

# Перспективные конструкции мостовых переходов на транспортных магистралях

А. А. ЛОКТЕВ<sup>1</sup>, В. В. КОРОЛЕВ<sup>1</sup>, Д. А. ЛОКТЕВ<sup>2</sup>, Д. Р. ШУКЮРОВ<sup>1</sup>, П. А. ГЕЛЮХ<sup>1</sup>, И. В. ШИШКИНА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ)), Москва, 127994, Россия

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» (ФГБОУ ВО МГТУ им. Н. Э. Баумана), Москва, 105005, Россия

**Аннотация.** При проектировании мостовых переходов на автомобильных и железных дорогах обычно используются классические балочные или ферменные расчетные схемы сооружений, выполненных из стали или железобетона, но в настоящее время происходит существенное увеличение скоростей движения отдельных транспортных средств, повышаются осевые нагрузки и общая масса поезда, а также уменьшаются временные интервалы между составами. Перечисленные факторы приводят к заметному росту динамических воздействий и обуславливают необходимость использования неклассических расчетных схем искусственных сооружений транспортной инфраструктуры. В данном исследовании за основу унифицированного мостового перехода предлагается взять трехпролетный арочный мост с подвесным центральным пролетным строением. Такая компоновка позволит изменять проектную длину центрального пролета в достаточно широком диапазоне, уменьшить общее количество опор при увеличении общей длины мостового перехода, а также использовать подобную конструкцию в качестве двухпутного железнодорожного, двух- или четырехполосного автодорожного моста. Проведенные расчеты и полученные результаты вычисления перемещений, внутренних усилий и напряжений в узлах и элементах предлагаемой конструкции мостового перехода позволяют сделать вывод о допустимых предельных значениях найденных величин, достаточно равномерной загруженности всех ее основных элементов, об отсутствии ярко выраженных масштабных концентраторов напряжений.

**Ключевые слова:** трехпролетный арочный мостовой переход; метод конечных элементов; определяющие уравнения в перемещениях; концентратор напряжений; эквивалентные напряжения

**Введение.** Современное развитие транспортных систем, с одной стороны, характеризуется повышением скоростей подвижного состава и увеличением полезной массы перевозимого груза, с другой стороны, актуальным и своевременным становится рассмотрение вопросов унификации конструктивных решений искусственных сооружений. Часто при проектировании таких сооружений используются классические расчетные схемы сооружений, выполненных как из стали, так и из железобетона. Можно выделить пространственную металлическую ферму, многопролетную разрезную и неразрезную металлическую или железобетонную балку [1, 2]. В настоящем исследовании за основу унифицированного мостового перехода предлагается взять извест-

ный трехпролетный арочный мост с подвесным центральным пролетным строением. Такая компоновка позволяет изменять проектную длину центрального пролета в достаточно широком диапазоне, уменьшить общее количество опор при увеличении общей длины мостового перехода. Подобную конструкцию можно использовать в качестве двухпутного железнодорожного моста и двух- или четырехполосного автодорожного моста. Общий вид мостового перехода представлен на рис. 1.

Чтобы доказать эффективность данного конструктивного решения, необходимо определить внутренние усилия и напряжения в элементах конструкции мостового перехода (рис. 1). Для расчета предлагается метод конечных элементов с использованием в качестве основных неизвестных величин линейные перемещения и повороты узлов расчетной схемы, поскольку данный метод широко применяется в инженерном и проектно-конструкторском сообществе и реализуется практически во всех современных, активно используемых и прошедших экспертную верификацию вычислительных программных комплексах [3, 4].

**Метод решения.** Рассматриваемую конструкцию для расчета по методу конечных элементов предлагается представить в виде набора тел стандартного типа (стержней, пластин, оболочек и т. д.), связанных между собой узлами [4, 5]. Тип конечного элемента определяется его геометрической формой, зависимостями между перемещениями его узлов и узлов расчетной схемы, законом Гука для каждого элемента и набором жесткостных параметров [6, 7].

При составлении расчетной схемы использовались пять основных типов конечных элементов:

1) стержневой элемент, работающий по пространственной схеме и воспринимающий продольную силу  $N$ , изгибающие моменты  $M_y$  и  $M_z$ , поперечные силы  $Q_z$  и  $Q_y$ , а также крутящий момент  $M_k$ . Перемещения стержневых элементов аппроксимировались полиномами третьей степени при отсутствии сдвига [3, 4] и трансцендентными при его наличии [8];

2) четырехузловой плоский элемент, прогибы точек которого описываются неполным полиномом

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

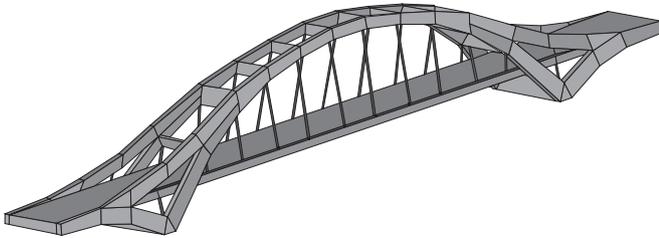


Рис. 1. Общий вид предлагаемой конструкции мостового перехода  
Fig. 1. General view of the proposed construction of the bridge overpass

пятой степени. Элемент предназначен для расчета тонких плит. В каждом из узлов конечных элементов имеется по три степени свободы:  $w$  — вертикальное перемещение (прогиб);  $\alpha = \partial w / \partial y$  — угол поворота относительно оси  $x$ ;  $\beta = -\partial w / \partial x$  — угол поворота относительно оси  $y$ . Для таких элементов вычисляются усилия  $M_x, M_y, M_{xy}, Q_x, Q_y$  и реакции в узлах [4, 7];

3) треугольный элемент оболочки, геометрическая форма которого на малом участке поверхности может быть принята плоской. Такой элемент не является совместным, поле нормальных перемещений внутри него моделируется с помощью полинома четвертой степени, а поле тангенциальных перемещений — с помощью полинома первой степени [3, 8];

4) четырехугольный элемент оболочки, который не является совместным, поле нормальных перемещений внутри него моделируется полиномом третьей степени, а поле тангенциальных перемещений — неполным полиномом второй степени [3, 7, 8].

Каждый узел конечных элементов оболочки имеет по шесть степеней свободы:  $U, V, W$  — линейные перемещения по осям  $x, y$  и  $z$ ;  $\alpha = \partial w / \partial y, \beta = -\partial w / \partial x, \gamma$  — углы поворота относительно осей  $x, y$  и  $z$  соответственно. Степени свободы  $U, V$  отвечают мембранным, а  $W, \alpha, \beta$  — изгибным деформациям. Угол поворота  $\gamma$  в местной системе координат элемента всегда равен нулю. Он вводится для стыковки элементов, не лежащих в одной плоскости, и необходим для пространственной работы конструкции;

5) связь конечной жесткости. Данный конечный элемент применяется для учета податливости опорной связи по направлению одной из предусмотренных вычислительным комплексом степеней свободы в общей системе координат. Этот конечный элемент дает возможность смоделировать работу упругого основания, для линейных перемещений его можно интерпретировать как жесткость на сжатие, которая позволяет произойти единичному смещению узла по заданному направлению [3, 6]. При моделировании упругого основания для задания данной жесткости надо первый коэффициент постели умножить на площадь поверхности, взаимодействующей с узлом. Для угловых перемещений такой конечный элемент может быть интерпретирован как жесткость на сдвиг, кото-

рая позволяет произойти единичным поворотам по заданному направлению. Для учета упругого основания надо второй коэффициент постели умножить на площадь поверхности, взаимодействующей с узлом [4, 9].

Уравнения равновесия элементов конструкции при применении метода конечных элементов можно получить, используя принцип возможных перемещений. Если предположить, что  $\bar{u}$  — поле перемещений точек деформируемого элемента под действием внешних нагрузок, то  $\delta u$  — дополнительное малое смещение каждой точки элемента [6, 10]. В соответствии с принципом возможных перемещений приращение работы внутренних сил  $\delta U$  равно работе внешних сил  $\delta W$  на возможных перемещениях тела. Если представить приложенную к элементу нагрузку в виде суммы нагрузки  $q$ , распределенной по его объему  $V$ , и нагрузки  $p$ , распределенной по его поверхности  $S$ , то можно записать

$$\int_V \sigma \delta \epsilon dV = \int_V \bar{q} \delta \bar{u} dV + \int_S \bar{p} \delta \bar{u} dS, \quad (1)$$

где  $\sigma = \sigma_{ij} \bar{e}_i \bar{e}_j$  — тензор напряжений;  $\epsilon = \epsilon_{ij} \bar{e}_i \bar{e}_j$  — тензор деформаций ( $\bar{e}_i$  и  $\bar{e}_j$  — единичные орты;  $i, j = 1, 2, 3$ ).

Тензор деформаций также можно представить через смещения узлов расчетной схемы  $\lambda_k$ :

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \Phi_{ik}}{\partial x_j} + \frac{\partial \Phi_{jk}}{\partial x_i} \right) \lambda_k, \quad (2)$$

где  $\Phi$  — функционал характеристик жесткости в различных направлениях перемещения узла;  $k = 1, 2, 3$ .

С учетом выражений (2) и закона Гука уравнение равновесия элемента (1) можно представить в следующем виде [4, 8, 10]:

$$\int_V D \bar{V} \bar{u} \delta (\nabla \bar{u}) dV = \int_V \bar{q} \delta \bar{u} dV + \int_S \bar{p} \delta \bar{u} dS, \quad (3)$$

где  $D$  — матрица упругих констант материала конструкции;  $\nabla$  — векторный дифференциальный оператор.

Если использовать выражение (3) применительно к конечному элементу определенного объема и площади поверхности с учетом того, что  $\delta \bar{u} = \Phi_i \delta \lambda_i$ , то получим систему линейных алгебраических уравнений, выражающих условия равновесия конечного элемента в матричной форме

$$\{\mathbf{K}\} \{\boldsymbol{\lambda}\} = \{\mathbf{f}\}, \quad (4)$$

где  $\{\mathbf{K}\}$  — матрица жесткостей элемента в различных направлениях,  $\{\mathbf{K}\} = \int_V \nabla \Phi_i D \nabla \Phi_j \lambda_i dV$ ;  $\{\mathbf{f}\}$  — вектор сил, приложенных в узлах элемента,  $\{\mathbf{f}\} = \int_V \bar{q} \Phi_i dV - \int_S \bar{p} \Phi_i dS$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ );  $\{\boldsymbol{\lambda}\}$  — вектор узловых перемещений.

Уравнения типа (4) используют для расчета конструкций на прочность при статическом нагружении,

при их решении вычисляется вектор узловых смещений, а после определяются перемещения всех точек тела, деформации и напряжения.

Чтобы получить уравнения движения конечного элемента, необходимо ввести в формулу (4) объемные силы инерции, полученные по принципу Д’Аламбера, и тогда

$$\{\mathbf{M}\}\{\boldsymbol{\lambda}\} + \{\mathbf{K}\}\{\boldsymbol{\lambda}\} = \{\mathbf{f}\}, \quad (5)$$

где  $\{\mathbf{M}\}$  — матрица масс элемента,  $\{\mathbf{M}\} = \int_V \rho \Phi_i \Phi_j dV$  ( $\rho$  — плотность его материала).

При использовании метода конечных элементов истинная форма перемещений точек внутри плоских или оболочечных элементов приближенно представляется различными упрощенными зависимостями [6, 11]. В данном случае погрешность в определении напряжений, усилий, перемещений и деформаций имеет порядок  $h/L^k$ , где  $h$  — максимальный шаг сетки;  $L$  — характерный размер исследуемой области. Скорость уменьшения ошибки приближенного результата определяется показателем степени  $k$ , который имеет разное значение для различных искомых функций.

**Численные исследования.** В настоящей работе в процессе численного моделирования рассматривается трехпролетный мостовой переход с боковыми пролетами длиной 25 м и центральным длиной 100 м, ширина несущих конструкций моста составляет 12 м. При построении расчетной схемы учитывалась нагрузка от собственного веса элементов и конструкций, снеговая нагрузка с полным расчетным значением (III район), гололедная нагрузка (II район), ветровая нагрузка как сумма средней и пульсационной составляющих (I район), нагрузка от подвижного состава (С14), а также динамическая составляющая при торможении подвижного состава [12]. Для динамического расчета системы использовались разложения по формам собственных колебаний, при учете пульсаций ветрового потока рассматривалось 6 форм, сейсмического воздействия — 4 формы.

Также при расчете могут использоваться дополнительные неизвестные, которые не отождествляются с компонентами линейных или угловых перемещений узла как бесконечно малого жесткого тела в точке, совпадающей с центром узла. К дополнительным неизвестным относится вторая смешанная производная деформированной поверхности плиты, отвечающая за кручение, или компоненты деформаций поперечного сдвига и обжатия в слоистых оболочках. Эти величины являются вспомогательными и используются для повышения точности вычисления основных неизвестных схемы [8, 13].

После получения результатов вычислений перемещений по системе уравнений (5) можно перейти к определению других функций, характеризующих по-

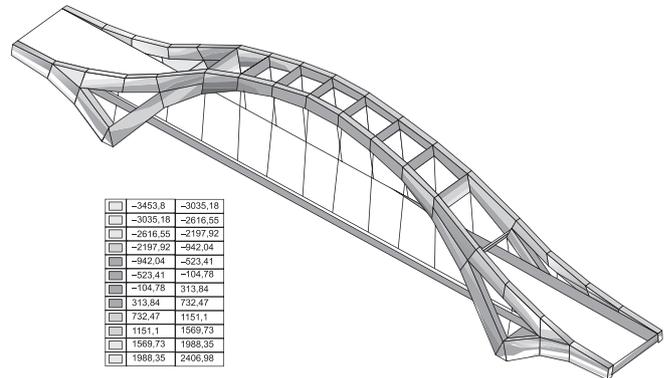


Рис. 2. Изополя продольных усилий вдоль координатной оси  $x$   
Fig. 2. Isofields of longitudinal forces along the  $x$ -axis

ведению конструкции при действии различных нагрузок и их сочетаний. Для стержневых элементов результатами счета являются усилия, которые вычисляются для плоскости торцевого сечения и в центре упругой части [10, 13]. Вычисленные усилия соответствуют заданному типу стержневой процедуры из общего тензора усилий ( $N, M_k, M_y, Q_z, M_z, Q_y$ ). В результате расчета для пластинчатых, объемных и оболочечных элементов определяются перемещения, усилия и напряжения в узлах, а также в центре тяжести элемента. На рис. 2 и 3 в качестве примера представлены изополя продольных усилий вдоль координатной оси  $x$ , изгибающих моментов  $M_y$  (в режиме, не показывающем объемные элементы, поскольку это усилие в них мало) соответственно.

**Основные результаты.** Проведенные расчеты позволяют определить наиболее нагруженные места предложенной конструкции мостового перехода, концентраторы напряжений, а также понять общую картину распределения усилий и характер работы всего сооружения. В целом видно, что полученные расчетные значения находятся в допустимых пределах, а их величины в отдельных местах конструкции показывают равномерность загрузки всех узлов и элементов, не вызывая появления экстремальных величин усилий, что является достоинством данной конструкции мостового перехода. Вычисленные усилия и напряжения, соответствующие каждому из найденных опасных сочетаний нагрузок, могут быть предложены проектировщику и конструктору для анализа.

Для выбора невыгодных расчетных сочетаний усилий используется принцип суперпозиции: из всех возможных сочетаний отбираются те, которые соответствуют максимальному значению некоторой приведенной величины, выбранной в качестве критерия и зависящей от всех компонентов напряженного состояния:

а) для стержней такими величинами являются экстремальные значения нормальных и касательных напряжений в контрольных точках сечения; к ним от-

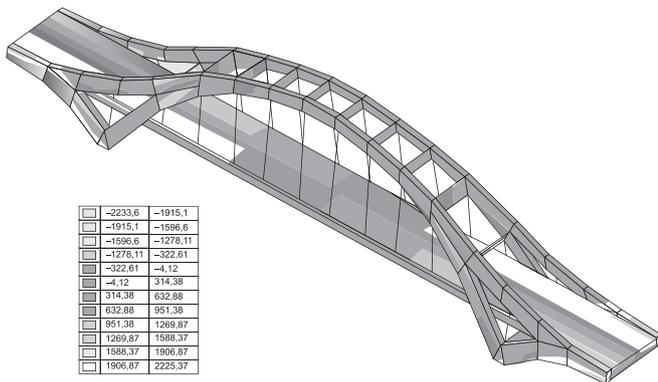


Рис. 3. Изополя изгибающих моментов  $M_y$   
Fig. 3. Isofields of bending moments  $M_y$

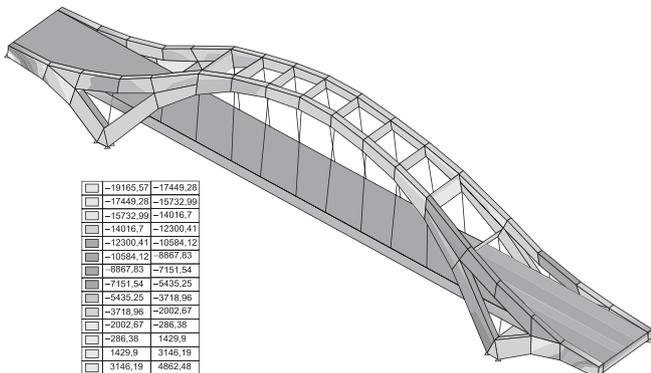


Рис. 4. Изополя и изолинии для главных напряжений в элементах конструкции на внешней поверхности конечных элементов  
Fig. 4. Isofields and isolines for principal stresses in structural elements on the outer surface of finite elements

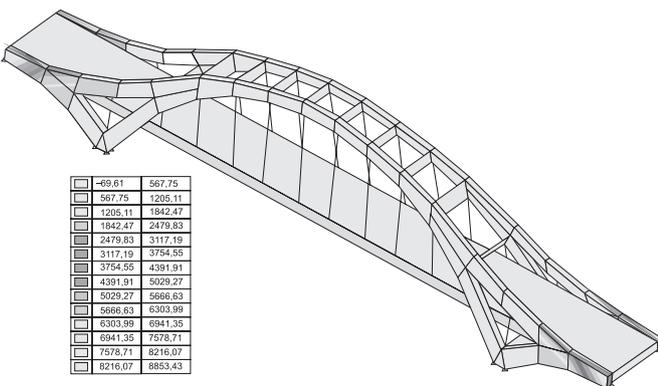


Рис. 5. Эквивалентные напряжения для среднего слоя конечно-элементной модели конструкции в виде изополей и изолиний  
Fig. 5. Equivalent stresses for the middle layer of finite element model of the structure in the form of isofields and isolines

носятся угловые точки поперечного сечения и точки на гранях, координаты которых связаны с угловыми точками ядра сечения;

б) для элементов, находящихся в плоском напряженном состоянии, определяющими величинами

являются огибающие экстремальные кривые нормальных и касательных напряжений, которые вычисляются по следующим формулам:

$$\sigma(\alpha) = N_x \cos^2 \alpha + N_z \sin^2 \alpha + T_{xz} \sin 2\alpha;$$

$$\tau(\alpha) = \frac{1}{2}(N_z - N_x) \sin 2\alpha + T_{xz} \cos 2\alpha, \quad (6)$$

где  $\sigma$  — нормальные напряжения;  $\tau$  — касательные напряжения;  $\alpha$  — угол наклона сечения, в котором определяются напряжения;  $T$  — касательное усилие в плоскости  $xz$ ;

в) для плит применяется аналогичный подход, определяющие величины в данном случае — это изгибающие и крутящие моменты, вычисляются по следующим формулам:

$$M(\alpha) = M_x \cos^2 \alpha + M_y \sin^2 \alpha + M_{xy} \sin 2\alpha;$$

$$M_k(\alpha) = \frac{1}{2}(M_y - M_x) \sin 2\alpha + M_{xy} \cos 2\alpha. \quad (7)$$

Помимо внутренних моментов, для плит определяются экстремальные значения перерезывающих сил;

г) для оболочечных конечных элементов вычисляются напряжения на верхней и нижней поверхностях оболочки с учетом мембранных напряжений и изгибающих усилий;

д) для объемных элементов критерием для определения опасных сочетаний напряжений являются экстремальные значения среднего напряжения и главных напряжений девиатора.

С целью получения более объемной картины распределения силовых характеристик по элементам и узлам данной конструкции мостового перехода предлагается определить также главные и эквивалентные напряжения. Картина их распределения позволит уменьшить число сравниваемых величин, получить более полные данные о работе всей конструкции в целом и ее отдельных элементов [4, 11].

Для вычисления главных и эквивалентных напряжений используется предположение, что на проходящей через произвольную точку элемента и произвольно ориентированную площадку, нормаль к которой  $\nu$  имеет направляющие косинусы  $l, m, n$  с осями  $x, y, z$ , действует нормальное напряжение  $\sigma_\nu$  и касательное напряжение  $\tau_\nu$  с равнодействующей величиной  $s_\nu$ . При этом на любой площадке результирующее напряжение  $s_\nu \leq \sigma_1$  и  $s_\nu \geq \sigma_3$ , где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — главные напряжения, причем  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ .

Для общей характеристики напряженно-деформированного состояния предлагается использовать параметр Лоде — Надаи [6, 7]:

$$\mu_0 = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1. \quad (8)$$

Значение  $\mu_0 = 1$  соответствует чистому сжатию,  $\mu_0 = 0$  — чистому сдвигу,  $\mu_0 = -1$  — чистому растяжению.

Главные напряжения для плоских и оболочечных элементов предлагается определять на нижней, средней и верхней поверхностях, чтобы лучше понять напряженно-деформированное состояние элемента и проанализировать его работу в общей конструкции сооружения.

Для сложного напряженного состояния, характеризующегося главными напряжениями, часто используется некоторая гипотеза (теория прочности), которая предусматривает возможность сопоставления некоторого эквивалентного напряжения  $\sigma_e$  с предельной величиной, соответствующей простому одноосному растяжению ( $\sigma_0^+$ ) или одноосному сжатию ( $\sigma_0^-$ ). Условие, характеризующее отсутствие предельного состояния в материале, можно представить в виде

$$\sigma_e = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, k_1, \dots, k_n) \leq \sigma_0^+, \quad (9)$$

где  $k_1, \dots, k_n$  — некоторые константы материала, определяющие его механические свойства.

На рис. 4 приведены изополя и изолинии для главных напряжений в элементах конструкции на внешней поверхности конечных элементов, видна разность в работе расчетной схемы конструкции с точки зрения условного растяжения и сжатия различных поверхностей плоских и оболочечных элементов. С учетом полученных данных необходимо планировать армирование железобетонных элементов или подбирать сечения и материал стальных элементов.

На рис. 5 изображены эквивалентные напряжения для среднего слоя конечно-элементной модели конструкции в виде изополей и изолиний. Попарное сравнение рис. 4 и 5 выявляет возможность использования в качестве результирующих функций, показывающих в целом напряженно-деформированное состояние конструкции мостового перехода, как главные, так и эквивалентные напряжения.

**Заключение.** 1. Проведенные расчеты и полученные результаты вычисления перемещений, внутренних усилий и напряжений в узлах и элементах предлагаемой конструкции мостового перехода позволяют сделать вывод о допустимых предельных значениях найденных величин, достаточно равномерной загруженности всех основных элементов конструкции, отсутствии в них ярко выраженных масштабных концентраторов напряжений.

2. Предлагаемая конструкция позволяет задавать при проектировании различные размеры пролетов, уменьшить количество или отказаться от устройства русловых опор, адаптировать данное сооружение для пропуска как железнодорожного, так и автомобильного транспорта. Конструкция мостового перехода,

математическая модель которой достаточно подробно рассмотрена в статье, может быть изготовлена на заводе, а затем доставлена на место установки и там же смонтирована, что существенно уменьшает конечную стоимость сооружения и делает его выгодным решением, например, для устройства транспортных развязок в различных уровнях в населенных пунктах и на наиболее загруженных транспортных направлениях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние высокочастотного нагружения на структуру малоуглеродистой стали / Е. А. Гридасова [и др.] // Наука и техника транспорта. 2017. № 2. С. 82–91.
2. Изменение структуры малоуглеродистой стали при высокочастотных воздействиях / Е. А. Гридасова [и др.] // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2017. Т. 11. № 11. С. 30–36.
3. Программный комплекс «МИРАЖ» для расчета конструкций на ПК. Инструкция пользователя. Киев: НИИАСС, 1995. 420 с.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 543 с.
5. Методика определения внешних дефектов сооружения путем анализа серии его изображений в системе мониторинга / А. А. Локтев [и др.] // Вестник МГСУ. 2015. № 3. С. 7–16.
6. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений / А. С. Гордецкий [и др.]. Киев: Факт, 2005. 344 с.
7. Динамический расчет зданий и сооружений / под ред. Б. Г. Коренева и И. М. Рабиновича. М.: Стройиздат, 1984. 303 с. (Справочник проектировщика).
8. 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 (274). С. 28–31.
9. Бабкова Н. Мостостроение: современные технологии // САПР и графика. 2012. № 2 (184). С. 50–52.
10. Поляков В. Ю. Синтез оптимальных пролетных строений для высокоскоростной магистрали // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. № 3 (266). С. 35–42.
11. Rossikhin Yu. A., Shitikova M. V., Loktev A. A. The analysis of thin-walled building structures subjected to impact excitation // Proceedings of the 4th International Ph.D. Symposium in Civil Engineering. Munich, 2002. P. 487–492.
12. Моделирование мостотоннеля для пропуска легкового транспорта через объекты инфраструктуры / А. А. Локтев [и др.] // Наука и техника транспорта. 2017. № 1. С. 73–78.
13. Алфимцев А. Н., Локтев Д. А., Локтев А. А. Сравнение методологий разработки систем интеллектуального взаимодействия // Вестник МГСУ. 2013. № 5. С. 200–208.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### ЛОКТЕВ Алексей Алексеевич,

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

### КОРОЛЕВ Вадим Вадимович,

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

### ЛОКТЕВ Даниил Алексеевич,

канд. техн. наук, доцент, кафедра «Инфокоммуникационные технологии», ФГБОУ ВО МГТУ им. Н. Э. Баумана

**ШУКЮРОВ Джалил Рамиз Оглы,**

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

**ГЕЛЮХ Павел Анатольевич,**

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

**ШИШКИНА Ирина Викторовна,**

ассистент, кафедра «Транспортное строительство»,  
ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ)

Статья поступила в редакцию 20.08.2018 г., принята к публикации  
02.11.2018 г.

## Perspective constructions of bridge overpasses on transport main lines

**A. A. LOKTEV<sup>1</sup>, V. V. KOROLEV<sup>1</sup>, D. A. LOKTEV<sup>2</sup>, D. R. SHUKYUROV<sup>1</sup>, P. A. GELYUKH<sup>1</sup>, I. V. SHISHKINA<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGBOU VO RUT (MIIT)),  
Moscow, 127994, Russia

<sup>2</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bauman Moscow State Technical University (FGBOU VO BMSTU)",  
Moscow, 105005, Russia

**Abstract.** When designing bridges on motorways and railways, conventional beam or trussed design schemes of structures made of steel or reinforced concrete are used, but at present there is a significant increase in the speeds of motion of individual vehicles, axial loads and total train weight increase, and temporary intervals between trains. These factors lead to a significant increase in dynamic effects and necessitate the use of non-classical design schemes for artificial structures of transport infrastructure. In this study, it is proposed to take a three-span arch bridge with suspended central span structure as the basis for unified bridge overpass. Such an arrangement will allow changing the design length of the central span in a fairly wide range, reducing the total number of supports with an increase in the total length of the bridge overpass, and using a similar design as a double-track railroad, two- or four-lane motorway bridge. Calculations carried out and the results obtained for calculating displacements, internal forces and stresses in the units and elements of the proposed bridge overpass design allow concluding about the allowable limit values of the values found, sufficiently uniform load of all its main elements, the absence of strongly marked large-scale stress concentrators. Proposed design allows setting different sizes of spans during the design, reducing the number or even avoiding the installation of channel supports, adapting this structure for the passage of both rail and road transport. Design of the bridge, mathematical model of which is described in detail in the article, can be manufactured at the factory, and then delivered to the installation site and mounted there, which significantly reduces the final construction cost and makes it a profitable solution, for example, for arranging railway interchanges at different levels.

**Keywords:** three-span arched bridge; finite element method; defining equations in displacements; stress concentrator; equivalent stresses

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-331-336>

### REFERENCES

1. Gridasova E. A., Nikiforov P. A., Grishin A. V., Tal'skikh K. Yu., Sukhorada A. E. *Effect of high-frequency loading on the structure of low carbon steel*. Science and Technology in Transport, 2017, no. 2, pp. 82–91.
2. Gridasova E. A., Nikiforov P. A., Grishin A. V. *Changes in the structure of low-carbon steel at high-frequency effects*. Vnedrenie sovremennykh konstruktsiy i peredovykh tekhnologiy v putevoe khozyaystvo [Introduction of modern structures and advanced technologies in track facilities], 2017, Vol. 11, no. 11, pp. 30–36.
3. *Software complex "MIRAGE" for the calculation of structures on the PC*. User's Manual. Kyiv, NIIASS Publ., 1995, 420 p. (in Russ.).
4. Zenkevich O. *Finite element method in engineering*. Moscow, Mir Publ., 1975, 543 p.
5. Loktev A. A., Bakhtin V. F., Chernikov I. Yu., Loktev D. A. *Method of determining external defects of a structure by analyzing a series of its images in the monitoring system*. Vestnik MGSU, 2015, no. 3, pp. 7–16.

6. Gorodetskiy A. S., Zavoritskiy V. I., Lantukh-Lyashchenko A. I., Rasskazov A. O. *Finite element method in the design of transport facilities*. Kyiv, Fakt Publ., 2005, 344 p.

7. Korenev B. G., Rabinovich I. M. *Dynamic calculation of buildings and structures*. Designer's Guide. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984, 303 p.

8. Belutskiy I. Yu., Lapin A. V. *Adaptation of the finite element model of the overpass span to the actual operation conditions of the structure*. Structural Mechanics and Analysis of Constructions, 2017, no. 5 (274), pp. 28–31.

9. Babkova N. *Bridge building: modern technologies*. SAPR I graphika [SAPR and graphics], 2012, no. 2 (184), pp. 50–52.

10. Polyakov V. Yu. *Synthesis of optimal spans for high-speed line*. Structural Mechanics and Analysis of Constructions, 2016, no. 3 (266), pp. 35–42.

11. Rossikhin Yu. A., Shitikova M. V., Loktev A. A. *The analysis of thin-walled building structures subjected to impact excitation*. Proceedings of the 4th International Ph.D. Symposium in Civil Engineering. Munich, 2002, pp. 487–492.

12. Loktev A. A., Sychev V. P., Poddaeva O. I., Potapov A. V., Tashkin G. N. *Simulation of a bridge tunnel to pass cars through infrastructure*. Science and Technology in Transport, 2017, no. 1, pp. 73–78.

13. Alfimtsev A. N., Loktev D. A., Loktev A. A. *Comparison of methodologies for developing systems of intellectual interaction*. Vestnik MGSU, 2013, no. 5, pp. 200–208.

### ABOUT THE AUTHORS

**Aleksey A. LOKTEV,**

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department  
"Transport constructions", FGBOU VO RUT (MIIT)

**Vadim V. KOROLEV,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Transport  
constructions", FGBOU VO RUT (MIIT)

**Daniil A. LOKTEV,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department  
"Infocommunication technologies", FGBOU VO BMSTU

**Dzhalil R. SHUKYUROV,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Transport  
constructions", FGBOU VO RUT (MIIT)

**Pavel A. GELYUKH,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department "Transport  
constructions", FGBOU VO RUT (MIIT)

**Irina V. SHISHKINA,**

Assistant, Department "Transport constructions",  
FGBOU VO RUT (MIIT)

Received 20.08.2018

Accepted 02.11.2018

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