

ОПТИМАЛЬНЫЙ ВЫБОР АНКЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ФУНДАМЕНТА НА СКАЛЬНОМ ГРУНТЕ, РАБОТАЮЩЕГО НА ВЫДЕРГИВАНИЕ

А. А. Соколов, О. А. Маковецкий

Соколов Артем Александрович, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация, тел.: + 7 (999)-363-99-88; e-mail: Sokolov.f963017266@yandex;

Маковецкий Олег Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; e-mail: oleg-mak@inbox.ru

Строительство фундаментов в скальных грунтах, воспринимающих значительные выдергивающие нагрузки, представляет собой актуальную задачу современного строительства в регионах со сложной климатогеологией. В статье проведен сравнительный анализ применимости различных анкерных систем для совместной работы со свайным фундаментом. На основе критической оценки традиционных и современных методов закрепления обоснована целесообразность применения химических анкерных систем. В качестве практического примера рассмотрен проект технологических эстакад ТЭЦ-2 в Норильске, для условий которого выполнен детальный анализ продукции ведущих производителей. По результатам исследования сформированы рекомендации по выбору анкерных систем, учитывающие комплекс технико-экономических, климатических и эксплуатационных критериев. Установлено, что для реализации проекта оптимально подходят продукты двух производителей, демонстрирующие сопоставимые показатели несущей способности при требуемых характеристиках.

Ключевые слова: анкерные системы, скальное основание, выдергивающая нагрузка, химический анкер, инъекционная технология, свайно-анкерный фундамент, закрепление в скалу, проектирование в Арктике.

OPTIMAL CHOICE OF AN ANCHOR SYSTEM FOR A FOUNDATION STRUCTURE UNDER TENSILE LOADS ON ROCKY SOIL

A. A. Sokolov, O. A. Makovetskiy

Sokolov Artem Aleksandrovich, postgraduate student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, phone: + 7 (999) 363-99-88; e-mail: Sokolov.f9630187266@yandex.ru;

Makovetskiy Oleg Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Building Structures and Computational Mechanics Department, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; e-mail: oleg-mak@inbox.ru

The construction of foundations in rocky soils that can withstand significant pulling loads is an important task in modern construction in regions with complex climatic and geological conditions. This article provides a comparative analysis of the applicability of various anchor systems for use with pile foundations. Based on a critical evaluation of traditional and modern anchoring methods, the article argues for the use of chemical anchor systems. As a practical example, the article examines the project for the technological overpasses of the TPP-2 in Norilsk, where a detailed analysis of the products of leading manufacturers was conducted. Based on the results of the study, recommendations for the selection of anchor systems have been formulated, taking into account a set of technical, economic, climatic, and operational criteria. It has been established that the products of two manufacturers are optimal for the implementation of the project, as they demonstrate comparable bearing capacity and required characteristics.

Keywords: anchor systems, rock foundation, tensile load, chemical anchor, injection technology, pile-anchor foundation, rock anchoring, Arctic construction design.

Введение

Интенсификация строительства в регионах России со сложными топографическими и геологическими условиями обуславливает рост интереса к фундаментам, устраиваемым на скальных основаниях. Особую актуальность приобретают конструкции, воспринимающие значительные выдергивающие нагрузки: опоры магистральных ЛЭП, ветроэнергетические установки, большепролетные мостовые переходы и объекты в сейсмически активных зонах [1–3]. Стимулом для настоящего исследования послужила практическая задача возведения технологических эстакад на ТЭЦ-2 в г. Норильск, где в условиях стесненной городской застройки и

вечномерзлых грунтов была применена новая концепция «свайно-анкерного» фундамента [4].

Несмотря на высокую прочность скальных пород на сжатие, их поведение под выдергивающими нагрузками носит нелинейный характер и критически зависит от структурных особенностей массива – трещиноватости, выветрелости и слоистости. Некорректный выбор типа анкера, его геометрических параметров или технологии монтажа может инициировать хрупкое разрушение породы, прогрессирующее раскалывание массива или выдергивание крепежного элемента. В этой связи, научно обоснованный выбор анкер-

ной системы становится императивом для обеспечения надежности, долговечности и экономической эффективности всего сооружения [5, 6].

Цель исследования – разработка методики и определение оптимального типа анкерной системы, работающей на выдергивание в скальных грунтах, на основе комплексного анализа технико-эксплуатационных характеристик и условий конкретного проекта.

Задачи исследования:

1) провести критический анализ существующих анкерных систем и отфильтровать варианты, пригодные для конструкций нормального и повышенного уровня ответственности;

2) разработать систему критериев для сравнительного выбора анкеров в зависимости от параметров строительства;

3) на примере проекта для г. Норильск выполнить верификацию предложений ведущих производителей химических анкеров и осуществить итоговый выбор.

В качестве объекта исследования выступают фундаментные конструкции на скальных грунтах. Предмет исследования являются анкерные системы, воспринимающие выдергивающие нагрузки в составе фундамента.

Метод

1. Классификация и скрининг анкерных систем.

В работе проведена систематизация анкерных креплений с выделением четырех фундаментальных типов по механизму взаимодействия с массивом:

- скальные крючья – применимы для временной фиксации, но их непредсказуемая прочность, зависящая от локальной прочности породы на скол, исключает использование в ответственных конструкциях [7];

- клиновые и фальцевые соединения – историческая технология, основанная на механическом расклинивании в естественных трещинах. В современной практике не используется из-за отсутствия стандартизированных методик расчета и недостаточной надежности [7, 8];

- анкера механического (распорного) типа – широко распространенное решение, принцип действия которого основан на создании напряжений смятия в зоне контакта. Подразделяются на анкера крутящего момента и забивные. Ключевое ограничение – генерация высоких локальных напряжений, что делает их применение недопустимым в слабых и трещиноватых породах из-за риска хрупкого разрушения [9];

- химические (инъекционные) анкерные системы – современная технология, основанная на создании монолитной связи «стержень-порода» по всей длине скважины за счет полимеризации клеевого состава. Главное преимущество – отсутствие распорных напряжений, что позволяет применять их в обводненных и нарушенных массивах [10].

По результатам скрининга, для дальнейшего анализа были отобраны только химические и механические анкера, как единственные, отвечающие требованиям к сооружениям нормального и повышенного уровня ответственности.

2. Разработка системы критериев выбора.

Для объективного сравнения была разработана система критериев, объединенная в таблице. Критерии включают технические (несущая способность, допустимые типы оснований), эксплуатационные (стойкость к трещиноватости, температурный режим монтажа) и экономические (стоимость, скорость монтажа) параметры [11]. Отдельным аспектом необходимо рассмотреть влияние подготовки отверстий для химических анкеров.

Таблица

Сравнительные характеристики анкерных систем

№ п/п	Критерий	Виды анкеров	
		Механические анкера	Химические (инъекционные) анкера
	1	2	3
1	Принцип работы	Распор, трение	Адгезия, сцепление по всей длине
2	Доминирующий вид разрушения	Вырыв конуса породы	Срез/раздавливание породы под распорным узлом или проскальзывание
3	Применимость в трещиноватых породах	Ограниченное применение, требуется дополнительная оценка состояния массива	Модифицируют и упрочняют прилегающую зону, обеспечивая надежное, долговременное и равномерное закрепление в несплошной среде
4	Минимальные расстояния между анкерами	Ориентировочный диапазон: $5d-10d$, где d – диаметр скважины	Ориентировочный диапазон: $3d-6d$, где d – диаметр скважины
5	Несущая способность	Ограничена прочностью наиболее ослабленной контактной точки на скол или сдвиг	Ограничена прочностью армированного (пропитанного) массива на вырыв
6	Температурный режим монтажа	Температура важна как эксплуатационный фактор, влияющий на долговечность и выбор марки стали, но не на сам момент монтажа	Необходимо строгое соблюдение температурного режима, как условие для корректной работы

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Критерий	Виды анкеров	
		Механические анкеры	Химические (инъекционные) анкеры
	1	2	3
7	Скорость монтажа	Мгновенная готовность к нагрузке	Немедленная нагрузка невозможна. Требуется время на заполнение, отверждение.
8	Стоимость	Низкая стоимость в сравнении с химическими анкерами	Высокая первоначальная цена
9	Универсальность	Ограниченная универсальность, эффективны в узком диапазоне прочных и монолитных материалов	Высокая универсальность по типу основания и условиям работы

Проведенный анализ технологических процессов установки анкерных систем выявил фундаментальную зависимость между качеством подготовки скважин и несущей способностью химических анкеров. В отличие от механических аналогов, где основной критерий - прочность породы в зоне распора, для инъекционных систем решающее значение имеет состояние контактной поверхности по всей длине анкеровки [12].

Собрав данные по ранее полученным исследованиям [10, 13–15], результаты демонстрируют, что наличие в скважине продуктов бурения (шлама) и влаги снижает прочность сцепления «сталь – раствор – порода» на 40–60 %.

3. Анализ рыночных предложений для кейса «Норильск».

Для проекта технологических эстакад в Норильске на участке ТЭЦ-2 (рис. 2) ключевыми стали критерии [4]:

- работа в натуральном камне. Требовалось обеспечить надежное закрепление в скальных породах с учетом их неоднородности и возможной трещиноватости;

- возможность монтажа при отрицательных температурах. В связи с особенностями арктического региона возникла необходимость применения технологий, сохраняющих рабочие характеристики при температуре до -20°C ;

- обеспечение расчетной несущей способности. Каждый анкер должен был выдерживать нагрузку на выдергивание не менее 20,2 т при общем количестве 16 анкерных элементов в конструкции. Общий вид, расчетная и конструктивная схема (рис. 3) [4, 16];

- долговечность и коррозионная стойкость. Учитывая агрессивные природные условия региона, все компоненты системы должны были иметь соответствующие защитные покрытия;

- соответствие срокам монтажа. Технология установки должна была позволять проводить работы в сжатые сроки при сложных погодных условиях [17].

Данные требования стали определяющими при выборе между различными системами анкерного крепления, представленными на рынке.



Рис. 2. Участок ТЭЦ-2 г. Норильск, на котором будет расположен «свайно-анкерный» фундамент (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Site of the TPP-2 in Norilsk, where the "pile-anchor" foundation will be located (illustration by the authors)

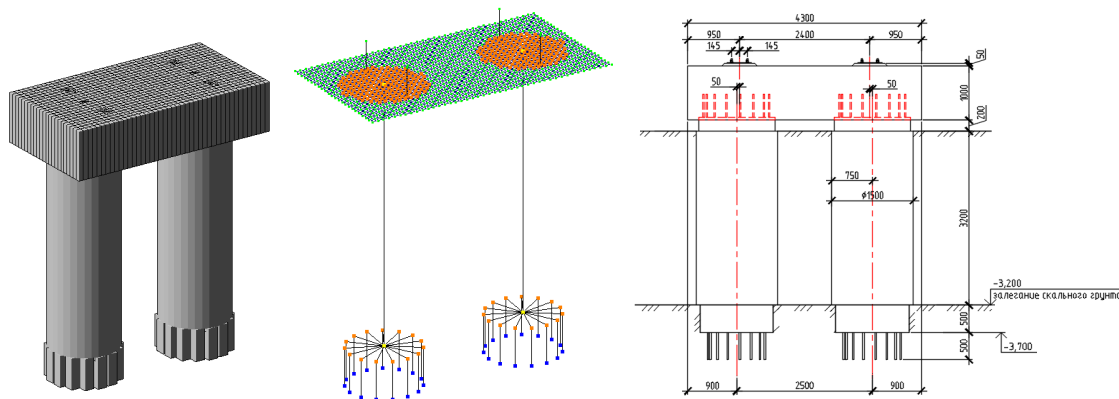


Рис. 3. Общий вид, расчетная и конструктивная схема «свайно-анкерного» фундамента (иллюстрация авторов)
Fig. 3. General view, design and structural scheme of a pile-anchor foundation (illustration by the authors)

Следующим этапом был выполнен запрос технических данных и протоколов испытаний у ведущих производителей: Hilti, EASYFIX, BITANKER,

Sormat, MasterFlow, Fasty, HIMTEX. Анализ проводился для анкеров максимальных диаметров с построением графика зависимости несущей способности от глубины анкеровки (рис. 4).

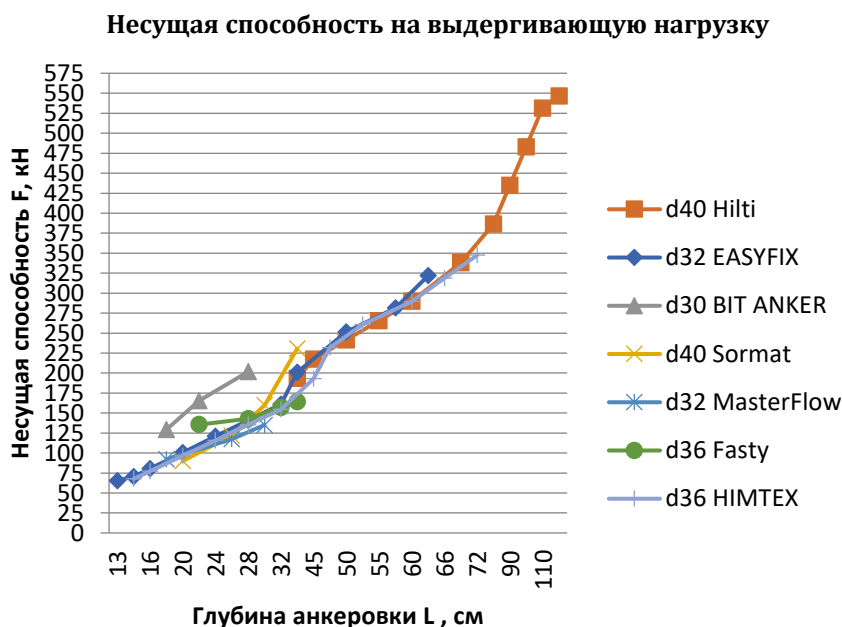


Рис. 4. Сравнительный график несущей способности химических анкеров на выдергивание без учета коэффициентов безопасности (иллюстрация авторов)
Fig. 4. Comparative graph of the pulling load capacity of chemical anchors, excluding safety factors (illustration by the authors)

Результаты и обсуждение

Анализ таблицы и рисунка 1 наглядно демонстрирует, что инъекционные анкеры обладают двумя ключевыми преимуществами перед распорными: многофункциональность (применимость в слабых и нарушенных грунтах с малыми межосевыми расстояниями) и масштабируемость несущей способности за счет увеличения глубины заделки. Подготовка скважин является не вспомогательной операцией, а ключевым технологическим процессом, определяющим надежность и долговечность химических анкерных систем в скальных грунтах. Пренебрежение этим этапом

сводит к минимуму преимущества даже самых совершенных материалов и конструкций [18]. Однако для массивных прочных скальных пород и умеренных выдергивающих нагрузок механические анкеры сохраняют экономическую привлекательность [19].

График на рисунке 4 и анализ технической документации позволили сделать следующие выводы применительно к проекту в Норильске:

1. Продукция большей части производителей (BITANKER, Sormat, MasterFlow, Fasty) имеет ограничение по глубине анкеровки (до 45 см),

что не позволяет достичь требуемой несущей способности в ~200 кН [6].

2. Анкеры Hilti, демонстрирующие максимальную нагрузку, имеют ограничение по температуре монтажа (-5°C), что не соответствует суровым условиям Арктики.

3. Критериям проекта в полной мере соответствуют два производителя: EASYFIX и российский НИМТЕХ. Их системы позволяют осуществлять анкеровку на глубину до 80 см, обеспечивая несущую способность до 350 кН, и допускают монтаж при температурах до -20°C .

Схожесть эксплуатационных характеристик у отобранных образцов свидетельствует о зрелости технологии и достоверности экспериментальных данных, предоставляемых производителями. Незначительные различия в стоимости (в пределах 10–15 %) объясняются различными логистическими схемами и наличием у российского производителя собственной производственной базы.

Однако, анализ экономической составляющей показал, что для массивных прочных скальных пород и при умеренных выдергивающих нагрузках (до 150 кН) механические анкеры сохраняют конкурентные преимущества. Экономия при использовании распорных систем в подобных условиях может достигать 40–60 % без ущерба для несущей способности конструкции.

Проведенные исследования подтверждают необходимость дифференцированного подхода к выбору анкерных систем с учетом всего комплекса технико-экономических показателей и конкретных условий строительства.

Заключение

1. Для постоянных ответственных сооружений использование сертифицированных химических или механических анкерных систем регламентировано строительными нормами. Устаревшие решения (скальные крючья, клиновые соединения) допустимы только для временных и вспомогательных конструкций при условии повышения коэффициента запаса.

2. Разработанная система критериев (табл.) позволяет формализовать процесс принятия проектного решения и объективно оценить преимущества различных анкерных систем. Доминирующим преимуществом инъекционных анкеров является их способность эффективно работать в слабых и трещиноватых грунтах без создания деструктивных распорных напряжений, что особенно критично для нарушенных скальных массивов. В то же время механические анкеры сохраняют свою нишу в качестве экономичного решения для прочных массивных пород с благоприятными структурно-текстурными характеристиками.

3. Апробация методики на реальном проекте в г. Норильск позволила идентифицировать двух производителей химических анкеров (EASYFIX и НИМТЕХ), продукция которых соответствует всем технологическим и климатическим требованиям. Окончательный выбор между ними может быть сделан на основе детального анализа коррозионной стойкости, стоимости системы «под ключ» и логистики поставок в арктический регион [20].

Список литературы

1. Bjarte Grindheim. Full-scale pullout tests of rock anchors in a limestone quarry focusing on bond failure at the anchor-grout and grout-rock interfaces / Bjarte Grindheim, Charlie C. Li, Are Håvard Høien // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2023. – Vol. 15, iss. 9. – P. 2264–2279. – DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.04.002.
2. John W. Barrett. Empirical Shaft Resistance of Driven Piles Penetrating Weak Rock / John W. Barrett, Luke J. Prendergast // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2020. – Vol. 53, iss. 4. – P. 5531–5543. – DOI: 10.1007/s00603-020-02228-7.
3. Analysis and design of axially loaded piles in rock / Chris Haberfield, Andrew Lochaden // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2019. – Vol. 11, iss. 3. – P. 535–548. – DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.10.001.
4. Соколов А. А. Конструкция фундамента на скальном основании, работающая на выдергивание в стесненных условиях / А. А. Соколов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2024. – № 4 (50). – С. 17–23. – DOI: 10.52684/2312-3702-2024-50-4-17-23.
5. Строительство в Севастополе // Сообщество мастеров-строителей и отделочников севпроект РФ. – Режим доступа: <https://севпроект.рф/fundament/na-skale-fundament.html> (дата обращения 10.09.25), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
6. Работа анкера в скальных грунтах. – Режим доступа: <https://forum.dwg.ru/showthread.php?t=4006> (дата обращения: 10.09.2025), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
7. Филатов А. А., Гуслиц В. М., Велиюлин И. И., Хасанов Р. Р. Конструкционные особенности и методика расчета рабочих параметров анкерных устройств нового типа / А. А. Филатов, В. М. Гуслиц, И. И. Велиюлин, Р. Р. Хасанов // Территория Нефтегаз. – 2018. – № 11. – С. 78–81.
8. Сооружение тоннелей в скальных грунтах. – Режим доступа: <http://офис.пф/нравов/p57-c.html?ysclid=mj9n5mosr7928985599> (дата обращения: 10.09.2025), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
9. Грановский А. В. О методике испытаний анкеров на вырыв из различных стеновых материалов и возможных областях их применения / А. В. Грановский, Д. А. Киселев // Жилищное строительство. – 2011. – №2. – С. 7–8.
10. Ковалев М. Г. Исследование свойств химического анкера на основе эпоксидной смолы / М. Г. Ковалев, В. А. Швецова // Вестник МГСУ. – 2024. – № 10. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-svoystv-himicheskogo-ankera-na-osnove-epoksidnoy-smoly> (дата обращения: 20.11.2025), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.



11. Несущая способность скального анкера по Крюкову. – Режим доступа: <https://forum.dwg.ru/showthread.php?t=145079&ysclid=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. Мушанов В. Ф. Анализ степени ответственности элементов для определения характеристик надежности и склонности к лавинообразному разрушению стержневых конструкций / В. Ф. Мушанов, 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. Федерация - № 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. Касанова, А. Ю. Юргайтис // 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.

© А. А. Соколов, О. А. 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 грунтовым 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, грунтовой массив, напряженно-деформированное состояние, мелкое заложение, дополнительные деформации.