

6. Ильичев В. А. Прогноз осадок зданий при прокладке коммуникационных тоннелей мелкого заложения в Москве / В. А. Ильичев, Н. С. Никифорова, М. М. Тупиков // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 1 (26). – С. 67–71.
7. Данг В. Ч. Изменение напряженно-деформированного состояния системы «грунтовый массив – тоннель» в зависимости от глубины заложения тоннеля / В. Ч. Данг // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2015. – № 4 (43). – С. 89–94.
8. Brinkgreve R. B. J. PLAXIS 2D – Reference Manual / R. B. J. Brinkgreve, W. M. Swolfs, E. Engine. – Plaxis bv, The Netherlands, 2020.
9. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. – Москва : Минрегион России, 2011.
10. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – Москва : Стандартинформ, 2013.
11. Meguid M. A., Dang H. K. The effect of erosion voids on existing tunnel linings / M. A. Meguid, H. K. Dang // Tunneling and Underground Space Technology. – 2009. – Vol. 24, iss. 3. – P. 278–286. – DOI: 10.1016/j.tust.2008.09.006.
12. Pelizza S., Peila D. Soil and rock reinforcements in tunnelling / S. Pelizza, D. Peila // Tunneling and Underground Space Technology. – 2013. – Vol. 35. – P. 1–12. – DOI: 10.1016/j.tust.2012.08.001
13. Бондаренко И. С. Модели и алгоритмы анализа технологических решений при строительстве коммуникационных тоннелей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. С. Бондаренко. – Москва, 2012. – 23 с.
14. Курганский М. Н. Определение влияния динамических воздействий на перекрытия коммуникационных тоннелей / М. Н. Курганский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 9. – С. 71–74.
15. Темкин И. О. Оценка рисков строительства коммуникационных тоннелей на основе экспертного анализа проектных решений / И. О. Темкин, И. С. Бондаренко // Тяжелое машиностроение. – 2013. – № 9. – С. 38–40.
16. Дизенко С. И. Современные способы усиления оснований и фундаментов / С. И. Дизенко, А. А. Ситниченко, Л. В. Елисеев // E-Scio. – 2022. – № 6 (69). – С. 169–177.
17. Гречко Д. С. Методы усиления фундаментов и оснований грунтов / Д. С. Гречко // Совершенствование методологии познания в целях развития науки : сборник статей Международной научно-практической конференции. – Казань, 2018. – С. 18–21.
18. Peck R. B. Deep excavations and tunneling in soft ground / R. B. Peck // Proc. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. – Mexico City, 1969. – P. 225–290.
19. ITA/AITES. Guidelines for the design of underground works. – 2017.
20. Midas GTS NX. Integrated Solution for Geo-technical and Tunnel Analysis. – Midas Information Technology Co., Ltd., 2021.

© Н. В. Купчикова, Е. А. Купчиков

Ссылка для цитирования:

Купчикова Н. В., Купчиков Е. А. Коммуникационные тоннели круглого сечения: конструктивные особенности и расчет взаимодействия с грунтовым массивом // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2025. № 4 (54). С. 50–55.

УДК 624.131.5 + 624.042.7
DOI 10.52684/2312-3702-2025-54-4-55-62

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ОТ РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА НА ГРУНТОВЫЙ МАССИВ И ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ю. В. Лазуткин, А. А. Еремеев

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

Еремеев Алексей Александрович, аспирант, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

Объектом исследования является грунтовый массив и подземное сооружение - тоннель, подверженные динамическому воздействию от рельсового транспорта - трамвая в условиях плотной городской застройки. Актуальность работы обусловлена необходимостью прогнозирования вибрационного воздействия на исторические здания и инженерную инфраструктуру при эксплуатации и реконструкции транспортных систем. Цель исследования – количественная оценка уровней вибраций, передаваемых в грунт от движущегося трамвая, и анализ их распределения в массиве с учетом реальной геологии и конструкций. В качестве основного метода использовано трехмерное конечно-элементное моделирование в специализированном геотехническом комплексе MIDAS GTS NX. На основе инженерно-геологических изысканий построена детализированная модель участка, включающая слоистый грунтовый массив, тоннель круглого сечения, фундаменты зданий, дорожные одежды и рельсошпальную решетку. Динамическая нагрузка от трамвая модели 71-931 «Витязь-М» задана как узловая, изменяющаяся во времени, с анализом на характерных частотах 8, 16 и 31,5 Гц. Результаты моделирования показали, что максимальные виброперемещения в грунте достигают $5 \cdot 10^{-5}$ м, а виброускорения –



$5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$. Наибольшие уровни колебаний наблюдаются в верхних слоях грунта в непосредственной зоне контакта и экспоненциально затухают с глубиной и расстоянием. Установлено, что тоннель существенно перераспределяет волновое поле, выступая как жесткое включение. Полученные количественные данные и зависимости позволяют оценить зону влияния трамвайного движения и могут быть использованы при проектировании мероприятий по виброзащите исторической застройки и модернизации трамвайной инфраструктуры.

Ключевые слова: динамическое воздействие; рельсовый транспорт; трамвай; вибрация; конечно-элементное моделирование; грунтовый массив; подземное сооружение; MIDAS GTS NX; зона влияния.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF DYNAMIC LOADS FROM RAIL TRANSPORT ON THE SOIL MASS AND UNDERGROUND STRUCTURES USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Yu. V. Lazutkin, A. A. Yeremeyev

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

Yeremeyev Aleksey Aleksandrovich, postgraduate student, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

The object of the study is the soil mass and an underground structure (tunnel) subjected to dynamic impact from rail transport (tram) in conditions of dense urban development. The relevance of the work is due to the need to predict the vibrational impact on historical buildings and engineering infrastructure during the operation and reconstruction of transport systems. The purpose of the study is a quantitative assessment of the vibration levels transmitted into the ground from a moving tram and an analysis of their distribution in the mass, taking into account real geology and structures. The main method used is three-dimensional finite element modeling in the specialized geotechnical complex MIDAS GTS NX. Based on engineering-geological surveys, a detailed model of the site was built, including a layered soil mass, a circular tunnel, building foundations, road pavements, and a rail-sleeper grid. The dynamic load from the tram model 71-931 "Vityaz-M" is set as a nodal load varying in time, with analysis at characteristic frequencies of 8, 16, and 31.5 Hz. The simulation results showed that the maximum vibration displacements in the soil reach $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, and vibration accelerations – $5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$. The highest oscillation levels are observed in the upper soil layers in the immediate contact zone and decay exponentially with depth and distance. It was found that the existing underground structure (tunnel) significantly redistributes the wave field, acting as a rigid inclusion. The obtained quantitative data and dependencies make it possible to assess the zone of influence of tram traffic and can be used in designing measures for vibration protection of historical buildings and modernizing tram infrastructure.

Keywords: dynamic impact; rail transport; tram; vibration; finite element modeling; soil mass; underground structure; MIDAS GTS NX; zone of influence.

Введение

Интенсификация движения городского рельсового транспорта, в частности трамвая, является неотъемлемой частью развития транспортной инфраструктуры мегаполисов. Однако динамические нагрузки от подвижного состава, передаваемые через рельсошпальную решетку и грунтовое основание, генерируют колебания, распространяющиеся в окружающем массиве [1, 2]. Эти вибрации могут оказывать негативное влияние как на наземные исторические здания с чувствительными фундаментами [3], так и на подземные инженерные сооружения (тоннели, коллекторы, фундаменты), расположенные в зоне влияния [4, 5]. Особую актуальность проблема приобретает в контексте реконструкции трамвайных депо и обновления путевого хозяйства в исторических центрах городов, где требования к сохранности объектов культурного наследия и ограничения по дополнительным воздействиям наиболее строги [6, 7].

Прогнозирование и оценка уровней вибраций традиционно представляют сложную задачу, требующую учета большого числа факторов: характеристик подвижного состава и пути, инженерно-геологических условий, наличия и конструкции подземных сооружений [8, 9]. Современным и эффективным инструментом для решения таких задач является метод конечных элементов (МКЭ),

реализованный в специализированных геотехнических комплексах, позволяющих проводить трехмерный нестационарный анализ взаимодействия системы «подвижная нагрузка – путь – грунтовый массив – сооружение» [10, 11].

Целью настоящего исследования является количественная оценка уровней вибрационного воздействия от трамвая на грунтовый массив и подземное сооружение с помощью трехмерного конечно-элементного моделирования. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: 1) разработать детализированную расчетную модель участка с учетом реальной геологии, конструкций пути, тоннеля и зданий; 2) задать адекватную динамическую нагрузку от трамвая; 3) провести анализ виброперемещений и виброускорений в массиве на характерных частотах; 4) оценить зону влияния и сделать выводы о возможном воздействии на окружающую застройку.

Методы и материалы

Моделирование выполнено в программном комплексе MIDAS GTS NX, предназначенном для решения сложных связанных геотехнических задач [12]. На основании данных инженерно-геологических изысканий (рис. 1) была построена трехмерная модель участка размерами, подобранными для исключения влияния граничных условий на зону интереса. Все параметрические данные конечно-элементной модели соответствуют

экспериментальным [12]. Модель включает шесть слоев грунта общей мощностью 26,75 м, характеристики которых - модуль деформации E , коэффициент Пуассона ν , удельный вес γ , угол внутреннего трения φ , удельное сцепление c приведены в таблице 1 и назначены в соответствии с ГОСТ 25100-2020 и СП 22.13330.2016. Для моделирования поведения грунта использована упругопластическая модель «Hardening Soil».

При расчете использована модель грунтов «2d Equivalent», характеристики грунтов определены на основании отчета по инженерно-геологическим изысканиям (рис. 2), и по ГОСТ 25100-2020 и СП 22.13330.2016. Заданные характеристики грунтов приведены далее (табл. 1).

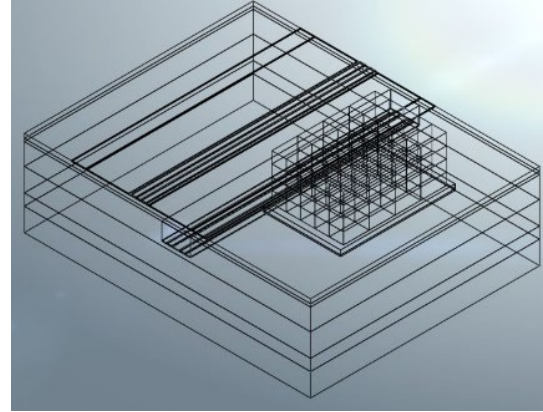


Рис. 1. Геометрия расчетной модели (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Geometry of the computational model (illustration by the authors)

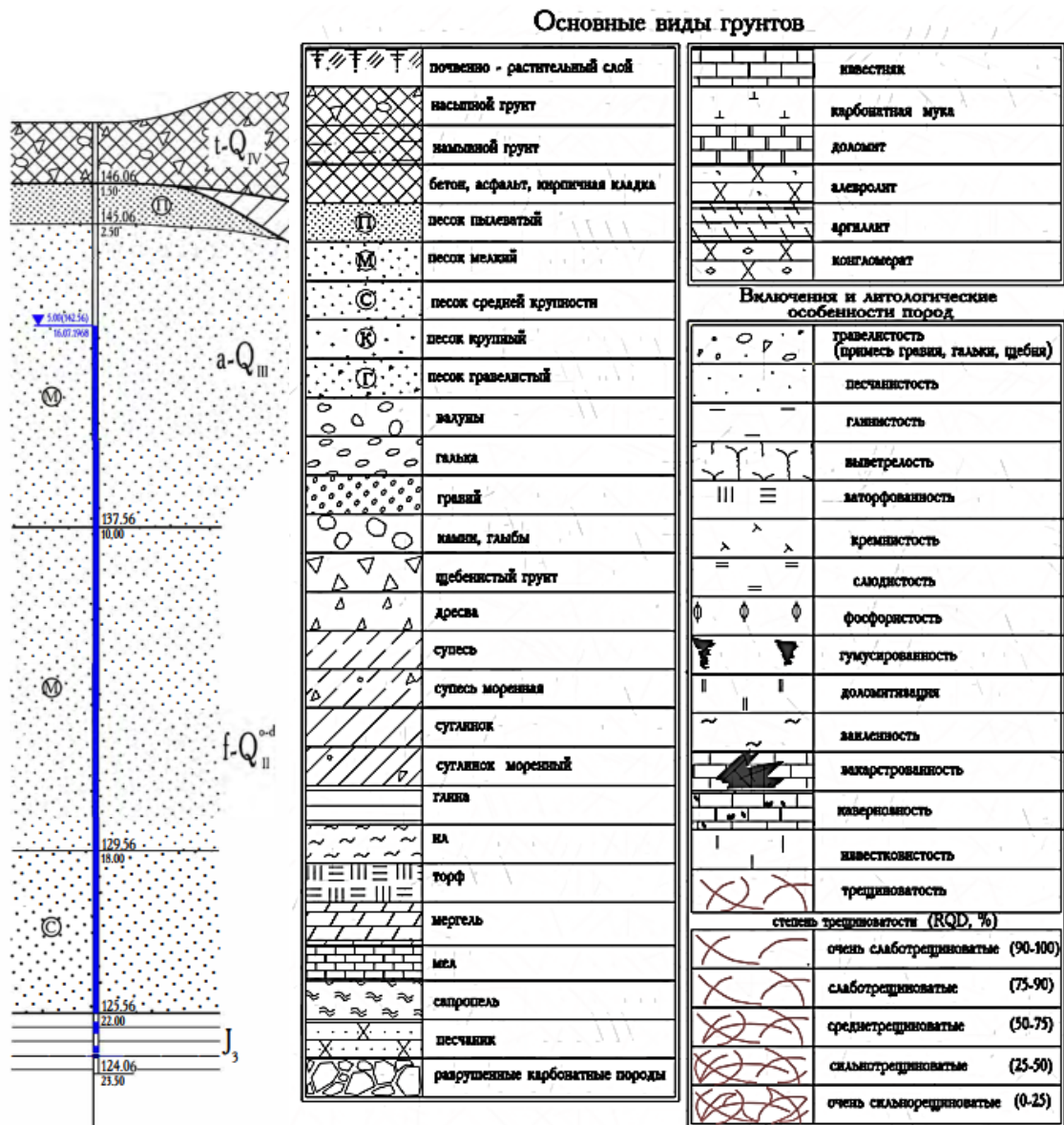


Рис. 2. Геологический разрез анализируемого участка (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Geological section of the analyzed area (illustration by the authors)

Таблица 1

Характеристики грунтов

	Shear Modulus, G, кН/м ²	Poissons Ratio, ν	Unit Weight, γ , кН/м ³	Damping Ratio
Щебень	15000	0,35	19,6	0,05
Насыпной грунт	5200	0,3	17,84	0,05
Песок пылеватый	7205	0,31	17,15	0,05
Песок мелкий	15180	0,32	17,64	0,05
Песок средний	18620	0,33	18,62	0,05
Глина	15410	0,34	17,93	0,05

Мощность слоев грунта составляет 1,25; 1,00; 7,50; 8,00; 4,00; 5,00 м с первого по шестой соответственно. Помимо грунта выше первого слоя в границах автомобильной дороги уложен слой щебня 0,25 м, и асфальта 0,12 м, в зоне трамвайных путей слой щебня 0,25 м и 0,18 м, и железобетонная шпала из бетона В-45 (табл. 2).

Для построения сетки конечных элементов необходимо выбрать шаг разбивки элементов, в данной модели принят шаг от 0,5 м в точке контакта нагрузки и модели, и в двух верхних слоях грунта и конструктивных элементах, до 5 м в нижних слоях грунта, общее количество узлов модели – порядка 200 тыс. (рис. 3). Большая часть модели представлена в виде трехмерных сплошных солюдов, обделка тоннеля и каркас здания представлены в виде двухмерных поверхностей.

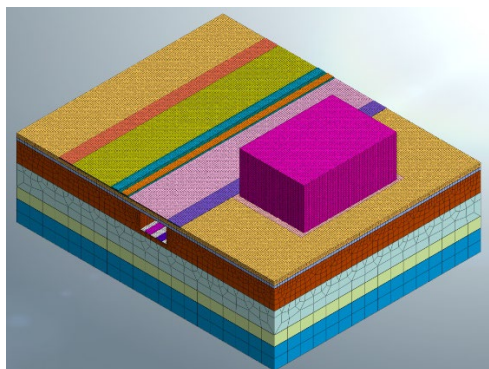


Рис. 3. Сетка конечных элементов (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Finite element mesh (illustration by the authors)

Для создания конструктивных элементов здания, тоннеля, асфальта, шпал применена модель Isotropic-Elastic со следующими характеристиками (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики материалов

Name	E, кН/м ²	ν	γ , кН/м ³	Damping Ratio
Асфальт	1.52E+06	0.35	25	0.05
Бетон В-30	3.25E+07	0.2	24.5	0.05
Кирпич	3.45E+06	0.25	18	0.05
Бетон В-45	3.75E+07	0.2	24.52	0.05

Граничные условия представлены жестким закреплением по всем направлениям нижней границы модели, и закреплением по горизонтальной оси для боковых границ модели. Для ис-

ключения влияния от отраженных волн предусмотрены демпфирующие узлы по каждой границе (рис. 4). В модель интегрированы конструктивные элементы:

- подземный тоннель круглого сечения, смоделированный оболочочными элементами;
- фундаменты и стены существующего здания;
- конструкции пути: слой щебня (0,25 м), железобетонные шпалы (модель Isotropic-Elastic, бетон В45), рельсы;
- дорожная одежда: слой щебня (0,25 м) и асфальтобетон (0,12 м).

Сетка конечных элементов построена с градиентом размера: от 0,5 м в зоне контакта нагрузки и конструкций до 5 м в удаленных областях. Общее количество узлов модели составило ~200 000 (рис. 2).

Нагрузки и граничные условия

Нижняя граница модели закреплена жестко, на боковых гранях заданы условия симметрии, для поглощения отраженных волн и устранения влияния искусственных границ по периметру модели применены демпфирующие элементы.

Динамическая нагрузка задана от трамвая модели 71-931 «Витязь-М», наиболее распространенной в Москве. Осовая нагрузка принята 100 кН. Нагрузка от каждого колеса прикладывалась как узловая, изменяющаяся во времени, по временной функции с шагом дискретизации 0,01 с (рис. 4). Расстояние между осями и колесами соответствовало реальной геометрии вагона.

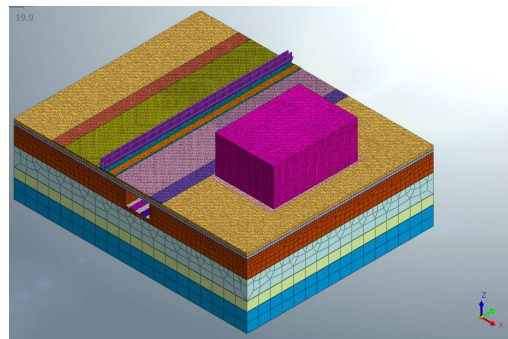


Рис. 4. Места приложения нагрузки

от подвижного состава (иллюстрация авторов)
Fig. 4. Places of application of load from rolling stock (illustration by the authors)

Метод расчета

Расчет проведен методом Linear Time History (Modal) – модального линейного анализа по времени. Анализ выполнен для трех характерных октавных частот, наиболее значимых для оценки воздействия на здания: 8 Гц, 16 Гц и 31,5 Гц.

Нагрузка от подвижного состава задается в виде динамической узловой нагрузки по временной функции с дискретизацией 0,01 с, 100 кН на ось для трамвая (рис. 4). Для определения расстояния между осями подвижного состава взяты наиболее распространенные в Москве модели: трамвай – 71-931 «Витязь-М».

Нагрузка задается точно от каждого колеса на расстоянии 1,5 м между ними по половине осевой нагрузки.

При расчете использован метод Linear time history (Modal), модальный линейный анализ по времени с дискретизацией 0,01 с, на частотах 8; 16; 31,5 Hz (рис. 5-12).

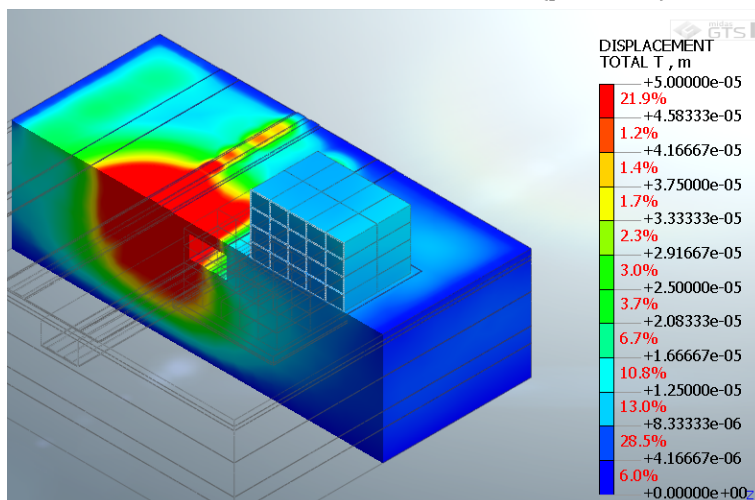


Рис. 5. Общее перемещение с максимальным значением $5 \cdot 10^{-5}$ м (иллюстрация авторов)
Fig. 5. Total displacement with a maximum value of $5 \cdot 10^{-5}$ m (illustration by the authors)

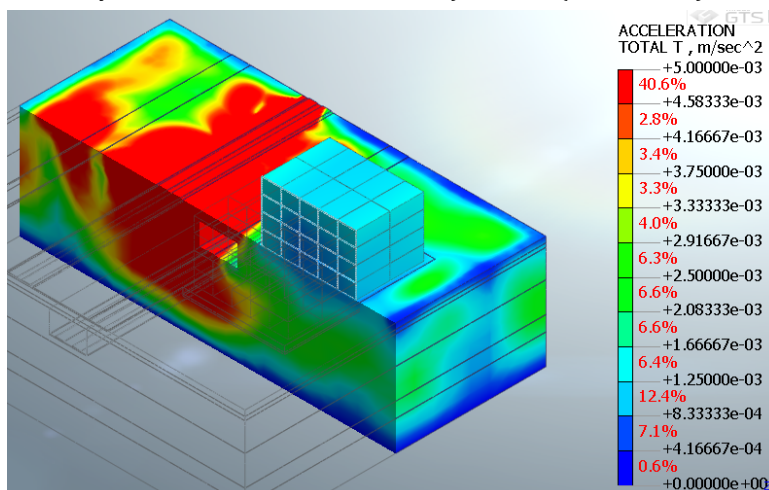


Рис. 6. Общее ускорение с максимальным значением $5 \cdot 10^{-3}$ м/с² (иллюстрация авторов)
Fig. 6. Overall acceleration with a maximum value of $5 \cdot 10^{-3}$ m/s² (illustration by the authors)

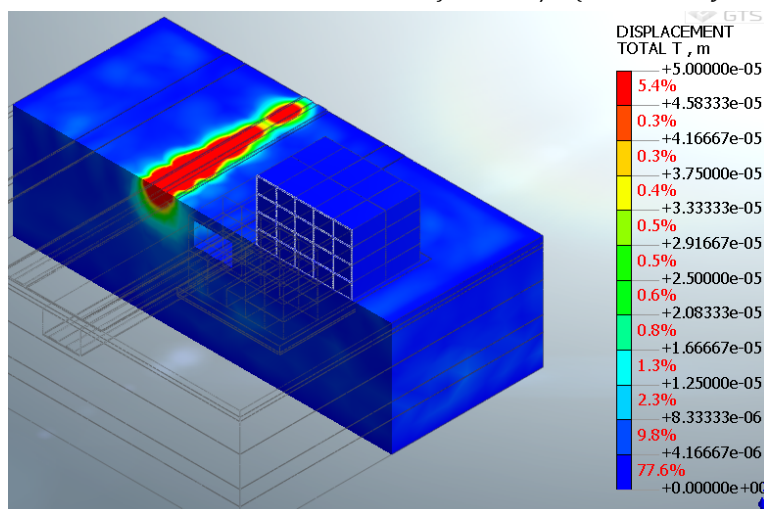


Рис. 7. Перемещение на частоте 8 Hz с максимальным значением $5 \cdot 10^{-5}$ м (иллюстрация авторов)
Fig. 7. Displacement at a frequency of 8 Hz with a maximum value of $5 \cdot 10^{-5}$ m (illustration by the authors)

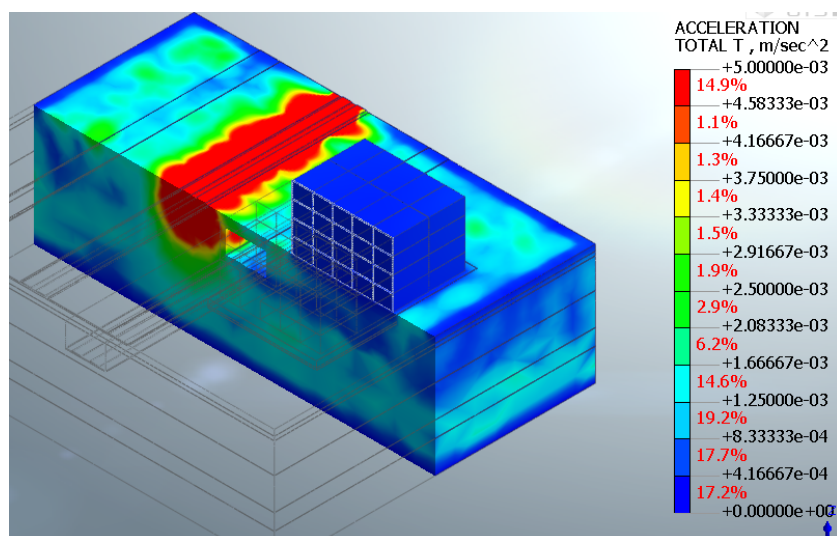


Рис. 8. Ускорение на частоте 8 Hz с максимальным значением $5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$ (иллюстрация авторов)
Fig. 8. Acceleration at a frequency of 8 Hz with a maximum value of $5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ (illustration by the authors)

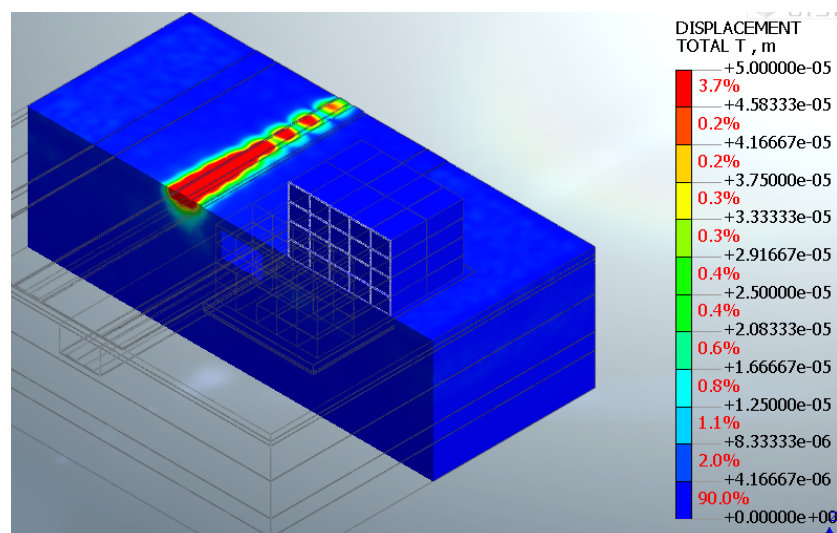


Рис. 9. Перемещение на частоте 16 Hz с максимальным значением $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ (иллюстрация авторов)
Fig. 9. Displacement at a frequency of 16 Hz with a maximum value of $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ (illustration by the authors)

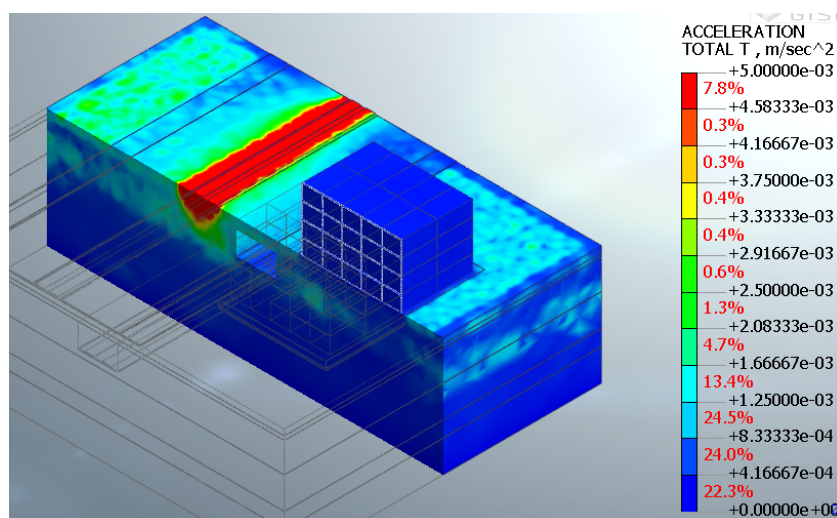


Рис. 10. Ускорение на частоте 16 Hz с максимальным значением $5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$ (иллюстрация авторов)
Fig. 10. Acceleration at a frequency of 16 Hz with a maximum value of $5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$ (illustration by the authors)

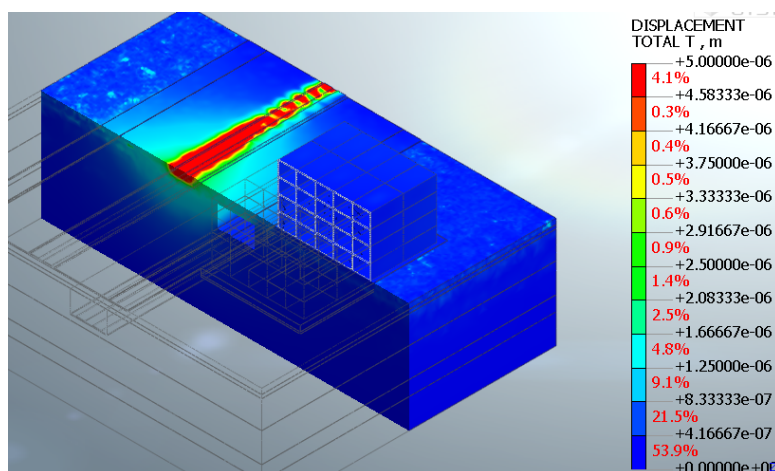


Рис. 11. Перемещение на частоте 16 Hz с максимальным значением $5 \cdot 10^{-6}$ м (иллюстрация авторов)
Fig. 11. Displacement at a frequency of 16 Hz with a maximum value of $5 \cdot 10^{-6}$ m (illustration by the authors)

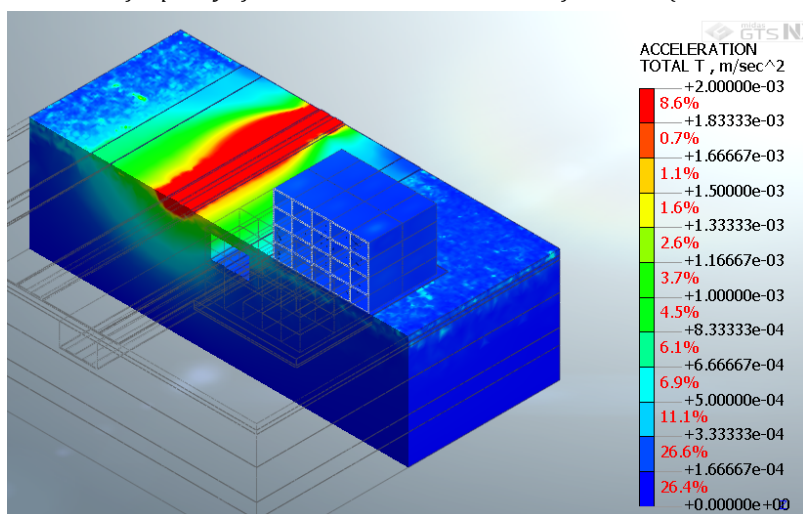


Рис. 12. Ускорение на частоте 16 Hz с максимальным значением $2 \cdot 10^{-3}$ м/с² (иллюстрация авторов)
Fig. 12. Acceleration at a frequency of 16 Hz with a maximum value of $2 \cdot 10^{-3}$ m/s² (illustration by the authors)

Результаты и обсуждение

Распределение виброперемещений и ускорений представлены на рисунках 8 и 7, как результаты моделирования в виде полей общих перемещений и ускорений в грунтовом массиве на частоте 8 Гц. Анализ показал, что максимальные перемещения составляют порядка $5 \cdot 10^{-5}$ м, а ускорения – $5 \cdot 10^{-3}$ м/с², как и следовало ожидать, максимальные значения сосредоточены в непосредственной близости от точек приложения нагрузки в зоне пути и быстро затухают с глубиной и в радиальном направлении.

Сравнение результатов на разных частотах (8, 16, 31,5 Гц) показало, что с ростом частоты происходит уменьшение глубины проникновения колебаний в массив при некотором изменении картины их распределения. На частоте 31,5 Гц максимальные перемещения снизились до $5 \cdot 10^{-6}$ м, а ускорения – до $2 \cdot 10^{-3}$ м/с², что свидетельствует о более эффективном поглощении высокочастотных составляющих грунтом.

Наличие в модели тоннеля круглого сечения, смоделированного как жесткое включение, существенно искажает картину распространения

волн. Наблюдается эффект экранирования и преотражения волн от стенок тоннеля, что приводит к локальному увеличению вибрационных уровней в грунтовом массиве непосредственно над тоннелем и с боков от него, что необходимо учитывать при оценке воздействия на близлежащие фундаменты.

На основе полученных распределений полей перемещений построены графики затухания амплитуды колебаний с расстоянием от оси пути на уровне подошвы фундаментов ближайших зданий. Анализ показывает, что на расстоянии 15–20 м от оси пути виброперемещения снижаются до уровня порядка $1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-7}$ м, что, согласно нормативным документам, может соответствовать допустимому уровню для большинства типов зданий, кроме особо чувствительных, например, некоторых исторических объектов с ветхими конструкциями [13–15]. Однако присутствие тоннеля может модифицировать эту зону, создавая локальные «язычки» повышенной вибрации.

Заключение

1. Разработана и верифицирована детализированная трехмерная конечно-элементная мо-

дель, позволяющая адекватно оценивать распространение вибраций от рельсового транспорта в сложной городской среде с учетом слоистого грунтового массива, подземного сооружения (тоннеля) и элементов пути.

2. Установлены количественные уровни вибрационного воздействия от трамвая модели «Витязь-М»: максимальные виброперемещения в грунте составляют $5 \cdot 10^{-5}$ м, виброускорения – $5 \cdot 10^{-3}$ м/с².

3. Выявлено, что наличие подземного тоннеля круглого сечения существенно изменяет картину распространения волн, приводя к их перераспределению и локальной концентрации, что требует специального учета при оценке воздействия на ближайшие фундаменты.

4. Определена ориентировочная зона значимого влияния вибраций, распространяющаяся на 15–20 м от оси пути в горизонтальном направлении. Для исторических зданий, попадающих в эту зону, рекомендуется проведение инструментального мониторинга вибраций в натуральных условиях.

5. Полученные результаты и методика могут быть использованы для прогнозной оценки вибрационного воздействия при проектировании реконструкции трамвайных линий и депо, а также для разработки целевых мероприятий по виброзащите (устройство виброизолирующих траншей, применение шпал с упругими подрельсовыми прокладками и т. п.).

Список литературы

1. Hung H. H. Elastic waves in visco-elastic half-space generated by various vehicle loads / H. H. Hung, Y. B. Yang // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2001. – Vol. 21. – P. 1–17.
2. Forrest J. A. A three-dimensional tunnel model for calculation of train-induced ground vibration / J. A. Forrest, H. E. M. Hunt // Journal of Sound and Vibration. – 2006. – Vol. 294. – P. 678–705.
3. Ильичев В. А. Влияние вибраций от городского транспорта на историческую застройку / В. А. Ильичев, Н. С. Никифорова // Вестник МГСУ. – 2015. – № 10. – С. 22–33.
4. Курганский М. Н. Определение влияния динамических воздействий на перекрытия коммуникационных тоннелей / М. Н. Курганский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 9. – С. 71–74.
5. Данг В. Ч. Изменение напряженно-деформированного состояния системы «грунтовой массив – тоннель» в зависимости от глубины заложения тоннеля / В. Ч. Данг // Вестник МАДИ. – 2015. – № 4 (43). – С. 89–94.
6. Технический отчет по результатам обследования основных конструкций здания... депо им. Апакова. – Москва : МосТрансПроект, 2019. – 55 с.
7. Федоров В. С. Фильтрационная устойчивость грунтовых перемычек плотин как временных гидротехнических сооружений / В. С. Федоров, Н. В. Купчикова, С. С. Рекунов, И. В. Федосюк // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 5 (115). – С. 44–60. – DOI 10.33979/2073-7416-2024-115-5-44-60.
8. Купчикова Н. В. Проектирование радиальных коммуникационных тоннелей при редевелопменте территорий / Н. В. Купчикова, Ю. В. Лазуткин, Е. Е. Купчиков // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования: материалы VII Национальной научно-практической конференции с международным участием, приуроченной ко Дню российской науки, Астрахань, 09 февраля 2024 года. – Астрахань : Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. – С. 70–78.
9. 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.
10. Midas GTS NX. Integrated Solution for Geo-technical and Tunnel Analysis. – Midas IT, 2022.
11. Degrande G. An efficient formulation of Krylov's prediction model for train induced vibration based on the dynamic reciprocity theorem / G. Degrande, G. Lombaert // Journal of the Acoustical Society of America. – 2001. – Vol. 110. – P. 1379–1390.
12. Федоров В. С. Планирование эксперимента по оценке влияния комплексности сочетания динамических воздействий от наземного и подземного транспорта / В. С. Федоров, Ю. В. Лазуткин, Н. В. Купчикова // Строительство и реконструкция. – 2025. – № 4 (120). – С. 71–81. – DOI 10.33979/2073-7416-2025-120-4-71-81.
13. 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», Казань, 04–06 июня 2025 года. – Казань : Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. – С. 128.
14. 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.
15. 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.

© Ю. В. Лазуткин, А. А. Еремеев

Ссылка для цитирования:

Лазуткин Ю. В., Еремеев А. А. Оценка влияния динамических нагрузок от рельсового транспорта на грунтовой массив и подземные сооружения методом конечно-элементного моделирования // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2025. № 4 (54). С. 55–62.