



11. Несущая способность скального анкера по Крюкову. – Режим доступа: <https://forum.dwg.ru/showthread.php?t=145079&syscid=mj9niq96ox135961809> (дата обращения: 10.09.2025), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
12. Ермаков В. П. Оценка работы стержневых свай-анкеров, воспринимающих вертикальные и горизонтальные нагрузки / В. П. Ермаков // Инновационная наука. – 2017. – № 11. – С. 14–19.
13. Химические анкера «EasyFix». – Режим доступа: <https://efrus.ru/company/docs/> (дата обращения: 18.10.2025), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
14. Мущанов В. Ф. Анализ степени ответственности элементов для определения характеристик надежности и склонности к лавинообразному разрушению стержневых конструкций / В. Ф. Мущанов, А. Н. Оржеховский // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 4 (42). – С. 5–10. – DOI: 10.52684/2312-3702-2022-42-3-5-10. – EDN KFCXJK.
15. Цибаев С. С. Оценка влияния за-топления горных выработок на состояние приконтурного массива горных пород и элементов анкерной крепи / С. С. Цибаев, С. И. Калинин, А. А. Ренев, Д. В. Зорков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 5. – С. 35–43.
16. Многофункциональный программный комплекс для расчета, исследования и проектирования конструкций различного назначения («ПК ЛИРА-САПР»). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Рос. Федерации - № 2014618855; 29.08.2014.
17. Костина О. В. Исследование характера работы свай с поворотными анкерами при работе в массиве пучинистых грунтов / О. В. Костина, Т. М. Бочкарева // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2020. – № 4. – С. 46–57.
18. Рослик В. П. Оптимизация плитно-анкерных конструкций в строительстве / В. П. Рослик, А. Г. Сорокин, Д. В. Линников, И. Д. Муромцев // Вестник Хакасского государственного университета им. Н. Ф. Катанова. – 2017. – № 20. – С. 37–40.
19. Топчий Д. В. Техническое нормирование современных методов ведения строительных работ при реконструкции, перепрофилировании и технологическом перевооружении зданий и сооружений / Д. В. Топчий, М. А. Катасонова, А. Ю. Юртайис // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 6. – С. 281–285.
20. Нуждин Л. В. Численный расчет свайного поля с учетом динамических воздействий / Л. В. Нуждин, В. С. Михайлов // Construction and Geotechnics. – 2023. – Т. 14, № 2. – С. 22–36. – DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.02.

© A. A. Соколов, O. A. Маковецкий

Ссылка для цитирования:

Соколов А. А., Маковецкий О. А. Оптимальный выбор анкерной системы для фундамента на скальном грунте, работающего на выдергивание // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2025. № 4 (54). С. 45–50.

УДК 624.1
DOI 10.52684/2312-3702-2025-54-4-50-55

**КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТОННЕЛИ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ:
КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И РАСЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
С ГРУНТОВЫМ МАССИВОМ**

Н. В. Купчикова, Е. Е. Купчиков

Купчикова Наталья Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2986-4190; e-mail: kupchikova79@mail.ru;

Купчиков Евгений Евгеньевич, студент, Российский университет транспорта (РУТ МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

Объектом исследования являются коммуникационные тоннели круглого сечения из железобетона, используемые для прокладки инженерных сетей в городских условиях. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения надежности и долговечности подземной инфраструктуры при минимизации воздействия на окружающую застройку. Целью исследования является анализ конструктивных особенностей таких тоннелей и оценка их напряженно-деформированного состояния при взаимодействии с грунтовым массивом. В качестве основного метода использовано численное моделирование в программном комплексе MIDAS GTS NX, позволяющее учесть последовательность производства работ и нелинейное поведение системы «грунт–сооружение». В результате выполнено моделирование трех тоннелей мелкого заложения в двухслойном грунтовом массиве. Получены распределения перемещений, усилий в обделке и напряжений в грунте. Установлено, что максимальные геометрические суммарные перемещения не превышают 5 см, а продольные усилия в обделке соответствуют работоспособному состоянию. Дополнительно проанализированы предельные допустимые осадки для зданий, расположенных в зоне влияния строительства. Результаты исследования показывают, что коммуникационные тоннели круглого сечения из гофролиста обеспечивают необходимую несущую способность и могут применяться при реконструкции городской инфраструктуры с учетом строгих ограничений по дополнительным деформациям оснований существующих зданий.

Ключевые слова: коммуникационный тоннель, круглое сечение, грунтовый массив, напряженно-деформированное состояние, мелкое заложение, дополнительные деформации.

CIRCULAR COMMUNICATION TUNNELS: DESIGN FEATURES AND CALCULATION OF INTERACTION WITH SOIL

N. V. Kupchikova, Ye. Ye. Kupchikov

Kupchikova Natalya Viktorovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Building Structures, Buildings, and Facilities Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2986-4190; e-mail: kupchikova79@mail.ru;

Kupchikov Yevgeniy Yevgenyevich, student, Russian University of Transport (RUT MIIT), Moscow, Russian Federation

The subject of this study is circular reinforced concrete utility tunnels used for utility lines in urban areas. The relevance of this work stems from the need to ensure the reliability and durability of underground infrastructure while minimizing the impact on surrounding buildings. The aim of the study is to analyze the design features of these tunnels and assess their stress-strain state when interacting with the soil mass. Numerical modeling in the MIDAS GTS NX software package was used as the primary method, accounting for the work sequence and the nonlinear behavior of the soil-structure system. As a result, three shallow tunnels in a two-layer soil mass were modeled. The distributions of displacements, lining forces, and soil stresses were obtained. It was found that the maximum geometric total displacements do not exceed 5 cm, and the longitudinal forces in the lining correspond to a functional state. The maximum permissible settlements for buildings located within the construction impact zone were additionally analyzed. The study results show that circular utility tunnels made of corrugated sheet metal provide the required load-bearing capacity and can be used in urban infrastructure reconstruction, taking into account strict restrictions on additional deformations of existing building foundations.

Keywords: utility tunnel, circular cross-section, soil mass, stress-strain state, shallow foundation, additional deformations.

Введение

Развитие городской инфраструктуры неизбежно связано с увеличением плотности подземных инженерных сетей. Традиционная открытая прокладка коммуникаций становится все менее приемлемой из-за высоких затрат, длительных сроков и значительных помех для городской жизни. В этой связи возрастает роль коммуникационных тоннелей - закрытых подземных сооружений, предназначенных для совместной или раздельной прокладки кабелей, трубопроводов и других инженерных систем [1, 2].

Особый интерес представляют тоннели круглого сечения (рис. 1), изготавливаемые из металлических гофрированных листов. Круглая форма оптимальна с точки зрения распределения внешнего давления грунта, а гофрирование придает конструкции высокую кольцевую жесткость при относительно малой массе [3]. Такие тоннели обладают модульностью, быстротой монтажа и возможностью использования в различных грунтовых условиях [4]. Определение назначения и длины тоннеля также занимает центральное место в проектировании. Эти параметры зависят от планируемой эксплуатации инфраструктуры, а также от уже существующих объектов на территории. Следует учесть, что выбранная форма поперечного сечения тоннеля может изменяться в зависимости от назначения и особенностей окружающей среды [3]. Хотя круглое сечение традиционно считается наиболее эффективным с точки зрения распределения нагрузок, использование некруглых форм начинает набирать популярность благодаря возможности лучшего использования пространства и ресурсов [1].

В тоннелях (коллекторах) должны быть выполнены мероприятия по предотвращению попадания в них грунтовых и технологических вод и обеспечен отвод почвенных и ливневых вод.

Тоннели (коллекторы) должны быть обеспечены в первую очередь естественной вентиляцией. Выбор системы вентиляции и расчет вентиляционных устройств производятся на основании тепловыделений, указанных в строительных заданиях. Прокладка кабелей в коллекторах и тоннелях рассчитывается с учетом возможности дополнительной прокладки кабелей в количестве не менее 15 % [8].



Рис. 1. Коммуникационный тоннель круглого сечения

Актуальность настоящего исследования определяется необходимостью надежного прогнозирования поведения таких конструкций, особенно в условиях плотной городской застройки, где критически важны ограничения на дополнительные осадки фундаментов существующих зданий [5, 6]. Цель работы – проанализировать конструктивные решения коммуникационных тоннелей круглого сечения из железобетона и оценить их напряженно-деформированное состояние при взаимодействии с грунтовым массивом методами численного моделирования, а также оценить зону взаимного влияния. Для достижения цели решались следующие задачи: 1) обзор конструктивных

особенностей и нормативных требований; 2) разработка расчетной модели системы «грунт–тоннель»; 3) анализ полученных результатов и их сопоставление с допустимыми деформациями для окружающей застройки.

Методы исследования

Основным методом исследования явилось конечно-элементное моделирование в программном комплексе MIDAS GTS NX, предназначенном для геотехнических расчетов. Данный метод поз-

воляет учесть нелинейное поведение материалов, этапность строительства и контактное взаимодействие между грунтом и конструкцией [7, 8].

Расчетная модель

Моделировалась работа трех параллельных коммуникационных тоннелей круглого сечения мелкого заложения в двухслойном грунтовом массиве (рис. 2). Размеры расчетной области – 60 м по ширине и 30 м по высоте. Диаметр каждого тоннеля принят равным 6 м, расстояние между осями – 15 м, глубина заложения кровли тоннелей от поверхности – 9 м.

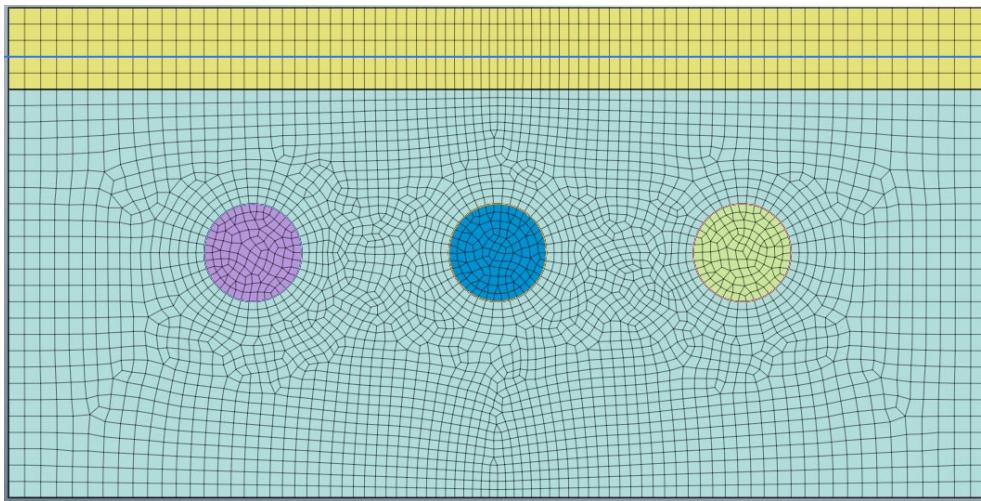


Рис. 2. Расчетная модель системы «грунтовый массив – три коммуникационных тоннеля» в MIDAS GTS NX
(иллюстрация авторов)

Fig. 2. Calculation model of the «soil mass – three communication tunnels» system in MIDAS GTS NX
(illustration by the authors)

Грунтовый массив представлен двумя изотропными слоями с различными деформационными характеристиками. Обделка тоннеля моделировалась балочными элементами, жестко связанными с окружающим грунтом через интерфейсные элементы с пониженным коэффициентом прочности (0.5), что имитирует неидеальный контакт. Учтены собственный вес грунта и конструкций, а также технологическое обжатие обделки на 2.5 %. Анализ проводился в плоской деформации с учетом стадий строительства.

Оценка результатов проводилась по величинам перемещений узлов модели, продольных усилий в элементах обделки и напряжений

в грунте. Для оценки влияния на окружающую застройку использовались нормативные ограничения на предельные дополнительные деформации оснований согласно СП 22.13330.2011 [9].

Результаты и обсуждение

Напряженно-деформированное состояние системы. Результаты расчета показали, что после завершения всех технологических этапов система «грунт – тоннель» приходит в равновесное состояние. Распределение вертикальных перемещений грунта имеет характерную форму с зонами осадки над тоннелями и незначительным поднятием (горбом) между ними.

Таблица

Максимальные расчетные перемещения и усилия

N п/п	Параметр	Обозначение	Значение	Примечание
1	2	3	4	5
1	Максимальное суммарное перемещение	T_{max}	4.98×10^{-2} м (~5 см)	Наблюдается в кровле центрального тоннеля
2	Минимальное суммарное перемещение	T_{min}	4.15×10^{-3} м	В области, удаленной от тоннелей
3	Максимальное продольное усилие в обделке	N_{max}	-584 кН	Сжатие
4	Минимальное продольное усилие в обделке	N_{min}	-335 кН	Сжатие

Как видно из таблицы, величина осадок поверхности над тоннелями не превышает 5 см. Продольные усилия в обделке носят характер равномерного сжатия, что соответствует рабочей схеме круглой оболочки, воспринимающей

горное давление. Эпюры напряжений в грунте (рис. 3) подтверждают формирование арочного эффекта вокруг тоннелей, способствующего перераспределению нагрузок.

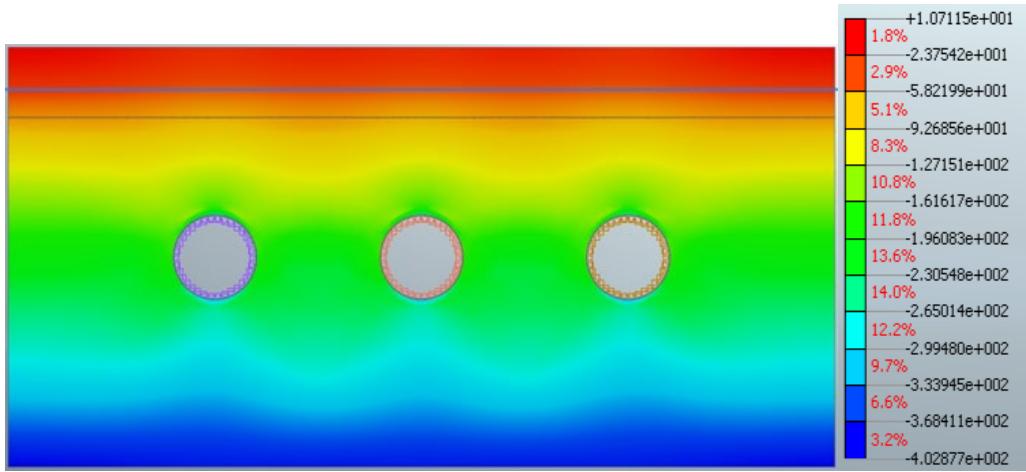


Рис. 3. Распределение вертикальных нормальных напряжений (σ_y) в грунтовом массиве, kN/m^2 (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Distribution of vertical normal stresses (σ_y) in the soil mass, kN/m^2 (illustration by the authors)

Влияние на окружающую застройку

Одним из ключевых аспектов проектирования подземных сооружений в городе является соблюдение требований к предельным дополнительным деформациям оснований существующих зданий. Согласно СП 22.13330.2011, для зданий, попадающих в зону влияния нового строительства, устанавливаются ограничения на максимальную осадку и относительную разность осадок [9].

В рамках данного исследования была проведена оценка для гипотетического здания, расположенного на расстоянии 10 м от оси крайнего

тоннеля. Расчетные дополнительные осадки такого здания не превысили 1.5 см, что соответствует II (удовлетворительной) категории технического состояния по СП 22.13330.2011 (максимальная допустимая осадка – 3.0 см, относительная разность осадок – 0.0010) [9, 10]. Это указывает на возможность безопасного строительства тоннелей при условии проведения предварительного обследования и мониторинга технического состояния окружающих объектов.

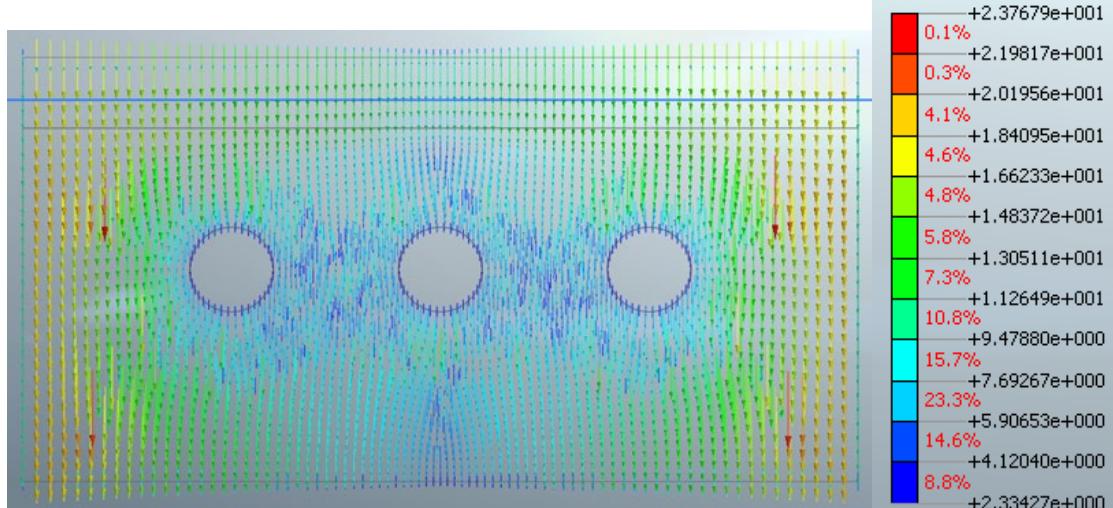


Рис. 4. Сумма всех внешних сил для трех туннелей (F , kN), $F_{\max} = 2.37679 \cdot 10$, $F_{\min} = 2.33427$ (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Sum of all external forces for three tunnels (F , kN), $F_{\max} = 2.37679 \cdot 10$, $F_{\min} = 2.33427$

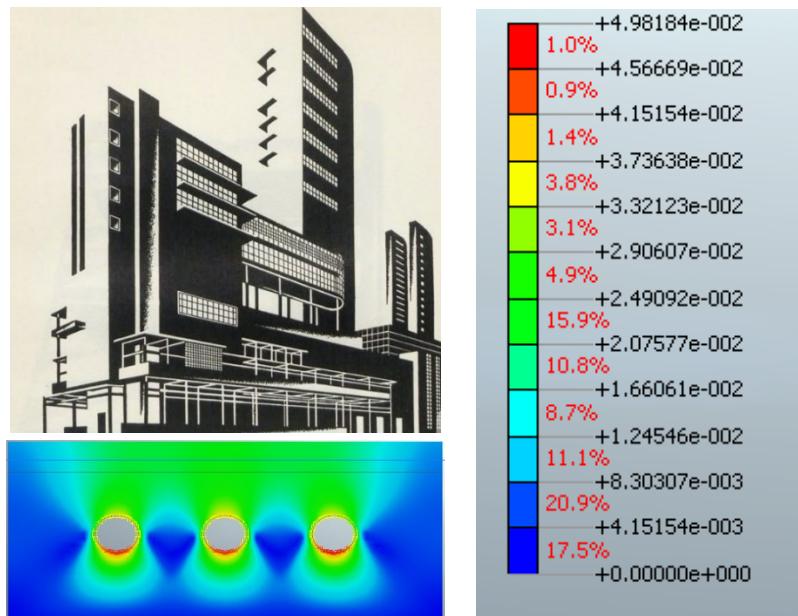


Рис. 5. Геометрическая сумма перемещений для всех туннелей вдоль осей X, Y и Z (T, м),

$$T_{\max} = 4.98184 \cdot 10^{-2}, T_{\min} = 4.15154 \cdot 10^{-3}$$

Fig. 5. Geometric sum of displacements for all tunnels along the X, Y, and Z axes (T, m),
 $T_{\max} = 4.98184 \cdot 10^{-2}, T_{\min} = 4.15154 \cdot 10^{-3}$

Конструктивные преимущества круглого сечения

Полученные результаты подтверждают теоретические преимущества круглого сечения. Равномерное сжатие обделки является наиболее приятной схемой работы для гофрированного металла, эффективно работающего на сжатие и изгиб. Это позволяет минимизировать материалоемкость конструкции по сравнению с прямоугольными или сводчатыми сечениями, в которых возникают значительные изгибающие моменты [11].

Заключение

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Коммуникационные тоннели круглого сечения из железобетона представляют собой эффективное конструктивное решение для прокладки инженерных сетей в стесненных городских условиях. Их ключевые преимущества - высокая пространственная жесткость, технологичность монтажа и оптимальное сопротивление внешнему грунтовому давлению.

2. Результаты численного моделирования в MIDAS GTS NX показали, что НДС системы «грунт-тоннель» после завершения строительства характеризуется равномерным сжатием обделки и осадками поверхности грунта до 5 см над осью тоннелей. Полученные усилия в обделке соответствуют ее работоспособному состоянию.

3. Оценка влияния на окружающую застройку, выполненная на основе нормативных требований СП 22.13330.2011, показала, что при грамотном проектировании и соблюдении безопасных расстояний дополнительные осадки фундаментов существующих зданий могут быть ограничены величинами, соответствующими удовлетворительной (II) категории технического состояния.

4. Для реализации потенциала данных конструкций при реконструкции городской инфраструктуры необходимо выполнение комплекса мероприятий, включающего детальное инженерно-геологическое обследование, мониторинг деформаций в процессе строительства и эксплуатации, а также применение методов усиления грунтов в случае необходимости.

Список литературы

1. Бондаренко И. С. Анализ факторов, влияющих на выбор технологии строительства коммуникационного тоннеля / И. С. Бондаренко, И. В. Баранникова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № S10. – С. 124–129.
2. Франкевич Ж. А. Обоснование принципа формирования структуры затрат на сооружение и эксплуатацию городских коммуникационных тоннелей / Ж. А. Франкевич // Научный вестник Московского государственного горного университета. – 2013. – № 12. – С. 250–256.
3. Патент № 2181411 С1. Российская Федерация. Коммуникационный тоннель / А. Ш. Бирбраер, В. М. Строков. – Опубл. 20.04.2002.
4. Шибаев Е. В. Методика выбора эффективных вариантов сооружения коммуникационных тоннелей / Е. В. Шибаев // Научный вестник Московского государственного горного университета. – 2011. – № 12. – С. 95–102.
5. Ильичев В. А. Оценка деформаций поверхности при сооружении коммуникационных тоннелей мелкого заложения в инженерно-геологических условиях города Москвы / В. А. Ильичев, Н. С. Никифорова, М. М. Тупиков // Научный потенциал регионов на службу модернизации. – 2011. – № 1 (1). – С. 33–38.

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 22.1330.2011. 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 // Tunnelling 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 // Tunnelling 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. Ситников, 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 - трамвай 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 рельсошпальной 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 вибропреремещения в грунте достигают $5 \cdot 10^{-5}$ м, а виброускорения –