

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2018, №1, Том 5 / 2018, No 1, Vol 5 <https://t-s.today/issue-1-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/15SATS118.pdf>

DOI: 10.15862/15SATS118 (<http://dx.doi.org/10.15862/15SATS118>)

Статья поступила в редакцию 19.02.2018; опубликована 11.04.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Локтев А.А., Сычев В.П., Степанов Р.Н., Локтев Д.А. Построение математической модели перспективной конструкции мостотоннеля для пропуска легкового автотранспорта // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №1, <https://t-s.today/PDF/15SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/15SATS118

For citation:

Loktev A.A., Sychev V.P., Stepanov R.N., Loktev D.A. (2018). Construction of a mathematical model of the perspective design of the bridgetunnel for passenger vehicles. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/15SATS118.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/15SATS118

УДК 539.3, 625.03

Локтев Алексей Алексеевич

ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия
Заведующий кафедрой «Транспортное строительство»
E-mail: aaloktev@yandex.ru

Сычев Вячеслав Петрович

ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия
Профессор кафедры «Транспортное строительство»
E-mail: vp@vpm770.ru

Степанов Роман Николаевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
Москва, Россия
Доцент кафедры «Строительная и теоретическая механика»
Кандидат технических наук
E-mail: rnstepanov@gmail.com

Локтев Даниил Алексеевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
Москва, Россия
Ассистент кафедры «Строительная и теоретическая механика»
Кандидат технических наук
E-mail: loktevdan@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=708990

Построение математической модели перспективной конструкции мостотоннеля для пропуска легкового автотранспорта

Аннотация. В настоящей работе для пропуска легкового автотранспорта предлагается разработать модель мостотоннеля цилиндрического типа и обосновать возможность его применения по критериям устойчивости от ветровых нагрузок и ударной волны внутри оболочки с возможностью установки изоляторов, демпфирующих динамические воздействия как со стороны транспортных средств, так и со стороны ветровых аэродинамических потоков.

Для обеспечения возможности практического использования мостотоннеля для реальных транспортных средств выполняется постановка задачи обеспечения прочности и устойчивости оболочки мостотоннеля при динамическом взаимодействии волны от движения экипажа и решается данная задача в первом приближении, вполне достаточном для начала детальной проработки конструкций предлагаемого сооружения транспортной инфраструктуры. Особенностью расчетов данного сооружения является необходимость учета двойного динамического воздействия: от проходящих транспортных средств и от ветровых потоков. Расчеты ветровых потоков и воздействий на мостовые сооружения в работе сводятся к решению трехмерных нестационарных нелинейных уравнений гидрогазодинамики с учетом вязкости в постановке Навье-Стокса. Задача воздействия транспортного средства на оболочку конструкции мостотоннеля ставится таким образом, что между ударником и мишенью располагается изолятор, состоящий из вязкого и упругого элементов, которые в различных комбинациях могут гасить колебательные движения сооружения.

Ключевые слова: мостовое сооружение; уравнение Навье-Стокса; вязкоупругая модель взаимодействия; модель типа Кельвина-Фойгта; модель типа Максвелла; динамическое воздействие

Введение

Строительство транспортных магистралей в условиях плотной городской застройки требует принципиально нового подхода к проектированию объектов инфраструктуры [1]. В процессе проектирования транспортных магистралей частично решены задачи создания номенклатуры унифицированных пролетных строений, например, предложены: пролетные строения коробчатого типа из предварительно напряженного железобетона, сталежелезобетонные, унифицированные по габаритным параметрам в том числе в вариантах с безбалластным верхним строением пути и для традиционной конструкции пути на балласте, включая разрезные и сборные, монолитные длиной 34,2 м, 23,6 м, сталежелезобетонное композитное 50 метров и т. д. [2]; разрезное из предварительно напряженного железобетона сборное (изготавливаемое на полигоне) полной длиной 34,2 м; разрезное из предварительно напряженного железобетона монолитное (изготавливаемое в проектном положении) полной длиной 34,2 м; разрезное сталежелезобетонное (композитное) (изготавливаемое в проектном положении) полной длиной 34,2 м.

Состояние проблемы

В отечественной и зарубежной инженерной практике известен [3-5] мост тоннельного типа, содержащий насыпи подходов, пролетное строение, устои, выполненные в виде подпорных стенок, опирающихся на основание, выполненное в виде высокого свайного ростверка. Каждый устой снабжен защитным экраном Г-образной формы. Экран при этом шарнирно соединен с нижней частью подпорной стенки, а горизонтальная полка экрана опирается на плиту ростверка соответствующей подпорной стенки. Так же экран соединен шарнирно гибкой тягой с верхней частью подпорной стенки и дополнительной тягой, которая крепится параллельно гибкой тяге к средней части подпорной стенки. Эти идеи о создании мост-тоннель нашли применение в предложении создания мостотоннеля для пропуска легкового транспорта в условиях насыщенного городского движения при этом был разработан проект арочного мостотоннеля. Конструкция мостотоннеля имеет мировую новизну (заявка на изобретение №2015149035 от 16.11.2015 г.) [3]. Архитектурно-планировочная композиция выполнена следующим образом: профиль в виде арки (см. рис. 1), план в Х – образном виде. Конструкция мостотоннеля подразумевает разделение встречных потоков автомобилей по

двум коробам, при этом обеспечивается необходимая безопасность эксплуатации. Мостотоннель оборудован системами пожаротушения и аварийной эвакуации автомобилей. Висячей мостовой конструкции (рис. 1), содержащем пилоны (1), несущие тросы (2), растяжки (3) и анкера, пролетное строение выполнено в виде тоннеля (4), при этом тоннель может быть исполнен в двух вариантах: а) когда экипаж находится внутри тоннеля; б) когда экипаж находится вне тоннеля, тогда в тоннеле размещается подвижной элемент, связанный с экипажем, который находится под тоннелем с организацией движения поверху. Поперечное сечение тоннеля имеет эллипсоидную форму (рис. 2) (1), нижняя часть которого имеет продольный вырез (2), края его изогнуты вверх и образуют колею (3) для движения колес экипажа, когда экипаж находится внутри тоннеля. Мостотоннель длиной 500 метров, арочного типа со стрелкой 14 метров, выполнен из стальных коробов овоидальной формы с внутренним габаритом 4 м, обеспечивает 7 метровый габарит на протяжении 300 м для пропуска наземного транспорта, максимальный габарит в районе стрелки 10 м, внутри коробов оборудована проезжая часть из профнастила. Величина подуклонки рассчитывается в зависимости от веса экипажа и приведенного модуля упругости материала тоннеля [5].

Постановка задачи

Особенностью настоящего исследования является необходимость проведения расчетов 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 [6]. 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 выполнения уравнений неразрывности и состояния:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$p = \rho RT. \quad (3)$$

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.

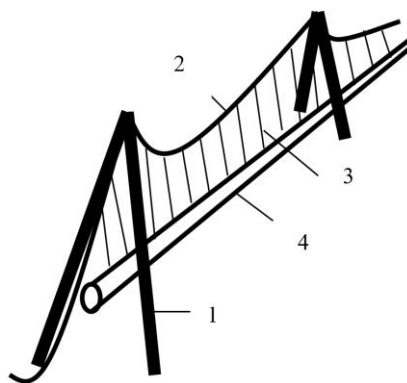


Рисунок 1. Общий вид мостотоннеля: 1 – пилоны; 2 – несущие тросы; 3 – растяжки; 4 – пролетное строение

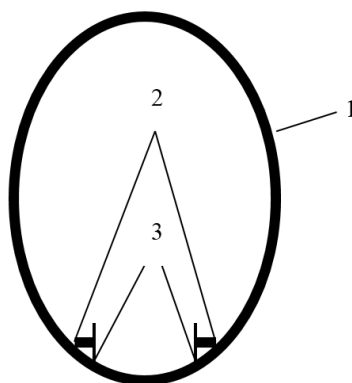


Рисунок 2. Поперечный разрез тоннельной части: 1 – поперечное сечение тоннеля; 2 – продольный вырез; 3 – колея

При этом для упрощения моделирования ветровые потоки предполагались несжимаемыми ($\rho = const$) и изотермическими, а массовые силы не учитывались. Применялось прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation, DNS), суть которого в решении полных трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса, с использованием различных моделей турбулентности, снижающих вычислительную сложность задачи за счет введения некоторых упрощающих предположений и позволяющие получать решение с приемлемой для практических приложений точностью. При моделировании крупных вихрей (LES, Large Eddy Simulation) использовались специальные фильтры при выводе уравнений для разрешаемых масштабов. Мелкомасштабная турбулентность являющаяся слабой и содержащая меньше рейнольдсовых напряжений, чем крупномасштабные вихревые структуры исключается из расчета. Применялся полуэмпирический подход, основанный на разложении скорости на осредненную во времени и пульсационную составляющие $u_i(t) = \bar{u}_i + u'_i(t)$ и переходе к решению т. н. "осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса" (Reynolds Averaged Navier-Stoks Method, RANS). Все упомянутые подходы к моделированию турбулентности реализованы с помощью программного комплекса (ПК) ANSYS Mechanical, который является универсальным многоцелевым конечноэлементным программным комплексом.

Однако расчет ветровую нагрузку мостотоннеля является необходимым, но не достаточным условием для проектирования предлагаемой конструкции. Экипаждвигающийся со значительной скоростью в полузамкнутой оболочке, которой является мостотоннель, создает ударную волну, вызывающую динамические воздействия на оболочку мостотоннеля.

Необходимо определить силу удара воздушной волны взаимодействия с оболочкой мостотоннеля и динамический прогиб оболочки, проведя сравнительный анализ динамических характеристик волновых уравнений мишени, которой является оболочка мостотоннеля [7-10].

Задача состоит в том, чтобы учесть растяжение-сжатие срединной поверхности мишени и исследовать анизотропные свойства мишени при нормальном осесимметричном ударе, предложив при необходимости для уменьшения силы взаимодействия в месте контакта ударника (воздушного удара) конструкции (оболочки) применить нелинейно-упругий буфер.

Задачи связаны перемещениями точек в зоне взаимодействия, которые определяются из функционального уравнения Тимошенко [11]

$$y(t) = V_0 t - \frac{1}{m_0} \int_0^t P(t_1)(t-t_1) dt_1 \quad (4)$$

где $y(t) = \alpha(t) + w(t)$ – полное перемещение ударника, $\alpha(t)$ – местное смятие материала оболочки в месте контакта с транспортным средством, $w(t)$ – динамический прогиб мостотоннеля в месте контакта, m – масса экипажа, t – время, отсчитываемое с момента касания экипажа и оболочки в заданном месте, t_1 – переменная интегрирования. Для решения уравнения (4) необходимо выразить все неизвестные величины входящие в него через одну, в качестве которой обычно используется сила взаимодействия в месте контакта. Зависимость $\alpha(t)$ от $P(t)$ определяется из решения контактной задачи, а зависимость $w(t)$ от $P(t)$ из решения уравнений типа Уфлянда-Миндлина для ортотропной оболочки, учитывающих инерцию вращения поперечных сечений и деформацию поперечного сдвига [12].

Метод решения

Однако вопрос идет не столько в определении динамических воздействий на оболочку, но и на создание противоударных систем и так называемых изоляторов, обеспечивающих защиту этой оболочки. Математически задача ставится таким образом, что между ударником, в качестве которого представляется колесо экипажа, и мишенью, которой моделируется проезжая часть искусственного сооружения и конструкции верхнего строения пути, должен стоять изолятор, состоящий из вязкого упругого элемента и элемента управления, который может генерировать некоторую силу противодействия начальному воздействию. Примем условное допущение, что колесо и точки пролетного строения, расположенные непосредственно под областью контакта, могут двигаться прямолинейно вдоль одной и той же прямой, т. е. не происходит потери устойчивости условного буфера, с помощью которого моделируется сам контакт. Движение колеса и участка пролетного строения после начала взаимодействия в выбранной точке конструкции для вязкоупругого контакта, параметры которого можно представить в виде соотношений типа Кильвина-Фойгта, относительно неподвижного основания [12] описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{x} + \ddot{z}) + K(\dot{x} - \dot{y}) + C(x - y) &= 0 \\ m_2(\ddot{y} + \ddot{z}) + K(\dot{y} - \dot{x}) + C(y - x) &= F \end{aligned} \quad (5)$$

если же за основу взять вязкоупругое тело типа Максвелла, то определяющие соотношения могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned}
 m_1(\ddot{x} + \ddot{z}) - K \int_0^t (\dot{x} - \dot{y}) e^{-\tau_1(t-t')} dt' + C(x - y) &= 0 \\
 m_2(\ddot{y} + \ddot{z}) - K \int_0^t (\dot{y} - \dot{x}) e^{-\tau_1(t-t')} dt' + C(y - x) &= F
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

где m_1 и m_2 – массы экипажа и части пролетного строения соответственно, x и y – координаты транспортного средства и части пролетного строения относительно верхней точки буфера, моделирующего контакт, z – координата верхней точки буфера, моделирующего контакт, относительно инерциальной системы отсчёта, K – коэффициент линейного сопротивления, зависящий от скорости воздействия (>0), C – коэффициент приведенной жесткости линейно упругого элемента (>0), F – управляющая сила, приложенная к части пролетного строения со стороны буфера, моделирующего контакт. Однако модели вязкоупругого тела типа Максвелла в данной работе рассматривать не будем, поскольку они являются, по сути, моделями с неустановившимся течением, т. е. для восстановления первоначальных геометрических размеров буфера необходимо внешнее воздействие. При этом рассматривается не мгновенный удар, т. е. контактная сила достигает своего максимального значения через какое-то время после касания колесом заданной области пролетного строения. Для решения системы уравнений (5) необходимо задаться начальными условиями, определяющими геометрические и кинематические параметры системы тел в момент времени $t = 0$

$$x(t=0) = 0, y(t=0) = 0, \dot{x}(t=0) = 0, \dot{y}(t=0) = 0
 \tag{7}$$

Вертикальное ускорение \ddot{z} фактически показывает интенсивность внешнего динамического воздействия в верхней точке буфера и является функцией времени, при этом можно задаться режимом движения транспортного средства и наличием дефектов верхнего строения пути. Для определения параметров поведения и состояния конструкции мостотоннеля необходимо задаться геометрическими, кинематическими и силовыми характеристиками, в настоящей работе, определим динамический прогиб (вертикальное перемещение) точек пролетной конструкции под колесной парой транспортного средства, который позволит увидеть картину деформирования конструкции под подвижным составом с течением времени,

$$I_1 = \max_{t \in [0, \infty]} y(t)
 \tag{8}$$

Детальное решение задачи противоударного демпфирования и уменьшения неблагоприятных воздействий на объект транспортной инфраструктуры, предполагает определение не только динамического прогиба, но и ускорений точек конструкции в различных направлениях и возникающих сил взаимодействия между экипажем и искусственным сооружением. Подобный тип задач рассматривался в [12], где буфер моделировался вязкоупругим элементом типа Кельвина-Фойгта, при этом рассматривался частный случай мгновенного удара, функция вертикального ускорения при этом менялась по закону $\ddot{z} = -v_0 \delta(t)$, в котором $\delta(t)$ представляет собой единичную дельта-функция Дирака.

В настоящем исследовании предлагается модифицировать положения приближенной теории динамического воздействия двух тел типа Сен-Венана на случай поперечного удара колесной пары по конструкциям мостотоннеля, для которых строится решение, учитывающее вынужденные колебания элементов и изменение контактной силы со временем по

гармоническому закону. Одновременно, принимается во внимание, что ударное взаимодействие колеса и пролетного строения носит неупругий характер, при этом зависимость силы взаимодействия от местного смятия в зоне контакта тел не учитывается, так как в задаче динамического демпфирования значения имеет каждая миллисекунда. Для получения аналитической и графической зависимости силы взаимодействия колеса и пролетного строения от времени используем основные положения теории динамического воздействия твердых тел Тимошенко [10]. Временная зависимость $P = P(t)$, полученная в работе [10], может быть взята за основу и в рассматриваемой задаче в начальные времена взаимодействия тел, поскольку скорость движения современных транспортных средств достаточно высока, то целесообразность использования данного соотношения вполне обоснована.

Сделаем предположение, что за время ударного взаимодействия стационарные и нестационарные процессы деформирования пролетного строения не успели дойти до конца мостотоннеля и отразиться от его торцов, т. е. рассматривается достаточно протяженная оболочка, в которой условно вырезана бесконечная балка-полоска. Эта балка-полоска, выступающая в качестве приведенного пролетного строения, шарнирно оперта по краям согласно классической разрезной мостовой схеме. В этом случае к начальным условиям типа (7) можно добавить и граничные условия:

$$y(x=-l) = y(x=l) = \frac{\partial^2 y(x=-l)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 y(x=l)}{\partial x^2} = 0 \quad (9)$$

где l – половина длины балки-полоски, такое представление более удобно поскольку начало координат помещено в центр пролета.

Для однозначного решения системы определяющих уравнений необходимо задаться начальными условиями динамического контакта колесной пары экипажа и балки-полоски, которые могут быть представлены в виде

$$y(x,0) = 0, \quad \frac{\partial y(x,0)}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

Результатом решения рассматриваемой задачи являются аналитические и графические зависимости геометрическим, кинематических и силовых характеристик деформирования пролетного строения или его части под подвижной нагрузкой от экипажа, для получения данных зависимостей используется вычислительный алгоритм, приведенный в [13]. В целом положения используемой теории применимы для случаев динамического воздействия на балку других твердых тел, при выполнении условия вертикальности общей нормали, а также то, что она проходит через центр инерции воздействующего тела, в нашем случае – колесной пары.

Колебательные движения балки-полоски, как элемента мостотоннеля могут быть описаны следующим уравнением

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\frac{\rho}{EI} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{q(x,t)}{EI} \quad (11)$$

где ρ – погонная масса балки-полоски пролетного строения мостотоннеля.

Поскольку функциональное уравнение (11) содержит не только искомую неизвестную величину, но и ее производные по времени и координате, то формально число неизвестных величин увеличивается, для упрощения данного соотношения необходимо избавиться от производной либо по времени с помощью преобразования Лапласа, либо по координате с

помощью условий совместности деформирования. Используем первую из приведенных возможностей, т. е. перепишем уравнение (11) в пространстве Лапласа и при этом неизвестное вертикальное перемещение также представим в пространстве изображений [10]

$$\tilde{y}(x, p) = \frac{2\tilde{P}(p)l^3}{EI\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{p^2 n^4} \sin\left(\frac{n\pi a}{l}\right) \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right), \quad (12)$$

здесь p – параметр преобразования Лапласа, a – координаты точки действия силы $\tilde{P}(p)$, которая представляет собой силу динамического контакта между колесом и пролетным строением, тильда над литерой представляет функцию в пространстве Лапласа. Прямые и обратные соотношения между искомыми функциями в реальном пространстве и пространстве Лапласа приведены в [13]. Можно показать, что граничные и начальные условия в пространстве Лапласа имеют концептуально прежние значения.

Определение временной зависимости вертикального перемещения балки-полоски позволяет перейти к следующему этапу решения задачи, определению силы взаимодействия колеса и пролетной конструкции [14, 15]. Контактная сила входит явным образом в уравнение движения колеса после нала его взаимодействия с балкой-полоской:

$$m_1 \frac{d^2 s}{dt^2} = m_1 g - P(t), \quad (13)$$

где $s(t)$ – полное вертикальное перемещение колеса экипажа.

Учитывая начальные условия [16, 17], в пространстве Лапласа функциональное уравнение (13) может быть представлено в виде

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

Результаты

При использовании последовательного расположения упругого и вязкого элемента в буфере уменьшение силы взаимодействия между двумя телами более существенно, при этом вязкоупругие параметры буфера в большей степени оказывают влияние на итоговые характеристики динамического воздействия [18, 19], в то же время при наличии вязкоупругого буфера с параллельным соединением упругого и вязкого элемента, происходит выравнивание деформации при условии соответствия характерных параметров [20, 21]. В реально существующих демпферах гашения динамических воздействий часто используются несколько вязкоупругих элементов, эффективность того или иного конструктивного решения при этом определяется временем динамического контакта, цикличностью воздействия и способом преобразования геометрической формы буфера в первоначальный вид [18, 21].

На рис. 3 изображены временные зависимости нормальных перемещений точек проезжей части мостотоннеля с начала воздействия на пролетное строение экипажа для случаев использования буфера с элементом типа Кельвина-Фойгта (графики 1, 2, 3) и типа Максвелла (графики 4, 5, 6) для различных величин параметров упругости и вязкости буфера. Графики 1 и 4 построены при $C = 10^4$ Н/м, $K = 10^7$ Нс/м, графики 2 и 5 построены при $C = 10^4$ Н/м, $K = 10^4$ Нс/м, а графики 3 и 6 соответствуют $C = 10^7$ Н/м, $K = 10^4$ Нс/м. Другие характеристики воздействия экипажа на мостотоннель принимают следующие значения: $E = 2.1 \cdot 10^5$ МПа, $q = 2/3$, $m = 1000$ кг, $V_0 = 8$ м/с, $l = 20$ м, балка-полоска представляется двутавром № 30,

построение представленных графиков проводилось с помощью программного комплекса, реализованного в [20-22].

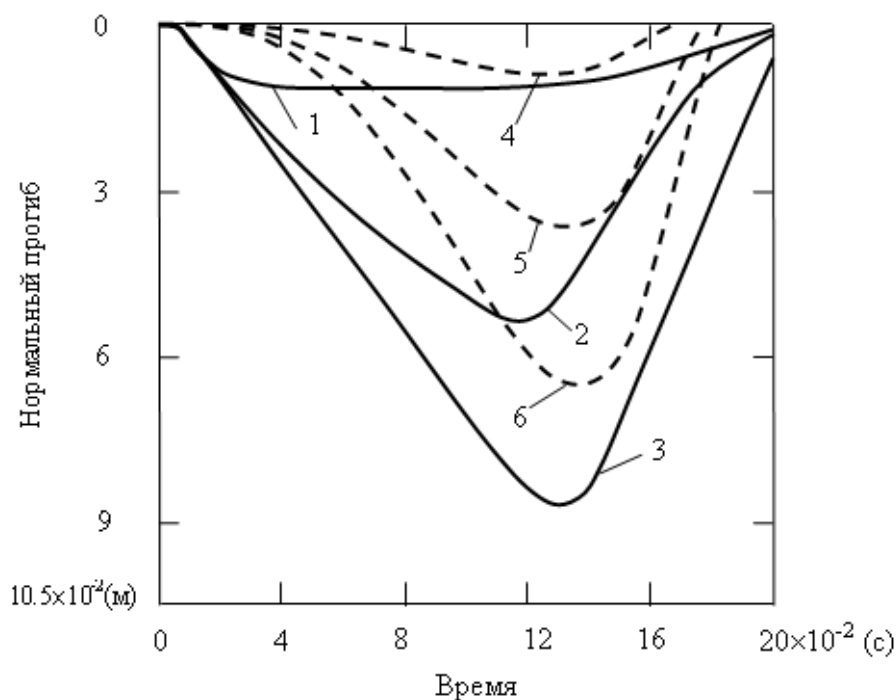


Рисунок 3. Временная зависимость вертикального перемещения точек проезжей части мостотоннеля для различных соотношений параметров упругости и вязкости вязкоупругого демпфера

Заключение

При анализе графических зависимостей на рис. 3 видно, что любая величина отношения характеристик вязкости и линейной упругости буфера типа Максвелла приводит к меньшему вертикальному перемещению проезжей части, чем при буфере типа Кельвина-Фойгта с такими же параметрами вязкости и упругости. Одновременно, сравнение графиков показывает, что для буфера с параллельным соединением вязкого и упругого элемента максимальная величина вертикального перемещения достигается за меньшее время, при большем полном времени контакта, чем для буфера с последовательным соединением вязкого и упругого блока.

Сравнительный анализ результатов численного моделирования позволяет сделать вывод о том, что положительный эффект от использования предлагаемой конструкции мостотоннеля – снижение эксплуатационных затрат, всепогодность эксплуатации мостотоннеля, саморегулирование движения транспортного средства. Проведенные расчеты мостотоннеля на действие ветровых нагрузок вне сооружения и динамических нагрузок от движения экипажа внутри него показывают принципиальную возможность применения предлагаемой конструкции при проектировании эстакад, мостов через водотоки и путепроводов для транспортных магистралей, особенно в стесненных условиях крупных городов.

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. Асмолов В.А. Мост тоннельного типа (RU 2012706): – Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/201/2012706.html>.
3. Потапов А.В., Сычев В.П. Мостовое сооружение, заявка на патент № 2015149035 от 16.11.2015 г. Заявитель АНО Институт проблем управления транспортной инфраструктурой.
4. Потапов А.В., Сычев В.П., Локтев А.А., Поддаева О.И. Мостотоннель для пропуска легкового транспорта через объект транспортной инфраструктуры в сборнике Этика, транспорт и устойчивое развитие: социальная роль транспортной науки и ответственность ученых: Международная конференция ЮНЕСКО / Подобщей редакцией д.и.н., профессора И.В. Карапетянц, д.ф.-м.н., профессора Г.Г. Малинецкого М.: Агентство интеллектуальной собственности на транспорте, (АИСНТ), 2016. – стр. 184-190.
5. Сычева А.В., Сычев В.П., Бучкин В.А., Быков Ю.А. Моделирование работы железнодорожного пути как системы квазиупругих ортотропных слоев // Вестник МГСУ. 2016. № 3. С. 37-46.
6. Локтев А.А., Сычева А.В., Талашкин Г.Н., Степанов К.Д. Разработка математической модели железнодорожного пути переменной жесткости // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2016. Т. 9. № 9 (9). С. 26-38.
7. Локтев А.А., Сычева А.В. Моделирование работы железнодорожного пути // Путь и путевое хозяйство. 2014. № 7. С. 10-12.
8. Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкций. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975, 704 с.
9. Локтев А.А. Ударное взаимодействие твердого тела и упругой ортотропной пластинки // Механика композиционных материалов и конструкций. 2005. т. 11 N 4. С. 478-492.
10. Вершинин В.В., Локтев А.А. Моделирование систем противоударной изоляции с вязкоупругими элементами // Вестник МГТУ им. Баумана. Серия Естественные науки. N2(42). 2012. – С. 52-67.
11. Лурье А.И. Операционное исчисление и его приложение к задачам механики. Гостехиздат, М.-Л., 1951. – 534 с.
12. Баландин Д.В., Болотник Н.Н. Оптимизация параметров противоударных изоляторов для системы с двумя степенями свободы // Изв. РАН. МТТ. 2003. №3. С. 57-74.
13. Штаерман И.Я. К теории Герца местных деформаций при сжатии упругих тел. – ДАН СССР, 1939, 25, 5.
14. Локтев А.А., Вершинин В.В. Моделирование систем противоударной изоляции с ограничением рабочих характеристик // Вестник Пермского государственного технического университета, № 1, 2011. – С. 45-53.

15. Локтев А.А., Вершинин В.В. Расчет противоударного изолятора с ограничением рабочих характеристик // Вестник МГСУ, №4, 2011. – С. 35-40.
16. 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.
17. Локтев А.А. Удар вязкоупругого тела по упругой изотропной пластинке // Механика композиционных материалов и конструкций. 2007. Т. 13. № 3. – С. 417-425.
18. Локтев А.А. Уругопластическая модель взаимодействия цилиндрического ударника и пластинки // Письма в Журнал технической физики. 2007. Т. 33. № 16. – С. 72-77.
19. Локтев А.А., Залетдинов А.В. Определение точек взаимодействия прямых и отраженных волн в пластинке // Вестник МГСУ. 2010. № 4-3. – С. 303-308.
20. Алфимцев А.Н., Локтев Д.А., Локтев А.А. Разработка пользовательского интерфейса комплексной системы видеомониторинга // Вестник МГСУ. 2012. № 11. – С. 242-252.
21. Алфимцев А.Н., Локтев Д.А., Локтев А.А. Сравнение методологий разработки систем интеллектуального взаимодействия // Вестник МГСУ. 2013. № 5. – С. 200-208.
22. Локтев А.А., Локтев Д.А. Метод определения расстояния до объекта путем анализа размытия его изображения // Вестник МГСУ. 2015. № 6. – С. 140-151.

Loktev Alexey Alexeevich

Russian university of transport (МИИТ), Moscow, Russia
E-mail: aaloktev@yandex.ru

Sychev Vyacheslav Petrovich

Russian university of transport (МИИТ), Moscow, Russia
E-mail: vp@vpm770.ru

Stepanov Roman Nikolaevich

Moscow state university of civil engineering (national research university), Moscow, Russia
E-mail: rnstepanov@gmail.com

Loktev Daniil Alexeevich

Moscow state university of civil engineering (national research university), Moscow, Russia
E-mail: loktevdan@yandex.ru

Construction of a mathematical model of the perspective design of the bridgetunne for passenger vehicles

Abstract. In the present paper for the passage of passenger vehicles is proposed to develop a model bridgetunnel cylindrical type and to justify the possibility of applying the sustainability criteria from wind loads and shock waves inside the shell with the possibility of installation of the isolators damping of dynamic effects, both from vehicles and from wind to wind flow. In order to ensure the possibility of practical use of the bridge for real vehicles, the problem of ensuring the strength and stability of the bridge shell with the dynamic interaction of the wave from the movement of the crew is formulated and this problem is solved in the first approximation, which is sufficient to begin detailed study of the designs of the proposed construction of the transport infrastructure. A feature of the calculations of this facility is the need to take into account the double dynamic effects: from passing vehicles and wind flows. Calculations of wind flows and impacts on bridge structures in the work is reduced to the solution of unsteady nonlinear three-dimensional equations of fluid dynamics taking into account the viscosity in the formulation of the Navier-Stokes equations. The problem of the vehicle's influence on the bridge structure shell is set in such a way that between the drummer and the target there is an insulator consisting of viscous and elastic elements, which in various combinations can extinguish the oscillatory movements of the structure.

Keywords: bridge construction; Navier-Stokes equations; viscoelastic interaction model; the model of Kelvin-Voigt type; the model of Maxwell type; dynamic effect

REFERENCES

1. Potapov A.V., Sychev V.P. (2016). The main directions of development of transport systems. *Introduction of modern structures and advanced technologies in the travel industry*, 10(10), pp. 129-133.
2. Findpatent. (n.d.). *Asmolov V.A. Bridge and tunnel-type*. [online] Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/201/2012706.html> (in Russian).
3. Potapov A.V., Sychev V.P. (2015). Mostovoe sooruzhenie, zayavka na patent № 2015149035 ot 16.11.2015 g. [*Bridge construction, patent application No. 2015149035 from 16.11.2015.*] ANO the Institute of problems of management of transport infrastructure.
4. Potapov A.V., Sychev V.P., Loktev A.A., Poddaeva O.I. (2016). Mostotonnel dlyapropuska legkovogo transporta cherez obekt transportnoj infrastruktury v sbornike

- Etika, transport i ustojchivoe razvitie: socialnaya rol transportnoj nauki i odgovornost uchenyh. [*Mostotunnel for the passage of cars through the transport infrastructure in the collection Ethics, transport and sustainable development: the social role of transport science and the responsibility of scientists*. Ed. by I.V. Karapetyanc, G.G. Malineckogo] Moscow: Agency of intellectual property on transport, pp. 184-190.
5. Sycheva A.V., Sychev V.P., Buchkin V.A., Bykov Yu.A. (2016). Modeling of the railway track as a system of quasi-elastic orthotropic layers. *MSSU Bulletin*, 3, pp. 37-46. (in Russian).
 6. Loktev A.A., Sycheva A.V., Talashkin G.N., Stepanov K.D. (2016). Development of a mathematical model of a railway track of variable rigidity. *Introduction of modern designs and advanced technologies in the track economy*, 9(9), pp. 26-38. (in Russian).
 7. Loktev A.A., Sycheva A.V. (2014). The simulation of train path. *Path and track facilities*, 7, pp. 10-12. (in Russian).
 8. Timoshenko S.P. (1975). Prochnost i kolebaniya elementov konstrukcij. [*Strength and oscillations of structural elements*.] Moscow: Publishing house «Nauka», p. 704.
 9. Loktev A.A. (2005). Impact interaction of a rigid body and an elastic orthotropic plates. *Mechanics of composite materials and structures*, 4(11), pp. 478-492. (in Russian).
 10. Vershinin V.V., Loktev A.A. (2012). Modeling of shock-proof insulation systems with viscoelastic elements. *Vestnik MGTU m. Bauman N.E.*, 2(42), pp. 52-67. (in Russian).
 11. Lur'e A.I. (1951). Operacionnoe ischislenie i ego prilozhenie k zadacham mehaniki. [*Operational calculus and its application to problems of mechanics*.] Moscow-Leningrad: Gostekhizdat, p. 534.
 12. Balandin D.V., Bolotnik N.N. (2003). Optimization of parameters of shockproof insulators for a system with two degrees of freedom. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Solid mechanics*, 3, pp. 57-74. (in Russian).
 13. Shtaerman I.Ya. (1939). To Hertz theory of local deformations under compression of elastic bodies. *Reports of the Academy of Sciences*, 25(5). (in Russian).
 14. Loktev A.A., Vershinin V.V. (2011). Modeling of shock-proof insulation systems with performance limitation. *Bulletin of the Perm state technical university*, 1, pp. 45-53. (in Russian).
 15. Loktev A.A., Vershinin V.V. (2011). Calculation shockproof insulator with a limit of performance. *Vestnik MGSU*, 4, pp. 35-40. (in Russian).
 16. Rossikhin Yu.A., Shitikova M.V., Loktev A.A. (2004). The impact of the ball on the nonlinear elastic buffer mounted on the slab. *Proceedings of higher educational institutions. Construction*, 11, pp. 16-22. (in Russian).
 17. Loktev A.A. (2007). Impact of viscoelastic body on elastic isotropic plate. *Mechanics of composite materials and structures*, 3(13), pp. 417-425. (in Russian).
 18. Loktev A.A. (2007). Elastic-plastic model of interaction between a cylindrical drummer and a plate. *Technical physics letters*, 16(33), pp. 72-77. (in Russian).
 19. Loktev A.A., Zaletdinov A.V. (2010). Determination of points of interaction of direct and reflected waves in a plate. *Vestnik MGSU*, 4-3, pp. 303-308. (in Russian).
 20. Loktev A.A., Alfimtsev A.N., Loktev D.A. (2012). Developing a user interface for an integrated system of video monitoring. *Vestnik MGSU*, 11, pp. 242-252. (in Russian).
 21. Loktev A.A., Alfimtsev A.N., Loktev D.A. (2013). Comparison of methodologies for the development of systems of intellectual interaction. *Vestnik MGSU*, 5, pp. 200-208. (in Russian).
 22. Loktev A.A., Loktev D.A. (2015). The method of determining the distance to an object by analyzing its image blur. *Vestnik MGSU*, 6, pp. 140-151. (in Russian).