Особенности оценки состояния и поведения низководных мостов

А. А. ЛОКТЕВ, В. В. КОРОЛЕВ, И. В. ШИШКИНА

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)), Москва, 127055, Россия

Аннотация. Описаны особенности эксплуатации и мониторинга низководных мостов, которые встречаются на автомобильных дорогах регионального, межмуниципального и местного значения. Детально рассмотрены колебания пролетного строения моста с учетом его взаимодействия с другими элементами конструкции и окружающей среды. В качестве характеристики, изменение которой учитывает изменение состояния мостового сооружения, предлагается использовать частоту собственных колебаний. Для моделирования динамических воздействий со стороны транспорта и динамического поведения отдельных элементов и всего сооружения в целом предполагается использовать вязкоупругие элементы типа Кельвина—Фойгта. При решении задачи реализован подход, позволяющий учесть анизотропные свойства пролетного строения, связанные с различным армированием вдоль и поперек проезжей части моста, и представить расчетную схему пролета не в виде балки, опертой по краям с помощью шарниров или вязкоупругих демпферов, а в виде пластины, которая может иметь различные условия закрепления по всему контуру. Использование предлагаемой модели и подхода позволит получать необходимые данные о состоянии низководных мостов, для которых зачастую отсутствует возможность визуального осмотра или инструментального обследования с нижней стороны несущей части пролетного строения. По значениям частот собственных колебаний можно оценивать уровень воды над меженью и прогнозировать паводковые ситуации, во время которых проезжая часть низководного моста может быть подтоплена.

Ключевые слова: автомобильные дороги; низководный мост; пролетное строение; частота колебаний; вязкоупругие элементы; мониторинг; дефекты

Введение. Современные транспортные коммуникации невозможно представить без искусственных сооружений, особенности возведения и эксплуатации которых вносят весомый вклад на всех этапах жизненного цикла трассы. Для развития отечественных транспортных систем существенное значение имеют не только высокоскоростные магистрали и скоростные дороги, но и дороги обычного типа общего пользования, относящиеся по имеющейся классификации к автомобильным дорогам регионального, межмуниципального и местного значения, которые находятся в собственности субъектов Российской Федерации или муниципальных образований и финансируются из соответствующих бюджетов.

Существуют особенности эксплуатации и мониторинга низководных мостов, которые встречаются на

автомобильных дорогах регионального, межмуниципального, местного значения, а также на частных автомобильных дорогах. Низководные мосты возводятся для преодоления препятствия небольшой высоты над его поверхностью, при этом за основное положение уровня воды может приниматься меженный уровень, т. е. пролетные строения таких искусственных сооружений могут затопляться при высоком уровне проходящей воды. Чаще всего такие сооружения имеют временную категорию, но вместе с тем есть примеры очень длительной эксплуатации подобных мостов и их наличия на магистралях федерального уровня (Крымский мост, мост через Амурский залив во Владивостоке и т. д.).

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 (рис. 1, а) или ферменную с ездой понизу (рис. 1, б). Рассматриваемый ниже подход может быть применен при разработке алгоритмов мониторинга, диагностики и паспортизации подобных мостовых переходов, что актуально из-за сложностей визуального осмотра конструкции моста с воды.

Методы исследования. Детально рассмотрим колебания пролетного строения моста с учетом его взаимодействия с другими элементами конструкции и окружающей среды (грунт, вода). В качестве характеристики, изменение которой учитывает изменение состояния мостового сооружения, предлагается использовать частоту собственных колебаний [1–3]. Отдельно можно отметить отсутствие в нормативной литературе описания особенностей мониторинга низководных мостов, которые в этих документах практически не отличаются от обычных мостовых переходов, но опыт реальной эксплуатации таких искусственных сооружений показывает наличие множественных отличий [4, 5].

В качестве основной расчетной схемы моделируемого мостового перехода используется схема, представленная на рис. 2.

Пролетное строение, образуемое из проезжей и несущей частей, опирается на жесткие береговые

опоры. Верхнее строение (проезжая часть) воспринимает нагрузку от проходящего автотранспорта и передает давление от нее на пролетное строение (несущую часть), которая затем через узлы опирания передает нагрузку на ригельную балку опоры, а через нее и на стойки-сваи и далее на грунт основания [6–8]. Для моделирования динамических воздействий со стороны транспортных средств и динамического поведения отдельных элементов и всего сооружения в целом предполагается использовать вязкоупругие элементы типа Кельвина–Фойгта, которые, как показали исследования отечественных и зарубежных ученых, наилучшим образом описывают изменения во времени параметров состояния применяемых материалов, конструктивных узлов и окружающей среды при действии внешней динамической нагрузки [4, 5, 9].

Традиционные методы определения напряженно-деформированного состояния элементов мостового перехода [8–11] предполагают учет в основном статической нагрузки с определением изгибающего момента M и поперечной силы Q в сечениях пролетного строения по известным формулам

$$M\left(x = \frac{1}{2}\right) = \gamma_f p_{nc} \omega_M + \gamma_f k_p (1 + \mu_p) \omega_M + \gamma_f P_n (1 + \mu_p) (y_1 + y_2) \eta_s; \quad (1)$$

$$Q(x = 0) = \gamma_f p_{nc} \omega_Q + \gamma_f k_p (1 + \mu_p) \omega_Q + \gamma_f P_n (y_3 + y_4) \eta_s, \quad (2)$$

где γ_f — коэффициент надежности по нагрузке; p_{nc} — интенсивность равномерно распределенной нагрузки от собственного веса несущих конструкций пролетного строения; k_p — интенсивность равномерно распределенной нагрузки от собственного веса верхнего строения дороги (проезжей части); ω_M и ω_Q — площадь участка линии влияния изгибающего момента и поперечной силы в заданном сечении, м², соответственно; P_n — нагрузка на колесную ось, определяемая типом автомобильной нагрузки, кН; μ_p — коэффициент влияния поперечной деформации пролетного строения; y_1, y_2 и y_3, y_4 — ординаты линий влияния изгибающего момента и поперечной силы для двухосного транспортного средства в точках приложения внешних сил, м; η_s — коэффициент, связанный с симметричностью приложения нагрузки относительно продольной оси мостового сооружения.

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

$$\sigma = \frac{M\left(x = \frac{1}{2}\right)}{v_1 W_{ps nt}} \leq R_y m_n; \quad (3)$$

Рис. 1. Низководные мостовые переходы с однопролетной расчетной схемой:

а — железобетонный балочный; б — металлический ферменный

Fig. 1. Low-water bridge crossings with a single-span design scheme:

а — reinforced concrete beam; б — metal truss

$$\tau = \frac{Q_0 S_{br}}{v_2 J_{br} t_w} \leq R_s, \quad (4)$$

где m_n, v_1, v_2 — коэффициенты надежности; R_y — расчетное сопротивление материала пролетного строения изгибу, МПа; R_s — расчетное сопротивление материала пролетного строения срезу, МПа; $W_{ps nt}$ — момент сопротивления поперечного сечения пролетного строения нетто, см³; t_w — толщина стенки балки, мм; J_{br} — момент инерции поперечного сечения пролетного строения брутто, см⁴; S_{br} — статический момент части поперечного сечения брутто, см³, $S_{br} = 0,5 F_{br} y_{цт}$ (F_{br} — площадь сечения пролетного строения брутто, см²; $y_{цт}$ — ордината центра тяжести половины сечения пролетного строения, см).

Рис. 2. Схема однопролетного низководного моста с вязкоупругими элементами типа Кельвина—Фойгта, описывающая динамическое взаимодействие от колесной пары на дорожную одежду 1, динамическое поведение самого верхнего строения перехода 2, опирание пролета на ригель опоры 3, взаимодействие ригеля и воды 4, взаимодействие заглубленной опорной конструкции с грунтом основания 5, взаимодействие кузова экипажа и колесной пары 6:
 v — горизонтальная скорость движения экипажа, м/с; M_1 — масса кузова транспортного средства, кг; m_1 — масса колесной пары, кг; $P(t)$ — сила взаимодействия транспортного средства и пролетного строения, кН

Fig. 2. Scheme of a single-span low-water bridge with viscoelastic elements of the Kelvin—Voigt type, describing the dynamic interaction from the wheelset on the pavement 1, dynamic behavior of the uppermost structure of the transition 2, support of the span on the girder of the support 3, interaction of the girder and water 4, interaction of the recessed support structure with the ground of the base 5, interaction of the carriage body and wheelset 6:
 v — horizontal speed of the carriage, m/s; M_1 — mass of the vehicle body, kg; m_1 — mass of the wheelset, kg; $P(t)$ — force of interaction between the vehicle and the superstructure, kN

Если в качестве несущих конструкций пролетного строения используются балочные элементы, то необходимо проводить расчет общей устойчивости балки в сжатой зоне против выпучивания в горизонтальной плоскости, для этого используют следующее выражение:

$$\sigma = \frac{M \left(x = \frac{1}{2} \right)}{W_{pbr} \varphi_{pr}} \leq R_y m_n, \quad (5)$$

где W_{pbr} — момент сопротивления сжатого пояса балки брутто, см³, $W_{pbr} = t_p b_p^2 / 6$ (b_p и t_p — ширина и толщина сжатого пояса балки, мм, соответственно); φ_{pr} — коэф-

фициент продольного изгиба, определяемый согласно рекомендациям СП 35.13330.2010 [12].

При использовании конструкции пролетного строения с опорными ребрами жесткости требуется выполнить проверку устойчивости стенки балки и опорных ребер по формуле

$$\sigma = \frac{R_{op}}{A_{rbr} \varphi_{pr}} \leq R_y, \quad (6)$$

где R_{op} — опорная реакция в узле опирания балочного пролетного строения ригельной балки опоры, кН; A_{rbr} — приведенная рабочая площадь ребра жесткости брутто, мм², обычно определяется как $A_{rbr} = 30t_w t_w + 2b_r \delta_r$ (b_r , δ_r — ширина и толщина ребра жесткости, мм, соответственно, $b_r = h_{st} / 30 + 40$, где h_{st} — высота стенки, мм).

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 [2, 3, 12]. При проектировании мостовых переходов, пролетные строения которых работают по балочной схеме, необходимо, чтобы первая форма частоты вертикальных колебаний удовлетворяла условиям

$$f_{1, \min} \leq f_1 \leq f_{1, \max}, \quad 1,2 f_1 \leq f_{1, t}, \quad (7)$$

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

Условия (7) разработаны Международным союзом железных дорог и в России являются во многом рекомендательными. На китайских железных дорогах действуют альтернативные критерии ограничения нижнего предела частоты собственных колебаний, в зависимости от скорости экипажей и длины пролета разрезной балочной схемы такой критерий находится в диапазоне от $100/L$ до $150/L$ (L — длина пролета, м).

Графически описанные условия ограничения могут быть представлены в виде двух кривых, между которыми находится область допустимых значений для первой формы частоты собственных колебаний пролетного строения (рис. 3), кривая 1 — для $f_{1, \max}$, кривая 2 — для $f_{1, \min}$.

Как показывают результаты исследований отечественных и зарубежных ученых, данные графические условия ограничения хорошо подходят для скоростей экипажей от 100 до 450 км/ч, при этом чем выше значение скорости из этого интервала, тем ближе к верхнему пределу располагается расчетная кривая для частоты собственных колебаний [8, 10, 13–15].

В настоящем исследовании реализуется подход, позволяющий учесть анизотропные свойства пролетного строения, связанные с различным армированием вдоль и поперек проезжей части моста, и представить расчетную схему пролета не в виде балки, опертой по краям с помощью шарниров или вязкоупругих демпферов, а в виде пластины, которая может иметь различные условия закрепления по всему контуру [16–18].

Расчетная схема пролетного строения. Рассмотрим трансверсально-изотропную пластину постоянной толщины, которая в недеформированном виде занимает область $\{0 \leq x \leq l_1; 0 \leq y \leq l_2; -h \leq z \leq h\}$, где l_1, l_2 — длина и ширина плоского элемента в плане, мм, соответственно. Приближенное уравнение поперечных колебаний такого плоского элемента в частных производных четвертого порядка имеет гиперболический вид [9]:

$$A_1 \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + A_2 \frac{\partial^4 W}{\partial t^4} - A_3 \frac{\partial^2 \Delta W}{\partial t^2} + A_4 \Delta^2 W + P(W) = 0, \quad (8)$$

где A_1 – A_4 — функциональные коэффициенты; t — время, с; W — вертикальное перемещение точек срединной плоскости пластины, мм; Δ — оператор Лапласа; $P(W)$ — реакция опоры упругого основания.

$$\begin{aligned} A_1 &= \rho; A_2 = \rho^2 \left(A_{33}^{-1} + 3A_{44}^{-1} \right) \frac{h^2}{b}; \\ A_3 &= \left\{ -\rho \left[2 - 2A_{11}A_{33}^{-1} - 3(A_{13}^2 - A_{11}A_{33}) \times \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times A_{33}^{-1}A_{44}^{-1} \right] \right\} \frac{h^2}{b}; \\ A_4 &= 2A_{33}^{-1} (A_{11}A_{33} - A_{13}^2) \frac{h^2}{b}, \end{aligned} \quad (9)$$

где ρ — плотность материала пролетного строения, кг/м³; b — скорость поперечной (сдвиговой) волны, м/с; $A_{11} = A_{13} = \dots = A_{nm}$ — коэффициенты анизотропии.

Пластина, моделирующая пролетное строение мостового перехода с двух противоположных сторон, имеет не нагруженный край, а с двух сторон упруго оперта на ригельные балки опор, соответственно граничные условия могут быть представлены в виде следующих соотношений [8–10, 19]:

Рис. 3. Ограничения частоты собственных колебаний по первой форме f_1 для пролетных строений с разрезной балочной расчетной схемой:

1 — верхний предел; 2 — нижний предел

Fig. 3. Limitations of the frequency of natural vibrations according to the first form f_1 for spans with a split beam design scheme:

1 — upper limit; 2 — lower limit

$$\begin{aligned} & \left. \begin{aligned} & M \left\{ (2 + 3D) \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + (1 + D) \left[2 \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \frac{\rho}{M_{op}} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \right] \right\} = - \frac{3\rho_{op} h_{op}}{4} \frac{\partial^3 W}{\partial x \partial t^2} \\ & D^2 M \left[\frac{\partial^3 W}{\partial x^3} - \frac{3\rho_{op} h_{op}}{4M_{op}} \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial t^2} \right] = \\ & = 3 \frac{h_{op}^2}{h^3} D_{op} M_{op} (1 + D) \times \\ & \times \left[2 \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \frac{\rho_{op}}{M_{op}} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \right] \end{aligned} \right\} x = 0, l_1; \\ & \left. \begin{aligned} & \frac{\partial^3 W}{\partial y^3} = 0 \\ & (2 - 3D) \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + (1 + D) \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \\ & - \rho \frac{(1 + D)}{M} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} y = 0, l_2, \end{aligned} \quad (10)$$

где D, M — приведенная цилиндрическая жесткость пластины и изгибающий момент на ее кромке соответственно; индекс «*op*», стоящий в нижнем регистре величины, обозначает, что эта величина относится к упругому демпферу, на который опирается плоское пролетное строение, а физический смысл при этом не меняется [18, 20].

Решение уравнения (8) предлагается искать в следующем виде:

$$W(x, y, t) = W(x, y) \exp\left(\xi \frac{bt}{h}\right), \quad (11)$$

где ξ — частота собственных колебаний пластины, Гц.

Если подставить (11) в (8) и использовать новые обозначения для функциональных коэффициентов, то получим определяющее уравнение в следующем виде:

$$[\Delta^2 + B_1 \Delta + B_2] W(x, y) = 0, \quad (12)$$

$$\text{где } B_1 = \frac{1}{A_4} \left(-A_3 \left(\xi \frac{b}{h} \right)^2 \right);$$

$$B_2 = \frac{1}{A_4} \left(A_1 \left(\xi \frac{b}{h} \right)^2 + A_2 \left(\xi \frac{b}{h} \right)^4 \right). \quad (13)$$

Для удобства математических преобразований введем безразмерные координаты и функции прогиба:

$$x = \frac{l_1}{\pi} \alpha; \quad y = \frac{l_2}{\pi} \beta; \quad W(x, y) = \frac{l_1^4}{\pi^4} V(\alpha, \beta). \quad (14)$$

Вводя новое обозначение $\eta = l_1 / l_2$, определяющее соотношение сторон пролетного строения в плане, уравнение (12) с учетом соотношений (14) можно записать как

$$\left[\frac{\partial^4}{\partial \alpha^4} + 2\eta^2 \frac{\partial^4}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + \eta^4 \frac{\partial^4}{\partial \beta^4} + B_1 \frac{l_1^2}{\pi^2} \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + \eta^2 \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \right) + B_2 \frac{l_1^4}{\pi^4} \right] V(\alpha, \beta) = 0. \quad (15)$$

Для решения данного уравнения предлагается подход (метод декомпозиций), заключающийся в разделении сложной задачи на три более простые вспомогательные задачи:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial^4 V_1}{\partial \alpha^4} = f_1(\alpha, \beta); \quad V_1 = \frac{\partial^2 V_1}{\partial \alpha^2} = 0; \quad \alpha = 0 \\ & 1) (M_1 - M_4) \frac{\partial^2 V_1}{\partial \alpha^2} + M_2 \frac{\partial^2 V_1}{\partial \beta^2} + \\ & + M_3 \frac{\partial^2 V_1}{\partial t^2} = 0 \\ & (M_5 - M_8) \frac{\partial^3 V_1}{\partial \alpha^3} + M_6 \frac{\partial^3 V_1}{\partial \alpha \partial \beta^2} + \\ & + M_7 \frac{\partial^3 V_1}{\partial \alpha \partial t^2} = 0 \end{aligned} \right\} \alpha = \pi; \quad (16)$$

$$2) \eta^4 \frac{\partial^4 V_2}{\partial \beta^4} = f_2(\alpha, \beta); \quad V_2 = \frac{\partial^2 V_2}{\partial \beta^2} = 0; \quad \beta = 0, \pi; \quad (17)$$

$$3) \left[2\eta^2 \frac{\partial^4}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + B_1 \frac{l_1^2}{\pi^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + \eta^2 \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \right) + \right. \\ \left. + B_2 \frac{l_1^4}{\pi^4} \right] V_3 + f_1 + f_2 = 0. \quad (18)$$

При формулировке вспомогательных задач считается, что в заданных точках плитного элемента [21–23] выполняются следующие соотношения:

$$V_1 \cong V_2; \quad V_3 \cong \frac{1}{2}(V_1 + V_2). \quad (19)$$

В выражениях (16)–(18) $f_i(\alpha, \beta)$ — произвольные функции, которые в общем случае представим в виде

$$f_i(\alpha, \beta) = \sum_{n,m=1}^{\infty} a_{n,m}^{(i)} \sin(n\alpha) \sin(m\beta), \quad (20)$$

где $a_{n,m}^{(i)}$ — произвольные постоянные, а индекс i принимает значения 1 или 2.

Общее решение для всех трех вспомогательных задач предлагается искать в виде

$$V_1(\alpha, \beta) = \sum_{n,m=1}^{\infty} \frac{a_{n,m}^{(1)}}{n^4} \sin(n\alpha) \sin(m\beta) + \\ + \frac{\alpha^3}{6} \psi_1(\beta) + \frac{\alpha^2}{2} \psi_2(\beta) + \alpha \psi_3(\beta) + \psi_4(\beta); \quad (21) \\ V_2(\alpha, \beta) = \sum_{n,m=1}^{\infty} \frac{a_{n,m}^{(2)}}{\eta^4 m^4} \sin(n\alpha) \sin(m\beta) + \\ + \frac{\beta^3}{6} \varphi_1(\alpha) + \frac{\beta^2}{2} \varphi_2(\alpha) + \beta \varphi_3(\alpha) + \varphi_4(\alpha),$$

где $\psi_i(\beta), \varphi_i(\alpha)$ — произвольные функции, зависящие от безразмерных координат.

Произвольные функции ψ_i в выражении (21) для $V_1(\alpha, \beta)$ можно определить, используя соотношения (16):

$$\psi_2(\beta) = 0; \quad \psi_4(\beta) = 0; \\ \psi_1(\beta) = \frac{A_2}{A_1 - 1} a_{11}^{(1)} \sin(\beta); \quad \psi_3(\beta) = 0 \quad \text{при } \alpha = \pi, \quad (22)$$

$$\text{где } A_1 = \frac{M_1 - M_4 - M_5 + M_8}{M_2 \frac{\pi^2}{6} - M_6 \frac{\pi^2}{2}} + \frac{\frac{1}{3} M_3 - M_7}{\frac{1}{3} M_2 - M_6} \left(\xi \frac{b}{h} \right)^2; \\ A_2 = \frac{M_5 - M_8 + M_6 - M_7}{M_2 \frac{\pi^2}{6} - M_6 \frac{\pi^2}{2}} \left(\xi \frac{b}{h} \right)^2;$$

$$M_1 = \mu(2 + 3D) \frac{l_1^3}{\pi^3};$$

$$\begin{aligned} M_2 &= 2[\mu(1+D)h - \mu_{op}(1+D_{op})h_{op}] \frac{l_1^4}{\pi^3 l_2}; \\ M_3 &= -[\rho h(1+D) - \rho_{op} h_{op}(1+D_{op})] \left(\frac{\xi b}{h}\right)^2 \frac{l_1^4}{\pi^4}; \\ M_4 &= \mu_{op} \left(2 + 3D_{op}\right) \frac{l_1^3}{\pi^3}; \quad M_5 = 2D\mu h^2 \frac{l_1^3}{\pi^3}; \\ M_6 &= (2D\mu h^2 - 2D_{op}\mu_{op} h_{op}^2) \frac{l_1^4}{\pi^3 l_2}; \\ M_7 &= -(\rho D h^2 - \rho_{op} D_{op} h_{op}^2) \left(\frac{\xi b}{h}\right)^2 \frac{l_1^4}{\pi^4}; \\ M_8 &= 2D_{op}\mu_{op} h_{op}^2 \frac{l_1^3}{\pi^3}, \end{aligned}$$

где μ, μ_{op} — коэффициенты Пуассона для материала пролетного строения и опорного узла соответственно.

Полагая $n, m = 1$, получим

$$V_1(\alpha, \beta) = a_{11}^{(1)} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{\alpha^3}{6} \frac{A_2}{A_1 - 1} a_{11}^{(1)} \sin(\beta). \quad (23)$$

Произвольные функции φ_i из выражения для $V_2(\alpha, \beta)$ в системе (21) можно определить, используя соотношения (24):

$$\begin{aligned} \varphi_2(\alpha) &= 0; \quad \varphi_4(\alpha) = 0 \quad \text{при } \beta = 0; \\ \varphi_1(\alpha) &= 0; \quad \varphi_3(\alpha) = 0 \quad \text{при } \beta = \pi; \\ V_2(\alpha, \beta) &= \frac{a_{11}^{(2)}}{\eta_1^4} \sin(\alpha) \sin(\beta). \end{aligned} \quad (24)$$

Подставляя выражения (23) и (24) в соотношения метода декомпозиций (18) и (19), получим определяющую систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} &\frac{1}{2} \left[2\eta^2 \frac{\partial^4}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + B_1 \frac{l_1^2}{\pi^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + \eta^2 \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \right) + \right. \\ &+ B_2 \frac{l_1^4}{\pi^4} \left[a_{11}^{(1)} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{\alpha^3}{6} \frac{A_2}{A_1 - 1} a_{11}^{(1)} \sin(\beta) + \right. \\ &+ \frac{a_{11}^{(2)}}{\eta_1^4} \sin(\alpha) \sin(\beta) \left. \right] + a_{11}^{(1)} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \\ &+ a_{11}^{(2)} \sin(\alpha) \sin(\beta) = 0; \\ &a_{11}^{(1)} \sin(\alpha) \sin(\beta) + \frac{\alpha^3}{6} \frac{A_2}{A_1 - 1} a_{11}^{(1)} \sin(\beta) - \\ &- \frac{a_{11}^{(2)}}{\eta_1^4} \sin(\alpha) \sin(\beta) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Систему (25) можно переписать в более компактном виде

$$\begin{cases} c_{11} a_{11}^{(1)} + c_{12} a_{11}^{(2)} = 0; \\ c_{11} a_{11}^{(1)} + c_{12} a_{11}^{(2)} = 0, \end{cases} \quad (26)$$

используя следующие обозначения:

$$\begin{aligned} c_{11} &= \eta_1^2 \left(1 - \frac{\pi}{2} \frac{A_2}{A_1 - 1} \right) + B_1 \frac{l_1^2}{\pi^2} \left(-\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \frac{A_2}{A_1 - 1} - \right. \\ &- \frac{1}{2} \eta_1^2 - \eta_1^2 \frac{\pi^3}{96} \frac{A_2}{A_1 - 1} \left. \right) + B_2 \frac{l_1^4}{\pi^4} \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi^3}{96} \frac{A_2}{A_1 - 1} \right) + 1; \\ c_{12} &= \frac{1}{\eta_1^2} - \frac{1}{2} B_1 \frac{l_1^2}{\pi^2} \left(\frac{1}{\eta_1^4} - \frac{1}{\eta_1^2} \right) + \frac{1}{2} B_2 \frac{l_1^4}{\pi^4} \frac{1}{\eta_1^4} + 1; \\ c_{21} &= 1 + \frac{\pi^3}{6} \frac{A_2}{A_1 - 1}; \quad c_{22} = -\frac{1}{\eta_1^4}. \end{aligned} \quad (27)$$

Уравнения системы (26) имеют нулевую правую часть, а значит, нетривиальное решение данных соотношений возможно только при условии разрешения характеристического уравнения относительно частот собственных колебаний [24–26], которое представляет собой равенство нулю главного определителя системы (26). При решении характеристического уравнения определяются частоты собственных колебаний плитной конструкции, которые могут быть показаны в виде графических кривых для различных механических и геометрических параметров моста. В качестве примера был рассмотрен железобетонный мостовой переход с длиной пролета 18 м, шириной пролета 6 м и приведенной толщиной $h = 0,6$ м, параметры опорного узла принимались следующими: $\mu_{op} = 0,35$; $\rho_{op} = 2500$ кг/м³; $M = 2$ кН·м. На рис. 4 показана

Рис. 4. Зависимость первых трех форм частоты собственных колебаний пролетного строения моста от жесткости узла опирания пролета на ригель опоры: 1 — третья форма частоты собственных колебаний; 2 — вторая форма частоты собственных колебаний; 3 — первая форма частоты собственных колебаний

Fig. 4. Dependence of the first three forms of the frequency of natural vibrations of the bridge superstructure on the rigidity of the span support unit on the support girder: 1 — third form of the frequency of natural vibrations; 2 — second form of the frequency of natural vibrations; 3 — first form of the frequency of natural vibrations

зависимость частоты собственных колебаний плитного пролетного строения от приведенной жесткости узла опирания пролета на ригельную балку опоры. Кривая 1 на рисунке соответствует третьей форме частоты собственных колебаний, кривая 2 — второй форме, кривая 3 — первой форме.

Полученные графические зависимости имеют ярко выраженный нелинейный характер с жесткой характеристикой нелинейности, т. е. выпуклость кривых направлена вниз. Формат получаемых результатов соответствует формату, необходимому для проверки условий нормативных документов о попадании первой формы частоты собственных колебаний мостовых пролетов в интервал между верхним и нижним значениями соответствующего предела; это позволит при строительстве, реконструкции или капитальных ремонтах искусственных сооружений правильно подобрать длину пролетных строений и скоростной режим движения транспортных средств.

Выводы. Периодический мониторинг одних и тех же мостовых переходов с использованием рассмотренного подхода позволит выявить наличие дефектов в самом пролетном строении, связанных с образованием трещин, сколов, уменьшением рабочих площадей значимых элементов и т. д., поскольку при таких дефектах меняются оцениваемые частоты, и это может являться сигналом к проведению необходимых ремонтных работ или введению ограничений на нагрузку, передаваемую на ось транспортного средства, общий вес экипажа, на расстояние между экипажами и скорости при их движении по мосту.

Использование предлагаемой модели и подхода позволит получать необходимые данные о состоянии низководных мостов, для которых зачастую отсутствует возможность визуального осмотра или инструментального обследования с нижней стороны несущей части пролетного строения. По значениям частоты собственных колебаний можно оценивать уровень воды над межею и прогнозировать паводковые ситуации, во время которых проезжая часть низководного моста может быть подтоплена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hess J. Rail expansion joints — the underestimated track work material // *Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways*. London, UK: Taylor & Francis Group, 2009. P. 149–164.
2. Технические условия для конструкций пути на подходах к искусственным сооружениям: утв. Департаментом пути и сооружений МПС 16 декабря 2003 г. 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. СПб.: [б. и.], 2014. 32 с.
4. Иванченко И. И. Динамика транспортных сооружений: высокоскоростные подвижные, сейсмические и ударные нагрузки. М.: Наука, 2011. 574 с.
5. Matsumoto N., Asanuma K. Some experiences on track-bridge interaction in Japan // *Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways*. London, UK: Taylor & Francis Group, 2009. P. 80–97.
6. Fryba L. *Dynamic of railway bridges*. Praha: Academia, 1996. 330 p.
7. Polyakov V. Interaction Optimization in Multibody Dynamic System // *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2017. Vol. 2. P. 43–51.
8. Барченков А. Г. Динамический расчет автодорожных мостов. М.: Транспорт, 1976. 200 с.
9. Филиппов И. Г., Егорычев О. А. Нестационарные колебания и дифракция волн в акустических и упругих средах. М.: Машиностроение, 1977. 302 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 // *Journal of Bridge Engineering / ASCE*. 2000. Vol. 5. No. 2. P. 124–130.
12. Мосты и трубы: свод правил: СП 35.13330.2010. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*. М.: ОАО «ЦПП», 2011. 341 с.
13. Kawatani M., Kim C. Y. Computer simulation for dynamic wheel loads of heavy vehicles // *Structural Engineering & Mechanics*. 2001. Vol. 12. No. 4. P. 409–428.
14. Pan T. C., Li J. Dynamic vehicle element method for transient response of coupled vehicle-structure systems // *Journal of Structural Engineering / ASCE*. 2002. Vol. 128. No. 2. P. 214–223.
15. Kou J. W., DeWolf J. T. Vibrational behavior of continuous span highway bridge — Influencing variables // *Journal of Structural Engineering / ASCE*. 1997. Vol. 123. No. 3. P. 333–344.
16. Метод защиты сооружений от вибраций и сейсмических воздействий / Е. Н. Курбачкий [и др.] // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 4. С. 55–67.
17. Kurihara M., Shimogo T. Vibration of an elastic beam subjected to discrete moving loads // *Journal of Mechanical Design / ASME*. 1978. Vol. 100. No. 7. P. 514–519.
18. 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.
19. 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.
20. New lining with cushion for energy efficient railway turnouts / B. Glusberg [et al.] // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 982. P. 556–570.
21. Modeling the dynamic behavior of the upper structure of the railway track / A. A. Loktev [et al.] // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 189. P. 133–137.
22. Перспективные конструкции мостовых переходов на транспортных магистралях / А. А. Локтев [и др.] // *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ)*. 2018. Т. 77. № 6. С. 331–336. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-331-336>.
23. Влияние высокочастотного нагружения на структуру малоуглеродистой стали / Е. А. Гридасова [и др.] // *Наука и техника транспорта*. 2017. № 2. С. 82–91.
24. 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.
25. Energy efficiency of temperature distribution in electromagnetic welding of rolling stock parts / A. Lyudagovsky [et al.] // *E3S Web of Conferences*. 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE-2018. [S. l.], 2019. P. 01017.
26. Perspective constructions of bridge crossings on transport lines / A. Loktev [et al.] // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1116 AISC. P. 209–218.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛОКТЕВ Алексей Алексеевич,

д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой «Транспортное строительство», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

КОРОЛЕВ Вадим Вадимович,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Транспортное строительство», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

ШИШКИНА Ирина Викторовна,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Транспортное строительство», ФГАОУ ВО «РУТ» (МИИТ)

Статья поступила в редакцию 08.11.2021 г., первая рецензия получена 11.11.2021 г., вторая рецензия получена 18.11.2021 г., принята к публикации 22.11.2021 г.

Для цитирования: Локтев А. А., Королёв В. В., Шишкина И. В. Особенности оценки состояния и поведения низководных мостов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 6. С. 334–342. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-6-334-342>.

Features of assessing the condition and behavior of low-water bridges

A. A. LOKTEV, V. V. KOROLEV, I. V. SHISHKINA

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGAOU VO "RUT" (MIIT)), Moscow, 127055, Russia

Abstract. The article describes features of operation and monitoring of low-water bridges, which are found on highways of regional, intermunicipal and local importance. Vibrations of the bridge span are considered in detail, taking into account its interaction with other structural elements and the environment. As a characteristic, the change of which takes into account the change in the state of the bridge structure, it is proposed to use the frequency of natural vibrations. To simulate the dynamic effects of transport and the dynamic behavior of individual elements and the entire structure as a whole, it is proposed to use viscoelastic elements of the Kelvin–Voigt type. When solving the problem, an approach has been implemented that makes it possible to take into account the anisotropic properties of the superstructure associated with various reinforcement along and across the roadway of the bridge, and to present the design scheme of the span not in the form of a beam supported at the edges with the help of hinges or viscoelastic dampers, but in the form of a plate, which can have different fixing conditions along the entire contour. The use of the proposed model and approach will make it possible to obtain the necessary data on the state of low-water bridges, for which there is often no possibility of visual inspection or instrumental inspection from the lower side of the bearing part of the superstructure. By the values of the frequency of natural vibrations, it is possible to estimate the water level above the low-water period and predict flood situations, during which the roadway of the low-water bridge may be flooded.

Keywords: automobile roads; low-water bridge; span; vibration frequency; viscoelastic elements; monitoring; defects

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-6-334-342>

REFERENCES

1. Hess J. *Rail expansion joints — the underestimated track work material*. Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways. London, UK, Taylor & Francis Group, 2009, pp. 149–164.
2. *Technical conditions for track structures on the approaches to artificial structures*. Approved by Department of tracks and structures of the Ministry of Railways December 16, 2003. Moscow, Transport Publ., 2004, 24 p. (in Russ.).
3. *Special technical conditions. Track superstructure of the Moscow–Kazan–Yekaterinburg section of the high-speed railway*. Technical standards and requirements for design and construction. St. Petersburg, 2014, 32 p. (in Russ.).
4. Ivanchenko I. I. *Dinamika transportnykh sooruzheniy: vy-sokoskorostnye podvizhnye, seysmicheskie i udarnye nagruzki*

[Dynamics of transport structures: high-speed mobile, seismic and shock loads]. Moscow, Nauka Publ., 2011, 574 p.

5. Matsumoto N., Asanuma K. *Some experiences on track-bridge interaction in Japan*. Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways. London, UK, Taylor & Francis Group, 2009, pp. 80–97.

6. Fryba L. *Dynamic of railway bridges*. Praha, Academia Publ., 1996, 330 p.

7. Polyakov V. *Interaction Optimization in Multibody Dynamic System*. International Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, Vol. 2, pp. 43–51.

8. Barchenkov A. G. *Dinamicheskiy raschet avtodorozhnykh mostov* [Dynamic calculation of road bridges]. Moscow, Transport Publ., 1976, 200 p.

9. Filippov I. G., Egorychev O. A. *Nestatsionarnye kolebaniya i difraktsiya voln v akusticheskikh i uprugikh sredakh* [Nonstationary vibrations and diffraction of waves in acoustic and elastic media]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 302 p.

10. Kogan A. Ya. *Dinamika puti i ego vzaimodeystvie s podvizhnym sostavom* [Track dynamics and its interaction with the rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1997, 325 p.

11. Chen Y. H., Li C. Y. *Dynamic response of elevated high-speed railway*. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2000, Vol. 5, no. 2, pp. 124–130.

12. *Bridges and pipes. Set of rules: SP 35.13330.2010*. Updated edition of SNiP 2.05.03–84*. Moscow, JSC "TsPP" Publ., 2011, 341 p. (in Russ.).

13. Kawatani M., Kim C. *Computer simulation for dynamic wheel loads of heavy vehicles*. Structural Engineering & Mechanics, 2001, Vol. 12, no. 4, pp. 409–428.

14. Pan T. C., Li J. *Dynamic vehicle element method for transient response of coupled vehicle-structure systems*. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2002, Vol. 128, no. 2, pp. 214–223.

15. Kou J. W., DeWolf J. T. *Vibrational behavior of continuous span highway bridge — Influencing variables*. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1997, Vol. 123, no. 3, pp. 333–344.

16. Kurbatskiy E. N., Titov E. Yu., Golosova O. A., Kosaurov A. P. *Method of protecting structures from vibrations and seismic effects*. Building and reconstruction, 2018, no. 4, pp. 55–67.

17. Kurihara M., Shimogo T. *Vibration of an elastic beam subjected to discrete moving loads*. Journal of Mechanical Design, ASME, 1978, Vol. 100, no. 7, pp. 514–519.

18. 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, pp. 46–55.

19. Loktev A.A. *Dynamic contact of a spherical indenter and a prestressed orthotropic Uflyand-Mindlin plate*. Acta Mechanica, 2011, Vol. 222, no. 1–2, pp. 17–25.

20. 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, pp. 556–570.

21. 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, pp. 133–137.

22. Loktev A.A., Korolev V.V., Loktev D.A., Shukurov D.R., Gelyukh P.A., Shishkina I.V. *Perspektivnye konstruksii mostovykh perekhodov na transportnykh magistralyakh* [Prospective designs of bridge crossings on highways]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2018, Vol. 77, no. 6, pp. 331–336. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-331-336>.

23. Gridasova E.A., Veretkovskiy A.V., Safar'yants A.A. *Vliyanie vysokochastotnogo nagruzheniya na strukturu malouglerodistoy stali* [Influence of high-frequency loading on the structure of low-carbon steel]. Science and Technology in Transport, 2017, no. 2, pp. 82–91.

24. Loktev A.A., Loktev D.A. *Reshenie zadachi udarnogo vzaimodeystviya tverdogo tela i sfericheskoy obolochki lucheverym metodom* [Solution of the problem of shock interaction of a rigid body and a spherical shell by the ray method]. Proceedings of the Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics, 2007, no. 2, pp. 128–135.

■ E-mail: aaloktev@yandex.ru (A. A. Loktev)

25. 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*. E3S Web of Conferences, 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPBWOSCE-2018. [S. I.], 2019, P. 01017.

26. 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, Vol. 1116 AISC, pp. 209–218.

ABOUT THE AUTHORS

Aleksey A. LOKTEV,

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Department "Transport construction", FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Vadim V. KOROLEV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Transport construction", FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Irina V. SHISHKINA,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Transport construction", FGAOU VO "RUT" (MIIT)

Received 08.11.2021

First review received 11.11.2021

Second review received 18.11.2021

Accepted 22.11.2021

For citation: Loktev A.A., Korolev V.V., Shishkina I.V. Features of assessing the condition and behavior of low-water bridges // Russian Railway Science. 2021. 80 (6): 334–342 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-6-334-342>.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В АО «ВНИИЖТ»

Центр дополнительного образования (ЦДО) (лиц. № 2329 от 11.08.2016 г.) проводит повышение квалификации и профессиональную переподготовку слушателей по следующим направлениям:

- Анализ, моделирование бизнес-архитектуры и бизнес-процессов, использование процессного подхода в управлении организацией (для руководителей и специалистов)
- Проектирование, изготовление и приемка сварных конструкций железнодорожного подвижного состава, управление качеством в сварке рельсов, проведение аудита сварочного производства
- Построение энергосберегающих графиков движения поездов с использованием автоматизированной системы АПК ЭЛЬБРУС
- Изучение технологии транспортных процессов
- Транспортная логистика
- Изучения принципов построения и функционирования автоматизированной системы контроля за работой специального подвижного состава
- Изучение устройств, диагностики и средств контроля состояния железнодорожного пути
- Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт подвижного состава и устройств электроснабжения

Программы обучения могут быть разработаны по инициативе заказчика с учетом профессиональной деятельности АО «ВНИИЖТ».

Обучение проводится как в очной форме, так и с применением дистанционных образовательных технологий.

По итогам освоения образовательных программ слушателям выдается документ о квалификации государственного образца.

Куратор ЦДО — Пархаев Алексей Александрович, кандидат социологических наук, заместитель генерального директора по управлению персоналом и социальным вопросам.

По вопросам обучения обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская улица, д.10
Центр дополнительного образования. Тел.: +7 (495) 602-81-74, e-mail: shiryaeva.oksana@vniizht.ru