

Academia. Архитектура и строительство, № 4, стр. 159–165.

Academia. Architecture and Construction, no. 4, pp. 159–165.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 53.09

DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-159-165

Влияние состояния конструкции пути на вибрационное воздействие от трамваев

Смирнов Владимир Александрович (Москва). Кандидат технических наук. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ). Эл. почта: belohvost@list.ru

Чечулина Любовь Михайловна (Москва). Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН); Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ). Эл. почта: chechulyu@gmail.com

Аннотация. Воздействия, вызванные движением трамваев, часто приводят к возникновению в помещениях близлежащих зданий повышенной вибрации и структурного шума, которые зачастую превышают нормируемые санитарными требованиями уровни, установленные федеральными законами. На величину таких воздействий оказывают влияние как характеристики самого подвижного состава трамваев (скорость, осевая нагрузка, состояние поверхностей катания), так и техническое состояние конструкции верхнего строения пути. Причём последнее в соответствии с положениями СП 441.1325800.2019 может оказать существенное влияние – общее увеличение вибрационного воздействия составляет до 10 дБ для изношенной конструкции пути. В статье проведено сравнение измеренных в натурных условиях характеристик вибрационного воздействия от движения поездов трамвая на одних и тех же участках пути – прямом и криволинейном – до и после их реконструкции. Как показывают результаты сравнительного анализа, реконструкция пути в рассматриваемом случае привела к изменению параметров вибрационного фона, вызванного прохождением поездов трамвая.

Ключевые слова: вибрация, трамвайные пути, прогноз, структурный шум, измерения, акселерометры

Для цитирования. Смирнов В.А., Чечулина Л.М. Влияние состояния трамвайного пути на вибрационное воздействие // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – № 4. – С. 159–165. – DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-159-165.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке грантов НИУ МГСУ на 2023 год на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований (НИР/НИОКР) в рамках Программы развития университета на 2021–2030 годы.

Tramway Condition Impact on the Vibration Effect

Smirnov Vladimir A. (Moscow). Candidate of Sciences in Technology. National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, 129337, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia. NRU MGSU). E-mail: belohvost@list.ru

Chechulina Liubov M. (Moscow). The Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (21, Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russia. NIISF RAASN); National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, 129337, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia. NRU MGSU). E-mail: chechulyu@gmail.com

Abstract. Impacts caused by the movement of trams often lead to increased vibration and structural noise in the premises of nearby buildings, which exceed the limit levels normalized by sanitary requirements in accordance with Federal Laws No. 52-FZ and No. 384-FZ. Such impacts are influenced by both the characteristics of the tram train rolling stock itself (speed, weight,

condition of structures) and the technical condition of the track structure. Moreover, in accordance with the provisions of SP 441.1325800.2019, the latter can have a significant impact – up to 10 dB with the wear of the structure. The article compares the characteristics of the vibration effect from the movement of trams on the same section for the track under two different technical conditions – before and after the reconstruction, both on a straight section and a curved one. The reconstruction of the track led to a change in the parameters of the vibration caused by the passage of tram trains.

Keywords: vibration, tram tracks, forecast, structural noise, measurements, accelerometers

For citation. Smirnov V.A., Chechulina L.M. Tramway Condition Impact on the Vibration Effect. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2023, no. 4, pp. 159–165, doi: 10.22337/2077-9038-2023-4-159-165.

Funding. The research was carried out with the support of grants from the National Research University MGSU for 2023 to conduct fundamental and applied scientific research (R&D) within the framework of the University development program for 2021–2030.

Негативное влияние трамвайного движения на экологическое состояние городской среды выражается в повышенном уровне шума, вибрации [1; 2] и электромагнитного излучения. При этом трамваи до сих пор являются сильно нагруженным видом общественного транспорта. По данным [3], на конец 2021 года в Российской Федерации общая протяжённость трамвайных путей составила около 2,4 тыс. км при среднем вводе 27,4, 2,2 и 10,2 км новых трамвайных путей в 2019, 2020 и 2021 годах, соответственно. На конец 2021 года трамвайным транспортом перевезено около 992 млн человек. Для сравнения, троллейбусным транспортом – 808 млн человек, а метрополитеном – 2680 млн человек.

Шум и вибрация в настоящее время – наиболее важные причины ухудшения качества городской жизни [3; 4]. Это подтверждается увеличением количества жалоб городских жителей, проживающих или работающих в зоне расположения транспортных коридоров, по которым движутся грузовые автомобили и рельсовый транспорт. Вредное воздействие шума на жителей города проявляется в ослаблении слуха (вплоть до полной его потери) и многочисленных видах психических расстройств, которые имеют свойство накапливаться [5]. Результатом воздействия вибрации могут быть заболевания опорно-двигательного аппарата, сердечно-сосудистой системы и пр. [6–9]. Результатом воздействия вибрации на здания и сооружения может быть появление и разрастание трещин, возникновение резонансных колебаний в таких зданиях, повышение уровня и переизлучение структурного шума. Особенно страдают исторические здания, зачастую расположенные в старых городских кварталах с узкими улицами [10–12].

Допустимые уровни шума и вибрации нормируются санитарными требованиями и строительными правилами в соответствии с федеральными законами № 52-ФЗ¹ и № 384-ФЗ². Для обеспечения комфортной обстановки в по-

мещениях зданий и сооружений, расположенных вблизи трамвайных линий, необходимо учитывать влияние многих внешних факторов, о которых пойдёт речь в данной статье.

Администрация городов, где есть трамвайные пути, вынуждена искать решение проблем, обусловленных их наличием, хотя исследований, связанных с этим вопросом, очень мало, чего нельзя сказать о железнодорожном транспорте и связанных с ним проблемами.

Хотя концепции этих двух транспортных систем схожи, между ними есть существенные различия:

- трамвайные пути часто расположены вдоль проезжих частей, совмещающих также автомобильный транспорт, а не на выделенных участках, как пути метрополитена или железной дороги;

- различная осевая нагрузка (в соответствии с СП 35.13330.2011³, СП 46.13330.2012⁴ осевая нагрузка от трамвая составляет 73,5 кН, поезда метро 147 кН, локомотива типа ВЛ-80 – 245 кН) и длина транспортных средств (16,2 м по осям сцепки для трамвая, 19,2 м для поезда метрополитена, 32,8 м – для локомотива ВЛ-80);

- скорость трамваев (до 40 км/ч) обычно намного ниже, чем у поездов метро (средняя скорость 60 – 70 км/ч).

С учётом того, что в России наибольшая протяжённость трамвайных линий наблюдается в крупных городах со сложившейся плотной застройкой: – Санкт-Петербурге (228 км, 41 маршрут, в том числе самый загруженный в России № 60 с интервалами 2-3 мин. в час-пик, а на линию каждый день выходят около 800 вагонов), Москве (178 км, 40 маршрутов трамваев, на линии выходят более 800 вагонов), Екатеринбурге (80 км, 31 маршрут и более 470 трамваев), Нижнем Новгороде (78 км, 15 маршрутов, а подвижной состав насчитывает более 330 вагонов) и Магнитогорске (74 км, 51 маршрут и 200 вагонов) – задача детального прогноза виброакустического воздействия от движения трамваев является актуальной.

¹ Федеральный закон от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» (<http://www.kremlin.ru/acts/bank/13636>).

² Федеральный закон от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (<http://www.kremlin.ru/acts/bank/30476>).

³ СП 35.13330.2011. Свод правил «Мосты и трубы». Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (<https://docs.cntd.ru/document/1200084849>).

⁴ СП 46.13330.2012. Свод правил «Мосты и трубы». Актуализированная редакция СНиП 3.06.04-91 (<https://docs.cntd.ru/document/1200093425>).

В случае с трамваями ситуация осложняется тем, что часто недостаточно информации о характеристиках грунтов оснований, наличии и типе подземных сооружений и инженерных коммуникаций в полосе отвода трамвайного пути, что затрудняет прогнозирование эффектов распространения колебаний, в отличие от железных дорог, имеющих вдоль линий «свободное поле» (без каких-либо подземных сооружений) [13; 14].

Хотя источником вибрации является проезд трамвая, уровень помех для людей, живущих или работающих вблизи трамвайных путей, не определяется просто суммой отдельных проездов или характеристик источника. Реальное воздействие зависит от подробных характеристик участка. Таким образом, определение переменных, влияющих на явление генерации и распространения колебательной энергии, является сложным процессом, поскольку требует изучения того, как колебания взаимодействуют с окружающей средой.

С учётом указанных особенностей взаимодействия пути и подвижного состава применительно к оценке воздействия вибрации, создаваемой движением трамвайных поездов, в данной работе была принята методика расчёта СП 441.1325800.2019⁵, учитывающая характерные и описанные выше особенности с безусловной поправкой на характеристики трамвайных поездов.

В соответствии с разделом 5.2 и 6.3 ГОСТ 27751-2014⁶ расчёт конструкций следует проводить с учётом наиболее неблагоприятного сочетания нагрузок. Для рельсовых путей,

⁵ СП 441.1325800.2019. Свод правил «Защита зданий от вибрации, создаваемой железнодорожным транспортом. Правила проектирования» (<https://docs.cntd.ru/document/554818817>).

⁶ ГОСТ 27751-2014 «Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения» (<http://vsegost.com/Catalog/58/58469.shtml>)



Красным обозначены точки измерения в 2020 году, зелёным – в 2023 году. Точки 1 и 6 соответствуют прямолинейному участку пути, точки 4 и 5 – криволинейному

Рис. 1. Схема расположения точек измерения. Схема авторов статьи

в соответствии с разделом 5.2.2 СП 441.1325800.2019, к наиболее неблагоприятным условиям относят дефекты поверхностей катания (колесных пар, головки рельсов), наличие стыков, переездов и стрелочных переводов. Для их учёта при прогнозе вибрационного воздействия установлена поправка «+10 дБ» в случае наличия изношенной конструкции пути.

В рамках данного исследования были выполнены натурные измерения уровней виброускорений, вызванных движением трамваев по маршруту от станции «Бульвар Рокоссовского» до станции «Богородское» в 2020 году, и после реконструкции пути (2020–2022) в 2023 году. Цель проведения исследований – оценка изменения вибрационного фона до и после проведения реконструкции пути и уточнение величин поправочных коэффициентов, описанных выше.

Схема участка и расположение точек измерения показаны на рисунке 1. Фотофиксация точек измерений приведена на рисунке 2.

Замеры уровней вибрации проводили на поверхности грунта в нескольких точках (по трём направлениям измерений в каждой точке, время измерений в каждой точке было достаточным для реализации не менее 14-ти событий



Рис. 2. Фотофиксация точек измерений – около прямолинейного участка (т. 1–т. 6) и около криволинейного участка (т. 5–т. 4): а, в) 2020 год; б, г) 2023 год. Фото авторов статьи

прохода трамвайных поездов сквозь створ измерений). При проведении измерений использовали высокоточные малошумящие велосиметры. При этом направления осей координат назначались следующим образом: Z – для вертикального направления, X – для направления поперёк оси пути и Y – вдоль оси пути.

Сравнение результатов производили для двух соответствующих пар точек, расположенных возле двух участков пути (прямолинейного и криволинейного), в разные годы и при разном техническом состоянии пути.

За время измерений было зафиксировано в 2020 году: для т. 1 – 18 прохождений трамваев; для т. 5 – 21 прохождение; в 2023 году: для т. 6 – 15 прохождений, для т. 4 – 13 прохождений. Указанное число событий достаточно для получения адекватного набора репрезентативных данных.

Полученные временные развёртки реализации сигналов для октавных полос в уровнях виброускорений (дБ) для двух участков представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.

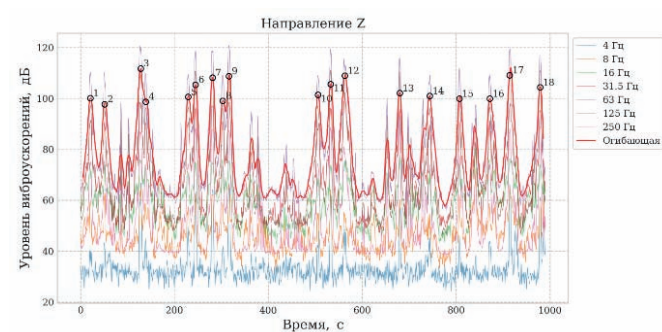
На виброграммах (рис. 3, 4) видны всплески уровней виброускорений в моменты прохождения поездов трамваев напротив измерительного створа. Вибрация при прохождении трамваев выделяется в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 16–250 Гц.

На рисунках 5 и 6 представлены зависимости максимальных ($L_{\max}$, дБ) и среднеквадратических (L_{rms} , дБ)

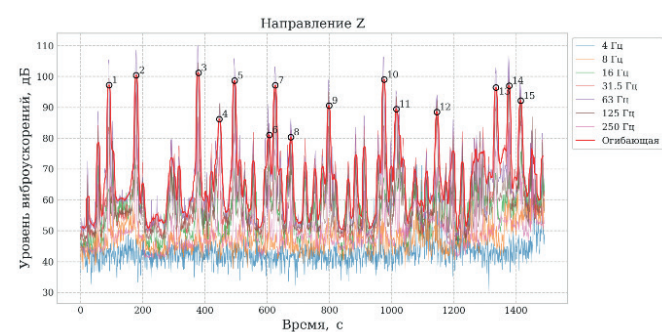
значений виброускорений по всем событиям прохождения трамваев от среднегеометрической частоты 1/1 – октавной полосы, а также вычисленная разница между соответствующими результатами измерений, полученными в 2023 и 2020 годы.

После реконструкции пути в 2022 году для вертикального направления на прямом участке пути отмечено снижение уровней вибрации в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 8–63 Гц на величину от 0,9 (0,5) до 11 (13,2) дБ для максимальных (СКЗ) значений виброускорений. При этом в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 1–4 и 125–250 Гц картина наблюдается обратная. Для горизонтального направления колебаний отмечается снижение уровней вибрации в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 4–16 (направление X) и 8–16 (направление Y) Гц. В остальном диапазоне наблюдается повышение уровней виброускорений до 33 дБ. Наибольшее снижение уровней вибрации наблюдается в октавной полосе со среднегеометрической частотой 16 Гц. В эту октаву попадает основная частота параметрического резонанса трамвайного пути для скорости движения 25–50 км/ч и эпюре шпал по СП 98.13330.2018.

Для криволинейного участка пути разница в уровнях вибрации для вертикального направления оказалась небольшой – в диапазоне 8–63 Гц, а для горизонтальных – в диапазоне 4–16 Гц и при этом практически без повышения эффективно-

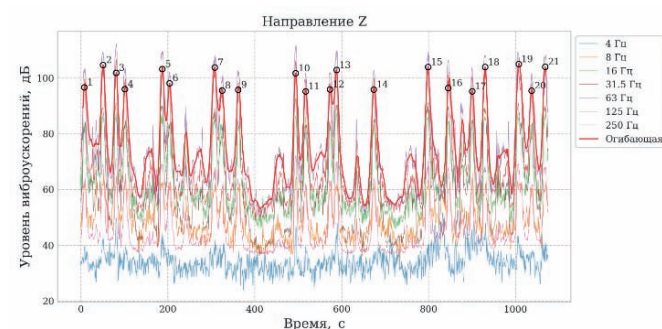


а)

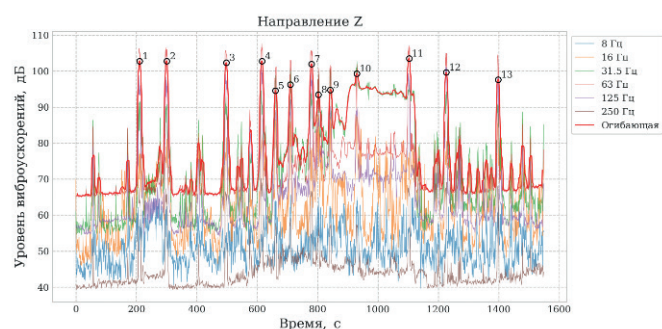


б)

Рис. 3. Спектральная реализация сигнала для прямого участка по оси Z: а) 2020 год; б) 2023 год. Графики авторов статьи



а)



б)

Рис. 4. Спектральная реализация сигнала для криволинейного участка по оси Z: а) 2020 год; б) 2023 год. Графики авторов статьи

сти. В остальных октавных полосах уровень виброускорений, наоборот, увеличился до 22,4 дБ для максимальных значений и 24,9 дБ для СКЗ виброускорений.

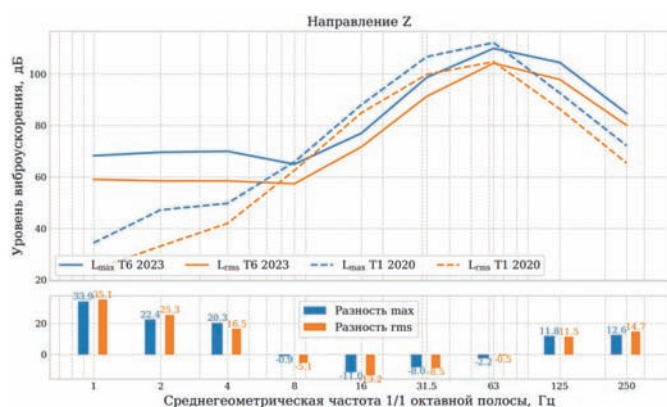
* * *

Как показывают результаты выполненных сравнительных измерений, соблюдение технологии и качества производства ремонтных работ влияет на изменение вибрационного фона. Для рассматриваемого в статье участка пути отмечено увеличение уровней вибрационного воздействия от

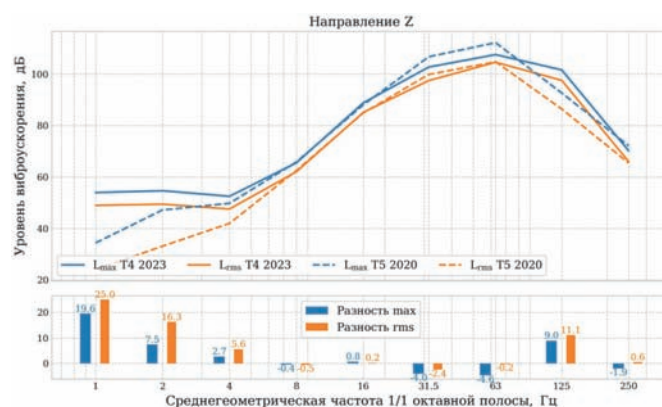
трамвайного пути после его реконструкции. При прогнозе уровней вибрации по методике СП 441.1325800.2019 следует учитывать частотно-зависимый характер коэффициентов таблицы 5.1. Требуется проведение серии сравнительных изысканий для уточнения указанных коэффициентов таблицы 5.1 применительно к трамвайным путям.

Список источников

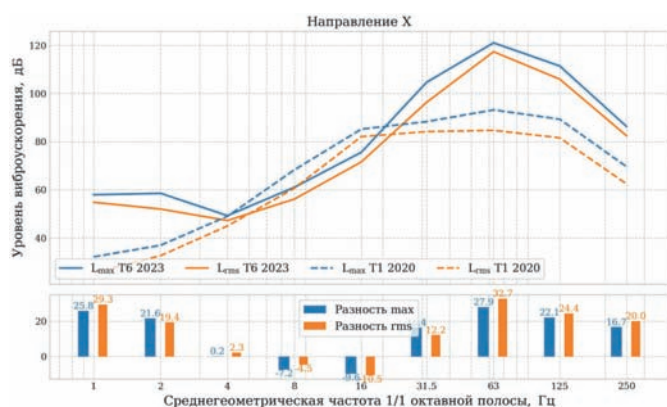
1. Кустенко, А.А. Исследование влияния шума и вибрации в трамвайном движении / А.А. Кустенко. – Текст : не-



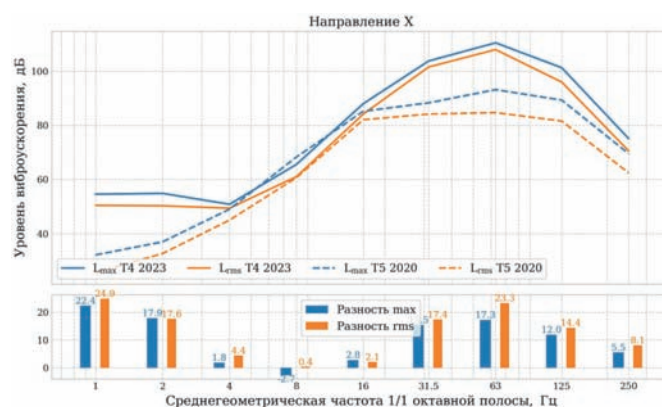
а)



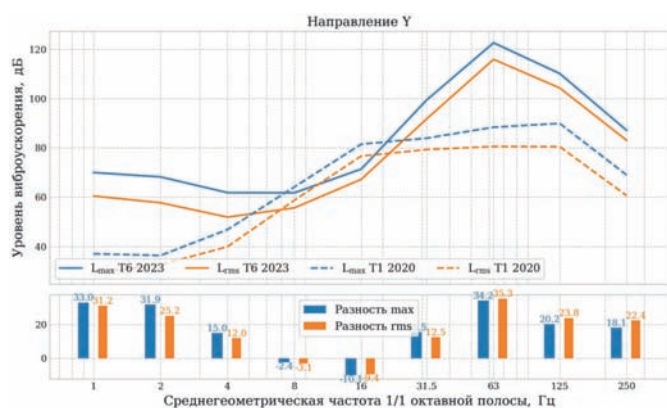
а)



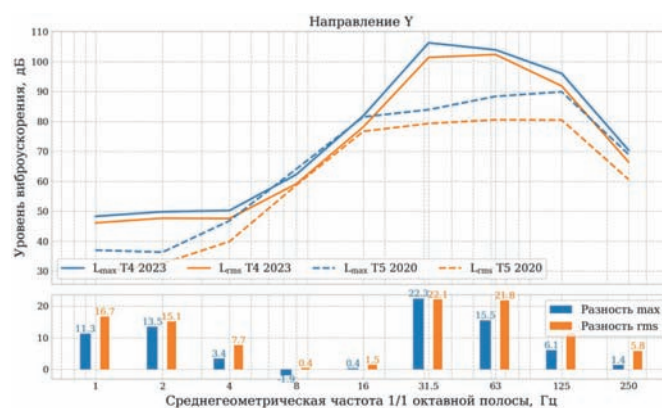
б)



б)



в)



в)

Рис. 5. Уровни вибрации на прямом участке для осей: а) Z; б) X; в) Y. Графики авторов статьи

Рис. 6. Уровни вибрации в кривом участке для осей: а) Z; б) X; в) Y. Графики авторов статьи

посредственный // Вестник Курганского государственного университета. – 2017. – № 12. – С. 97–99.

2. Бирюкова, А.Ю. Урбанизация и болезни цивилизации, гигиенические проблемы их профилактики / А.Ю. Бирюкова, Т.С. Волкотруб, Ю.В. Тищенко. – Текст : непосредственный // Экология и безопасность жизнедеятельности : Сборник статей XX Международной научно-практической конференции. Пенза, 2020. – Пенза : Пензенский государственный аграрный университет. – 2020. – С. 24–27.

3. Транспорт в России. 2022 : Статистический сборник. – Москва : Росстат, 2022. – Текст : непосредственный.

4. Weinhold, D. How Big a Problem is Noise Pollution? A Brief Happiness Analysis by a Perturbable Economist / Diana Weinhold. – Текст : электронный. – MPRA Paper. – 2008. – № 9885. – URL: <https://econpapers.repec.org/paper/pramprapa/9885.htm> (дата обращения 16.07.2023).

5. Krekel, C. How Environmental Quality Affects Our Happiness / Krekel Christian, George MacKerron. – Текст : электронный // World Happiness Report. – URL: <https://worldhappiness.report/ed/2020/how-environmental-quality-affects-our-happiness/> (дата обращения 22.06.2023).

6. Шишелова, Т.И. Влияние шума на организм человека / Т.И. Шишелова, Ю.С. Малыгина, Нгуен Суан Дат. – Текст : непосредственный // Успехи современного естествознания. – 2009. – № 8. – С. 14–15.

7. Абадзев, Ф.Ф. Влияние загрязнения окружающей среды на состояние здоровья населения крупного города / Ф.Ф. Абадзев. – Текст : непосредственный // Terra Economicus. – 2010. – Т. 8, № 1-2. – С. 100–105.

8. Трифонов, А.П. Влияние вибрации на организм человека, методы борьбы с вибрацией на производстве / А.П. Трифонов, Д.Д. Будаев, К.А. Алябьева. – Текст : непосредственный // Школа молодых новаторов : Сборник научных статей 2-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых учёных : В 3-х томах : Том 3. Курск, 2021. – Курск : ЮЗГУ, 2021. – С. 41–45.

9. Огородов, Ю.Т. Влияние вибрации на организм человека / Ю.Т. Огородов, В.О. Агаев, И.С. Волотов. – Текст : непосредственный // Научный альманах. – 2022. – № 9-2 (95). – С. 37–42.

10. Смирнов, В.А. Защита исторических памятников от вибраций, вызванных движением рельсового транспорта / В.А. Смирнов. – Текст : непосредственный // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2018. – № 8 (1008). – С. 23–25.

11. Smirnov V. Vibration Protection of Historical Buildings Located near the Lines of Urban Rail Transport / Smirnov V. – Текст : электронный // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 945. – P. 318–324. – URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.945.318> (дата обращения 16.07.2023)

12. Smirnov, V. To the Question of Vibration Levels Prediction Inside Residential Buildings Caused by Underground Traffic / V. Smirnov, I. Tsukernikov. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.334. – Текст : электронный // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 176. – P. 371–380. – URL: https://www.researchgate.net/publication/314268210_To_the_Question_of_Vibration_Levels_Prediction_Inside_Residential_Buildings_Caused_by_Underground_Traffic (дата обращения 16.07.2023).

13. Смирнов, В.А. Защита несущих конструкций зданий от влияния вибрации, создаваемой железнодорожным транспортом / В.А. Смирнов. – Текст : непосредственный // Жилищное строительство. – 2020. – № 12. – С. 40–46.

14. Smirnov, V. Dynamic Analysis of Railway Track with Vibration Isolated Booted Sleepers / V. Smirnov. – DOI: 10.1051/mateconf/201819601045. – Текст : электронный // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 196. – № 01045. URL: https://www.researchgate.net/publication/327397780_Dynamic_analysis_of_railway_track_with_vibration_isolated_booted_sleepers (дата обращения 16.07.2023).

References

1. Kustenkov A.A. Issledovanie vliyaniya shuma i vibratsii v tramvainom dvizhenii [Investigation of the Influence of Noise and Vibration in Tram Service]. In: *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Kurgan State University], 2017, no. 12, pp. 97–99. (In Russ.)

2. Biryukova A.Yu., Volkotrub T.S., Tishchenko Yu.V. Urbanizatsiya i bolezni tsivilizatsii, gigienicheskie problemy ikh profilaktiki [Urbanization and Diseases of Civilization, Hygienic Problems of Their Prevention]. In: *Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Ecology and life safety], collection of articles of the XX International Scientific and Practical Conference, Penza State Agrarian University. Penza. 2020. Penza, Penza State Agrarian University Publ., 2020, pp. 24–27. (In Russ.)

3. Transport v Rossii [Transport in Russia. 2022], Statistical collection. Moscow, Rosstat Publ., 2022. (In Russ.)

4. Weinhold Diana. How Big a Problem is Noise Pollution? A Brief Happiness Analysis by a Perturbable Economist. In: *MPRA*, 2008, Paper no. 9885. (In Engl.)

5. Krekel Christian, MacKerron George. How Environmental Quality Affects Our Happiness. World Happiness Report. 2020. URL: <https://worldhappiness.report/ed/2020/how-environmental-quality-affects-our-happiness/> (Accessed 06/22/2023) (In Engl.)

6. Shishelova T.I., Malygina Yu.S., Nguen Suan Dat. Vliyanie shuma na organizm cheloveka [The Effect of Noise on the Human Body]. In: *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences], 2009, no. 8, pp. 14–15. (In Russ., abstr. in Engl.)

7. Abadzev F.F. Vliyanie zagryazneniya okruzhayushchei sredy na sostoyanie zdorov'ya naseleniya krupnogo goroda [The Impact of Environmental Pollution on the Health of the Population of a Large City]. In: *Terra Economicus*, 2010, Vol. 8, no. 1-2, pp. 100–105. (In Russ.)

8. Trifonov A.P. Vliyanie vibratsii na organizm cheloveka, metody bor'by s vibratsiei na proizvodstve [The Effect of Vibration on the Human Body, Methods of Combating Vibration

in Production]. In: *Shkola molodykh novatorov [School of Young Innovators]*, Collection of scientific articles of the 2nd International Scientific Conference of Promising Developments of Young Scientists, in 3 volumes, Vol. 3. Kursk : UyZGU Publ., 2021, pp. 41–45. (In Russ.)

9. Ogorodov Yu.T. Vliyanie vibratsii na organizm cheloveka [The Effect of Vibration on the Human Body]. In: *Nauchnyi al'manakh [Scientific Almanac]*, 2022, no. 9-2 (95), pp. 37–42. (In Russ., abstr. in Engl.)

10. Smirnov V. A. Zashchita istoricheskikh pamyatnikov ot vibratsii, vyzvannykh dvizheniem rel'sovogo transporta [Protection of Historical Monuments from Vibrations Caused by Rail Traffic]. In: *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki*, 2018, no. 8 (1008), pp. 23–25. (In Russ., abstr. in Engl.)

11. Smirnov V. Vibration Protection of Historical Buildings Located near the Lines of Urban Rail Transport. In: *Materials*

Science Forum, 2019, Vol. 945, pp. 318–324. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.945.318> (In Engl.)

12. Smirnov V., Tsukernikov I. To the Question of Vibration Levels Prediction Inside Residential Buildings Caused by Underground Traffic. In: *Procedia Engineering*, 2017, Vol. 176, pp. 371–380, DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.334. 318 (In Engl.)

13. Smirnov V.A. Zashchita nesushchikh konstruktsii zdaniy ot vliyaniya vibratsii, sozdavaemoy zheleznodorozhnym transportom [Protection of Bearing Structures of Buildings Against the Influence of Vibration Generated by Railway Transport]. In: *Zhilishchnoe stroitel'stvo [Housing Construction]*, 2020, 12, 40–46, DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-12-40-46>. (In Russ., abstr. in Engl.)

14. Smirnov V. Dynamic Analysis of Railway Track with Vibration Isolated Booted Sleepers. In: *MATEC Web of Conferences*, 2018, Vol. 196, no. 01045,