

Оценка возможности применения новых конструкций мостотоннелей при строительстве высокоскоростных линий с учетом аэродинамических воздействий и движения транспортных средств



О. И. Поддаева,
к.т.н., доцент,
заведующий Учебно-
научно-производственной
лабораторией по
аэродинамическим
и аэроакустическим
испытаниям строительных
конструкций НИУ МГСУ
(УНПЛААИСК)



В. П. Сычев,
д.т.н., профессор
кафедры «Транспортное
строительство»
Московского
государственного
университета путей
сообщения Императора
Николая II



А. А. Локтев,
д.ф.-м.н., профессор,
заведующий кафедрой
«Транспортное
строительство»
Московского
государственного
университета путей
сообщения Императора
Николая II

Строительство высокоскоростных магистралей требует принципиально нового подхода к проектированию железнодорожного пути. Анализ различных предложений по созданию ВСМ на основе иных, нежели «колесо – рельс» физических явлений [1] показал, что сегодня на практике нет альтернативы железнодорожному пути, обеспечивающему движение колеса по рельсу.

В рамках строительства высокоскоростных магистралей сложнейшей задачей является проектирование внеклассных мостов. Обеспечить на мосту те же скорости, что и вне его, при этом сохраняя возможность унификации конструкций искусственных сооружений и оптимизации проектных решений на ВСМ можно только за счет прорывных технологий [2].

Попытка отойти от традиционных мостовых сооружений была предпринята разными исследователями, например, предлагалось использовать трубчатую дорогу (автор – Robert Pulliam, Tubular Rails, Inc.), которая представляет серию колец, разведенных на возвышении. Состав в виде цилиндра, как правило, опирается на три кольца. В кольцах имеются движители, которые толкают цилиндр вперед [1, 3]. Очевидно, что подобное решение практически реализовать невозможно, однако мысль о создании трубчатой дороги, по нашему мнению, разумная.

Висячей мостовой конструкции (рис. 1), содержащей пилоны 1, несущие тросы 2, растяжки 3 и анкера, пролетное строение выполнено в виде тоннеля 4. При этом он может быть исполнен в двух вариантах:

а) когда экипаж находится внутри тоннеля;

б) когда экипаж находится вне тоннеля и тогда в тоннеле размещается подвижной элемент, связанный с экипажем, который размещается под тоннелем с организацией движения поверху.

Поперечное сечение тоннеля 1 на рис. 2 имеет эллипсовидную форму, нижняя часть которого содержит продольный вырез 2. Его края изогнуты вверх и образуют колею 3 для движения колес экипажа, когда он находится внутри тоннеля, или для движения подвижного элемента, когда экипаж находится вне тоннеля [4, 5]. В предлагаемой конструкции имеется возможность саморегулирования устойчивости движения экипажа или подвижного элемента за счет подуклонки колеиной части тоннеля.

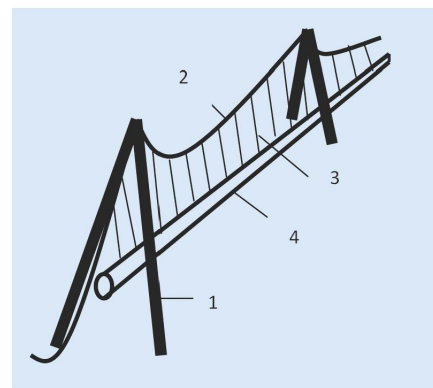


Рис. 1. Общий вид мостотоннеля: 1 – пилоны; 2 – несущие тросы; 3 – растяжки; 4 – пролетное строение

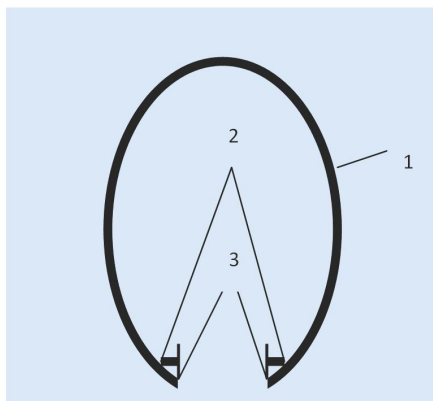


Рис. 2. Поперечный разрез тоннельной части:

- 1 – поперечное сечение тоннеля;
2 – продольный вырез; 3 – колея

Мостотоннель длиной 500 м арочного типа со стрелкой 14 м, выполненный из стальных коробов овоидальной формы с внутренним габаритом 4 м, обеспечивает 7-метровый габарит на протяжении 300 м для пропуска наземного транспорта и максимальный габарит в районе стрелки 10 м. Внутри коробов оборудована проезжая часть из профнастила. В момент воздействия колесной нагрузки экипажа [6] колесные части тоннеля 3 подуклониваются. Величина подуклонки рассчитывается в зависимости от веса экипажа и приведенного модуля упругости материала тоннеля [7].

Современные мостовые переходы представляют собой крайне сложные с инженерной точки зрения строительные конструкции, требующие особых подходов как при проектировании, так и при эксплуатации. На этапе проекти-

рования большое внимание уделяется расчету устойчивости моста к динамическому воздействию (сейсмическому, ветровому, нагрузки от подвижного состава и пешеходов и др.). При эксплуатации большое внимание уделяется техническому мониторингу состояния мостов, позволяющему оценить воздействие различных негативных факторов, таких как непроектные нагрузки, коррозионные процессы, а также возникновение и развитие дефектов.

В данной статье остановимся подробнее в том числе на одном из основных факторов, влияющих на строительство и проектирование современных большепролетных мостовых переходов, – учет ветрового воздействия. Действующие отечественные и зарубежные документы, регламентирующие учет ветровой нагрузки при проектировании мостовых конструкций, предписывают проведение экспериментальных исследований ветрового воздействия в специализированных аэродинамических трубах архитектурно-строительного типа с длиной рабочей части более 15 м, что позволяет моделировать атмосферный приземный слой в соответствии с условиями реальной площадки строительства и особенностями рельефа (рис. 3–6).

Такие испытания входят в число самых трудоемких и сложных с научной точки зрения в области строительной аэродинамики и, соответственно, требуют от исследователей высочайшей квалификации. В первую очередь, это объясняется сложностью изготовления макета. В отличие от классических аэро-

динамических макетов зданий и сооружений, тут требуется помимо геометрического подобия точно воспроизвести все частотные и массово-инерционные характеристики, чтобы при проведении испытаний динамическое поведение макета соответствовало поведению реального объекта [7, 8].

Существует ряд различных вариантов проведения исследований ветрового воздействия на мосты, таких как испытания:

- отсеченной модели пролетного строения;
- модели моста на стадии строительства;
- полной модели моста.

Наиболее распространен первый вариант. На стадии проектирования и изготовления макета в данном случае моделируется, как правило, центральный участок пролетного строения исследуемого объекта. Для проведения испытаний требуется специализированный стенд, содержащий пружинные подвесы, на которых закрепляется макет. Пружины выбираются таким образом, чтобы смоделировать основные частотные характеристики – собственные частоты колебаний и уровень демпфирования мостовой конструкции [8, 9]. Результатом исследований являются графики зависимости колебаний макета от скорости ветра, что позволяет выявить большинство проявлений аэродинамической неустойчивости (вихревой резонанс, галопирование, флаттер и т. д.), и дать рекомендации по изменению формы пролетного строения или установке



Рис. 3. Аэродинамическая труба НИУ МГСУ

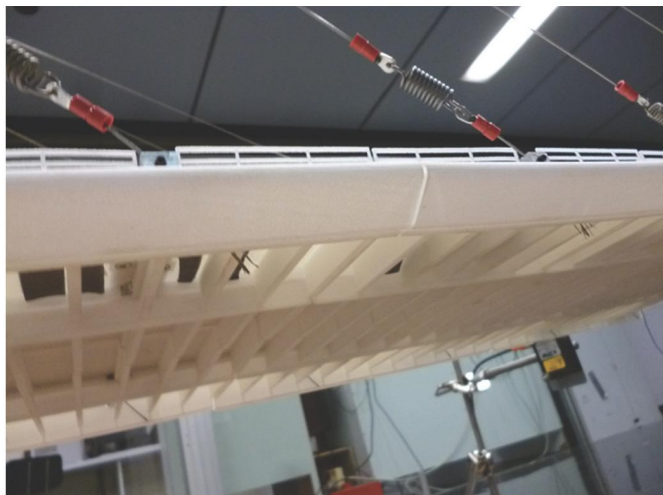


Рис. 4. Фрагмент макета вантового моста

дополнительных демпфирующих устройств.

Второй вариант исследований актуален для большепролетных мостовых конструкций, возводимых методом надвигки, когда пролетное строение (или его часть) собирают на насыпи подхода или подмостях, сооруженных по оси моста, а затем надвигают в пролет по специальным накаточным устройствам. Наиболее опасным с точки зрения аэродинамики является момент максимального вылета консоли пролетного строения перед его соединением с опорой. Именно эта ситуация и моделируется в аэродинамической трубе [10]. Основной задачей здесь является исследование характера колебаний вывешенной консоли и выявление амплитуд колебаний, превышающих предельно допустимые значения. Помимо этого исследуется ветровая нагрузка на пилон или опору мостовой конструкции.

И наконец, последний тип – испытания полной модели моста – является наиболее сложным и трудоемким, так как необходимо моделировать не какой-то отдельный участок исследуемого объекта, а всю мостовую конструкцию в целом, с учетом массово-инерционных и частотных характеристик всех ее элементов. В то же время это позволяет получить наиболее полную картину о ветровом воздействии. Такие испытания проводятся крайне редко, учитывая их высокую стоимость и сроки выполнения, и в основном для уникальных объектов, серьезно отличающихся от существующих и/или расположенных в районах, неблагоприятных с точки зрения ветровых режимов.

На территории развитых стран работает множество лабораторий, активно занимающихся аэродинамическими испытаниями строительных конструкций. Это как традиционные европейские научно-исследовательские центры, имеющие большой опыт в данной области (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Rowan Williams Davies and Irwin Inc. (RWDI), Politecnico di Milano, и др.), так и сравнительно молодые лаборатории.

В России исследования ветрового воздействия на строительные конструкции, в том числе мостовые, долгое время проводились в аэродинамических трубах, предназначенных для испытания аэрокосмических аппаратов, имеющих ряд существенных отличий от труб архитектурно-строительного типа, что влияет на результат исследований. В последнее десятилетие эта тенденция изменилась, и при поддержке государства было создано несколько лабораторий, оснащенных

требуемым оборудованием и имеющих в своем составе квалифицированный персонал. Одной из них является Учебно-научно-производственная лаборатория по аэродинамическим испытаниям строительных конструкций на базе Национального исследовательского Московского государственного строительного университета. Сотрудники лаборатории провели комплексное исследование аэродинамической устойчивости вантового моста через Корабельный фарватер в г. Санкт-Петербурге.

Аэродинамические испытания мостовых конструкций являются неотъемлемой частью современного мостостроения. Их своевременное и грамотное проведение позволяет оптимизировать затраты при проектировании, строительстве и эксплуатации, а также способствует повышению надежности конструкций, их долговечности, улучшению эксплуатационных качеств, уменьшению риска причинения вреда человеку и окружающей природной среде.

Расчеты на двойное динамическое воздействие от проходящих транспортных средств и от ветровых потоков, вызванные расположением основных конструкций мостотоннеля на существенной высоте и размерами несущих пилонов сооружения, проводились в работе [8]. Расчеты ветровых потоков и воздействий на большепролетные мостовые сооружения сводились к решению трехмерных нестационарных нелинейных уравнений гидрогазодинамики с учетом вязкости в постановке Навье – Стокса:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Определяющие уравнения (1) были решены с учетом уравнений неразрывности и состояния:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} &= 0 \\ p &= \rho RT \end{aligned} \quad (2)$$

В выражениях (1)–(3) приняты следующие обозначения u, v, w – искомые компоненты вектора скорости (по осям x, y, z), p – давление, t – время, μ – динамический коэффициент вязкости для воздуха, ρ – плотность, R – универсальная газовая постоянная, T – температура.

При решении уравнений (1)–(3) для упрощения используемых вычислительных алгоритмов предполагалось, что ветровые потоки несжимаемы ($\rho = const$) и изотермически, также не учитывались массовые силы. Использовались различные модели турбулентности, позволяющие снизить вычислительную сложность задачи за счет введения некоторых упрощающих предположений.

Моделирование крупных вихрей (LES, Large Eddy Simulation) происходит с помощью полуэмпирического подхода, основанного на разложении скорости на осредненную во времени и пульсационную составляющие $u_i(t) = \bar{u}_i + u'_i(t)$ и на переходе к решению осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes Method, RANS). При этом мелкомасштабная турбулентность, содержащая меньше рейнольдсовых напряжений, в расчете не учитывается.

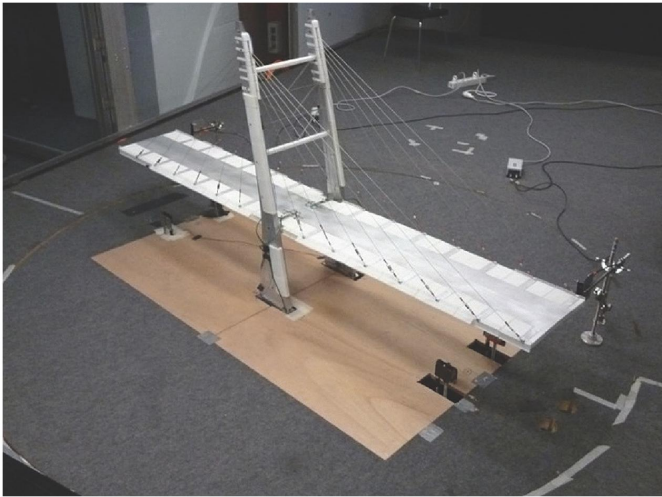


Рис. 5. Макет вантового моста на стадии строительства.

Непосредственно численная реализация предлагаемой модели происходит в программном комплексе ANSYS Mechanical, который является универсальным многоцелевым конечно-элементным ПК.

Результаты расчетов для стационарной и нестационарной постановки задачи с различными моделями турбулентности при движении экипажа по мостотоннелю, приведенные в [8], позволили получить для мостотоннеля зависимость аэродинамического коэффициента от угла атаки ветра.

Для обеспечения возможности практического использования предлагаемой конструкции мостотоннеля для высокоскоростных линий необходимо решить задачу обеспечения прочности и устойчивости оболочки мостотоннеля при ударном воздействии волны от движущегося транспортного средства. Важным аспектом при решении такой задачи является не только определение параметров поведения оболочки мостотоннеля при динамическом воздействии на него, но и создание систем гашения колебаний и ударных всплесков, которые могут быть при различных сочетаниях внешних и внутренних нагрузок [11, 12]. Физически данную задачу можно представить, разместив между транспортным средством и оболочкой мостотоннеля изолятор, состоящий из вязких и упругих элементов, связанных между собой в разном порядке. Также изолятор может содержать некий элемент управления, который способен генерировать направленное силовое воздействие навстречу начальному динамическому воздействию [12, 13]. При этом предположим, что изолятор не теряет устойчивости в процессе взаимодействия, обеспе-

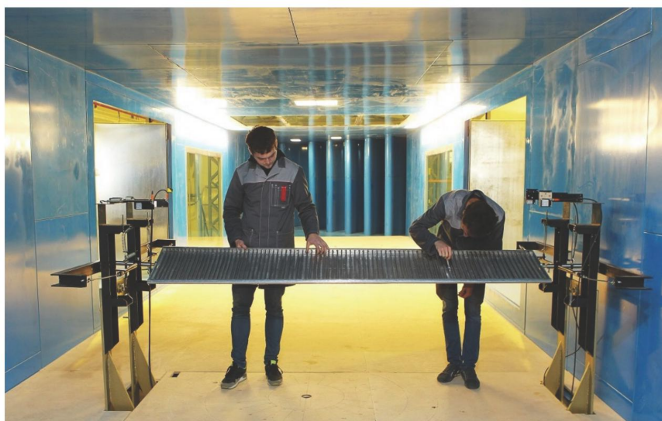


Рис. 6. Макет пролетного строения моста в специализированном стенде НИУ МГСУ.

чивая прямолинейное давление колеса на оболочку.

В качестве вязкоупругих элементов используем элементы типа Кельвина – Фойгта и Максвелла. Движение колеса экипажа и мишени (оболочки мостотоннеля) в вертикальном направлении после начала контакта для модели вязкоупругого тела типа Кельвина – Фойгта описывается [14] системами дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} m_1 (\ddot{x} + \ddot{z}) + K (\dot{x} - \dot{y}) + C (x - y) &= 0 \\ m_2 (\ddot{y} + \ddot{z}) + K (\dot{y} - \dot{x}) + C (y - x) &= F \end{aligned} \quad (4)$$

Для модели Максвелла справедливые уравнения движения примут следующий вид:

$$\begin{aligned} m_1 (\ddot{x} + \ddot{z}) - K \int_0^t (\dot{x} - \dot{y}) e^{-\frac{t-t'}{\tau_1}} dt' + C (x - y) &= 0 \\ m_2 (\ddot{y} + \ddot{z}) - K \int_0^t (\dot{y} - \dot{x}) e^{-\frac{t-t'}{\tau_1}} dt' + C (y - x) &= F, \end{aligned} \quad (5)$$

где m_1 и m_2 – массы колеса и части оболочки под зоной контакта, соответственно;

x и y – координаты ударника и мишени относительно верхней точки изолятора; z – координата верхней точки изолятора относительно инерциальной системы отсчета;

K – коэффициент вязкого сопротивления гидравлического демпфера (вязкого элемента);

C – коэффициент жесткости упругого элемента;

F – управляющая сила, приложенная к оболочке со стороны изолятора.

При решении уравнений (4), (5) учитываются следующие начальные условия:

$$x(t=0) = 0, y(t=0) = 0, \dot{x}(t=0) = 0, \dot{y}(t=0) = 0 \quad (6)$$

В качестве критериев работы изолятора предлагается использовать три следующие характеристики: сила, действующая на мишень под изолятором

$$I_1 = \max_{t \in [0, \infty)} P(t), \quad (7)$$

максимальное смещение оболочки

$$I_2 = \max_{t \in [0, \infty)} y(t) \quad (8)$$

ускорение, которое получают точки защищаемой от динамического воздействия оболочки

$$I_3 = \max_{t \in [0, \infty)} \ddot{y}(t). \quad (9)$$

Таким образом, имеются три характеристики, одна из которых – силовая, вторая – геометрическая, третья – кинематическая. Для полного решения задачи противоударной изоляции, для выбора закона изменения управляемой силой F , и способа ее генерации необходимо определить все три критерия изолятора.

Расчет конструкций мостотоннеля будем производить исходя из предположения, что за время ударного взаимодействия волновые и колебательные процессы деформирования мишени не дошли до конца мостотоннеля, т. е. рассматривается достаточно протяженная оболочка относительно размеров колеса транспортного средства. В оболочке условно вырезается полоска единичной длины, которая моделируется балкой. Эта балка, выступающая в качестве мишени, шарнирно опирается по краям на опоры мостотоннеля, т. е. граничные условия можно записать в виде

$$y(x=-l) = y(x=l) = \frac{\partial^2 y(x=-l)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 y(x=l)}{\partial x^2} = 0, \quad (10)$$

где l – полудлина балки.

В качестве начальных условий ударного взаимодействия тел принимаются следующие:

$$y(x,0) = 0, \quad \frac{\partial y(x,0)}{\partial t} = 0. \quad (11)$$

Уравнение поверхности тела в точках начального касания с балкой и их окрестностях должно быть свободно от аналитических особенностей и не должно содержать особых точек, а кривизна ударяющего тела в тех же точках не должна быть равна нулю, иначе невозможно применение расширенной теории Герца [15].

После определения зависимости для прогиба балки можно перейти к определению контактной силы в месте взаимодействия двух тел. Для этого рассмотрим уравнение движения ударника (колеса) после начала контакта:

$$m_1 \frac{d^2 s}{dt^2} = m_1 g - P(t), \quad (12)$$

где $s(t)$ – полное перемещение ударника.

Динамический контакт происходит при соблюдении следующих начальных условий:

$$s(t=0) = 0, \quad \frac{ds(x,0)}{dt} = V_0. \quad (13)$$

В пространстве изображений уравнение (12) с учетом начальных условий (13) примет вид

$$\tilde{P}(p) = -m_1 p^2 \tilde{s}(p) + m_1 p V_0 + m_1 g. \quad (14)$$

Перемещение ударника можно представить в виде

$$s(t) = \alpha(t) + y(a,t), \quad (15)$$

где $\alpha(t)$ – местные деформации материала балки в месте удара, а прогиб $y(a,t)$ вычисляется в месте ударного воздействия.

Зависимость местного смятия и контактной силы определяется при решении контактной задачи и характеризуется механическими и геометрическими параметрами контактирующих тел [16]. В качестве основного чаще всего используется модифицированное соотношение Герца

$$\alpha(t) = b P(t)^q, \quad (16a)$$

или контактная сила в случае вязкоупругого ударника принимает интегральный вид с экспоненциальным ядром релаксации [16]:

$$P(t) = E_1 (\alpha - w) - \frac{E_1}{\tau_1} \int_0^t (\alpha - w) e^{-\frac{t-t'}{\tau_1}} dt', \quad (16b)$$

где $\tau_1 = \frac{\eta_1}{E_1}$,

τ_1 – время релаксации элемента;

t' – переменная интегрирования;

η_1 – коэффициент вязкости гидравлического демпфера, входящего в состав вязкоупругого элемента;

b определяется геометрическими и механическими свойствами соударяющихся тел, для шаровидного ударника:

$$b = \left(\frac{9\pi^2 (k_1 + k_2)^2}{16R} \right)^{1/3}, \quad k_1 = (1 - \sigma_1^2)/E_1, \quad k_2 = (1 - \sigma^2)/E,$$

σ_1, E_1 – коэффициент Пуассона и модуль упругости для ударника,

q – рациональная дробь.

В частности, $q = 2/3$ для начального касания в одной точке и $q = 1 - 1/(2n+1)$ для плотного начального касания, рассмотренного в [17]. Штаерман [17] и ряд других исследователей рекомендуют определять этот параметр экспериментально.

На основании соотношений (15) и (16), записанных в пространстве изображений из уравнения (12), получим

$$\tilde{P}(p) (1 + m_1 p^2 u) = -m_1 p^2 b \tilde{P}(p)^q + m_1 p V_0 + m_1 g. \quad (17)$$

Для решения уравнения (17) можно использовать алгоритм последовательных приближений [6], для этого выражение (17) удобно переписать в виде

$$\tilde{P}(p) (1 + m_1 p^2 u) = -m_1 p^2 b \tilde{P}(p)^q + m_1 p V', \quad (18)$$

где $V' = V_0 + \frac{g}{p}$.

Отсюда получаем рекуррентную формулу для $\tilde{P}(p)$

$$\tilde{P}(p) = \left(\frac{V'}{bp} \right)^{\frac{1}{q}} \left[1 + (1 + m_1 p^2 u) \frac{V'^{\frac{1}{q}-1}}{m_1 p (pb)^{\frac{1}{q}}} \left(1 + (1 + m_1 p^2 u) \frac{\tilde{P}(p)^{1-q}}{b m_1 p^2} \right)^{\frac{1}{q}-1} \right]^{\frac{1}{q}}. \quad (19)$$

Если положить в правых частях равенств (17) $\tilde{P} = 0$, то получим приближения для контактной силы соответствующего порядка [18], который определяется степенью вложенности, т. е. количеством представлений $\tilde{P}(p)^{1-q}$ с помощью самого же выражения (17).

Указанный алгоритм приводит к вычислению корней кубического характеристического уравнения [19], определяющего соотношение $P^*(p)$ единственно удовлетворяющим физическим условиям задачи.

При использовании последовательной модели изолятора уменьшение контактной силы более существенно и вязкоупругие свойства демпфера влияют в большей степени на конечные динамические характеристики, в то время как при наличии параллельного вязкоупругого элемента в изоляторе упругость и вязкость связаны между собой одинаковой деформацией и таким образом ограничивают влияние друг друга на конечные характеристики удара. Но в реальных противоударных изоляторах возможно использование обеих моделей соединения упругого и вязкого элемента. Эффективность конструктивного решения при этом будет зависеть от времени ударного взаимодействия, от повторяемости динамической нагрузки и от способа восстановления первоначальной формы изолятора после первого удара.

На рис. 7 изображены нормальные ускорения сечений мостотоннеля относительно времени с начала взаимодействия на конструкцию экипажа для случаев использования изолятора с вязкоупругим элементом Кельвина – Фойгта (кривые 1, 2, 3) и вязкоупругим элементом Максвелла (кривые 4, 5, 6) для различных значений упругого и вязкого параметра изолятора. Графики 1 и 4 получены для случая $C = 105$ Н/м, $K = 108$ Нс/м, графики 2 и 5 соответствуют значениям $C = 105$ Н/м, $K = 105$ Нс/м, графики 3 и 6 – $C = 108$ Н/м, $K = 105$ Нс/м. Остальные параметры взаимодействия принимают следующие значения: $E = 2,1 \times 10^5$ МПа, $q = 2/3$, $m = 3000$ кг, $V_0 = 8$ м/с, $l = 25$ м, тип профиля – v_0 двутавр № 40.

Из сравнения графических зависимостей для ускорения точек мишени в области взаимодействия тел (рис. 7) следует, что максимальные ускорения мишени соответствуют изолятору с вязкоупругим элементом Кельвина – Фойгта. Кроме того, время их возникновения существенно меньше, чем для элемента Максвелла, для которого характерны в целом более

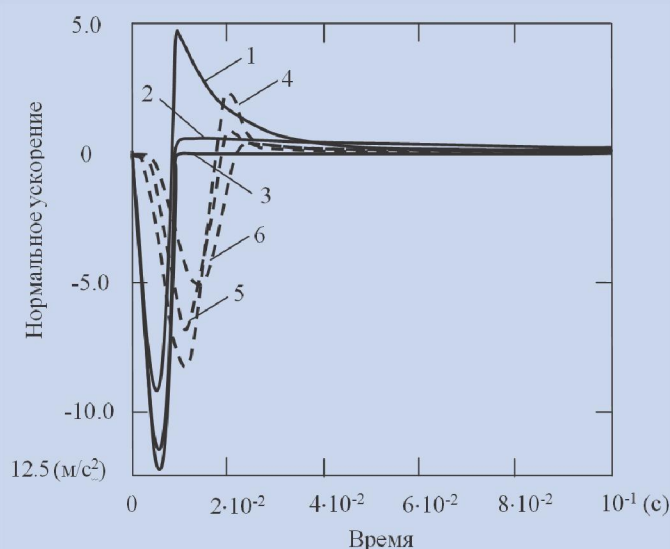


Рис. 7. Зависимость нормального ускорения от времени для различных значений упругих и вязких характеристик изолятора

плавные кривые, которые имеют максимальные значения сильнее разнесенных во времени в зависимости от параметров упругости и вязкости.

Приведенные на рис. 7 зависимости позволяют воспользоваться качественными параметрами, вычисляемыми по формулам (7)–(9), и сделать вывод о том, что при проектировании реальных изоляторов и гасителей динамических колебаний имеет смысл использовать элементы Кельвина-Фойгта и Максвелла вместе, подбирая параметры вязкости и упругости в зависимости от прогнозируемых характеристик динамического воздействия и параметров движения транспортного средства. При этом эффективность конструктивного решения будет зависеть от времени взаимодействия экипажа и оболочки конструкции, цикличности пропуска транспортных средств и от способа восстановления первоначальной формы изолятора.

Таким образом, можно сделать вывод, что расчеты на устойчивость мостотоннеля от ветровых нагрузок вне мостотоннеля и ударных волновых нагрузок от движения экипажа внутри мостотоннеля показывают принципиальную возможность применения предлагаемой конструкции мостового перехода при проектировании железнодорожных эстакад, мостов и путепроводов для высокоскоростных магистралей. ■

Литература:

1. Потапов А.В., Сычев В.П. Основные направления развития транспортных систем // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2016. Т. 10, № 10 (10). С. 129–133.
2. Проекты высокоскоростных магистралей. — URL: gzd-expo.ru/innovation/high_speed_traffic_and...
3. Novel Modes Workshop. — URL: <http://www.rita.dot.gov/sites/default/files/NovelModesWkshop-web.pdf>.
4. Тоннель – мост. — URL: <http://www.mining-enc.ru/t/tonnel-most>.
5. Асмолов В. А. Мост тоннельного типа (RU 2012706). — URL: <http://www.findpatent.ru/patent/201/2012706.html>.
6. Потапов А. В., Сычев В. П. Мостовое сооружение, заявка на пат. № 2015149035 от 16.11.2015 г. Заявитель АНО Институт проблем управления транспортной инфраструктурой.
7. Климатологическое исследование ветрового воздействия на

метеорологической станции «Невская-порт» ЛЕНТИСИЗ, 2006.

8. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*, М., 2011.
9. Потапов А. В., Сычев В. П., Локтев А. А., Поддаева О. И. Мостотоннель для пропуска легкового транспорта через объект транспортной инфраструктуры // Этика, транспорт и устойчивое развитие: социальная роль транспортной науки и ответственность ученых: Междунар. конф. ЮНЕСКО / под общ. ред. д.и.н., проф. И. В. Карапетянц, д.ф.-м.н., проф. Г. Г. Малинецкого. М.: Агентство интеллектуальной собственности на транспорте, (АИСНТ), 2016. — С. 184–190.
10. Сычева А. В., Сычев В. П., Бучкин В. А., Быков Ю. А. Моделирование работы железнодорожного пути как системы квазиупругих ортотропных слоев // Вестн. МГСУ. 2016. № 3. С. 37–46.
11. Churin P.A., & Poddaeva O.I. Aerodynamic testing of bridge structures // Appl. Mechanics and Materials. 2014. № 477. P. 817–821.
12. Локтев А. А., Сычева А. В. Моделирование работы железнодорожного пути // Путь и путевое хозяйство. 2014. № 7. С. 10–12.
13. Тимошенко С. П. Прочность и колебания элементов конструкций. М.: Наука. Физматлит, 1975. 704 с.
14. Локтев А.А. Ударное взаимодействие твердого тела и упругой ортотропной пластинки // Механика композиционных материалов и конструкций. 2005. Т. 11, № 4. С. 478–492.
15. Вершинин В. В., Локтев А. А. Моделирование систем противударной изоляции с вязкоупругими элементами // Вестн. МГТУ им. Баумана. Сер. Естественные науки. 2012. № 2 (42). С. 52–67.
16. Лурье А. И. Операционное исчисление и его приложение к задачам механики. М.: Л.: Гостехиздат, 1951. 534 с.
17. Баландин Д. В., Болотник Н. Н. Оптимизация параметров противударных изоляторов для системы с двумя степенями свободы // Изв. РАН. МТТ. 2003. №3. С. 57–74.
18. Штаерман И. Я. К теории Герца местных деформаций при сжатии упругих тел // ДАН СССР. 1939. № 25. С. 5.
19. Локтев А.А., Вершинин В.В. Моделирование систем противударной изоляции с ограничением рабочих характеристик // Вестник Пермского государственного технического университета, № 1, 2011. — С. 45-53
20. Локтев А. А., Вершинин В. В. Расчет противударного изолятора с ограничением рабочих характеристик // Вестн. МГСУ. 2011. № 4. С. 35–40.