

Научная статья

DOI: 10.15593/24111678/2023.01.07

УДК 625.1, 614.872.5

А.А. Локтев¹, Д.А. Локтев², Л.А. Илларионова¹¹Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГОРОДСКОГО РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА НА ОКРУЖАЮЩУЮ ЗАСТРОЙКУ

Растущая урбанизация и более плотные города вызывают потребность в транспорте, который производит меньше загрязнения и занимает как можно меньше места. Железнодорожный общественный транспорт, работающий на электроэнергии, прекрасно справляется с этой задачей. Однако в городских районах из-за близости между трамвайными путями и жилыми зданиями, с точки зрения жителей, а также пользователей трамваев, проблема шума и вибраций от железнодорожного движения особенно выражена. Вибрации, распространяющиеся от трамвая, движутся по пути и издают шум, а с увеличением интенсивности движения экипажей, плотности инфраструктурой сети, а также возрастанием площади городской территории, выделенной для организации транспортных магистралей и транспортно-пересадочных узлов, приводят к значительному увеличению акустического и вибрационного воздействия на объекты транспортной инфраструктуры и окружающей застройки. Вибрации могут оказывать негативное воздействие на здоровье и благополучие человека. Поэтому при строительстве, ремонте и реконструкции трамвайной инфраструктуры необходимо учитывать их влияние на будущее распространение шума и вибрации в окружающей среде. В данной работе делается попытка создать и апробировать расчетную модель воздействия на несущую конструкцию зданий со стороны экипажа на основе теории колебаний. Рассматриваются способы, сокращающие с наибольшей эффективностью уровень вибраций от подвижного состава. Выбор математической модели зависит от параметров конструкции, внешнего динамического воздействия при различных режимах движения транспортных средств, параметров грунтового массива и возможных элементов, защищающих от вибрации.

Ключевые слова: вязкоупругие элементы, транспортная система, вибрация, структурный шум, виброакустическое воздействие, виброзащитные мероприятия, степень комфорта.

A.A. Loktev¹, D.A. Loktev², L.A. Illarionova²¹Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation²Lomonosov Moscow State Technical University N.E. Bauman, Moscow, Russian Federation

MODELING THE IMPACT OF URBAN RAIL TRANSPORT ON THE SURROUNDING BUILDINGS

Increasing urbanization and densely-populated cities are driving the need for transport that produces less pollution and takes up as little space as possible. Railway public transport, powered by electricity, perfectly copes with this task. However, in urban areas, due to the proximity between tram tracks and residential buildings, from the point of view of residents as well as tram users, the problem of noise and vibrations from railway traffic is particularly pronounced. Vibrations propagating from the tram move along the track and emit noise, and with an increase in the intensity of the movement of crews, the density of the network infrastructure, as well as an increase of the urban area allocated for the organization of highways and transport interchange nodes, it will lead to a significant increase in acoustic and vibration impact on objects of transport infrastructure and surrounding buildings. Vibrations can have a negative impact on human health and well-being. Therefore, during the construction and reconstruction of the tram infrastructure, it is necessary to take into account their impact on the future distribution of noise and vibration in the environment. The paper attempts to create and test a calculation model of the impact on the supporting structure of buildings by the crew based on the theory of oscillations and considers ways to most effectively reduce the level of vibrations from the rolling stock. The choice of a mathematical model depends on the design parameters, external dynamic impact under different modes of vehicle movement, parameters of the soil mass and possible vibration protection elements.

Keywords: viscoelastic elements, transport system, vibration, structural noise, vibroacoustic effect, vibration protection measures, degree of comfort.

Шум окружающей среды, особенно шум транспорта, представляет собой серьезную проблему в густонаселенных городских районах, где жилые и деловые центры расположены в непосредственной близости от основных транспортных систем. Многие источники шума сосуществуют в городской среде, включая дорожное движение, городские поезда, а также трамвайные пути [1]. Его воздействие на людей может быть эмоциональным, физиологическим и психологическим. Неблагоприятные последствия шумового загрязнения могут включать раздражение, нарушение сна, тревогу, нарушение слуха и сердечно-сосудистые заболевания, связанные со стрессом.

Различают несколько видов шумов:

- шум катания (качения): шумы качения возникают при качении колес по трамвайному пути и вызваны динамическими силами, возникающими при контакте пути с колесом из-за шероховатости поверхности [2; 3];

- ударный шум: ударный шум появляется, когда трамвайное колесо сталкивается с неровностями, такими как рельсовые стыки;

- пронзительный шум: звук, возникающий из-за трения между колесом и рельсом, когда трамвай движется по кривой с малым радиусом;

- шум на повороте – вызван взаимодействием колеса с рельсом, но имеет совершенно другой характер. Он сильно тональный, связанный с вибрацией колеса в одном из его резонансов (рис. 1).

Пронзительный шум – это трение колеса о рельс, возникающее при таком вращательном движении, когда колесо движется по внешней стороне кривой. К поперечному движению его приводит подвижный гребень колеса. Продольное прерывистое скольжение вызвано разными скоростями поступательного движения между внутренними и внешними рельсами. Когда напряжение в колесе превышает определенную заданную величину, происходит резкое движение отдачи и последующее освобождение. Это происходит периодически и приводит к колебанию колес [4].

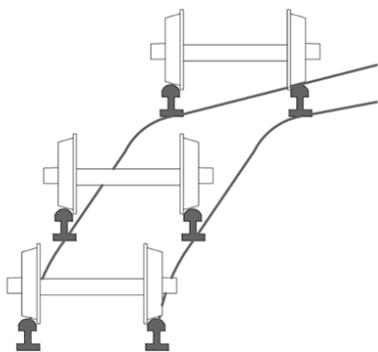


Рис. 1. Криволинейный участок железнодорожного пути городского транспорта

Для устранения негативных воздействий и снижения транспортного шума необходимо максимально точно определить шумовую нагрузку в непосредственной близости от дорог. Эти уровни шума оцениваются либо с использованием стандартизированной методологии проектирования, либо с использованием измерений в соответствии с действующими в настоящее время правилами или стандартами РФ.

Наиболее точные данные об уровне шума вдоль трамвайных путей можно получить путем измерения. Поскольку этот метод трудоемок, часто используются расчетные методы прогнозирования будущей акустической обстановки в районе трамвайных путей, что в настоящее время является стандартной практикой в городской среде.

Колебательные движения сопровождают весь жизненный цикл объектов транспортной инфраструктуры. Они связаны с восстанавливающими силами (силы упругости), силами сопро-

тивления среды, при этом чаще всего имеет смысл рассматривать двухфазную среду, в которой происходит перемещение транспортного средства. Первую фазу представляет собой воздушная среда, через которую передается акустический шум различных частот и интенсивности [5].

Вторая фаза представляет собой грунт и элементы несущих конструкций зданий и сооружений. Влияние на них скорости транспорта лучше всего описывается вибрацией отдельных частиц и элементов этой среды.

Анализ шумового явления и вибрации, вызванных движением трамвая по трамвайным путям, является очень сложной задачей. Акустическая энергия, возникающая при движении трамвая и распространяющаяся в окружающую среду, возникает в результате вибраций сложной механической системы, включающей как сам трамвай, так и основание, по которому он движется, т.е. трамвайные рельсы [6]. Степень вклада отдельных параметров в общую существующую систему зависит от множества факторов.

Среди прочих параметров, влияющих на уровень шума при работе трамвая, можно выделить следующие:

- объем движения / трамвайный поток;
- техническое состояние трамваев;
- тип трамвайной конструкции / пути;
- классический открытый путь с деревянными или бетонными шпалами;
- классическая капитальная дорога, покрытая тощим бетонным слоем или с асфальтобетонным покрытием, бетонными плитами;
- количество вагонов;
- скоростной режим;
- увеличение скорости с 20 до 40 км/ч означает повышение уровня шума на 6,1 дБ, а увеличение скорости с 40 до 60 км/ч – повышение уровня шума на 3,5 дБ. Совершенно очевидно, что уровень шума значительно возрастает на малых скоростях (до 40 км/ч);
- земляное полотно.

Для определения уровней вибрации в помещениях зданий необходимо спрогнозировать уровень вибрации на перекрытиях, для чего требуется учесть снижение и увеличение вибрации при переходе от грунта на фундамент (ΔL_{ϕ}), распространении по конструкции здания ($\Delta L_{от}$) и резонансах ограждающих конструкций ($\Delta L_{рез}$).

Согласно методике ВСН 211-91 «Прогнозирование уровней вибраций грунта от движения метропоездов и расчет виброзащитных строительных устройств», уровень виброускорения на перекрытии определяется по формуле [7]:

$$L_{пер} = L_{изм} - \Delta L_{\phi} + \Delta L_{от}. \quad (1)$$

Представленная методика является приближенной, однако более точный расчет передачи колебаний из грунта в здание и распространения вибраций по строительным конструкциям требует рассмотрения соответственно более сложной, например, пространственной волновой модели сооружения на полубесконечном грунтовом основании, и может внести лишь уточнения в сторону снижения ожидаемых уровней колебаний.

Выбор конкретной математической модели взаимодействия грунта и несущих конструкций жилого здания зависят от параметров, приведенных выше, а также от типа и свойств самого грунта, принятых допущений, среди которых можно выделить, что к колебательной системе применима теория и законы малых колебаний, при рассмотрении вертикальных колебаний грунт обладает только вертикальной податливостью, а при рассмотрении горизонтальных – только горизонтальной. При описании вертикальных и горизонтальных колебаний по моделям (рис. 2), предполагается, что вязкоупругие элементы не теряют устойчивости, т.е. точки грунта и элемента несущей конструкции, в области их контакта двигаются прямолинейно вдоль одной и той же прямой [8].

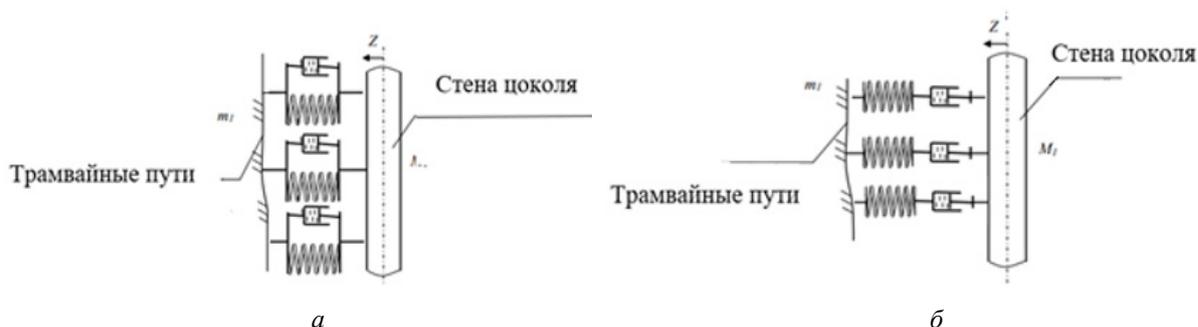


Рис. 2. Модель взаимодействия грунта, через который передается вибрация от городского транспорта, и элементов несущей конструкции здания при наличии вязкоупругого элемента: *а* – элемент Кельвина – Фойгхта; *б* – элемент Максвелла

При математическом моделировании динамического влияния объекта транспортной инфраструктуры на несущую конструкцию цокольной части здания или сооружения через грунтовой массив считается, что колебательное движение происходит вдоль оси недеформированного вязкоупругого демпфера, который при прохождении транспортного средства как источника вибрации и шума не теряет устойчивости и не отклоняется от своей прямолинейной оси [9; 10].

Горизонтальное движение части несущей конструкции цоколя после проезда транспортного средства мимо данного участка сооружения может быть описано с помощью системы дифференциальных уравнений для вязкоупругой модели деформирования типа Кельвина – Фойгта:

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{z}_1 + \ddot{z}_3) + K(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + C(z_1 - z_2) &= 0, \\ m_2(\ddot{z}_2 + \ddot{z}_3) + K(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + C(z_2 - z_1) &= 0; \end{aligned} \tag{2}$$

для вязкоупругой модели деформирования типа Максвелла:

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{z}_1 + \ddot{z}_3) - K \int_0^t (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) e^{-\frac{t-t'}{\tau_1}} dt' + C(z_2 - z_1) &= 0, \\ m_2(\ddot{z}_2 + \ddot{z}_3) - K \int_0^t (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) e^{-\frac{t-t'}{\tau_1}} dt' + C(z_2 - z_1) &= 0, \end{aligned} \tag{3}$$

где m_1 и m_2 – массы приведенной части грунтового массива, примыкающей к несущей конструкции, и самой несущей конструкции соответственно, z_1 и z_2 – координаты центров тяжести грунтового массива и фрагмента несущей конструкции относительно верхней точки вязкоупругого буфера, z_3 – координата верхней точки буфера в ненагруженном состоянии относительно удаленной системы отсчёта, K – коэффициент вязкого сопротивления буфера, C – коэффициент жесткости буфера, t' – время, по которому происходит интегрирование уравнений.

Системы уравнений (2) и (3) должны рассматриваться с учетом начальных условий, характеризующих геометрическое и кинематическое состояние конструкции. В начальный момент прохождения транспортного средства в точке, расположенной на нормали к несущей конструкции сооружения, предполагается, что скорость горизонтального воздействия на конструкцию в начальный момент равна V_0 .

В системы определяющих уравнений (2) и (3) входят производные по времени от искомым горизонтальных перемещений первого и второго порядка, поэтому одним из способов решения этих уравнений является их представление в пространстве Лапласа, чтобы дифференциальные уравнения представить в виде алгебраических, решить их в пространстве изображений и после этого уже переходить в пространство оригиналов. Для этого необходимо решить характеристические уравнения относительно параметра p , характеризующее пространство Лапласа,

и определить особые значения этой величины, приравнивая знаменатель простых дробей или функциональные множители нулю.

Для системы определяющих уравнений (2) эти характеристические выражения или системные множители приобретают вид [11]:

$$K \cdot p + C = 0, \quad (4)$$

$$m^2 \cdot p^2 + K \cdot p + C = 0, \quad (5)$$

$$m_1 \cdot m_2 \cdot p^2 + K \cdot p(2m_1 + m_2) + C \cdot (2m_1 + m_2) = 0. \quad (6)$$

Множество решений образуют концентрические кривые, сходящиеся к отдельным полюсам, которые задают пару значений K и C , соответствующих оптимальной работе вязкоупругого буфера.

Для уравнений (3) можно получить одно характеристическое уравнение, представляющее знаменатель дроби:

$$p^3 + (\zeta + B_1)p^2 + (C_1 + B_1\zeta)p + B_1C_0 = 0, \quad (7)$$

здесь

$$\chi = C / K, \quad A_1 = \frac{C}{\rho h \pi r_0^2}, \quad B_1 = \frac{2G^{(2)}}{r_0}, \quad C_1 = \left(\frac{2}{\rho h \pi r_0^2} + \frac{1}{m} \right), \quad C_0 = \frac{C}{m}.$$

Выражение (7) имеет или три действительных корня, или один действительный и два комплексно-сопряженных, что определяет характер взаимодействия двух тел посредством вязкоупругого буфера типа Максвелла.

Наилучшее соотношение K и C для разных моделей зависит от параметров конструкции, внешнего динамического воздействия при различных режимах движения транспортных средств, параметров грунтового массива и возможных виброзащитных элементов [12]. При несоответствии значений K и C вязкоупругий буфер типа Кельфина – Фойхта работает преимущественно или как гидравлический демпфер, или как упругий элемент. Модель Максвелла имеет точку бифуркации, которая соответствует времени релаксации, входящему в экспоненциальное ядро вязкоупругой функции, и определяет момент «прилипания» грунтового массива к несущей конструкции.

Для определения перемещений элемента несущей конструкции и силы динамического воздействия для различных значений K и C предлагается использовать дифференциальное уравнение колебаний балки, т.е. фрагмент несущей конструкции представляется таким элементарным элементом строительной механики [13]:

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\frac{\rho}{EI} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{q(x,t)}{EI}, \quad (8)$$

где ρ – приведенная к длине масса балки; E – модуль Юнга материала балки; I – момент инерции поперечного сечения; $q(x, t)$ – внешняя поперечная нагрузка.

За основу предлагается принять шарнирно-опертую балку, представляющую продольную конструкцию в плане, примыкающую к двум поперечным стенам, граничные условия в этом случае можно представить в виде:

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

здесь l – половина длины балки (данное представление размеров несущей конструкции упрощает некоторые преобразования в будущем).

При решении определяющего уравнения (8) обычно используют его представление в пространстве изображений, поскольку оно содержит, помимо искомым неизвестных функций, их производные по времени и по пространственной координате:

$$\frac{\partial^4 \tilde{y}}{\partial x^4} = -\frac{\rho}{EI} p^2 \tilde{y} + \frac{\tilde{q}(x, p)}{EI}. \quad (10)$$

Функция $\tilde{y}(x, p)$ является изображением функции $y(x, t)$, а $\tilde{q}(x, p)$ – изображением $q(x, t)$. Функция $\tilde{y}(x, p)$ удовлетворяет тем же краевым условиям, что и её оригинал $y(x, t)$ [13].

$$\tilde{y}(x, p) = \frac{2\tilde{P}(p)l^3}{EI\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{p^2 n^4} \sin\left(\frac{n\pi a}{l}\right) \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right), \quad (11)$$

здесь a – координаты точки приложения внешней силы $\tilde{P}(p)$ от транспортного средства, тильда над функцией указывает на ее запись в пространстве Лапласа.

Если уйти от вопроса определения динамического силового воздействия на несущую конструкцию и вычислить прогиб от действия единичной силы $u(x, p)$, приложенной в точке с координатой a , рассчитаем

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

Для городского железнодорожного транспорта рекомендуется применять различные методы снижения уровня шума и вибрации от подвижного состава.

Основные способы снижения уровней вибраций сооружений вблизи подземных и наземных рельсовых магистралей (трамвайных, железнодорожных, метрополитена) можно условно разделить на два направления:

- активная виброизоляция – изоляция непосредственно источника вибраций;
- пассивная виброизоляция – изоляция защищаемых объектов.

Поскольку основными источниками шума является сам подвижной состав, то с точки зрения инженерной эффективности предлагается использовать элементы и устройства виброгашения, расположенные в непосредственной близости от конструкции верхнего строения пути, на которое передается нагрузка от подвижного состава [15; 16]. При прокладке трамвайного пути в историческом центре города заполнители рельсов, виброизоляционные маты и системы смазки рельсов должны применяться совместно; в спальном районе достаточно только наполнителя рельсов. Для отделения трамвайных линий от жилой зоны могут использоваться шпальные опорные конструкции или бесшпальные опорные конструкции. Подобные решения могут быть реализованы как при проектировании и последующем строительстве требуемых линий, при их ремонте и реконструкции, что позволит унифицировать использованные подходы.

В настоящем исследовании предложен подход, основанный на агрегировании двух основных моделей вязкоупругого тела, представлении определяющих дифференциальных уравнений в пространстве изображения, подборе сочетания параметров вязкости и жесткости в простейшем элементе.



Рис. 3. Возможные инженерные решения для железнодорожного пути городского транспорта с пассивными элементами виброгашения

Принимая за искомые величины динамического воздействия со стороны транспортных средств на несущие конструкции расположенных рядом с магистралями зданий и сооружений нормальные перемещения и ускорения точек цокольных элементов, можно подобрать параметры реальных материалов и конструкций, рекомендуемых для гашения акустической и вибрационной нагрузки. При этом пассивные изоляторы можно размещать как в непосредственной близости от несущих стен, так и рядом с транспортной магистралью и отдельными ее элементами, непосредственно на которые происходит воздействие колес автомобильной или железнодорожной техники.

Важно верно определить входные параметры, так как их точная спецификация необходима для правильного проектирования трамвая и городского планирования транспортной инфраструктуры в целом. Предлагаемый подход позволяет связать время релаксации, параметры упругости, тип модели с реально существующими материалами и конструкциями, используемыми для виброгашения.

Список литературы

1. Haladin I., Lakusic S., Bogut M. Analysis of tram traffic vibrations in respect to tram track structure and exploitation period // Proceedings of the 20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV '13). – International Institute of Acoustics and Vibration, Bangkok, Thailand, 2013. – P. 3242–3249.
2. Pan T.C., Li J. Dynamic vehicle element method for transient response of coupled vehicle–structure systems // Journal of Structural Engineering – J. Struct, Eng. – ASCE. – 2002. – Vol. 128, no. 2. – P. 214–223. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:2(214)
3. Lakušić S., Haladin I., Bogut M. Analysis of tram induced vibration influence on underground garage structure through exploitation // Proceedings of the 21st International Congress on Sound and Vibration. – International Institute of Acoustics and Vibration, Beijing, China, 2014. – P. 13–17.
4. Railway noise measurement method for pass-by noise, total effective roughness, transfer functions and track spatial decay / M.H.A. Janssens, M.G. Dittrich, F.G. de Beer, C.J.C. Jones // Journal of Sound and Vibration. – 2006. – Vol. 293, no. 3–5. – P. 1007–1028. DOI: 10.1016/j.jsv.2005.08.070
5. Кукуджанов В.Н. Распространение волн в упруговязкопластических материалах с диаграммой общего вида. // Изв. РАН. МТТ. – 2001. – № 5. – С. 96–111.
6. Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкций. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975. – 704 с.
7. ВСН 211–91. Прогнозирование уровней вибраций грунта от движения метропоездов и расчет виброзащитных строительных устройств. – М.: Минтрансстрой СССР, 1991. – 38 с.
8. Степанов К.Д. Моделирование вибрационного воздействия от поездов метрополитена на проектируемое здание и подбор параметров системы виброакустической защиты // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2018. – Т. 12, № 12(12). – С. 19–25.
9. Modeling the dynamic behavior of the upper structure of the railway track / A.A. Loktev [et al.] // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 189. – P. 133–137.
10. Локтев А.А., Сычева А.В., Сычев В.П. Обоснование эффекта притормаживания упругой волны от воздействия колес подвижного состава на рельс с локализацией волны в зоне дефекта железнодорожного пути // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 3. – С. 25–30.
11. Особенности динамического поведения пролетного строения низководных мостов / А.А. Локтев, Д.А. Локтев, Л.А. Илларионова, А. Баракат // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2022. – № 2. – С. 72–81. – DOI: 10.15593/24111678/2022.02.09.

12. Kou J.W., DeWolf J.T. Vibrational behavior of continuous span highway bridge – Influencing variables // *Journal of Structural Engineering – ASCE*. – 1997. – Vol. 123(3). – P. 333–344. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:3(333)
13. Баландин Д.В., Болотник Н.Н. Оптимизация параметров противоударных изоляторов для системы с двумя степенями свободы // *Изв. РАН. МТТ*. – 2003. – № 3. – С. 57–74.
14. Modeling the Dynamic Behavior of the Upper Structure of the Railway Track / A.A. Loktev, V.V. Korolev, I.V. Shishkina, D.A. Basovsky // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 189. – P. 133–137.
15. Kalivoda M.T. Track decay rate of different railway noise test sites. – *Forum Acusticum*, Budapest, Hungary, 2005. – P. 3.
16. Метод защиты сооружений от вибраций и сейсмических воздействий / Е.Н. Курбацкий [и др.]. // *Строительство и реконструкция*. – 2018. – С. 55–67.

References

1. I. Haladin, S. Lakusic, M. Bogut. Analysis of tram traffic vibrations in respect to tram track structure and exploitation period. *Proceedings of the 20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV '13)*, International Institute of Acoustics and Vibration, Bangkok, Thailand, July 2013, pp. 3242–3249. – англоязычная статья.
2. Pan T.C., Li J. Dynamic vehicle element method for transient response of coupled vehicle–structure systems // *Journal of Structural Engineering – J. Struct. Eng. – ASCE*, 2002, Vol. 128, No 2, pp. 214–223. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:2(214) – англоязычная статья.
3. S. Lakušić, I. Haladin, M. Bogut. Analysis of tram induced vibration influence on underground garage structure through exploitation. *Proceedings of the 21st International Congress on Sound and Vibration*, International Institute of Acoustics and Vibration, Beijing, China, July 2014, pp. 13–17. – англоязычная статья.
4. M. H. A. Janssens, M. G. Dittrich, F. G. de Beer, C. J. C. Jones. Railway noise measurement method for pass-by noise, total effective roughness, transfer functions and track spatial decay. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, Vol. 293, No. 3–5, pp. 1007–1028. DOI: 10.1016/j.jsv.2005.08.070. – англоязычная статья.
5. Kukudzhanov V.N. Rasprostranenie-voln-v-uprugoviazkoplasticheskikh-materialakh-s-diagrammoi-obshchego-vida [Propagation of waves in elastoviscoplastic materials with a general diagram], *Mech. Solids*, 2001, no. 5, pp. 96–111.
6. Timoshenko S.P. Prochnost i kolebaniia elementov konstruksii [Strength and vibrations of structural elements]. Moscow, Nauka, 1975, p. 704.
7. VSN 211 – 91 Prognozirovanie urovnej vibracij grunta ot dvizhenija metropoezdov i raschet vibrozashhitnyh stroitel'nykh ustrojstv, *Mintransstroj SSSR*, 1991, 38 p.
8. Stepanov K.D. Modelirovanie-vibratsionnogo-vozdeistviia-ot-poezdov-metropolitena-na-proektiruемое-zdanie-i-podbor-parametrov-sistemy-vibroakusticheskoi-zashchity [Simulation of vibration impact from underground trains on the designed building and selection of parameters of the vibroacoustic protection system]. *Implementation of modern designs and advanced technologies in track facilities*, 2018. Vol. 12, no 12, pp.19–25.
9. Loktev A.A. [et al.]. Modeling the dynamic behavior of the upper structure of the railway track. *Procedia Engineering*, 2017, Vol. 189, pp. 133–137. – англоязычная статья.
10. Loktev A.A., Sycheva A.V., Sychev V.P. Obosnovanie efekta pritormazhivaniia uprugoi volny ot vozdeistviia koles podvizhnogo sostava na rels s lokalizatsiei volny v zone defekta zheleznodorozhnogo puti [Substantiation of the effect of braking of an elastic wave from the impact of rolling stock wheels on a rail with wave localization in the zone of a railway track defect], *Nauka-i-tekhnika-transporta*, 2022, no. 3, pp. 25–30.
11. Loktev A.A., Loktev D.A., Illarionova L.A., Barakat A. Osobennosti dinamicheskogo povedeniia proletnogo stroeniia nizkovodnykh mostov [Features of the dynamic behavior of the span structure of low-water bridges]. *Transport. Transportnye sooruzheniia. Ekologiya*, 2022, No. 2, pp. 72–81. DOI: 10.15593/24111678/2022.02.09
12. Kou J.W., DeWolf J.T. Vibrational behavior of continuous span highway bridge – Influencing variables // *Journal of Structural Engineering- ASCE*, 1997, Vol. 123(3), pp. 333–344. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:3(333). – англоязычная статья.
13. Balandin D.V., Bolotnik N.N. Optimizatsiia parametrov protivoudarnykh izolyatorov dlia sistemy s dvumia stepeniami svobody [Optimization of shock insulator parameters for a system with two degrees of freedom]. *Mech. Solids*, 2003, No. 3, pp. 57–74.
14. A.A. Loktev, V.V. Korolev, I.V. Shishkina, D.A. Basovsky Modeling the Dynamic Behavior of the Upper Structure of the Railway Track. *Procedia Engineering*, 2017, Vol. 189, pp. 133–137. – англоязычная статья.
15. M.T. Kalivoda. Track decay rate of different railway noise test sites. *Forum Acusticum*, Budapest, Hungary, 2005, p. 3. – англоязычная статья.
16. Kurbatskii E.N. [et al.]. Metod zashchity sooruzhenii ot vibratsii i seismicheskikh vozdeistvii [Method of protection of structures from vibrations and seismic effects]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiia*, 2018, pp. 55–67.

Об авторах

Локтев Алексей Алексеевич (Москва, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой транспортного строительства Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)) (Россия, 125190, г. Москва, ул. Часовая, 22/2, e-mail: aaloktev@yandex.ru).

Локтев Даниил Алексеевич (Москва, Россия) – доктор технических наук, доцент, заместитель декана, доцент кафедры «Информационные системы и телекоммуникации» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, e-mail: loktevdan@yandex.ru).

Илларионова Лилия Алексеевна (Москва, Россия) – старший преподаватель кафедры зданий и сооружений на транспорте Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)) (Россия, 125190, г. Москва, ул. Часовая, 22/2, e-mail: illarionova.roat@mail.ru).

About the authors

Alexey A. Loktev (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Construction, Russian University of Transport (MIIT) (22/2, Chasovaya st., Moscow, 125190, Russian Federation, e-mail: aaloktev@yandex.ru).

Daniil A. Loktev (Moscow, Russian Federation) – Deputy Dean, Associate Professor of the Department of Information Systems and Telecommunications, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow State Technical University m. N.E. Bauman (5, 2nd Bauman str., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: loktevdan@yandex.ru).

Lilia A. Illarionova (Moscow, Russian Federation) – Lecturer of the Department of Buildings and Structures in Transport; Russian University of Transport (MIIT) (22/2 Chasovaya st., Moscow, 125190, Russian Federation, e-mail: illarionova.roat@mail.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Вклад авторов равноценен.

Поступила: 06.12.2022

Одобрена: 24.12.2022

Принята к публикации: 01.03.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Локтев, А.А. Моделирование воздействия городского рельсового транспорта на окружающую застройку / А.А. Локтев, Д.А. Локтев, Л.А. Илларионова // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2023. – № 1. – С. 52–60. DOI: 10.15593/24111678/2023.01.07

Please cite this article in English as: Loktev A.A., Loktev D.A., Illarionova L.A. Modeling the impact of urban rail transport on the surrounding buildings. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2023, no. 1, pp. 52-60. DOI: 10.15593/24111678/2023.01.07