

А. А. Локтев<sup>1,2</sup>, Л. А. Илларионова<sup>1</sup>, А. Баракат<sup>2</sup>

## ВОЗМОЖНОСТИ ВИБРОДИАГНОСТИКИ НИЗКОВОДНЫХ МОСТОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

<sup>1</sup>Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

**Аннотация.** Настоящее исследование посвящено изучению динамического поведения однопролетного низководного моста и оценке возможности детектирования появляющихся в процессе его эксплуатации дефектов. Актуальность работы подтверждается тем, что уровень воды для низководных мостов не позволяет провести визуальный осмотр и инструментальное обследование нижней части пролетного строения и ригельных балок опор. Поскольку для таких мостовых переходов не учитываются возможности пропуска ледохода, высоких вод и водного транспорта, то в вязкоупругую модель опирания пролетного строения вводятся обобщенные параметры вязкости и упругости, которые могут позволить учесть эти факторы. За расчетную схему принята балочная система, для описания деформирования которой могут быть применены уравнения для балки или пластины-полоски, которая может быть усилена дополнительной конструкцией для увеличения жесткости. В данной работе получены аналитические и графические зависимости для геометрических и динамических характеристик деформирования пролетного строения, с помощью которых можно выполнить оценку эксплуатационного состояния моста по собственным частотам колебаний пролетного строения.

**Ключевые слова:** мониторинг мостового перехода, собственные частоты, пролетное строение, динамическая нагрузка, вязкоупругая модель, вертикальное перемещение

DOI: 10.37972/chgpu.2021.50.4.008

УДК: 539.3, 624.21

---

© Локтев А. А., Илларионова Л. А., Баракат А., 2021

*Локтев Алексей Алексеевич*

**e-mail:** aaloktev@yandex.ru, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой транспортного строительства, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Россия, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия,

*Илларионова Лилия Алексеевна*

**e-mail:** illarionova.goat@mail.ru, старший преподаватель, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Россия,

*Баракат Ахмад*

**e-mail:** ahmadbarakat9992@gmail.com, аспирант, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

Поступила 25.11.2021

Отличительной особенностью современного состояния дорог регионального, межмуниципального, местного значения и частных (например, подъездные пути к промышленным предприятиям) дорог по сравнению с дорогами федерального значения является меньший контроль за скоростным режимом и массо-габаритными характеристиками транспортных средств, а также меньшее внимание со стороны как эксплуатирующих организаций, так и со стороны нормативно-правовой документации.

В настоящей работе рассмотрены особенности эксплуатации и мониторинга низководных мостов, которые встречаются чаще всего и встречаются на таких дорогах. Низководные мосты возводятся для преодоления препятствия не небольшой высоты над его поверхностью, при этом за основное положение уровня воды может приниматься уровень межня, т.е. пролетные строения таких искусственных сооружений могут затопляться при высоком уровне проходящей воды, чаще всего такие сооружения имеют временную категорию.

В целом, можно отметить, что низководные мостовые переходы возводятся без учета возможности пропуска ледохода, высоких вод и водного транспорта, чаще всего за расчетную схему принимают балочную разрезную систему, которая может быть усилена пространственной ферменной конструкцией (рис. 1). В данной работе изучается возможность оценки эксплуатационного состояния моста по собственным частотам колебаний пролетного строения, что особенно актуально при диагностике и паспортизации из-за сложностей визуального осмотра конструкций моста с воды [1-3].

В качестве характеристики, изменение которой учитывает изменение состояния мостового сооружения, предлагается использовать частоту собственных колебаний, определение изменений в ее величине позволит выявить дефекты, повреждения и отступления от проекта, приводящие к уменьшению несущей способности моста [4,5]. Разработанное математическое и алгоритмическое обеспечение могут быть реализованы в системах вибродиагностики мостовых переходов, позволяющих не только обнаруживать и идентифицировать дефекты и неисправности, но и прогнозировать динамику изменения эксплуатационных параметров в любое время года [6,7].

Верхнее строение мостового перехода воспринимает нагрузку от проходящего транспорта и передает давление от нее на пролетное строение, которая затем через узлы опирания передает нагрузку на ригельную балку опоры, а через нее и на стойки-сваи и далее на грунт основания. Для моделирования динамических воздействий со стороны транспорта и динамического поведения отдельных элементов и всего сооружения в целом предполагается использовать вязкоупругие элементы типа Кельвина-Фойгта, которые, как показали исследования отечественных и зарубежных исследователей, наилучшим образом описывают изменения во времени параметров состояния применяемых материалов, конструктивных решений, узлов и окружающей среды при действии внешней динамической нагрузки [8,9].

При этом считается, что параметры жесткости и вязкости могут меняться в достаточно широком интервале значений, позволяя учесть особенности инженерно-геологических характеристик грунта, материал и конструкцию верхнего строения (дорожной одежды), особенности узлов опирания пролета и объем воды в подмостовом пространстве, непосредственно контактирующей с ригельной частью береговой опоры [10,11].

Одним из известных подходов в расчете колебаний пролетного строения является рассмотрение вязкоупругого взаимодействия двух твердых массивных тел, одним из которых является часть пролетного строения с приведенной длиной и массой, а



Рис. 1. Низководный мостовой переход с однопролетной расчетной схемой в виде пространственной фермы.

другим - верхняя часть опоры, на которую через узел специальной конструкции опирается пролет (рис.2).

Система определяющих уравнений, описывающих вертикальные перемещения системы двух твердых тел, связанных между собой вязкоупругим демпфером типа Кельвина-Фойгта и одно из которых испытывает воздействие транспортного средства [8,12], может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} m_1 (\ddot{z}_1 + \ddot{z}_3) + K (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + C (z_1 - z_2) &= 0, \\ m_2 (\ddot{z}_2 + \ddot{z}_3) + K (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + C (z_2 - z_1) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

здесь  $m_1$  и  $m_2$  - приведенные массы части пролетного строения и ригельной балки опоры соответственно,  $z_1$  и  $z_2$  - координаты центров тяжести фрагмента пролетного строения и ригельной балки опоры относительно верхней точки опорного узла до начала его деформирования,  $z_3$  - координата верхнего сечения опорного узла до его нагружения относительно инерциальной системы отсчёта,  $K$  - коэффициент линейного вязкого сопротивления опорного узла,  $C$  - коэффициент жесткости опорного узла,  $t'$  - время, являющееся переменной интегрирования.

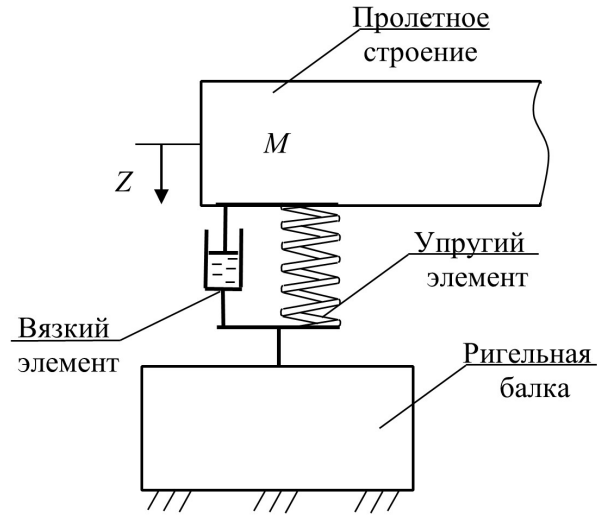


Рис. 2. Береговая опора балочного пролетного строения с вязкоупругим демпфером типа Кельвина-Фойгта.

В качестве метода решения системы (1) традиционно используется представление основных неизвестных перемещений и их производных в пространстве Лапласа [6,9,13]. Для обратного перехода в пространство оригиналов требуется записать характеристические уравнения и найти параметры  $p$ , при которых знаменатель и системные параметры обращаются в ноль. В случае системы (1) эти соотношения принимают вид:

$$K \cdot p + C = 0, \quad (2)$$

$$m_2 \cdot p^2 + K \cdot p + C = 0, \quad (3)$$

$$m_1 \cdot m_2 \cdot p^4 + K \cdot p^3 \cdot (2m_1 + m_2) + Cp^2 \cdot (2m_1 + m_2) - K^2 \cdot p^2 - K \cdot C \cdot p - C^2 = 0. \quad (4)$$

Совокупность решений уравнений (2) – (4) можно представить графически в виде набора точек на действительно-мнимой плоскости, каждая из которых получена при определенных величинах параметров  $K$  и  $C$ . Множество точек-решений объединяются между собой в концентрические кривые, в центре которых расположены полюсы. Физически полюсы означают равновесные значения параметров вязкости и жесткости для которых требуется определить перемещения взаимодействующих тел и силу контакта между ними [14,15].

Работа опорного демпфированного узла характеризуется геометрическими (перемещение), кинематическими (скорость вертикального перемещения) и динамическими (вертикальное ускорение) характеристиками. Рассмотрим более подробно функцию вертикального перемещения [15,16].

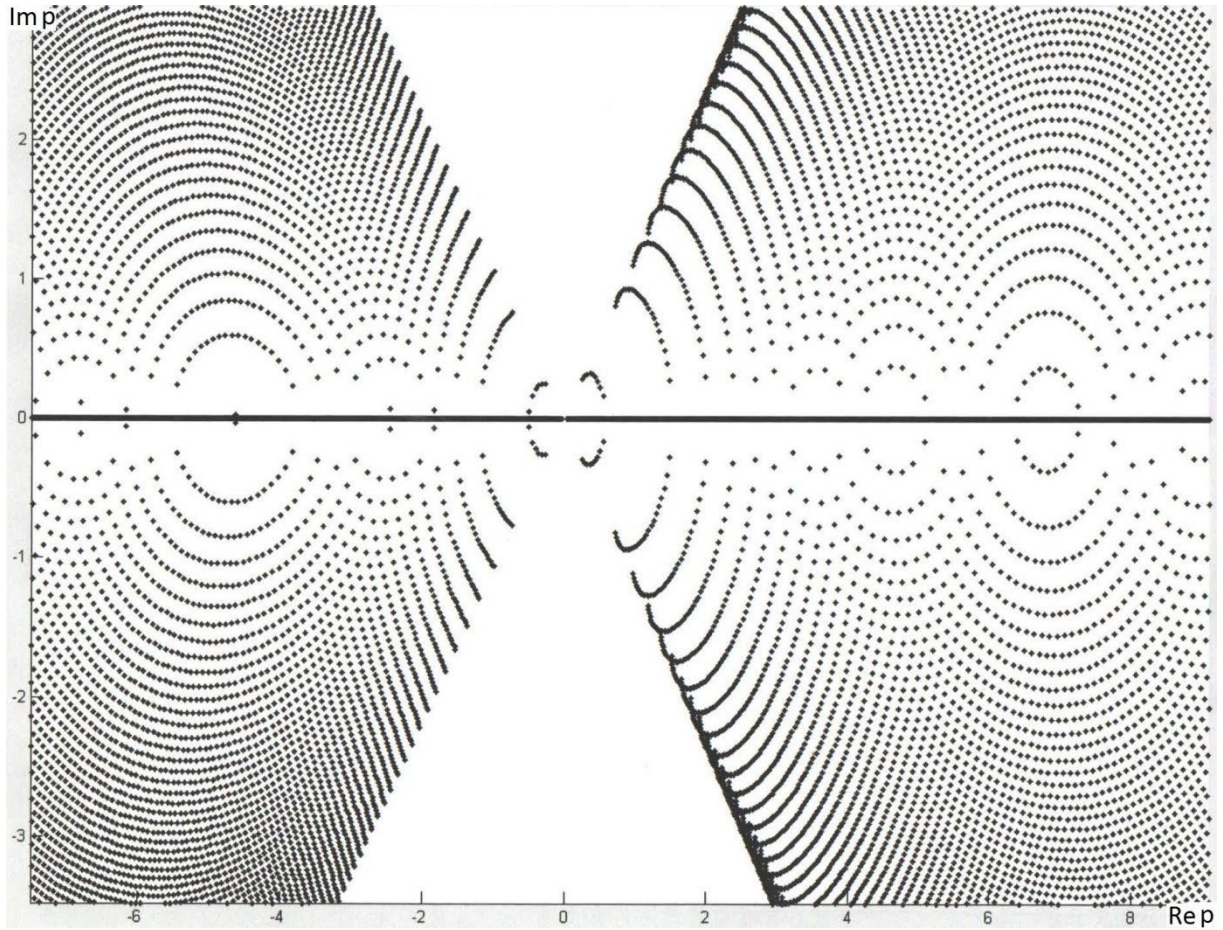


Рис. 3. Графическая зависимость поведения корней характеристических уравнений и системных множителей (2) – (4) для различных значений параметров вязкости  $K$  и упругости  $C$ .

Граничные условия для шарнирного опирания пролетного строения можно представить в виде (если начало координат будет находиться в середине пролета):

$$u(-l, 0) = u(l, 0) = \frac{\partial^2 u(-l, 0)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u(l, 0)}{\partial x^2} = 0, \quad (5)$$

здесь  $l$  – полудлина пролетного строения.

В начальный момент времени считаем, что опорные узлы (рис.2) находятся в недеформированном состоянии, т.е. к граничным условиям (5) можно присоединить начальные:

$$u(x, 0) = 0, \quad \frac{\partial u(x, 0)}{\partial t} = 0. \quad (6)$$

Для описания динамического поведения пролетного строения балочной расчетной схемы [17,18] часто используют дифференциальное уравнение поперечных колебаний стержня:

$$\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = -\frac{\rho}{EI} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{q(x, t)}{EI}, \quad (7)$$



здесь  $\rho$  - погонная масса стержня,  $E$  - модуль упругости материала пролетного строения,  $I$  - момент инерции поперечного сечения балки,  $q(x,t)$  - внешняя нагрузка от экипажей.

Для проверки условия прочности пролетного строения вычисляют наибольшие нормальные (в середине пролета) и касательные напряжения (на опоре):

$$\sigma_{\nu} = \frac{M(x = \frac{l}{2})}{1W_{nt}} \leq R_y \cdot m; \quad (8)$$

$$\tau_{\nu} = \frac{Q_0 \cdot S_{br}}{2 \cdot J_{br} t_w} \leq R_s; \quad (9)$$

здесь  $m$ ,  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  - коэффициенты надежности;  $R_y$  - расчетное сопротивление материала пролетного строения изгибу;  $R_s$  - расчетное сопротивление материала пролетного строения срезу;  $W_{nt}$  - момент сопротивления поперечного сечения нетто пролетного строения;  $t_w$  - толщина стенки балки;  $J_{br}$  - момент инерции поперечного сечения брутто пролетного строения;  $S_{br}$  - статический момент части поперечного сечения  $S_{br} = 0,5 \cdot F_{bp} \cdot y_{цт}$ ,  $F_{br}$  - площадь сечения брутто пролетного строения;  $y_{цт}$  - ордината центра тяжести половины сечения пролетного строения.

Выбор в качестве одного из основных параметров мониторинга технического состояния мостового перехода частоты собственных колебаний пролетного строения объясняется тем, что данная характеристика отражена в нормативно-правовой документации по проектированию и эксплуатации искусственных сооружений. При проектировании мостовых переходов, пролетные строения которых работают по балочной схеме необходимо, чтобы первая собственная частота вертикальных колебаний, удовлетворяла условиям

$$f_{1,min} \leq f_1 \leq f_{1,max}, \quad 1.2f_1 \leq f_{1,t} \quad , \quad (10)$$

здесь  $f_1$  - первая собственная частота вертикальных колебаний;  $f_{1,t}$  - собственная частота по первой крутильной форме;  $f_{1,max}$  - верхний предел первой собственной частоты, связан с частотами возбуждения, возникающими из-за неровностей проезжей части и нехарактерных деформаций колесных пар транспортных средств;  $f_{1,min}$  - нижний предел собственной частоты, связан с возможным резонансом пролетного строения из-за перемещения колесных пар экипажей и существенно зависит от длины пролетного строения.

Графически описанные условия-ограничения могут быть представлены в виде двух кривых, между которыми находится область допустимых значения для первой собственной частоты пролетного строения (рис.4), кривая для  $f_{1,max}$  - представлена сплошной линией, а для  $f_{1,min}$  - пунктирной.

Как показывают результаты исследований, данные графические условия ограничения хорошо подходят для скоростей экипажей от 100 до 450 км/ч.

Определяющее уравнение (7) решается в пространстве изображений, это позволяет уменьшить число неизвестных величин, к которым относится функция прогибов (нормальных перемещений) и ее производные по времени и по продольной координате, поскольку в пространстве изображений вместо производных по времени присутствуют сами функции, умноженные на параметр  $p$ .

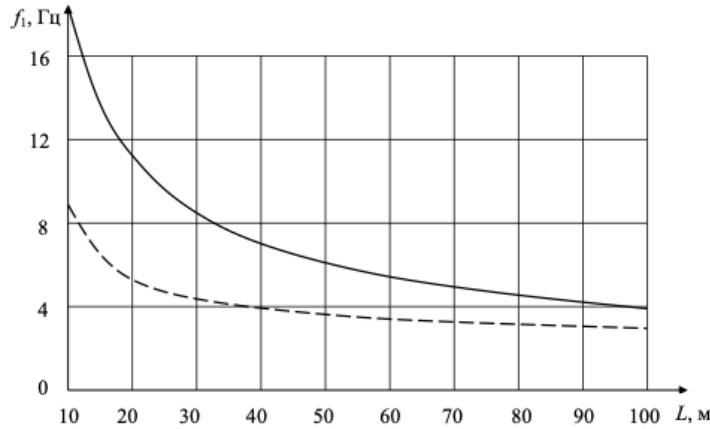


Рис. 4. Ограничения собственной частоты колебаний по первой форме для пролетных строений с разрезной балочной расчетной схемой.

Перемещение в этом случае можно записать в следующем виде:

$$\tilde{u}(x, p) = \frac{2\tilde{P}(p)l^3}{EI\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{p^2 n^4} \sin\left(\frac{n\pi a}{l}\right) \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right), \quad (11)$$

в этом выражении  $a$  – координата места приложения внешней силы  $\tilde{P}(p)$  от экипажа, верхняя тильда обозначает на представление величины в пространстве Лапласа.

Несмотря на увеличивающиеся скорости движения транспортных средств, их абсолютные величины все еще существенно меньше скоростей продольных и поперечных волн в материале искусственного сооружения, поэтому имеет смысл рассматривать немгновенное динамическое воздействие на элементы инфраструктуры со стороны экипажей, а также учитывать местное деформирование взаимодействующих элементов [19-21]. Таким образом, функцию  $\tilde{P}(p)$  в пространстве изображений или  $P(t)$  в пространстве оригиналов предлагается определять из решения контактной задачи и за основу взять модифицированную модель типа [16,22,23]:

$$\alpha(t) = bP(t)^q, \quad (12)$$

здесь  $\alpha(t)$  – функция местного смятия материалов контактирующих тел от времени, параметры  $b$  и  $q$  определяются геометрическими и механическими характеристиками взаимодействующих элементов сооружения.

Используя описанный подход, в настоящей работе получены графические зависимости нормального перемещения точек пролетного строения от времени для различных значений параметров упругости и вязкости опорного узла (рис.5) [24-26]. Кривые 1, 2, 3 получены для следующих пар значений  $C$  и  $K$  соответственно:  $C = 10^4$  Н/м,  $K = 10^6$  Нс/м;  $C = 10^4$  Н/м,  $K = 10^4$  Нс/м;  $C = 10^6$  Н/м,  $K = 10^4$  Нс/м. Остальные параметры взаимодействия принимают следующие значения:  $E = 7 \cdot 10^4$  МПа,  $q = 2/3$ ,  $m = 20$  т,  $V_0 = 10$  м/с,  $l = 9$  м,  $r_0 = 0.1$  м, тип балки пролетного строения – железобетонная балка серии 3.503.1-81 (двутаповая с развитым верхним поясом). Полученные зависимости говорят о том, что после приложения нагрузки через некоторый временной

интервал конструкция вернется в свое первоначальное положение, максимальное значение вертикального перемещения с изменением соотношения параметров жесткости и вязкости смещается вправо в пределах времени деформирования [27,28]. Опорный узел реализованный в виде вязкоупругого демпфера типа Кельвина-Фойгта позволяет воздействовать на характеристики напряженно-деформированного состояния пролетного строения, в том числе, на прогиб. Совмещая полученные результаты рис. 5 с предельными значениями собственных частот колебаний рис. 4 можно получить рекомендуемые скорости движения транспортных средств по мостовому переходу, а можно решать и обратную задачу, подобрать значения упругих и вязких параметров опоры пролетного строения для организации движения в составе высокоскоростной транспортной системы.

Формат получаемых результатов соответствует требованиям нормативных документов о попадании первой формы собственных частот колебаний мостовых пролетов в интервал между верхним и нижним значением соответствующего предела, это позволит при строительстве, реконструкции или капитальных ремонтах искусственных сооружений правильно подобрать длину пролетных строение, скоростной режим движения транспортных средств и вязкоупругие параметры узла опирания пролетного строения на береговую опору.

Мониторинг мостовых переходов с использованием предложенных математических моделей позволит своевременно диагностировать износ, появление дефектов в бетоне растянутой зоны и разрушение опорных узлов пролетных строений, например, растрескивание и выкрашивание резинометаллических опорных частей, выявлять опирание железобетонного элемента на элемент из такого же материала (это возможно как из-за полного разрушения резинометаллической опорной части).

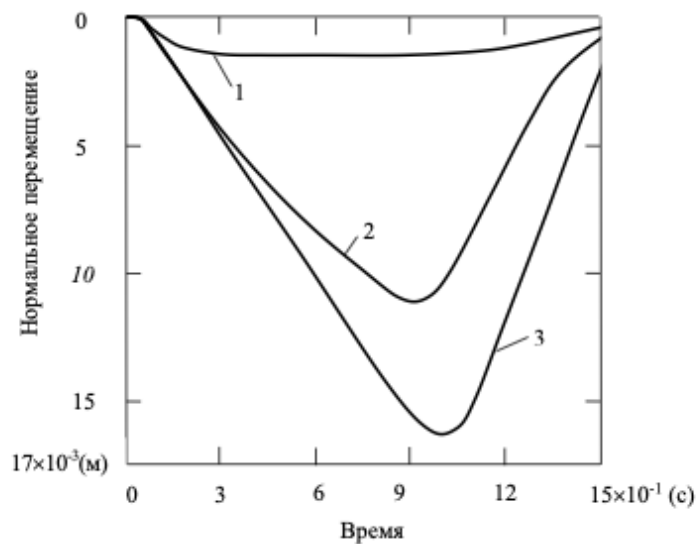


Рис. 5. Зависимость нормального перемещения от времени для различных значений упругих и вязких характеристик узла опирания.

Выявление упомянутых дефектов таких дефектов посредством оценки частот собственных колебаний, позволяет более точно планировать ремонтные работы, вводить



ограничения на нагрузку, передаваемую на ось транспортного средства, общий вес экипажа, на расстояние между экипажами и скорости при их движении по искусственному сооружению.

Полученные аналитические и графические зависимости особенно актуальны для низководных мостов, которые отличаются тем, что не позволяют провести визуальный осмотр и инструментальное обследование с нижней стороны несущей части пролетного строения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hess J. Rail expansion joints – the underestimated track work material // *Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways*, Taylor & Francis Group, London, UK. 2009. P. 149–164.
- [2] Технические условия для конструкций пути на подходах к искусственным сооружениям. Утв. Департаментом пути и сооружений МПС 16.12.2003, М. Транспорт. 2004. 24 с.
- [3] Специальные технические условия. Верхнее строение пути участка Москва – Казань – Екатеринбург высокоскоростной железнодорожной магистрали. Технические нормы и требования к проектированию и строительству. Санкт-Петербург. 2014. 32 с.
- [4] Иванченко И. И. Динамика транспортных сооружений. Высокоскоростные подвижные, сейсмические и ударные нагрузки. Москва, 2011. 574 с. ISBN: 978-5-02-037488-1.
- [5] Matsumoto N., Asanuma K. Some experiences on track-bridge interaction in Japan // *Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways*. Taylor & Francis Group, London, UK. 2009. P. 80–97.
- [6] Fryba L. Dynamic of railway bridges. Academia, Praha, 1996. 330 p. ISBN: 0-7277-2044-9.
- [7] Poliakov V. Interaction Optimization in Multibody Dynamic System // *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2017. Volume 2. P. 43–51.
- [8] Барченков А. Г. Динамический расчет автодорожных мостов. М.: Транспорт, 1976 – 200 с.
- [9] Болотин В. В. Динамическая устойчивость упругих систем. М.: Гостехиздат, 600 с.
- [10] Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. М. Транспорт. 1997, 325 с.
- [11] Chen Y. H., Li C. Y. Dynamic response of elevated high-speed railway // *J. Bridge Eng. ASCE*. No 5(2). 2000. P. 124–130.
- [12] Kawatani M., Kim C. W. Computer simulation for dynamic wheel loads of heavy vehicles // *Struct. Eng. & Mech.* No 12(4). 2001. P. 409–428.
- [13] Pan T. C., Li J. Dynamic vehicle element method for transient response of coupled vehicle–structure systems // *J. Struct. Eng. ASCE*. No 128(2). 2002. P. 214–223.
- [14] Kou J. W., DeWolf J. T. Vibrational behavior of continuous span highway bridge - Influencing variables // *J. Struct. Eng. ASCE*. No 123(3). 1997. P. 333–344.
- [15] Курбацкий Е. Н., Тигов Е. Ю., Голосова О. А., Косауров А. П. Метод защиты сооружений от вибраций и сейсмических воздействий // *Строительство и реконструкция*. 2018. С. 55 – 67.
- [16] Kurihara M. Vibration of an elastic beam subjected to discrete moving loads / M. Kurihara, T. Shimogo // *J. Mech. Design. ASME*. No 100(7). 1978. P. 514–519.
- [17] Loktev A. A. Non-elastic models of interaction of an impactor and an Uflyand-Mindlin plate // *International Journal of Engineering Science*. 2012. Vol. 50. No 1. P. 46-55.
- [18] Loktev A. A. Dynamic contact of a spherical indenter and a prestressed orthotropic Uflyand-Mindlin plate // *Acta Mechanica*. 2011. Vol. 222. No 1-2. P. 17-25.
- [19] 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. Vol. 982. P. 556-570.
- [20] 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. Vol. 189. P. 133-137.
- [21] 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.
- [22] 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.

- [23] Локтев А. А., Локтев Д. А. Решение задачи ударного взаимодействия твердого тела и сферической оболочки лучевым методом // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. 2007. № 2. С. 128-135.
- [24] 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 // В сборнике: E3S Web of Conferences. 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018. 2019. P. 01017.
- [25] Локтев А. А. Упругопластическая модель взаимодействия цилиндрического ударника и пластинки // Письма в Журнал технической физики. 2007. Т. 33. № 16. С. 72-77.
- [26] Локтев А. А. Ударное взаимодействие твердого тела и упругой ортотропной пластинки // Механика композиционных материалов и конструкций. 2005. Т. 11. № 4. С. 494-508.
- [27] Локтев А. А., Локтев Д. А. Решение задачи ударного взаимодействия твердого тела и сферической оболочки лучевым методом // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. 2007. № 2. С. 128-135.
- [28] Сычёв В. П., Локтев А. А., Локтев Д. А., Виноградов В. В. Повышение информативности оценки содержания железнодорожного пути // Мир транспорта. 2017. Т. 15. № 2 (69). С. 20-31.

A. A. Loktev<sup>1,2</sup>, L. A. Illarionova<sup>1</sup>, A. Barakat<sup>2</sup>

## POSSIBILITIES OF VIBRATION DIAGNOSTICS OF LOW-WATER BRIDGE CROSSINGS

<sup>1</sup>*Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia*

**Abstract.** The present investigation is devoted to the study of the dynamic behavior of a single-span low-water bridge and the assessment of the possibility of detecting defects appearing during its operation. The relevance of the work is confirmed by the fact that the water level for low-water bridges does not allow for a visual inspection and instrumental examination of the lower part of the superstructure and the girder beams of the supports. Since such bridge crossings do not take into account the possibility of ice passage, high waters and water transport, generalized viscosity and elasticity parameters are introduced into the viscoelastic model of the superstructure support, which can allow these factors to be taken into account. A beam system has been adopted as the design scheme, to describe the deformation of which equations for a beam or a strip plate can be applied, which can be reinforced with an additional structure to increase rigidity. In this paper, analytical and graphical dependences are obtained for the geometric and dynamic characteristics of the deformation of the superstructure, with the help of which it is possible to assess the operational condition of the bridge by the natural frequencies of vibrations of the superstructure.

**Keywords:** Bridge crossing monitoring, natural frequencies, superstructure, dynamic load, viscoelastic model, vertical displacement

---

*Loktev Alexey Alekseevich* Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, *Lilia Alekseevna Illarionova*, Senior Lecturer, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia *Barakat Ahmad*, PhD student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

## REFERENCES

- [1] Hess J. Rail expansion joints - the underestimated track work material // *Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways*, Taylor & Francis Group, London, UK. 2009. P. 149–164.
- [2] Technical conditions for track structures on approaches to artificial structures. Approved. Department of tracks and structures of the Ministry of Railways 12/16/2003, M. Transport. 2004. 24 p.
- [3] Special specifications. Track superstructure of the Moscow - Kazan - Yekaterinburg section of the high-speed railway. Technical standards and requirements for design and construction. Saint Petersburg. 2014. 32 p.
- [4] Ivanchenko I. I. Dynamics of transport facilities. High-speed moving, seismic and shock loads. Moscow, 2011. 574 p. ISBN: 978-5-02-037488-1.
- [5] Matsumoto N., Asanuma K. Some experiences on track-bridge interaction in Japan // *Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways*. Taylor & Francis Group, London, UK. 2009. P. 80-97.
- [6] Fryba L. Dynamic of railway bridges. Academia, Praha, 1996. 330 p. ISBN: 0-7277-2044-9.
- [7] Poliakov V. Interaction Optimization in Multibody Dynamic System // *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2017. Volume 2. P. 43–51.
- [8] Barchenkov A. G. Dynamic calculation of road bridges. Moscow: Transport, 1976. 200 p.
- [9] Bolotin VV Dynamic stability of elastic systems. M.: Goste-hizdat. 600 p.
- [10] A. Ya. Kogan. Track dynamics and its interaction with rolling stock. M. Transport. 1997, 325 p.
- [11] Chen Y. H., Li C. Y. Dynamic response of elevated high-speed railway // *J. Bridge Eng. ASCE*. No 5 (2). 2000. P. 124-130.
- [12] Kawatani M., Kim C. W. Computer simulation for dynamic wheel loads of heavy vehicles // *Struct. Eng. & Mech.* No 12 (4). 2001. P. 409-428.
- [13] Pan T. C., Li J. Dynamic vehicle element method for transient response of coupled vehicle – structure systems // *J. Struct. Eng. ASCE*. No 128 (2). 2002. P. 214-223.
- [14] Kou J. W., DeWolf J. T. Vibrational behavior of continuous span highway bridge - Influencing variables // *J. Struct. Eng. ASCE*. No 123 (3). 1997. P. 333-344.
- [15] Kurbatsky E. N., Titov E. Yu., Golosova O. A., Kosaurov A. P. Method of protecting structures from vibrations and seismic influences // *Construction and reconstruction*. 2018. P. 55 - 67.
- [16] Kurihara M. Vibration of an elastic beam to discrete moving loads / M. Kurihara, T. Shimogo // *J. Mech. Design. ASME*. No 100 (7). 1978. P. 514-519.
- [17] Loktev A. A. Non-elastic models of interaction of an impactor and an Uflyand-Mindlin plate // *International Journal of Engineering Science*. 2012. Vol. 50. No 1. P. 46-55.
- [18] Loktev A. A. Dynamic contact of a spherical indenter and a prestressed orthotropic Uflyand-Mindlin plate // *Acta Mechanica*. 2011. Vol. 222.No. 1-2. P. 17-25.
- [19] 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. Vol. 982. P. 556-570.
- [20] 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. Vol. 189. P. 133-137.
- [21] Loktev A. A., Korolev V. V., Loktev D. A., Shukurov D. R., Gelyukh P. A., Shishkina I. V. Perspective designs of bridge crossings on highways // *Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport*. 2018.Vol. 77. No. 6. P. 331-336.
- [22] Gridasova E. A., Nikiforov P. A., Loktev A. A., Grishin A. V., Suhorada A. E. Influence of high-frequency loading on the structure of low-carbon steel // *Science and technology of transport*. 2017. No. 2. P. 82-91.
- [23] Loktev A. A., Loktev D. A. Solution of the problem of impact interaction of a rigid body and a spherical shell by the ray method // *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*. 2007. No. 2. P. 128-135.
- [24] 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 the collection: E3S Web of Conferences. 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018.2019.P. 01017.
- [25] Loktev A. A. Elastoplastic model of interaction of a cylindrical impactor and a plate // *Letters to the Journal of Technical Physics*. 2007. Vol. 33. No. 16. P. 72-77.

- [26] Loktev A. A. Shock interaction of a rigid body and an elastic orthotropic plate // Mechanics of composite materials and structures. 2005. Vol. 11. No. 4. P. 494-508.
- [27] Loktev A. A., Loktev D. A. Solution of the problem of impact interaction of a rigid body and a spherical shell by the ray method // Bulletin of the Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics. 2007. No. 2. P. 128-135.
- [28] Sychev V. P., Loktev A. A., Loktev D. A., Vinogradov V. V. Increasing the information content of assessing the maintenance of a railway track // World of transport. 2017. Vol. 15. No. 2 (69). P. 20-31.