashkin G. N. Modeling the place of a tunnel for passing passenger transport through infrastructure facilities. *Science and Technology in Transport*. 2017;(1):73–78. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/yhwpmt.

7. Иванченко И. И. Динамика транспортных сооружений: высокоскоростные подвижные, сейсмические и ударные нагрузки. М.: Наука, 2011. 574 с. EDN: https://www.elibrary.ru/qnxtxp.

Ivanchenko I. I. *Dynamics of transport structures: high-speed mobile, seismic and shock loads*. Moscow: Science; 2011. 574 p. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/qnxtxp.

8. Matsumoto N., Asanuma K. Some experiences on track-bridge interaction in Japan. In: Calcada R., Delgado R., Campos A. et al. (eds). *Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways*. London: CRC Press; 2008. P. 80–97. https://doi.org/10.1201/9780203895399.

9. Frýba L. Dynamics of railway bridges. Praha: Academia; 1996. 330 p.

10. Chen Y.-H., Li C.-Y. Dynamic response of elevated high-speed railway. *Journal of Bridge Engineering (ASCE)*. 2000;5(2):124–130. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2000)5:2(124).

11. Loktev A. A. Non-elastic models of interaction of an impactor and an Uflyand-Mindlin plate. *International Journal of Engineering Science*. 2012;50(1):46–55. https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2011.09.004. EDN: https://elibrary.ru/pdghrv.

12. Loktev A. A. Dynamic contact of a spherical indenter and a prestressed orthotropic Uflyand-Mindlin plate. *Acta Mechanica*. 2011;222(1–2): 17–25. https://doi.org/10.1007/s00707-011-0517-8. EDN: https://elibrary.ru/pegxlp.

13. Glusberg B., Savin A., Loktev A., Korolev V., Shishkina I., Alexandrova D., Loktev D. New lining with cushion for energy efficient railway turnouts. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;982: 556–570. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8_53. EDN: https://elibrary.ru/hmgycb.

14. Loktev A. A., Korolev V. V., Shishkina I. V., Basovsky D. A. Modeling the dynamic behavior of the upper structure of the railway track. *Procedia Engineering*. 2017;189:133–137. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.022. EDN: https://elibrary.ru/zfbjvx.

15. Локтев А. А., Королев В. В., Локтев Д. А., Шукюров Д. Р., Гелюх П. А., Шишкина И. В. Перспективные конструкции мостовых переходов на транспортных магистралях // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2018. Т. 77, № 6. С. 331–336. https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-331-336. EDN: https://elibrary.ru/yqnwwd.

Loktev A. A., Korolev V. V., Loktev D. A., Shukyurov D. R., Gelyukh P. A., Shishkina I. V. Perspective constructions of bridge overpasses on transport main lines. *Russian Railway Science Journal*. 2018;77(6):331–336. (In Russ.). https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-331-336. EDN: https://elibrary.ru/yqnwwd.

16. Lyudagovsky A., Loktev A., Korolev V., Shishkina I., Alexandrova D., Geluh P., Loktev D. Energy efficiency of temperature distribution in electromagnetic welding of rolling stock parts. In: *E3S Web of Conferences*: *International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE-2018*, *10–12 December*, *2018*, *St. Petersburg*. EDP Sciences Publ. 2019;110:01017. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001017. EDN: https://elibrary.ru/okfkse.

17. Локтев А. А., Королев В. В., Шишкина И. В. Особенности оценки состояния и поведения низководных мостов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2021. Т. 80, № 6. С. 334–342. https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-6-334-342. EDN: https://elibrary.ru/jypqer.

Loktev A. A., Korolev V. V., Shishkina I. V. Features of assessing the condition and behavior of low-water bridges. *Russian Railway Science Journal*. 2021;80(6):334–342. (In Russ.). https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-6-334-342. EDN: https://elibrary.ru/jypqer.

18. Королев В. В., Локтев А. А., Шишкина И. В., Гридасова Е. А. Особенности работы пролетного строения мостового перехода при смещении оси рельсошпальной решетки // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2020. Т. 79, № 3. С. 127–138. https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-3-127-138. EDN: https://elibrary.ru/mnblbm.

Korolev V. V., Loktev A. A., Shishkina I. V., Gridasova E. A. Features of the bridge span performance when shifting the axis of the rail-sleeper grid. *Russian Railway Science Journal*. 2020;79(3):127–138. (In Russ.). https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-3-127-138. EDN: https://elibrary.ru/mnblbm.

19. Локтев А. А., Сычева А. В. Моделирование работы железнодорожного пути // Путь и путевое хозяйство. 2014. № 7. С. 10–12. EDN: https://www.elibrary.ru/silwih.

Loktev A. A., Sycheva A. V. About the modelling of work of the railway track. *Railway Track and Facilities*. 2014;(7):10–12. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/silwih.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексей Алексеевич ЛОКТЕВ,
д-р физ.-мат. наук, профессор,
заведующий кафедрой «Транспортное строительство»,
Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ),
125315, г. Москва, ул. Часовая, д. 22/2),
Author ID: 16528, https://orcid.org/0000-0002-8375-9914

Ирина Викторовна ШИШКИНА,
канд. техн. наук, доцент;
доцент кафедры «Транспортное строительство»,
Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ),
125315, г. Москва, ул. Часовая, д. 22/2),
Author ID: 1040652, https://orcid.org/0000-0002-6530-8116

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey A. LOKTEV,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of Transport Construction Department, Russian University of Transport (125315, Moscow, 22/2, Chasovaya St.), Author ID: 16528,
https://orcid.org/0000-0002-8375-9914

Irina V. SHISHKINA,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (125315, Moscow, 22/2, Chasovaya St.), Author ID: 1040652,
https://orcid.org/0000-0002-6530-8116

ВКЛАД АВТОРОВ

Алексей Алексеевич ЛОКТЕВ. Общее руководство исследованием, выполнение расчетов для описания динамического поведения пролетного строения мостового перехода, подготовка текста статьи (50 %).

Ирина Викторовна ШИШКИНА. Обзор и анализ состояния вопроса, подготовка данных, описание результатов, редактирование рукописи статьи (50 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexey A. LOKTEV. Overall management of the study, calculation performance for dynamic behavior of the bridge crossing superstructure, article preparation (50 %).

Irina V. SHISHKINA. Issue review and analysis, data preparation, results description, revision of the manuscript (50 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 02.06.2025, рецензия от первого рецензента получена 10.07.2025, рецензия от второго рецензента получена 11.07.2025, рецензия от третьего рецензента получена 22.07.2025, принята к публикации 07.08.2025.

The article was submitted 02.06.2025, first review received 10.07.2025, second review received 11.07.2025, third review received 22.07.2025, accepted for publication 07.08.2025.