



АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВИБРОУСКОРЕНИЙ ПРИ ДВИЖЕНИИ МЕТРО, ТРАМВАЯ И АВТОТРАНСПОРТА ВБЛИЗИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Ю. В. Лазуткин

Лазуткин Юрий Викторович, аспирант, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация; e-mail: LazutkinYV@mtp.mos.ru

В условиях плотной городской застройки крупных агломераций динамическое воздействие от наземного и подземного транспорта является критическим фактором, вызывающим деформации и раскрытие трещин в фундаментах и несущих конструкциях зданий, особенно объектов культурного наследия. Цель исследования – оценка комплексного динамического воздействия от различных видов городского транспорта на здания и сооружения культурно-исторической застройки на основе численно-аналитического расчета и натурных исследований. Выполнен анализ загруженности транспортных магистралей в историческом центре Москвы, выбраны три экспериментальных участка. Проведены натурные замеры вибраций в пяти контрольных точках: в тоннеле метро, на фундаменте в подвале и на кровле зданий. Статистическая обработка данных позволила построить графики виброскоростей и виброускорений в октавных полосах частот. Выполнено численное моделирование в ПК MIDAS GTS NX и аналитический расчет по модели балки Эйлера – Бернулли на вязко-упругом основании в ПК Mathcad. Впервые экспериментально зафиксирован эффект интерференции волн от разных видов транспорта, приводящий не к суммированию, а к взаимному гашению вибраций в определенные временные промежутки. Построены изополя ускорений и перемещений от транспорта, определены максимальные значения. Получены аналитические выражения для расчета виброускорений при одновременном прохождении нагрузки. Выявленный эффект интерференции имеет важное значение для прогнозирования долговременной сохранности памятников архитектуры. Сравнительный анализ результатов натурных измерений и численно-аналитического моделирования подтвердил адекватность предложенных моделей. Наблюдается корреляция между пиковыми значениями вибраций и раскрытием существующих трещин в несущих конструкциях обследуемого здания. Расхождение результатов эксперимента и численно-аналитического моделирования не превышает 20%, что подтверждает достоверность предложенного подхода. Разработанная конечно-элементная и аналитическая модели позволяют прогнозировать уровни вибраций при различных сценариях транспортной нагрузки для разработки эффективных мер виброзащиты объектов культурного наследия.

Ключевые слова: виброускорения, транспортная вибрация, метрополитен, объекты культурного наследия, численно-аналитическое моделирование.

ANALYTICAL CALCULATION OF VIBRATION ACCELERATIONS DURING THE MOVEMENT OF SUBWAYS, TRAMS, AND VEHICLES NEAR BUILDINGS AND STRUCTURES

Yu. V. Lazutkin

Lazutkin Yuriy Viktorovich, postgraduate student, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation; e-mail: LazutkinYV@mtp.mos.ru

In the conditions of dense urban development in large agglomerations, the dynamic impact from surface and underground transport is a critical factor causing deformations and crack opening in foundations and load-bearing structures of buildings, especially cultural heritage sites. Aim is to assess the complex dynamic impact of various types of urban transport on buildings and structures of cultural and historical value based on numerical-analytical calculations and field studies. An analysis of traffic congestion on transport routes in the historical center of Moscow was carried out, and three experimental sites were selected. Field measurements of vibrations were conducted at five control points: in the subway tunnel, on the foundation in the basement, and on the rooftops of buildings. Statistical data processing allowed for the construction of graphs for vibration velocities and accelerations in octave frequency bands. Numerical modeling was performed using the MIDAS GTS NX software and an analytical calculation using the Euler – Bernoulli beam on a viscoelastic foundation model in the Mathcad software. For the first time, the effect of wave interference from different types of transport was experimentally recorded, leading not to a summation, but to mutual damping of vibrations at certain time intervals. Isofields of accelerations and displacements from transport were constructed, and maximum values were determined. Analytical expressions for calculating vibration accelerations under simultaneous load passage were obtained. The identified interference effect is of significant importance for predicting the long-term preservation of architectural monuments. A comparative analysis of the results of field measurements and numerical-analytical modeling confirmed the adequacy of the proposed models. A correlation is observed between peak vibration values and the opening of existing cracks in the load-bearing structures of the examined building. The discrepancy between the experimental results and numerical-analytical modeling does not exceed 20%, which confirms the reliability of the proposed approach. The developed finite element and analytical models make it possible to predict vibration levels under various traffic scenarios to develop effective vibration protection measures for cultural heritage sites.

Keywords: vibration acceleration, transport vibration, subway, cultural heritage sites, numerical-analytical modeling.

Исследования динамических воздействий на грунт в различные годы проводились Барканом Д. Д., Вознесенским Е. А., Герсевановым Н. М., Ильичевым В. А., Курбацким Е. Н., Нуждиным Л. В., Савиновым О. А., Ставницером Л. Р., Тер-Мартirosяном А. З., Уздиным А. М., Алим-

вым С. Г., М. В. Берлиновым, Р. О. Головановым, Исмагиловой З. Ф., Ковальчуком О. А., Купчиковой Н. В., Маринченко Е. В., Моториным В. В., Наумовым Б. В., Титовым Е. Ю., Габибовым Ф. Г., Мариничевым М. Б., Нуждиным Л. В., Скворцовым Е. П., Уздиным А. М. и др.[1, 3–5].

Анализ работ отечественных и зарубежных ученых показал, что ранее оценка комплексного динамического воздействия от трех видов наземного и подземного городского транспорта на фундаменты и строительные конструкции зданий и сооружений не проводилась [6–8].

Цель исследования – оценка комплексного динамического воздействия от наземного и подземного городского транспорта на здания и сооружения культурно-исторической застройки. В рамках реализации поставленной цели сформулировано ряд задач [9–11].

Для выбора натурной площадки и проведения эксперимента был проведен анализ загруженности транспортных магистралей наземного и подземного транспорта в Москве, выбраны в исторической части – в самом центре, где расположены памятники исторического и культурного наследия, три наиболее загруженные участки для замера вибрации от метро, трамвая и автотранспорта – это по улице Краснопрудная, Второй экспериментальный участок расположен по улице Павелецкой и третий экспериментальный участок по ул. Бауманская [2].

Разработана программа и план проведения натурных исследований распространения волн от прохождения транспорта, определено пять точек установки оборудования: в метро, на кровле многоэтажных зданий и на фундаменте в подвале (рис. 1). По улице Краснопрудная по данному участку проходят восемь маршрутов общественного транспорта. Замеры вибрации в метро осуществлялись круглые сутки. Интенсивность движения на перегоне с 8–10 утра позволила определить временные пики в тоннеле, также визуально на поверхности определялось одновременное прохождение трамвая и автотранспорта. В результате получилось два пиковых пересечения по времени – это в 8 ч 55 мин. 35 сек. и 9.38.40 в котором вычислили суммарные вибрации.

Получили уровни вибрации с корректировкой виброускорений в октавных полосах частот от суммарного прохождения всех видов транспорта и от каждого в отдельности. По полученным результатам исследований построены уровни виброускорений (дБа) для отдельных источников вибрации – автотранспорта, трамвая, метро и комплексного их воздействия.

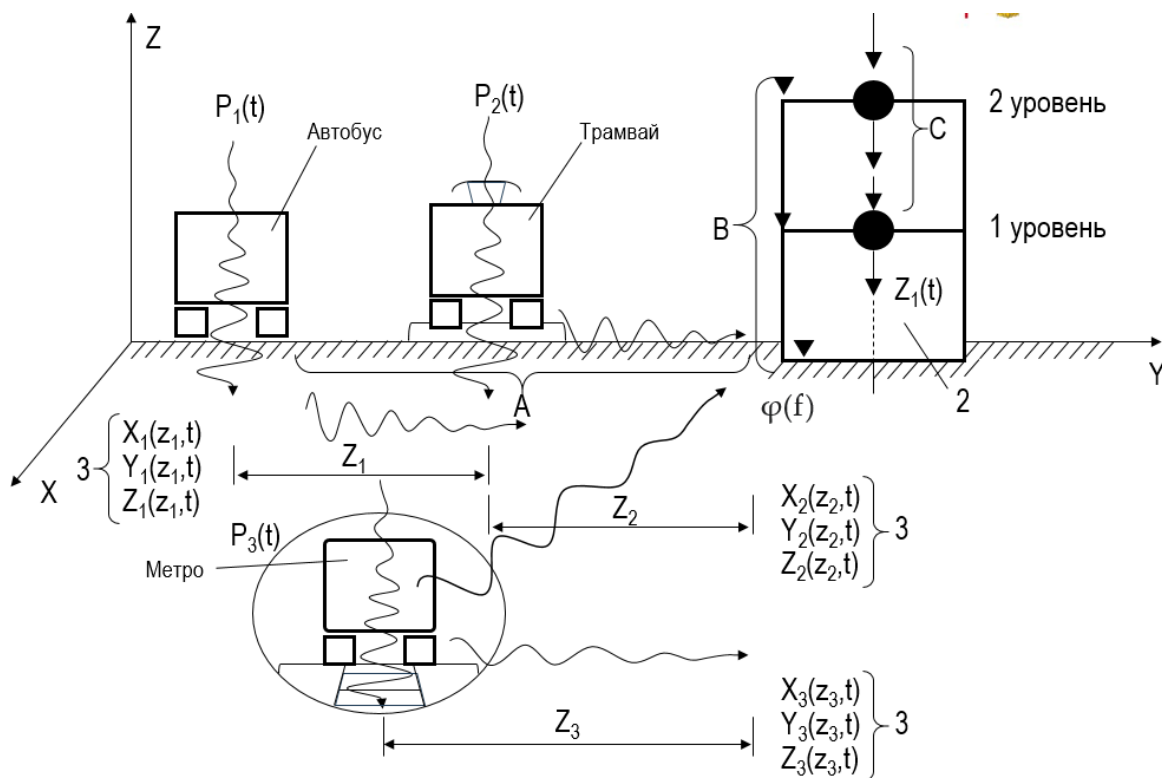


Рис. 1. План проведения экспериментальных исследований от комплекса воздействий наземного и подземного транспорта по улице Краснопрудная:

1 – транспортное средство (автобус, трамвай, метро); 2 – исследуемое здание; 3 – параметры энергетического потока; измерительные системы: А – динамики грунта; В – колебаний фундамента и стен; С – колебаний перекрытий. $\varphi(f)$ – передаточная функция, характеризующая трансформацию силового потока при переходе его от грунта к фундаменту; $Z_1(t)$ – вертикальные колебания перекрытия первого уровня (иллюстрация автора)

Fig. 1. Experimental research plan for the impact of surface and underground transport on Krasnoprudnaya Street: 1 – vehicle (bus, tram, metro); 2 – building under study; 3 – energy flow parameters; measuring systems: А – soil dynamics; В – foundation and wall vibrations; С – floor vibrations. $\varphi(f)$ – transfer function characterizing the transformation of the force flow as it passes from the ground to the foundation; $Z_1(t)$ – vertical vibrations of the first-level floor (author's illustration)

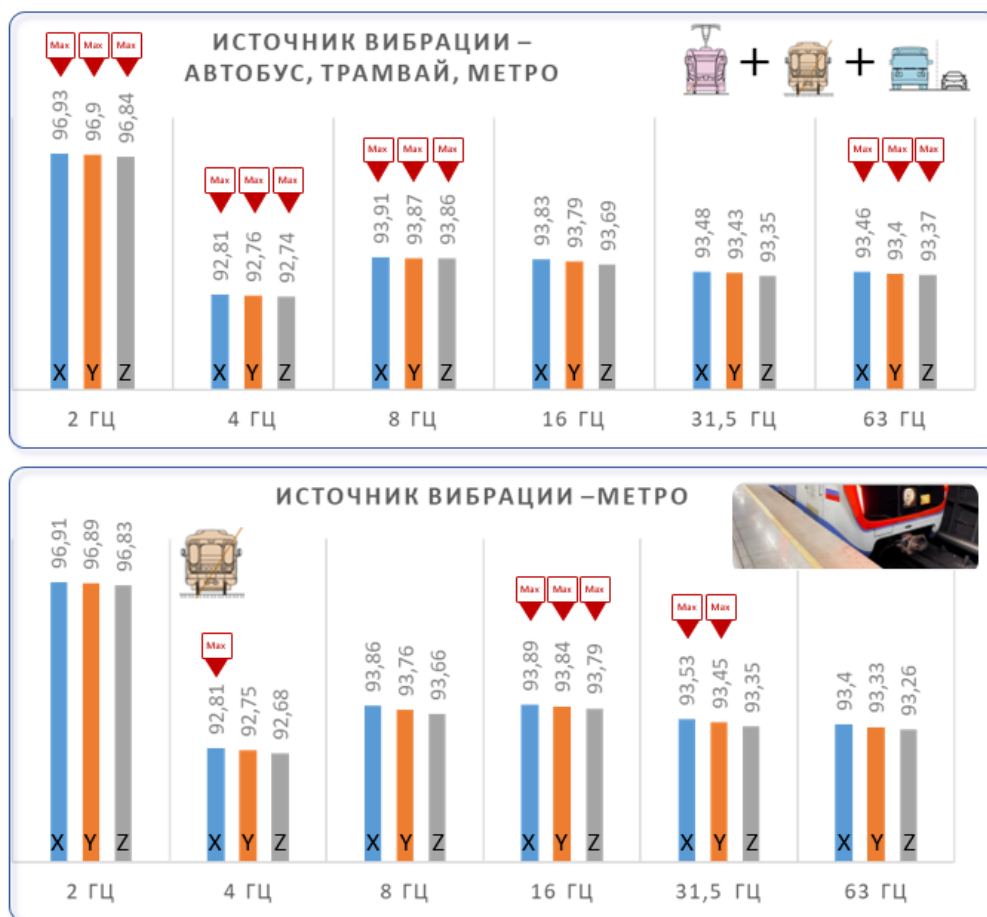


Рис. 2. Результаты испытаний в виде сводных графиков по оси X вибрационных воздействий по октавным частотам в подвале здания (иллюстрация автора)

Fig. 2. Test results in the form of summary graphs on the X-axis of vibration effects at octave frequencies in the basement of the building (illustration by the author)

По результатам статистической обработки данных построены графики максимальных и минимальных значений виброскоростей и виброускорений (рис. 2). На данном этапе был получен самый парадоксальный из результатов – по предварительному анализу, были предположения, что в пиковые часы, когда транспорт идет сплошным потоком, вибрации будут просто складываться, но оказалось, что при определенных условиях происходит интерференция волн – их взаимное гашение. В здании, где велись замеры, а это памятник культурного наследия, имеются трещины и деформации в несущих конструкциях [12-15]. На фасаде установлены постоянные маяки. Наблюдается дальнейшее раскрытие сквозных трещин. На следующем этапе исследований с применением программного комплекса MIDAS GTS NX построена плоская конечно-элементная модель расчета изополей ускорений. Представлены изополя ускорений и перемещений от транспорта с максимальным значением 2м/с² при частоте 8 Гц. Видно, увеличение площади изополей при большей частоте прохождения транспорта.

В аналитическом расчете тоннель моделируется балкой на вязко-упругом основании, параметрами которого являются коэффициенты постели грунта и коэффициенты вязкого демпфирования,

характеризующего рассеяние энергии в грунт при распространении продольных волн [3, 16, 17]. Для расчета использована модель балки Эйлера – Бернулли, в качестве грунта под основанием принят песок мелкой крупности с характеристиками: плотность 1800 кг/м³; коэффициент Пуассона 0.32; модуль деформации 23 МПа; коэффициент постели 20 МПа/м; вязкое демпфирование 0,24мПа*с/м. Дифференциальное уравнение балки Эйлера – Бернулли на вязко-упругом основании при воздействии подвижных сил представим в виде:

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + Ku + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + C \frac{\partial u}{\partial t} = \sum_{j=1}^n P_j \delta(x + l_j - Vt), \quad (1)$$

где u – прогиб балки, x – координата направления движения подвижной нагрузки, t – время, EI – жесткость балки, E – модуль Юнга, I – момент инерции балки, m – массовая единица балки, K – коэффициент постели основания, C – коэффициент вязкого демпфирования основания, P_j – j -я сосредоточенная сила, ω_0 – круговая частота колебания нагрузки, $\delta(x + l_j - Vt)$ – дельта-функция Дирака, V – скорость движения поезда, l_j – расстояние от j -й сосредоточенной силы до крайней левой силы, n – число колес. В качестве балки Эйлера для метро принята тоннельная обделка, для трамвая – рельсо-шпальная решет-

ка, для автобуса дорожное покрытие. Вязкое демпфирование грунта определяется по формуле [3]:

$$C = \rho\alpha = \sqrt{\rho E \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (2)$$

где ρ (кг /м³) – плотность грунта, E (Па) – модуль упругости и ν – коэффициент Пуассона грунта.

Выполняя ряд преобразований, согласно [3], а именно, применив преобразование Фурье к обеим частям уравнения (1) по двум переменным, получим выражения скорости и ускорения балки в частотной области, далее используя свойство дельта функции, выполним интегрирование этих выражений по переменной ω_0 . Для вычисления интегралов по переменной V применим теорию вычетов, получим:

$$u(x,t) = \begin{cases} i \sum_{\text{Im } v_k > 0} \sum_{j=1}^n P_j \exp(-i(x+l_j-Vt)v_k) / (4Elv_k^3 - 2mV^2v_k + iCV), & \text{при } x+l_j-Vt < 0 \\ -i \sum_{\text{Im } v_k < 0} \sum_{j=1}^n P_j \exp(-i(x+l_j-Vt)v_k) / (4Elv_k^3 - 2mV^2v_k + iCV), & \text{при } x+l_j-Vt \geq 0 \end{cases}$$

$$\dot{u}(x,t) = \begin{cases} -V \sum_{\text{Im } v_k > 0} \sum_{j=1}^n P_j v \exp(-i(x+l_j-Vt)v_k) / (4Elv_k^3 - 2mV^2v_k + iCV), & \text{при } x+l_j-Vt < 0 \\ V \sum_{\text{Im } v_k < 0} \sum_{j=1}^n P_j v \exp(-i(x+l_j-Vt)v_k) / (4Elv_k^3 - 2mV^2v_k + iCV), & \text{при } x+l_j-Vt \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\ddot{u}(x,t) = \begin{cases} -iV^2 \sum_{\text{Im } v_k > 0} \sum_{j=1}^n P_j v^2 \exp(-i(x+l_j-Vt)v_k) / (4Elv_k^3 - 2mV^2v_k + iCV), & \text{при } x+l_j-Vt < 0 \\ iV^2 \sum_{\text{Im } v_k < 0} \sum_{j=1}^n P_j v^2 \exp(-i(x+l_j-Vt)v_k) / (4Elv_k^3 - 2mV^2v_k + iCV), & \text{при } x+l_j-Vt \geq 0 \end{cases}$$

где, v_k – корни уравнения: $Elv^4 - mV^2v^2 + iCVv + K = 0$.

В применения полученных выражений с помощью ПК Mathcad, получили результаты расчета виброускорений при прохождении каждого транспорта по отдельности и одновременно.

Выводы

В результате натурных экспериментов на трех участках в историческом центре Москвы впервые установлено, что при комплексном воздействии наземного и подземного транспорта наблюдается не только

суммация вибрационных полей, но и их интерференция. Зафиксированы временные промежутки, в которые происходит взаимное гашение волн, что является парадоксальным, но крайне важным фактором для точного прогнозирования динамического воздействия на памятники архитектуры.

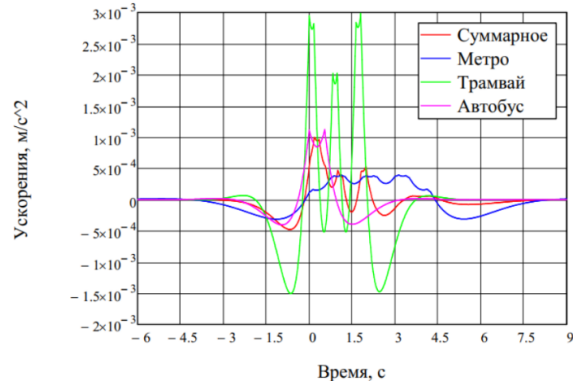


Рис. 3. Суммарное виброускорение в м/с²
Fig. 3. Total vibration acceleration in m/s²

Разработанная конечно-элементная модель в ПК MIDAS GTS NX и аналитическая модель балки на вязко-упругом основании позволяют с достаточной точностью описывать волновые процессы в системе «транспорт – грунт – сооружение». Аналитические выражения, полученные в ПК Mathcad, дают возможность оперативно оценивать уровни виброускорений в широком диапазоне частот без проведения трудоемких вычислительных экспериментов.

Сравнительный анализ результатов виброускорения, полученных экспериментально и в результате численного моделирования, показывает допустимые расхождения от 4 до 20 %, что подтверждает адекватность предложенных математических моделей и методов расчета и позволяет рекомендовать их для инженерной практики при оценке влияния транспорта на существующую застройку.

Список литературы

1. Титов В. П. Территориально-пространственное развитие трамвайной транспортной инфраструктуры Москвы и ее влияние на существующую застройку / В. П. Титов, В. И. Гришин, Н. В. Купчикова, Ю. В. Лазуткин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2024. – № 3 (49). – С. 40–49. – DOI 10.52684/2312-3702-2024-49-3-40-49.
2. Федоров В. С. Об организации опытно-экспериментальной работы в ходе исследования влияния комплексности вибровоздействий наземного и подземного транспорта на здания и сооружения / В. С. Федоров, Н. В. Купчикова, Ю. В. Лазуткин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2024. – № 1 (47). – С. 95–100. – DOI 10.52684/2312-3702-2024-47-1-95-100.
3. Пестрякова Е. А. Спектры максимальных реакций экипажей поездов на землетрясения / Е. А. Пестрякова, Е. Н. Курбацкий, Ч. Т. Нгуен // Транспортные сооружения. – 2019. – Т. 6, № 2. – С. 13. – <https://doi.org/10.15862/15SAT5219>.
4. Макаров А. В. Корреляционно-регрессионный анализ взаимовлияния загруженности автостоянок и внутривозрастных территорий / А. В. Макаров, С. Г. Артемова, Д. В. Ивасик // Московский транспорт. Наука и проектирование. – 2025. – № 4 (4). – С. 28–37.
5. Купчикова Н. В. Свайные фундаменты сушениями при землетрясениях в транспортном строительстве / Н. В. Купчикова // Московский транспорт. Наука и проектирование. – 2025. – № 4 (4). – С. 48–58.
6. Золина Т. В. Графоаналитическое моделирование и оценка эффективности транспортно-планировочных решений в условиях линейно-вытянутой городской структуры (на примере г. Волгограда) / Т. В. Золина, С. С. Рекунов // Московский транспорт. Наука и проектирование. – 2025. – № 3 (3). – С. 37–46.
7. Терехов И. А. Учет взаимного влияния дефектов на категорию технического состояния конструкций / И. А. Терехов, А. В. Ямалов // Московский транспорт. Наука и проектирование. – 2025. – № 3 (3). – С. 47–55.

8. Нгуен Ч. Т. Преобразование Фурье и аппарат обобщенных функций в оценке вибраций тоннеля метро Вьетнама при движении сосредоточенных сил / Ч. Т. Нгуен // Московский транспорт. Наука и проектирование. – 2025. – № 2 (2). – С. 60–68.
9. Лазуткин Ю. В. Результаты эксперимента по оценке влияния комплексности сочетания динамических воздействий от наземного и подземного транспорта / Ю. В. Лазуткин // Московский транспорт. Наука и проектирование. – 2025. – № 2 (2). – С. 40–50.
10. Дьяков М. И. Экспериментальные данные быстрых догрузений стальных жестких фундаментов в транспортном строительстве / М. И. Дьяков, Б. Ю. Барыкин, И. М. Дьяков // Московский транспорт. Наука и проектирование. – 2025. – № 2 (2). – С. 51–59.
11. Лазуткин Ю. В. Численное моделирование комплексности динамических воздействий от наземного и подземного транспорта / Ю. В. Лазуткин, Н. В. Купчикова, А. А. Еремеев // Теория и практика фундаментостроения : сборник тезисов докладов XV Международного симпозиума по реологии грунтов, посвященного 95-летию КГАСУ и 60-летию кафедры «Основания, фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология», г. Казань, 04–06 июня 2025 года. – Казань : Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. – С. 128.
12. Патент № 2764509 С1 Российская Федерация, МПК E04H 1/00, F03D 9/00. строительно-экологический комплекс : № 2021117790 : заявл. 16.06.2021 : опубл. 18.01.2022 / Н. В. Купчикова, Р. И. Шаяхмедов, Т. В. Золина ; заявитель АГАСУ.
13. Купчикова Н. В. Техническая экспертиза в эксплуатации инженерных систем и коммуникаций / Н. В. Купчикова. – Астрахань : Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. – 138 с. – ISBN 978-5-93026-138-7.
14. Zolina T. Monitoring of the collapse of the shores of reservoirs and the technology of their surface and deep fixing / T. Zolina, S. Strelkov, N. Kupchikova, K. Kondrashin // E3S Web of Conferences : Key Trends in Transportation Innovation, КТТИ 2019, Khabarovsk, 24–26 октября 2019 года. – Khabarovsk : EDP Sciences, 2020. – Vol. 157. – P. 02011. – DOI 10.1051/e3sconf/202015702011.
15. Kupchikova N. V. Numerical researches of the work of the pile with end spherical broadening as part of the pile group / N. V. Kupchikova // Building and Reconstruction. – 2019. – № 6 (86). – P. 3–9. – DOI 10.33979/2073-7416-2019-86-6-3-9.
16. Курбацкий Е. Н. Оценка влияния поверхностных слоев грунта на параметры спектров максимальных реакций / Е. Н. Курбацкий, Е. А. Пестрякова, Ш. А. Хуссейн // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2025. – Т. 21, № 1. – С. 48–61. – DOI 10.22363/1815-5235-2025-21-1-48-61.
17. Курбацкий Е. Н. Оценка влияния поверхностных слоев грунта на параметры спектров максимальных реакций / Е. Н. Курбацкий, А. Ш. Хуссейн // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2024. – № 1 (68). – С. 47–48.

References

1. Titov V. P., Grishin V. I., Kupchikova N. V., Lazutkin Yu. V. Territorialno-prostranstvennoe razvitie tramvainoi transportnoi infrastrukturi Moskvi i yee vliyaniye na sushchestvuyushchuyu zastroyku [Territorial and spatial development of moscow's tram transport infrastructure and its impact on existing development]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2024, no. 3 (49), pp. 40–49. DOI 10.52684/2312-3702-2024-49-3-40-49.
2. Fedorov V. S., Kupchikova N. V., Lazutkin Yu. V. Ob organizatsii opitno-eksperimentalnoi raboti v khode issledovaniya vliyaniya kompleksnosti vibrovozdeystvii nazemnogo i podzemnogo transporta na zdaniya i sooruzheniya [On the organization of experimental work in the course of studying the influence of complex vibration effects of ground and underground transport on buildings and structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2024, no. 1 (47), pp. 95–100. DOI 10.52684/2312-3702-2024-47-1-95-100.
3. Pestyakova Ye. A., Kurbatskii Ye. N., Nguen Ch. T. Spektri maksimalnikh reakttsii ekipazhei poezdov na zemletryaseniya [Spectra of maximum responses of train crews to earthquakes]. *Transportnie sooruzheniya* [Transport Structures]. 2019, vol. 6, no. 2, pp. 13. <https://doi.org/10.15862/15SATS219>.
4. Makarov A. V., Artemova S. G., Ivasik D. V. Korrelyatsionno-regressionnii analiz vzaimovliyaniya zagruzhennosti avtostoyanok i vnutridvorovikh territorii [Correlation and regression analysis of the mutual influence of parking lot and intra-yard area congestion]. *Moskovskii transport. Nauka i proektirovanie* [Moscow Transport. Science and Design]. 2025, no. 4 (4), pp. 28–37.
5. Kupchikova N. V. Svainie fundamenti s ushireniami pri zemletryaseniya v transportnom stroitel'stve [Pile Foundations with Widening during Earthquakes in Transport Construction]. *Moskovskii transport. Nauka i proektirovanie* [Moscow Transport. Science and Design]. 2025, no. 4 (4), pp. 48–58.
6. Zolina T. V., Rekunov S. S. Grafoanaliticheskoe modelirovanie i otsenka effektivnosti transportno-planirovochnikh reshenii v usloviyakh lineino-vityanutoi gorodskoi strukturi (na primere g. Volgograda) [Graph-analytical modeling and evaluation of the efficiency of transport planning solutions in the conditions of a linear-elongated urban structure (on the example of Volgograd)]. *Moskovskii transport. Nauka i proektirovanie* [Moscow Transport. Science and Design]. 2025, no. 3 (3), pp. 37–46.
7. Terekhov I. A., Yamalov A. V. Uchet vzaimnogo vliyaniya defektov na kategoriyu tekhnicheskogo sostoyaniya konstruksii [Accounting for the Mutual Influence of Defects on the Category of Technical Condition of Structures]. *Moskovskii transport. Nauka i proektirovanie* [Moscow Transport. Science and Design]. 2025, no. 3 (3), pp. 47–55.
8. Nguen Ch. T. Preobrazovanie Fure i apparat obobshchennikh funktsii v otsenke vibratsii tonnelya metro Vetnama pri dvizhenii sredotochennikh sil [Fourier transform and the apparatus of generalized functions in assessing vibrations of a vietnam tunnel under the motion of concentrated forces]. *Moskovskii transport. Nauka i proektirovanie* [Moscow Transport. Science and Design]. 2025, no. 2 (2), pp. 60–68.
9. Lazutkin Yu. V. Rezultati eksperimenta po otsenke vliyaniya kompleksnosti sochetaniya dinamicheskikh vozdeystvii ot nazemnogo i podzemnogo transporta [Results of an Experiment to Assess the Impact of a Complex Combination of Dynamic Impacts from Surface and Underground Transport]. *Moskovskii transport. Nauka i proektirovanie* [Moscow Transport. Science and Design]. 2025, no. 2 (2), pp. 40–50.
10. Dyakov M. I., Barikin B. Yu., Dyakov I. M. Eksperimentalnie dannie bistrikh dogruzhonii stalnikh zhestkikh fundamentov v transportnom stroitel'stve [Experimental data on rapid additional loading of rigid steel foundations in transport construction]. *Moskovskii transport. Nauka i proektirovanie* [Moscow Transport. Science and Design]. 2025, no. 2 (2), pp. 51–59.

11. Lazutkin Yu. V., Kupchikova N. V., Yeremeev A. A. Chislennoe modelirovanie kompleksnosti dinamicheskikh vozdeystviy ot nazemnogo i podzemnogo transporta [Numerical modeling of the complexity of dynamic effects from surface and underground transport]. *Teoriya i praktika fundamentostroeniya : sbornik tezisov dokladov XV Mezhdunarodnogo simpoziuma po reologii gruntov, posvyashchennogo 95-letiyu KGASU i 60-letiyu kafedri «Osnovaniya, fundamenti, dinamika sooruzhenii i inzhenernaya geologiya», g. Kazan, 04–06 iyunya 2025 goda* [Theory and Practice of Foundation Engineering: Collection of Abstracts of the XV International Symposium on Soil Rheology, Dedicated to the 95th Anniversary of KSUACE and the 60th Anniversary of the Department of Foundations, Foundations, Dynamics of Structures and Engineering Geology, Kazan, June 4–6, 2025]. Kazan: Kazanskii gosudarstvennii arkhitekturno-stroitel'nyi universitet; 2025, pp. 128.
12. Kupchikova N. V., Shayakhmedov R. I., Zolina T. V. Patent № 2764509 C1 Rossiiskaya Federatsiya, MPK E04H 1/00, F03D 9/00. *Stroitel'no-ekologicheskii kompleks : № 2021117790 : zayavl. 16.06.2021 : opubl. 18.01.2022 / ; zayavitel AGASU* [Construction and Environmental Complex: No. 2021117790: declared 06/16/2021: published 01/18/2022 /; applicant AGASU].
13. Kupchikova N. V. *Tekhnicheskaya ekspertiza v ekspluatatsii inzhenernykh sistem i kommunikatsii* [Technical expertise in the operation of engineering systems and communications]. Astrakhan: Astrakhanskii gosudarstvennii arkhitekturno-stroitel'nyi universitet; 2021, 138 p. ISBN 978-5-93026-138-7.
14. Zolina T., Strelkov S., Kupchikova N., Kondrashin K. Monitoring of the collapse of the shores of reservoirs and the technology of their surface and deep fixing. *E3S Web of Conferences : Key Trends in Transportation Innovation, KTTI 2019, Khabarovsk, October 24–26, 2019 goda*. Khabarovsk: EDP Sciences; 2020, vol. 157, pp. 02011. DOI 10.1051/e3sconf/202015702011.
15. Kupchikova N. V. Numerical researches of the work of the pile with end spherical broadening as part of the pile group. *Building and Reconstruction*. 2019, no. 6 (86), pp. 3–9. DOI 10.33979/2073-7416-2019-86-6-3-9.
16. Kurbatskii Ye. N., Pestryakova Ye. A., Khussein Sh. A. Otsenka vliyaniya poverkhnostnykh sloev grunta na parametri spektrov maksimalnykh reaktzii [Assessing the influence of surface soil layers on the parameters of maximum response spectra]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii* [Structural Mechanics of Engineering Structures and Facilities]. 2025, vol. 21, no. 1, pp. 48–61. DOI 10.22363/1815-5235-2025-21-1-48-61.
17. Kurbatskii Ye. N., Khussein A. Sh. Otsenka vliyaniya poverkhnostnykh sloev grunta na parametri spektrov maksimalnykh reaktzii [Assessing the impact of surface soil layers on maximum response spectrum parameters]. *Prirodnie i tekhnogennie riski. Bezopasnost sooruzhenii* [Natural and Man-Made Risks. Structural Safety]. 2024, no. 1 (68), pp. 47–48.

© Ю. В. Лазуткин

Ссылка для цитирования:

Лазуткин Ю. В. Аналитический расчёт виброускорений при движении метро, трамвая и автотранспорта вблизи зданий и сооружений // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 1 (55). С. 94–99.