УДК 539.3:624.21 DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-3-127-138

Особенности работы пролетного строения мостового перехода при смещении оси рельсошпальной решетки

В. В. КОРОЛЕВ[1], А. А. ЛОКТЕВ[1], И. В. ШИШКИНА[1], Е. А. ГРИДАСОВА[2]

[1] Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)), Москва, 127994, Россия

[2] Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ФГАОУ ВО ДВФУ), Владивосток, 690950, Россия

Аннотация. Настоящее исследование посвящено изучению напряженно-деформированного состояния малого железнодорожного мостового перехода, имеющего балочную расчетную схему, при смещении оси рельсошпальной решетки относительно оси моста на величину, превышающую предельное значение, определяемое нормативными документами. При аналитическом расчете параметров поведения и состояния пролетного строения при действии нагрузки применяется дифференциальное уравнение, описывающее вертикальные колебания балки и позволяющее рассмотреть их как сочетание вынужденных и свободных колебаний. При численном моделировании используется метод конечных элементов, определяющие уравнения которого в качестве неизвестных содержат линейные и угловые перемещения узлов расчетной схемы. В результате расчетов получены графические зависимости для нормальных и горизонтальных перемещений, внутренних усилий, главных и эквивалентных напряжений в различных точках пролетного строения. Представленные в виде изополей и изолиний величины позволяют определить увеличение изгибающих и крутящих усилий, а также полностью описать напряженно-деформированное состояние пролетного строения мостового перехода при смещении оси железнодорожного пути относительно оси моста.

Ключевые слова: малый мост; железобетонное пролетное строение; неосесимметричная нагрузка; метод конечных элементов; лучевой метод; динамическое воздействие; вертикальные перемещения

Введение. Искусственные сооружения составляют неотъемлемую часть железных дорог, как эксплуатируемых, так и только проектируемых, причем в последнем случае мостовые переходы и транспортные тоннели встречаются чаще, чем в проектах прошлых лет. Это связано с развитием технологий строительства, появлением новых конструктивных материалов, более строгими требованиями по осадкам верхнего строения пути, увеличением скоростей следования подвижного состава, повышением нагрузки на ось и общего веса поездов.

Гармоничное взаимодействие верхнего строения железнодорожного пути и несущих конструкций мостового перехода является важным условием для нормальной эксплуатации участка железной дороги без различных ограничений и проведения дополнительных работ по текущему содержанию конструктивных элементов и их диагностики. Концептуальная модель «мостовой переход — верхнее строение пути» или совместная модель «мостовой переход — верхнее строение пути — транспортное средство» рассматривались во многих работах отечественных и зарубежных исследователей. Чаще всего изучались совместное деформирование конструкций пути и моста при действии подвижной нагрузки, стационарные и нестационарные процессы в отдельных элементах или в сооружении в целом [1, 2]. Проводимые исследования были направлены на оптимизацию конструкций мостовых переходов с точки зрения жесткости пролетных строений, ригельных опорных балок, вязкоупругих опорных частей, взаимного воздействия колебательных движений неподвижных конструкций и элементов при различных режимах движения экипажей и разных типах подвижного груза в них [1, 3].

Наиболее современный подход, применяемый при расчетах мостовых переходов на подвижную нагрузку, предполагает исследование на базе модели «мостовой переход — верхнее строение пути — транспортное средство»; при этом выявляются особенности работы конструкционных элементов при различных режимах движения экипажей, геометрических и механических параметрах пролетного строения, характеристиках перевозимого груза, наличии и степени развития дефектов поверхностей катания и т. д. Также необходимо учитывать вероятностный характер при взаимодействии транспортных средств и мостового сооружения. Это связано с возникновением вертикальных и горизонтальных сил инерции, зависимостью от времени средних величин динамических характеристик, изменением при неравномерном движении моментов инерции и положения центра тяжести экипажа, влиянием геометрического положения дефектов рельсовых плетей на частоту кинематического возмущения, изменяющегося по длине пролетного строения.

E-mail: korolevadim@mail.ru (В. В. Королев)

Рис. 1. Общий вид мостового перехода
Fig. 1. General view of the bridge crossing

Современные подходы к проблематике. В настоящее время в области строительства транспортной инфраструктуры на уровне решения инженерных задач не всегда используются модели динамики неравномерного движения, учитывающие обозначенные выше факторы, а продолжают применяться упрощенные подходы, связанные, например, с учетом равнозамедленного торможения экипажей, имеющих одинаковую загруженность, а передаваемая при этом на мостовое сооружение нагрузка моделируется сосредоточенными силами, приложенными в заранее заданные точки пролетного строения [1, 4, 5].

Современная транспортная система предполагает увеличение протяженности дорог, интенсивности их эксплуатации, одновременно происходит рост грузонапряженности искусственных сооружений и зачастую ухудшение их технического содержания при эксплуатации. В отдельную задачу, которая далее и будет рассматриваться, можно выделить точную оценку состояния и эксплуатационной надежности существующих искусственных сооружений, причем не только находящихся на главных транспортных магистралях, но и на подъездных путях промышленных предприятий (рис. 1) [5, 6]. Схема и поперечное сечение пролетного строения мостового перехода, имеющегося на участке однопутной неэлектрифицированной железной дороги, представлена на рис. 2.

Существенным аспектом при решении инженерных задач по проектированию строительства и реконструкции объектов транспортной инфраструктуры является необходимость гашения вынужденных колебаний элементов искусственных сооружений, для чего приходится предусматривать вязкоупругие опорные части, которые позволяют уменьшить резонансные явления, контролировать амплитуду колебаний сооружения при расчетных нагрузках. Часто для этого применяются резинометаллические опорные части, устанавливаемые в месте опирания пролетной части на опорную конструкцию. В качестве основных параметров, определяющих работу мостового перехода, можно использовать геометрические (перемещения), кинематические (ускорения при колебаниях) и динамические (усилия, действующие в различных элементах моста от приложенной нагрузки) характеристики [7, 8]. Параметры вязкого сопротивления, коэффициент жесткости составных элементов и конструкции в целом также являются важными характеристиками, определяющими работу искусственного сооружения.

При учете влияния на мостовой переход колебаний от транспортного средства, возникающих при его движении, важными являются величины периодов воздействия подрессоренных масс экипажа (обычно их значения находятся в интервале 0,5–1,0 с). Для мостов с малыми пролетами (рис. 1, 2) характерно незначительное влияние от колебаний транспортного средства; это объясняется кратковременностью динамического воздействия экипажа на искусственное сооружение и тем, что амплитуды колебаний пролетного строения малы по сравнению с амплитудами вертикальных перемещений транспортного средства. Отсутствие эффекта обратной связи увеличивает запас по первой и второй группам предельных состояний для сооружения в целом [4, 9, 10]. В мировой инженерной практике известны случаи возникновения колебаний мостовых сооружений со значительными амплитудами вертикальных перемещений при проходе с малыми скоростями длинных составов с большой нагрузкой на ось, но поскольку объект нашего исследования — участок дороги, связывающий промышленное предприятие с участком пути III категории, то такие явления здесь учитываться не будут.

Постановка задачи. Рассмотрим малый железобетонный железнодорожный мост, полная длина которого составляет 18,80 м, длина основного пролета — 7,80 м, отверстие — 6,50 м (рис. 2, *а*), находится на прямом участке пути, уклон отсутствует, возведен в 1955 г. В качестве пролетного строения использованы две ребристые железобетонные балки высотой 1,50 м, расстояние между осями 2,90 м, борта пролетного строения увеличены на 0,30 м, высота балластного слоя 0,60 м, ширина пролетного строения составляет 4,20 м (рис. 2, *б*).

В ходе очередного осмотра искусственного сооружения было выявлено, наряду с некоторыми другими отклонениями от проектного положения и дефектами элементов конструкции, отклонение оси рельсошпальной решетки от оси пролетного строения на 15 см, что превышает нормативные значения для такой величины на железных дорогах ОАО «РЖД» в прямых участках пути в три раза.

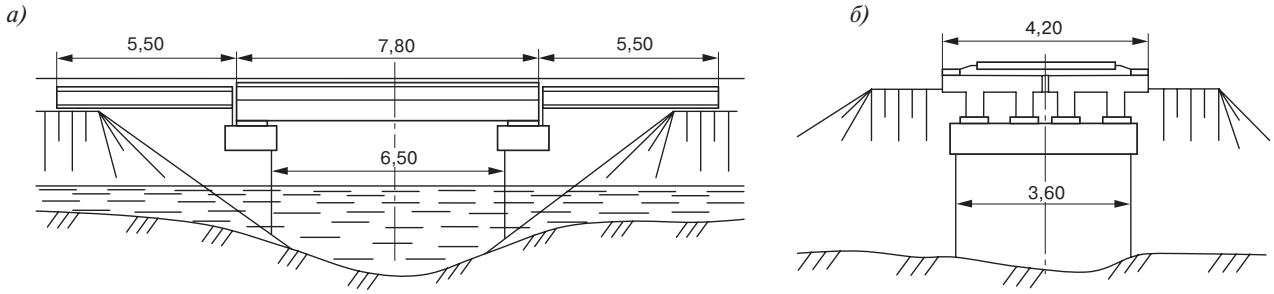

Рис. 2. Схема мостового перехода на участке однопутной неэлектрифицированной железной дороги:
а — фасад; *б* — поперечный разрез по оси
Fig. 2. Scheme of the bridge crossing on the site of a single-track non-electrified railway:
а — facade; *б* — cross section along the axis

Настоящее исследование направлено на изучение изменений в параметрах напряженно-деформированного состояния мостового перехода, а следовательно, и в его работе при смещении оси рельсошпальной решетки относительно оси моста на величину больше нормативно допустимой.

Расчетную схему основного пролетного строения представим в виде традиционной однопролетной шарнирно опертой балки (рис. 2, *а*). В качестве основных предположений примем: рассматриваемые колебания малы по сравнению с геометрическими размерами моста и его отдельных элементов (балочная система линейно деформируема); материал подчиняется закону Гука; силы инерции вращения при низкочастотных колебаниях не учитываются; масса верхнего строения пути включена в массы соответствующих конструкций моста и принимается равномерно распределенной; резинометаллические опорные части моделируются идеальными шарнирами; опорные устройства идеальные; внутреннее трение элементов пролетного строения описывается моделью Фойгта [11, 12, 13].

Аналитическое решение. Дифференциальное уравнение, описывающее вертикальные колебания балки и позволяющее рассмотреть их как сочетание вынужденных и свободных колебаний, можно представить в виде

$$m_b \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + EI_z \left(1 + \mu_0 \frac{\partial w(x,t)}{\partial t}\right) \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} \times$$
$$\times \sum_{i=1}^{n} P_i(t)\, \delta(x - \gamma_i) \left[\eta(t - t_0) - \eta(t - t_1)\right], \qquad (1)$$

где w — вертикальное перемещение средней линии балки; m_b — погонная масса балки; EI_z — жесткость балки при изгибе в вертикальном направлении; μ_0 — приведенный коэффициент внутреннего трения; $P_i(t)$ — динамическое давление от i-й оси транспортного средства с учетом эксцентриситета относительно оси балки; n — количество осей транспортного средства, которое может одновременно уместиться на основном пролете моста; $\delta(x)$ — дельта-функция Дирака; γ_i — момент времени, когда i-я ось экипажа подойдет к заданной точке пролетного строения; $\eta(t)$ — единичная функция, показывающая момент появления t_0 и схода t_1 подвижной нагрузки на мосту.

К дифференциальному уравнению, описывающему динамическое поведение балки пролетного строения, необходимо добавить выражение для вертикальных перемещений колесной пары, учитывающее силу взаимодействия колеса и рельса [14, 15]:

$$m_{ki} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = -P_i(t), \qquad (2)$$

где m_{ki} — масса экипажа, приведенная к i-й колесной паре; y — вертикальное перемещение колеса.

К уравнениям (1) и (2) нужно добавить соотношения, связывающие вертикальные перемещения различных элементов колебательной системы и решение задачи контактного взаимодействия колеса и рельса:

$$y = \alpha_{loc} + w(\gamma_i, t); \qquad (3)$$

$$\alpha_{loc} = \kappa' F^{n'}, \qquad (4)$$

где α_{loc} — местная деформация в области взаимодействия колесной пары и рельса; κ' — коэффициент, зависящий от геометрических и механических свойств контактирующих тел, а также материалов элементов конструкции непосредственно под областью контакта; $F^{n'}$ — контактная сила в области взаимодействия колеса и рельса.

Для решения функциональных уравнений (1) и (2) необходимо учесть начальные условия:

$$y(t = t_i) = 0; \ \frac{\partial y(t = t_i)}{\partial t} = v_0;$$
$$w(x, t_i) = 0; \ \frac{\partial w(t = t_i)}{\partial t} = 0, \qquad (5)$$

где v_0 — вертикальная компонента скорости экипажа при попадании колесной пары в заданную точку рель-

совой плети; t_i — некоторый начальный момент времени, когда колесная приходит в определенную точку пролетного строения.

Из уравнений (1) и (2) с учетом соотношений (3), (4) и начальных условий (5) можно получить определяющее интегро-дифференциальное уравнение относительно одного из вертикальных перемещений колебательной системы. Решение данного уравнения предлагается искать численно с помощью ЭВМ, для этого период колебаний делится на k частей. Продолжительность элементарного временного интервала t_{int} зависит от частоты собственных колебаний конструкции пролетного строения и скорости распространения волновых фронтов в случае учета нестационарных волновых процессов [16, 17]. При достаточно малом шаге деления характерного временного периода можно предположить, что на каждом элементарном интервале $(k-1)t_{\text{int}} \le t \le kt_{\text{int}}$ неизвестные искомые функции, определяющие динамическое поведение мостового перехода, линейно зависят от времени, т. е. первая производная неизвестной функции может вычисляться как отношение

$$\frac{\partial f(kt_{\text{int}})}{\partial t} = \frac{(f_k - f_{k-1})}{t_{\text{int}}}, \qquad (6)$$

где f — неизвестная функция от времени, определяемая в процессе решения; f_k — значение искомой функции в заданный момент времени для выбранного шага разбиения общего временного интервала.

Производные старшего порядка от искомых функций тоже определяются с использованием шаблонов с бóльшим числом опорных точек, аналогичных используемым в конечно-разностных вычислительных схемах [4, 5, 18].

Подставляя данное соотношение в определяющее уравнение, получим рекуррентное выражение, которое позволит определить значение неизвестной функции в каждый момент времени $t_{\text{int}i} = t_{\text{int}} i$.

Решение составленных конечно-разностных уравнений сходится к точному решению краевой задачи при уменьшении интервала интегрирования. В предложенной схеме вычисления могут использоваться сеточные шаблоны с постоянным интервалом разбиения (регулярные сеточные шаблоны) или с уменьшающимся шагом интегрирования в области со значительным градиентом изменения искомой функции (адаптивные сеточные шаблоны).

Особенностью представленной итерационной процедуры является то, что для достижения высокой скорости сходимости решения погрешности аппроксимации дифференциальных уравнений, начальных и граничных условий должны иметь одинаковый порядок значений. При этом наблюдается эффект увеличения погрешностей при существенном уменьшении интервала интегрирования, что связано с реализацией алгоритмов округления в программной среде на ЭВМ и появлением ошибок и погрешностей, обусловленных делением на близкую к нулю величину.

Описанная процедура может быть автоматизирована как при помощи существующих математических вычислительных пакетов MathCAD, MatLab, Maple, Mathematica, так и при помощи возможностей языков программирования C++, Delphi, C# и соответствующих традиционных библиотек. В настоящем исследовании был использован программный код, написанный и реализованный в среде языка C++.

На рис. 3 представлены зависимости от времени вертикальных перемещений средней точки медианной линии, связывающей центры тяжести поперечных сечений пролетного строения, в случае если ось рельсошпальной решетки совпадает с осью мостового перехода (кривая *1*) и если ось рельсошпальной решетки смещена на 15 см вправо от оси моста (кривая *2*).

При построении графических зависимостей на рис. 3 расчетная длина пролетного строения была принята равной 7,80 м, что соответствует расчетной схеме на рис. 2, *а* и имеющимся опорным элементам. Выполнение расчета определяющего уравнения проводилось при движении тележки грузового полувагона 18-9890 с нагрузкой на ось 20 т и базой 1850 мм со скоростью 30 км/ч; размеры основного пролета мостового перехода позволяют рассмотреть движение по нему только одной такой тележки (с двумя колесными парами). Проводя анализ полученных графиков, можно отметить увеличение амплитуды вертикальных перемещений выбранной точки пролетного строения при наличии смещения оси рельсошпальной решетки относительно оси моста и некоторое смещение по времени экстремумов функции прогибов.

Численное решение. Процессы деформирования пролетных строений мостовых переходов имеют достаточно сложный характер и зависят от множества факторов, связанных с конструкцией сооружения, движением транспортных средств, характером перевозимых грузов, погодными условиями и др. Попытка решить подобную задачу аналитически связана с трудностями вычисления, необходимостью использования дополнительных условий, ограничивающих в конечном итоге рамки применения полученных решений, и не дает достаточно простых конечных выражений, которые могли бы применяться в инженерной практике [1, 2, 3, 4, 19]. Описанный выше аналитический подход позволяет рассчитать характеристики деформированного состояния в отдельных точках мостовой конструкции при заданных воздействиях транспортных средств при движении. Для определения характера работы всего пролетного строения в настоящем исследовании предлагается использовать методы численного моделирования на ЭВМ. В

качестве основного численного метода для расчета пролетного строения моста воспользуемся методом конечных элементов, определяющие уравнения которого содержат неизвестные в виде линейных и угловых перемещений узлов расчетной схемы. Данный метод (и различные его модификации) широко применяется в современных вычислительных программных комплексах, в том числе прошедших процедуру государственного лицензирования и верификации для различных инженерных задач, типов конструкций и сооружений.

Конструкция рассматриваемого пролетного строения представляется в виде набора конечных элементов стандартного типа, связанных между собой в узлах (стержни, пластины, оболочки, связи с конечной жесткостью, односторонние связи и т. д.). Используемый тип конечного элемента зависит от геометрических (форма, способ закрепления и т. д.) и механических (закон деформирования элемента, зависимость перемещений узлов отдельного элемента и узлов расчетной схемы в целом) характеристик, типа материала и параметров жесткости при работе на заданную нагрузку в составленной расчетной схеме [2, 5, 20].

Важным элементом расчетной схемы сооружения является узел, который моделируется жестким телом бесконечно малых размеров, его положение в пространстве определяется тремя линейными (U, V, W — линейные перемещения по осям x, y и z) и тремя угловыми ($\alpha = \partial w / \partial y, \beta = -\partial w / \partial x, \gamma$ — углы поворота относительно осей x, y и z соответственно) перемещениями. Система канонических уравнений метода перемещений для конечных элементов формируется при наложении дополнительных связей на все возможные перемещения и приравнивании усилий, возникающих в этих связях, к нулю. Данное предположение позволяет сформировать систему, число уравнений которой равно числу неизвестных перемещений, определяемых затем численно в программном комплексе [2, 3, 15, 21].

В узлах опирания пролетного строения на балку опоры расположены связи, ограничивающие перемещения составляющих конечно-элементной расчетной схемы пролетных балок, что соответствует наличию в местах опирания резинометаллических опорных частей и упоров от горизонтальных смещений.

Для составления уравнений равновесия, определяющих деформирование отдельного конечного элемента и их совокупности, предлагается использовать принцип возможных перемещений, согласно которому каждая точка элемента может получить дополнительное малое перемещение — δu, а основные перемещения точек деформируемого элемента, представляются вектором — $\overline{u}$. Приравнивая приращение работы внутренних сил δU на возможных перемещениях тела приращению работы внешних сил δW, представленных в виде суммы работ распределенной по объему V_1 нагрузки q и распределенной по поверхности S нагрузки p, можно представить основное функциональное соотношение в виде

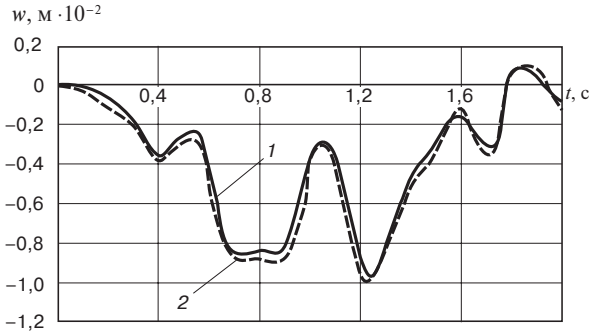

Рис. 3. Зависимость вертикального перемещения средней линии балки пролетного строения от времени в точке с координатой $x = l/2$:
1 — ось рельсошпальной решетки совпадает с осью мостового перехода; *2* — ось рельсошпальной решетки смещена на 15 см вправо от оси моста

Fig. 3. Dependence of the vertical displacement of the midline of the span beam on time at a point with coordinate $x = l/2$:
1 — axis of the rail-sleeper grid coincides with axis of the bridge; *2* — axis of the rail-sleeper grid is shifted 15 cm to the right of the axis of the bridge

$$\int_{V_1} \sigma\, \delta\varepsilon\, dV_1 = \int_{V_1} \overline{q}\, \delta\overline{u}\, dV_1 + \int_S \overline{p}\, \delta\overline{u}\, dS, \tag{7}$$

где $\sigma = \sigma_{ij}\overline{e}_i\overline{e}_j$ — тензор напряжений; $\varepsilon = \varepsilon_{ij}\overline{e}_i\overline{e}_j$ — тензор деформаций; $\overline{e}_i$ и $\overline{e}_j$ — единичные ортогональные векторы; i, j принимают значения 1, 2, 3.

Исходя из предположения о малости деформаций элементов, можно записать соотношение, правая часть которого представляет собой тензор

$$\varepsilon = \nabla\overline{u} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\overline{e}_i\overline{e}_j, \tag{8}$$

где u_i, u_j — линейные перемещения в направлении трех основных ортогональных ортов; x_1, x_2, x_3 — координатные оси, соответствующие направлению единичных ортов.

Тензор напряжений и тензор деформаций для конечного элемента с упругими свойствами материала связан соотношением

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}\varepsilon_{kl}, \tag{9}$$

где D_{ijkl} — тензорный оператор, задающий упругие механические свойства элемента; ε_{kl} — относительные деформации из закона Гука.

Учитывая выражения (8) и (9), определяющее уравнение (7) можно записать в виде

$$\int_{V_1} D\overline{V}_1\overline{u}\, \delta(\nabla\overline{u})dV_1 = \int_{V_1} \overline{q}\, \delta\overline{u}\, dV_1 + \int_S \overline{p}\, \delta\overline{u}\, dS. \tag{10}$$

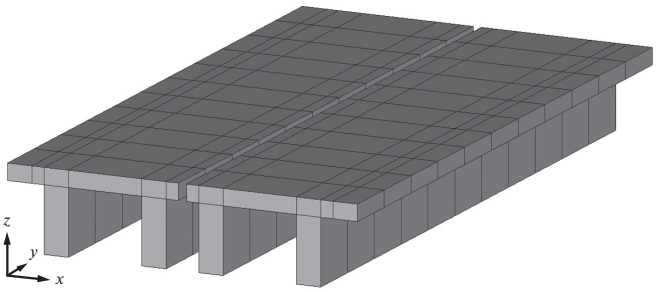

Рис. 4. Внешний вид расчетной схемы пролетного строения
Fig. 4. Appearance of the design scheme of the span

Для описания равновесия отдельного конечного элемента уравнение (10) можно представить в матричной форме, если использовать замену $\delta\overline{u} = \mathbf{\Phi}_i \delta\lambda_i$, где $\delta\overline{u}$ — это возможное малое перемещение центра тяжести простейшего элемента по направлению координатной оси в глобальной системе координат; $\mathbf{\Phi}_i$ — функция формы в матричном виде; $\delta\lambda_i$ — возможное малое перемещение каждого узла расчетной схемы, простейшего элемента в местной системе координат:

$$\{\mathbf{K}\}\{\boldsymbol{\lambda}\} = \{\mathbf{f}\}, \tag{11}$$

где $\{\mathbf{K}\} = \mathrm{K}_{ij} = \int\limits_{V_1} \nabla\Phi_i \, D \, \nabla\Phi_j \, \lambda_i dV_1$ — матрица, задающая параметры жесткости элемента в различных направлениях, где K_{ij} — приведенная функция жесткости от узла i в направлении узла j, $\mathbf{\Phi}_j$ — функция формы элемента в окрестности узла j; $\{\mathbf{f}\} = f_i = \int\limits_{V_1} \overline{q}\Phi_i dV_1 - \int\limits_{S} \overline{p}\Phi_i dS$ — вектор нагрузки, действующей в узлах элемента в направлении основных единичных ортов, где f_i — функция нагрузки в узле i; $\{\boldsymbol{\lambda}\} = \lambda_i$ — вектор перемещений узлов расчетной схемы; $i, j = 1, 2, ..., N$.

Для учета динамического поведения конструкций необходимо на основе уравнений равновесия (11) и использования принципа Д'Аламбера, позволяющего представить объемные силы инерции, получить уравнения движения

$$\{\mathbf{M}\}\{\boldsymbol{\lambda}\} + \{\mathbf{K}\}\{\boldsymbol{\lambda}\} = \{\mathbf{f}\}, \tag{12}$$

где $\{\mathbf{M}\} = \mathrm{M}_{ij} = \int\limits_{V_1} \rho \, \Phi_i \Phi_j dV_1$ — матрица масс, где M_{ij} — приведенная масса фрагмента элемента от узла i в направлении узла j, ρ — плотность материала элемента; $\rho \, \mathbf{\Phi}_i \gamma_j = \rho \dfrac{\partial^2 \overline{u}}{\partial t^2}$ — объемные силы инерции, где γ_j — угол поворота нормали к сечению в узле j.

Решением системы уравнений (12) является вектор перемещений узлов расчетной схемы, через который затем можно определить перемещения остальных точек элементов и всей конструкции, а также деформации и напряжения [8, 11, 22].

Функции, описывающие форму перемещений точек различных конечных элементов, в реализованном методе конечных элементов представляются приближенно с помощью упрощенных зависимостей. Используемые зависимости влияют на показатель k_1, входящий в выражение для оценки получаемой погрешности при определении перемещений, деформаций, усилий и напряжений, которая зависит от соотношения $(h/L)^{k_1}$, где h — максимальный шаг численного интегрирования; L — характерный геометрический размер рассматриваемого фрагмента.

Расчетную схему пролетного строения предлагается составить из пяти типов конечных элементов:

1) Упругая связь конечной жесткости, которая используется для моделирования опирания пролетных балок на балки опоры и фактически представляет собой жесткость на сжатие или на сдвиг, приведенную к единичному линейному или угловому перемещению соответственно. Существующие в программном комплексе первый и второй коэффициенты постели для данного элемента умножаются на площадь поверхности элемента, взаимодействующего с узлом опирания.

2) Стержневой элемент, перемещения точек которого моделируются полиномами третьей степени и трансцендентными выражениями (в зависимости от отсутствия или наличия сдвиговых деформаций). Такой элемент деформируется под воздействием продольной силы $F_{\text{пр}}$, изгибающих моментов M_y , M_z, соответствующих им поперечных сил Q_y и Q_z и крутящего момента M_k.

3) Плоский элемент с четырьмя узловыми точками в плане, нормальные перемещения которого моделируются неполным полиномом пятой степени. В каждой узловой точке имеется вертикальное перемещение w; угол поворота вокруг оси x — $\alpha = \partial w / \partial y$; угол поворота вокруг оси y — $\beta = -\partial w / \partial x$. Такой конечный элемент используется для расчета тонких плит, в нем определяются изгибающие моменты M_x, M_y, крутящий момент M_{xy}, поперечные силы Q_x, Q_y, а также реакции опор в узлах крепления с соседними элементами.

4) Оболочечный элемент с тремя узловыми точками. На малом участке поверхности его форма может быть представлена плоской фигурой. Нормальные перемещения точек такого элемента представляются полиномом четвертой степени, а касательные перемещения — с помощью полинома первой степени.

5) Оболочечный элемент с четырьмя узловыми точками. Нормальные перемещения точек такого элемента представляются полиномом третьей степени, а касательные перемещения моделируются неполным полиномом второй степени.

В целом можно отметить, что линейные перемещения U, V соответствуют мембранным деформациям, а линейное перемещение W и угловые перемещения α, β отвечают изгибным деформациям. Угловое перемещение γ используется для соединения элементов, не лежащих в одной плоскости, и отвечает за пространственное деформирование совокупности конечных элементов (в местной системе координат для каждого элемента $\gamma = 0$).

Внешний вид расчетной схемы пролетного строения представлен на рис. 4. Он соответствует паспортным данным мостового перехода и результатам натурных измерений (рис. 2).

Результаты численного моделирования. При расчете напряженно-деформируемого состояния пролетного строения учитывались нормативные статические и динамические нагрузки и их сочетания [2, 3, 4, 13]. Учет динамического поведения расчетной схемы проводился с помощью разложения по формам собственных колебаний, принимались во внимание первые шесть форм.

При расчете основных неизвестных системы определяющих уравнений (12) для учета ряда факторов, связанных с динамическими процессами и отдельными видами деформирования, могут использоваться дополнительные неизвестные, не являющиеся перемещениями узла (например, вторая смешанная производная функции поверхности плоского элемента при его деформировании, компоненты поперечного сдвига и обжатия в слоистых оболочечных элементах). Данные величины имеют вспомогательный характер и нужны для увеличения точности вычислительных процессов.

После решения системы уравнений (12) относительно перемещений узлов расчетной конечно-элементной модели пролетного строения можно перейти к определению с помощью выражений (8)–(11) других функций, характеризующих поведение и состояние пролетной конструкции при ее деформировании под действием заданных нагрузок и их сочетаний. Для плоских элементов, составляющих основу расчетной схемы рассматриваемой конструкции, при визуализации напряженно-деформированного состояния и представления графической модели сооружения под нагрузкой вычисляются перемещения, внутренние усилия и напряжения в узлах и в центре тяжести каждого простейшего элемента. Рис. 5, 6 показывают изополя и изолинии продольных усилий вдоль координатных осей x, z соответственно. Полученные значения удобнее всего использовать для сравнения с аналитическими расчетами деформирования балки до и после смещения оси рельсошпальной решетки относительно оси моста.

Сдвигающие усилия, изгибающие и крутящие моменты, поперечные силы также были вычислены, но их значения вошли в функции касательных и нормальных напряжений, графическая интерпретация

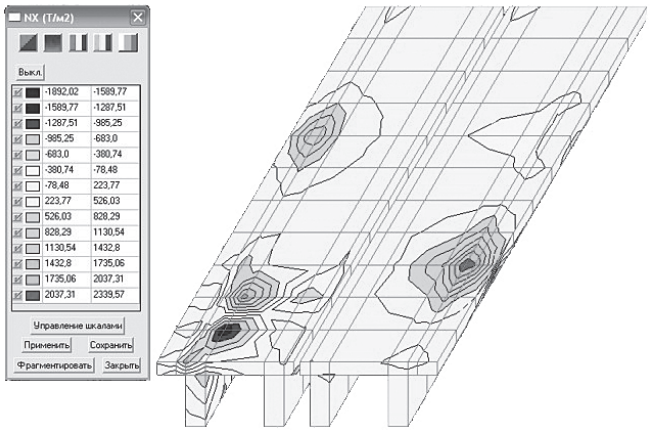

Рис. 5. Продольные усилия, действующие вдоль оси x в 10^{-1} т/м^2
Fig. 5. Longitudinal forces acting along the x axis in 10^{-1} t/m^2

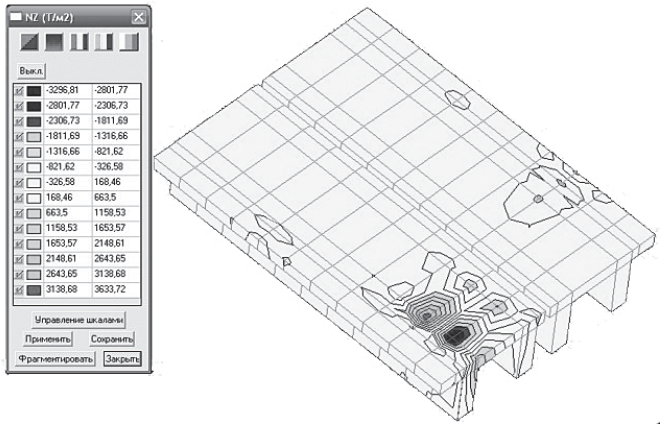

Рис. 6. Продольные усилия, действующие вдоль оси z в 10^{-1} т/м^2
Fig. 6. Longitudinal forces acting along the z axis in 10^{-1} t/m^2

которых представлена ниже. В целом результаты, представленные на рис. 5, 6, показывают наиболее нагруженные зоны пролетного строения при движении по нему со скоростью 30 км/ч тележки грузового полувагона 18-9890 с нагрузкой на ось 20 т и базой 1850 мм (концентраторы напряжений).

При изучении поведения конструкции при невыгодных сочетаниях расчетных нагрузок применяется принцип суперпозиции, поскольку предполагается, что элементы конструкции работают в упругой зоне деформаций. При выборе сочетаний нагрузок из возможных комбинаций в качестве основного критерия принимается максимальное значение приведенной величины, которая зависит от всех компонентов напряженно-деформированного состояния конкретного конечного элемента [2, 3, 4, 5, 15].

Для стержневых конечных элементов основными критериями являются экстремальные величины нормальных и тангенциальных напряжений в угловых точках поперечного сечения и угловых точках ядра сечения, расположенных на гранях поперечного сечения.

Для элементов оболочек, находящихся в плоском напряженном состоянии, в качестве определяющих критериев используются линии, огибающие экстремумы нормальных и касательных напряжений:

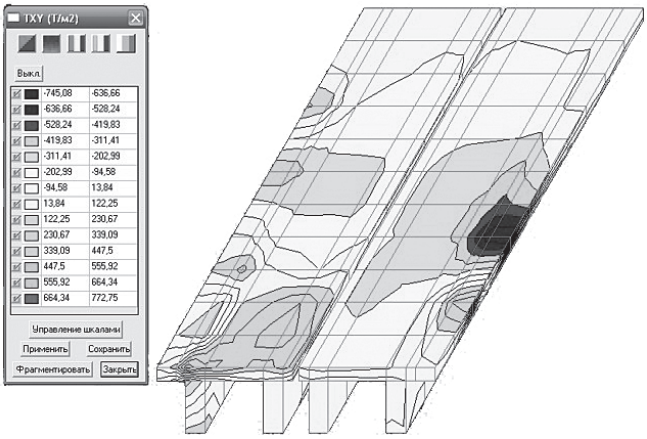

Рис. 7. Касательные напряжения в плоскости *xy* в 10^{-1} т/м^2
Fig. 7. Shear stresses in the *xy* planes in 10^{-1} t/m^2

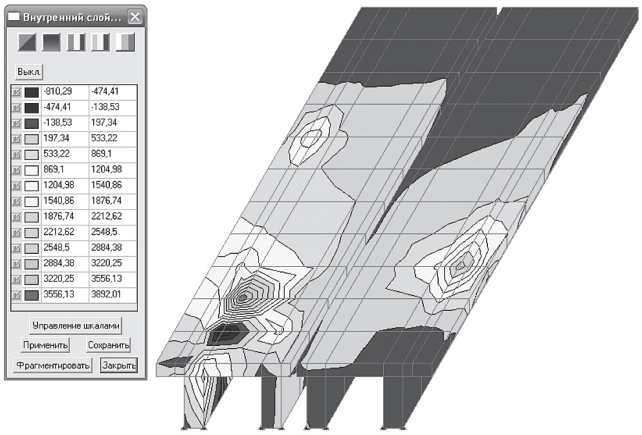

Рис. 8. Главные напряжения σ_1 в 10^{-1} т/м^2
Fig. 8. Main stresses σ_1 in 10^{-1} t/m^2

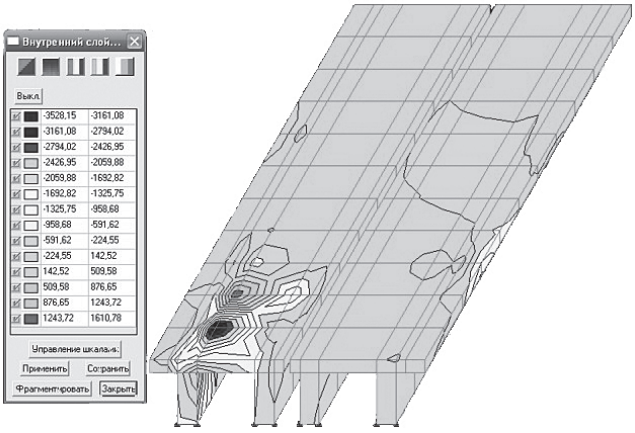

Рис. 9. Главные напряжения σ_3 в 10^{-1} т/м^2
Fig. 9. Main stresses σ_3 in 10^{-1} t/m^2

$$\sigma(\alpha) = F_{\text{пр}\,x}\cos^2\alpha + F_{\text{пр}\,z}\sin^2\alpha + T_{xz}\sin 2\alpha;$$
$$\tau(\alpha) = \frac{1}{2}\left(F_{\text{пр}\,z} - F_{\text{пр}\,x}\right)\sin 2\alpha + T_{xz}\cos 2\alpha, \quad (13)$$

где T_{xz} — касательное усилие, действующее в плоскости x и z.

Для плитных элементов определяющие критерии вычисляются при анализе огибающих кривых для экстремальных изгибающих и крутящих моментов:

$$M(\alpha) = M_x\cos^2\alpha + M_y\sin^2\alpha + M_{xz}\sin 2\alpha;$$
$$M_k(\alpha) = \frac{1}{2}\left(M_y - M_x\right)\sin 2\alpha + M_{xy}\cos 2\alpha. \quad (14)$$

Для одновременного учета большего количества факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние пролетного строения, в настоящем исследовании определяются главные и эквивалентные напряжения в характерных точках конечных элементов. Представление напряжений в виде изополей и изолиний позволит увидеть характер их распределения по конструкции, а также визуально показать работу всего пролетного строения [2, 5, 15, 19].

Определение главных и эквивалентных напряжений основано на предположении, что на любой площадке вблизи характерной точки элемента, нормаль к которой ν имеет направляющие косинусы l, m, r, выполняются условия для результирующего напряжения $S_\nu \le \sigma_1$ и $S_\nu \ge \sigma_3$, здесь S_ν — результирующее напряжение для нормального σ_ν и касательного τ_ν напряжения, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения ($\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \sigma_3$).

Поскольку для плоских элементов характеристики напряженно-деформированного состояния отличаются на нижней, верхней и медианной поверхности, то определять главные и эквивалентные напряжения предлагается в трех точках поперечного сечения. Так как пролетное строение находится в сложном напряженном состоянии, то необходимо использовать теории

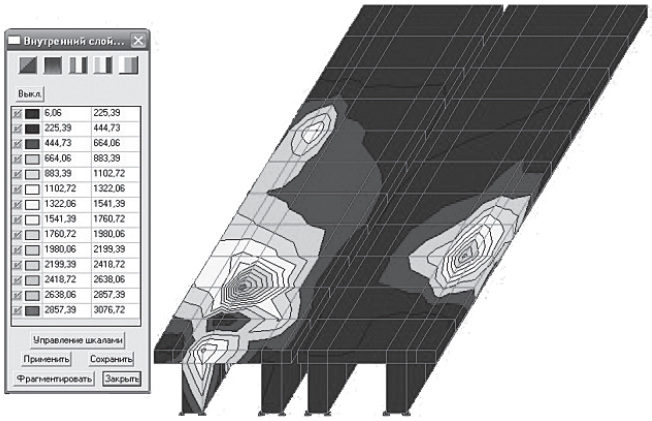

Рис. 10. Эквивалентные напряжения, рассчитанные по второй теории прочности в 10^{-1} т/м^2
Fig. 10. Equivalent stresses calculated according to the second theory of strength in 10^{-1} t/m^2

прочности, которые дают возможность сравнения эквивалентного напряжения σ_e с некоторой предельной величиной, соответствущей простому одноосному растяжению (σ_0^+) или сжатию (σ_0^-).

Результаты численного моделирования и расчетов главных и эквивалентных напряжений в программном комплексе приведены на рис. 7–10 в виде изополей и изолиний. Рис. 7 показывает распределение касательных напряжений в горизонтальной плоскости по пролетному строению. На рис. 8 и 9 представлено распределение главных напряжений σ_1 и σ_3 на внутренней грани плоских конечных элементов по всему балочному пролетному строению. Рис. 10 показывает распределение по пролетному строению на внутренней грани плоских конечных элементов эквивалентных напряжений, вычисленных по второй теории прочности.

Заключение. Представленные графические результаты численного моделирования позволяют оценить расположение наиболее нагруженных зон пролетного строения при движении транспортного средства при наличии смещения оси рельсошпальной решетки относительно оси моста. При проведении выправочных работ можно добиться такого расположения рельсошпальной решетки, при котором места концентрации экстремальных напряжений будут приходиться на ребра жесткости П-образных балок пролетного строения. Полученные результаты численных расчетов позволяют более точно планировать работы по усилению существующих железобетонных элементов или их дополнительному армированию при ремонте мостового перехода.

Приведенное распределение внутренних усилий и напряжений позволяет хорошо представить общую картину распределения силовых факторов и характер работы всего пролетного строения. Можно отметить, что представленные значения напряжений в растянутых и сжатых зонах находятся в допустимых для железобетона пределах, а их распределение по длине и ширине пролетного строения показывает в целом достаточную равномерность загружения балок, несмотря на наличие смещения оси рельсошпальной решетки относительно оси мостового перехода. Данная методика и полученные значения усилия и напряжения могут быть использованы проектировщиками при планировании ремонтов железнодорожного пути на участке, содержащем малые мосты с балочной расчетной схемой.

В результате пересчета данных аналитических и численных исследований, представленных в виде изополей, мы получили следующее:

1) Без смещения рельсошпальной решетки относительно оси моста максимальный изгибающий момент в одной из балок пролетного строения при пропуске вагона с нагрузкой на ось в 20 т равен 710 кН·м, а при наличии смещения на 15 см величина максимального изгибающего момента в балке, в сторону которой произошло смещение, равна 775 кН·м, т. е. увеличение внутреннего усилия (изгибающего момента) составляет 8,38 %.

2) При смещении оси рельсошпальной решетки на приведенную выше величину появляется дополнительный крутящий момент, равный 35 кН·м.

3) Максимальное напряжение в сжатой зоне составляет 3,91 МПа, а до смещения оси рельсошпальной решетки относительно оси моста эта величина равнялась 3,69 МПа.

4) Максимальное напряжение в растянутой зоне составляет 6,22 МПа, до появления смещения эта величина равнялась 5,85 МПа. Таким образом, происходит увеличение напряжений при изгибе на 5,95 %.

5) За счет дополнительного кручения балки пролетного строения появляется дополнительное напряжение 0,28 МПа.

6) Хотя увеличение напряжений (примерно на 6 %) в целом можно признать незначительным, наличие дефектов балок пролетного строения (сколы бетона, трещины в растянутой зоне, оголение и коррозия рабочей арматуры, уменьшение расчетного поперечного сечения, вымывание цементного камня из бетона, уменьшение прочности бетона с течением времени) может сделать это значение существенным фактором, ограничивающим эксплуатационные возможности мостовых переходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Круговова Е.А., Михеев Г.В., Ковалев Р.В. Компьютерное моделирование взаимодействия железнодорожных экипажей и мостов // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. 2010. № 3. С. 39–48.

2. Смирнов В.Н. Особенности работы опор мостов скоростных железнодорожных магистралей // Известия Петербургского ун-та путей сообщения. 2004. № 2. С. 168–171.

3. Карлина Е.А., Кузнецова И.О., Уздин А.М. Учет сил трения в подвижных опорных частях при назначении расчетных схем балочных разрезных железнодорожных мостов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. № 5. С. 45–47.

4. Динамический расчет зданий и сооружений / под ред. Б.Г. Коренева. М.: Стройиздат, 1984. 303 с. (Справочник проектировщика).

5. Белуцкий И.Ю., Лапин А.В. Адаптация конечно-элементной модели пролетного строения пешеходного путепровода к реальным условиям работы сооружения // Строительная механика и расчет сооружений. 2017. № 5. С. 28–31.

6. Ланис А.Л., Разуваев Д.А., Ломов П.О. Сопряжение подходных насыпей с мостами и путепроводами // Вестник СибАДИ / Сибирский гос. автомобильно-дорожный ун-т (СибАДИ). 2016. № 2. С. 110–120.

7. Бабкова Н. Мостостроение: современные технологии // САПР и графика. 2012. № 2. С. 50–52.

8. Россихин Ю.А., Шитикова М.В., Локтев А.А. Удар шара о нелинейно упругий буфер, установленный на плите перекрытия // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2004. № 11. С. 16–22.

9. Локтев А.А., Сычев В.П., Локтев Д.А. К задаче проектирования модуля визуального распознавания элементов верхнего строения пути на высокоскоростных магистралях // Транспорт Российской Федерации. 2017. № 1. С. 22–26.

10. Локтев А. А., Сычева А. В. Моделирование работы железнодорожного пути // Путь и путевое хозяйство. 2014. № 7. С. 10–12.

11. Локтев А. А., Локтев Д. А. Выявление и детектирование внешних дефектов верхнего строения пути агрегированным методом на основе стереозрения и анализа размытия образа // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2017. Т. 11. № 11. С. 96–100.

12. Локтев Д. А., Быков Ю. А., Коваленко Н. И. Использование метода анализа размытия изображения для определения внешних дефектов железнодорожного пути // Наука и техника транспорта. 2016. № 1. С. 69–75.

13. Ткаченко В. И., Погосян А. А. Комплексная система пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта при проведении ремонтно-путевых работ // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. 2017. № 13. С. 3–6.

14. Исследование микроструктуры рельсовой стали при высокочастотных динамических воздействиях / А. А. Локтев [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 5. С. 11–15.

15. Перспективные конструкции мостовых переходов на транспортных магистралях / А. А. Локтев [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 6. С. 331–336. DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-331-336.

16. Разработка математической модели железнодорожного пути переменной жесткости / А. А. Локтев [и др.] // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2016. Т. 9. № 9. С. 26–38.

17. Исследование особенностей динамической реакции верхнего строения железнодорожного пути от подвижного состава на основе модели трансверсально-изотропной пластины на деформируемом основании / А. А. Локтев [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2018. № 2. С. 55–65.

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. Локтев А. А., Виноградов В. В., Бучкин В. А. Модели взаимодействия колеса и рельса при высоких скоростях движения // Мир транспорта. 2016. Т. 14. № 1. С. 54–60.

20. Loktev D. A., Loktev A. A. Development of a user interface for an integrated system of video monitoring based on ontologies // Contemporary Engineering Sciences. 2015. Vol. 8. No. 20. P. 789–797.

21. Loktev D. A., Loktev A. A. Diagnostics of external defects of railway infrastructure by analysis of its images // Global Smart Industry Conference (GloSIC 2018): proc. of a meeting held 13–15 November 2018, Chelyabinsk, Russia. [S. l], 2018. Art. no. 8570083. DOI: 10.1109 / GloSIC.2018.8570083.

22. Повышение информативности оценки содержания железнодорожного пути / В. П. Сычёв [и др.] // Мир транспорта. 2017. Т. 15. № 2. С. 20–31.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

ШИШКИНА Ирина Викторовна,
канд. техн. наук, ассистент, кафедра «Транспортное строительство», ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)

ГРИДАСОВА Екатерина Александровна,
канд. техн. наук, руководитель центра коллективного пользования, доцент, кафедра «Сварочное производство», Инженерная школа ФГАОУ ВО ДВФУ

Статья поступила в редакцию 26.03.2020 г., принята к публикации 17.05.2020 г.

Для цитирования: Особенности работы пролетного строения мостового перехода при смещении оси рельсошпальной решетки / В. В. Королев [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 3. С. 127–138. DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-3-127-138.

Features of the bridge span performance when shifting the axis of the rail-sleeper grid

V. V. KOROLEV[1], A. A. LOKTEV[1], I. V. SHISHKINA[1], E. A. GRIDASOVA[2]

[1]Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGAOU VO RUT (MIIT)), Moscow, 127994, Russia
[2]Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Far Eastern Federal University" (FGAOU VO DVFU), Vladivostok, 690950, Russia

Abstract. Engineering structures form an integral part of the railways, both already operated and yet designed. The joint work of the upper structure of the railway track and the supporting structures of the bridge crossing is an important condition for the normal operation of the railway section without various restrictions and additional work on the current maintenance and diagnostics of structural elements. Presented study is devoted to the investigation of the stress-strain state of a small railway bridge with a beam design, when the axis of the rail-sleeper grid relative to the axis of the bridge is shifted by an amount exceeding the limit value determined by regulatory documents. In the analytical calculation of the behavior parameters and the state of the span under the action of the load, a differential equation is used that describes the vertical vibrations of the beam and allows considering them as a combination of forced and free vibrations. In numerical modeling, the finite element method is used as the solution method, the determining equations of which contain linear and angular displacements of nodes of the calculation scheme as unknowns. As a result of the calculations, graphical dependences for normal and horizontal displacements, internal forces, principal and equivalent stresses at various points of the span are obtained. Presented values show an increase in bending and torsional forces, as well as principal stresses when the axis of the railway track is displaced relative to the axis of the bridge. It is noted that although the increase in stresses (by about 6 %) can generally be considered insignificant, the presence of defects in the span beams (concrete chips, cracks in the stretched zone, exposure and corrosion of working reinforcement, decrease in the calculated cross section, leaching of cement stone from concrete, decrease in concrete strength over time) can make it a significant enough factor limiting the operational capabilities of bridge crossings.

Keywords: small bridge; reinforced concrete span; non-axis symmetric load; finite element method; beam method; dynamic impact; vertical shifts

DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-3-127-138

REFERENCES

1. Krugovova E. A., Mikheev G. V., Kovalev R. V. *Komp'yuternoe modelirovanie vzaimodeystviya zheleznodorozhnykh ekipazhey i mostov* [Computer modelling of the interaction of railway carriages and bridges]. Vestnik Bryanskogo gos. tekhn. un-ta [Bulletin of the Bryansk State Technical University], 2010, no. 3, pp. 39 – 48.

2. Smirnov V. N. *Osobennosti raboty opor mostov skorostnykh zheleznodorozhnykh magistraley* [Features of the work of the supports of bridges of high-speed railways]. Proceedings of Petersburg Transport University, 2004, no. 2, pp. 168 – 171.

3. Karlina E. A., Kuznetsova I. O., Uzdin A. M. *Uchet sil treniya v podvizhnykh opornykh chastyakh pri naznachenii raschetnykh skhem balochnykh razreznykh zheleznodorozhnykh mostov* [Accounting for friction forces in movable supporting parts when assigning design schemes for beam split railway bridges]. Earthquake engineering. Constructions safety, 2007, no. 5, pp. 45 – 47.

4. Korenev B. G. *Dinamicheskiy raschet zdaniy i sooruzheniy* [Dynamic calculation of buildings and structures]. Spravochnik proektirovshchika [Designer Guide]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984, 303 p.

5. Belutskiy I. Yu., Lapin A. V. *Adaptatsiya konechno-elementnoy modeli proletnogo stroeniya peshekhodnogo puteprovoda k real'nym usloviyam raboty sooruzheniya* [Adaptation of the finite element model of the span of the pedestrian overpass to the actual working conditions of the structure]. Structural Mechanics and Analysis of Constructions, 2017, no. 5, pp. 28 – 31.

6. Lanis A. L., Razuvaev D. A., Lomov P. O. *Sopryazhenie podkhodnykh nasypey s mostami i puteprovodami* [Interfacing approach embankments with bridges and overpasses]. Vestnik SibADI (The Siberian State Automobile and Highway University), 2016, no. 2, pp. 110 – 120.

7. Babkova N. *Mostostroenie: sovremennye tekhnologii* [Bridge building: modern technologies]. SAPR i grafika, 2012, no. 2, pp. 50 – 52.

8. Rossikhin Yu. A., Shitikova M. V., Loktev A. A. *Udar shara o nelineyno uprugiy bufer, ustanovlennyy na plite perekrytiya* [Ball impact on a non-linearly elastic buffer mounted on a slab]. News of higher educational institutions. Construction, 2004, no. 11, pp. 16 – 22.

9. Loktev A. A., Sychev V. P., Loktev D. A. *K zadache proektirovaniya modulya vizual'nogo raspoznavaniya elementov verkhnego stroeniya puti na vysokoskorostnykh magistralyakh* [On the task of designing a module for visual recognition of the elements of the upper track structure on high-speed highways]. Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation], 2017, no. 1, pp. 22 – 26.

10. Loktev A. A., Sycheva A. V. *Modelirovanie raboty zheleznodorozhnogo puti* [Modeling the operation of the railway track]. Railway Track and Facilities, 2014, no. 7, pp. 10 – 12.

11. Loktev A. A., Loktev D. A. *Vyyavlenie i detektirovanie vneshnikh defektov verkhnego stroeniya puti agregirovannym metodom na osnove stereozreniya i analiza razmytiya obraza* [Identification and detection of external defects of the upper track structure using the aggregated method based on stereo vision and image blur analysis]. Vnedrenie sovremennykh konstruktsiy i peredovykh tekhnologiy v putevoe khozyaystvo, 2017, Vol. 11, no. 11, pp. 96 – 100.

12. Loktev D. A., Bykov Yu. A., Kovalenko N. I. *Ispol'zovanie metoda analiza razmytiya izobrazheniya dlya opredeleniya vneshnikh defektov zheleznodorozhnogo puti* [Using the image blur analysis method to determine the external defects of a railway track]. Science and Technology in Transport, 2016, no. 1, pp. 69 – 75.

13. Tkachenko V. I., Pogosyan A. A. *Kompleksnaya sistema prostranstvennykh dannykh infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta pri provedenii remontno-putevykh rabot* [Integrated spatial data system of railway transport infrastructure during repair and track works]. Sovremennye problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta, 2017, no. 13, pp. 3 – 6.

14. Loktev A. A., Korolev V. V., Shishkina I. V., Gridasova E. A., Nikiforov P. A., Tal'skikh K. Yu. *Issledovanie mikrostruktury rel'sovoy stali pri vysokochastotnykh dinamicheskikh vozdeystviyakh* [Study of the microstructure of rail steel under high-frequency dynamic effects]. Railway Track and Facilities, 2019, no. 5, pp. 11 – 15.

15. Loktev A. A., Korolev V. V., Loktev D. A., Shukyurov D. R., Gelyukh P. A., Shishkina I. V. *Perspektivnye konstruktsii mostovykh perekhodov na transportnykh magistralyakh* [Perspective constructions of bridge overpasses on transport main lines]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2018, Vol. 77, no. 6, pp. 331 – 336. DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-331-336.

16. Loktev A. A., Tal'skikh K. Yu, Stepanov K. D. *Razrabotka matematicheskoy modeli zheleznodorozhnogo puti peremennoy zhestkosti* [Development of a mathematical model of a railway track of variable stiffness]. Vnedrenie sovremennykh konstruktsiy i peredovykh tekhnologiy v putevoe khozyaystvo, 2016, Vol. 9, no. 9, pp. 26 – 38.

17. Loktev A. A., Sycheva A. V., Zapol'nova E. V. *Issledovanie osobennostey dinamicheskoy reaktsii verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti ot podvizhnogo sostava na osnove modeli transversal'no-izotropnoy plastiny na deformiruemom osnovanii* [Study of dynamic response of the upper structure of the railway track from rolling stock on the basis of a model of transversely isotropic plate on a deformable base]. Engineering and automation problems, 2018, no. 2, pp. 55 – 65.

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., Vinogradov V. V., Buchkin V. A. *Modeli vzaimodeystviya kolesa i rel'sa pri vysokikh skorostyakh dvizheniya* [Models of wheel and rail interaction at high speeds]. World of Transport and Transportation, 2016, Vol. 14, no. 1, pp. 54 – 60.

20. Loktev D. A., Loktev A. A. *Development of a user interface for an integrated system of video monitoring based on ontologies.* Contemporary Engineering Sciences, 2015, Vol. 8, no. 20, pp. 789 – 797.

21. Loktev D. A., Loktev A. A. *Diagnostics of external defects of railway infrastructure by analysis of its images.* Global Smart Industry Conference (GloSIC 2018): proc. of a meeting held 13 – 15 November 2018, Chelyabinsk, Russia. [S. l], 2018, art. no. 8570083. DOI: 10.1109 / GloSIC.2018.8570083.

22. Sychev V. P. *Povyshenie informativnosti otsenki soderzhaniya zheleznodorozhnogo puti* [Improving the information content of the assessment of the railway track maintenance]. World of Transport and Transportation, 2017, Vol. 15, no. 2, pp. 20 – 31.

ABOUT THE AUTHORS

Vadim V. KOROLEV,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department “Transport Engineering”, FGAOU VO RUT (MIIT)

Aleksey A. LOKTEV,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department “Transport Engineering”, FGAOU VO RUT (MIIT)

Irina V. SHISHKINA,
Cand. Sci. (Eng.), Assistant, Department "Transport Engineering", FGAOU VO RUT (MIIT)

E-mail: korolevadim@mail.ru (V. V. Korolev)

Ekaterina A. GRIDASOVA,
Cand. Sci. (Eng.), Head of the Center of Collective Use, Associate Professor, Department "Welding Technologies", School for Engineers of the FGAOU VO DVFU

Received 26.03.2020
Accepted 17.05.2020

For citation: 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. Vestnik of the Railway Research Institute. 2020. 79 (3): 127 – 138 (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-3-127-138.

«Электроника – Транспорт 2020»: новые даты проведения

14-я Международная выставка информационных технологий и электроники для пассажирского транспорта «Электроника – Транспорт 2020» переносится на сентябрь. Мероприятие пройдет 22 – 24 сентября 2020 года в Москве, в КВЦ «Сокольники».

Условия участия в выставке остаются без изменений, продолжается прием заявок на участие, регистрация посетителей открыта на сайте выставки. Все договоренности с партнерами и спикерами остаются в силе.

Как и планировалось, выставка пройдет в рамках Российской недели общественного транспорта при поддержке Министерства транспорта РФ, Министерства промышленности и торговли РФ в интересах предприятий общественного транспорта нашей страны: метрополитенов, автотранспортных, трамвайных, троллейбусных предприятий. В выставке примут участие представители федеральных органов власти, специалисты муниципальных администраций, проектных институтов, разработчики и поставщики подвижного состава, комплектующих, оборудования и систем.

В деловой программе — конференции, семинары, круглые столы, технические визиты на объекты транспортной инфраструктуры Москвы и Московской области.

На данный момент более 60 организаций подтвердили участие в мероприятиях Российской недели общественного транспорта, поэтому оргкомитет принял решение выпустить в мае каталог участников, где, помимо информации об участниках, будут опубликованы аналитические статьи о состоянии транспортного рынка, интервью с известными экспертами и лидерами отраслевых ассоциаций, профсоюзов, исторические материалы к 85-летию Московского метрополитена и 75-летию Победы в Великой Отечественной войне.

Выставка «Электроника – Транспорт» является традиционным местом встречи 2500+ специалистов из России и ряда зарубежных стран. В непростой экономической обстановке выставка остается надежной площадкой для развития бизнеса и поиска новых клиентов и рынков сбыта.

Оргкомитет выставки «Электроника – Транспорт 2020»
+7(495) 287-44-12, http://www.e-transport.ru

«Electronica – Transport 2020»: new information

The 14th International specialized exhibition devoted IT for passenger transport and transport infrastructure Electronica – Transport 2020 will be held 22 – 24 September 2020 in Moscow, Sokolniki exhibition and convention Centre.

The participation conditions remain unchanged and you can fill the online application form provided on the website. All agreements with partners and speakers remain valid.

The exhibition will be held as a part of Russian Urban Transport Week and supported by Russian Transport Ministry, Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation in the interests of public transport enterprises of our country: metro, motor transport, tram and trolleybus enterprises. The exhibition will be attended by representatives of federal authorities, specialists of municipal administrations, design institutes, developers and suppliers of rolling stock, components, equipment and systems.

The exhibition program includes — conferences, seminars, round tables, technical visits to the objects of transport infrastructure of Moscow and Moscow region.

More than 60 organizations have confirmed their participation at the Russian Urban Transport Week so the organizing committee decided to publish participant's directory in May, which will also contain analytical articles on the market condition, interviews with well-known experts and leaders of industry associations, trade unions, historical materials for the 85th anniversary of the Moscow Metro and the 75th anniversary of Victory in the Great Patriotic War.

Electronica – Transport is a unique and traditional event for more than 2500 engineers and technical experts in the field of design, manufacture and running of electronics and IT solutions for transport use. The exhibition remains a reliable platform for business development and search of new clients and sales markets in such a difficult economic environment.

Exhibition team «Electronica – Transport 2020»
+7(495) 287-44-12, http://www.e-transport.ru