

DOI 10.15826/rjct.2025.2.012

УДК 624.131:624.138:624.139

Н. А. Перминов¹, А. О. Кузьмина², Г. Д. Шевченко³, С. П. Щипанов⁴

^{1,2,3,4} Петербургский Государственный университет путей сообщения (ПГУПС), г.

Санкт-Петербург, Россия

e-mail: ¹ perminov-n@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ ИНЖЕНЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ КРУПНЫХ ГОРОДОВ И ИХ ЗАЩИТА

Аннотация. Интенсивное развитие городов, как правило, сопровождается высотным строительством и уплотнительной застройкой. При этом возрастает нагрузка на объекты существующей инженерной инфраструктуры, что требует от них устойчивого функционирования. Это в первую очередь относится к объектам водоотведения городов, как системы обеспечивающую их экологическую безопасность. Геотехническое обеспечение конструкционной безопасности канализационных тоннелей в сложных инженерно-геологических является целью настоящей работы. На основе численного моделирования взаимодействия тоннельных коллекторов и грунтового массива определены границы бездефектной совместной работы системы. При возрастающих внешних антропогенных и динамических воздействиях моделирование зон городских территорий с потенциально опасными участками подземных канализационных сооружений является основой для разработки нормативных документов по методам мониторинга и безопасному развитию геотехнической инфраструктуры мегаполиса. Выявление потенциально опасных участков тоннелей, длительно эксплуатируемых в сложных грунтовых условиях, позволит обеспечить надежность их функционирования при возрастающих техногенных и динамических воздействиях и повысить экологическую безопасность при развитии городской инфраструктуры.

Ключевые слова: инфраструктура, слабые грунты, экологическая безопасность, моделирование, защитные мероприятия

Для цитирования: Перминов Н. А., Кузьмина А. О., Шевченко Г. Д., Щипанов С. П. Моделирование потенциально опасных участков инженерной инфраструктуры крупных городов и их защита // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2025. – Т. 11. – № 2. – 1102012. – DOI 10.15826/rjct.2025.2.012.

N. A. Perminov¹, A. O. Kuzmina², G. D. Shevcenko³, S. P. Shchipanov⁴

^{1,2,3,4} Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), St. Petersburg, Russia

e-mail: ¹ perminov-n@mail.ru

MODELING OF POTENTIALLY DANGEROUS SECTIONS OF ENGINEERING INFRASTRUCTURE OF LARGE CITIES AND THEIR PROTECTION

Abstract. Intensive urban development, as a rule, is accompanied by high-rise buildings and sealing buildings. At the same time, the load on the facilities of the existing engineering infra-

structure increases, which requires them to function sustainably. This primarily applies to urban sanitation facilities as a system that ensures their environmental safety. Geotechnical provision of structural safety of sewer tunnels in complex engineering and geological conditions is the purpose of this work. Based on numerical modeling of the interaction of tunnel collectors and a soil massif, the boundaries of the defect-free joint operation of the system are determined. With increasing external anthropogenic and dynamic impacts, modeling urban areas with potentially dangerous areas of underground sewage facilities is the basis for the development of regulatory documents on monitoring methods and the safe development of the geotechnical infrastructure of a megalopolis. Identification of potentially dangerous sections of tunnels that are operated for a long time in difficult ground conditions will ensure the reliability of their operation under increasing man-made and dynamic impacts and increase environmental safety during the development of urban infrastructure.

Key words: infrastructure, weak soils, environmental safety, modeling, protective measures

For citation: Perminov N. A., Kuzmina A. O., Shevchenko G. D., Shchipanov S. P. (2025) Modeling of potentially dangerous sections of engineering infrastructure of large cities and their protection. Russian Journal of Construction Science and Technology. 11(2). 1102012. (In Russ.) DOI 10.15826/rjct.2025.2.012.

1. Введение

Для устойчивого развития крупных городов необходимо обеспечение надежного функционирования инженерной инфраструктуры. Интенсивное развитие городов, как правило, сопровождается высотным строительством и уплотнительной застройкой. При этом возрастает нагрузка на объекты существующей инженерной инфраструктуры, что требует от них устойчивого функционирования. Это в первую очередь относится к объектам водоотведения городов, как системы обеспечивающую их экологическую безопасность. Целью изучения настоящей работы является геотехническое обеспечение конструкционной безопасности канализационных тоннелей в сложных инженерно-геологических условиях. На основе численного моделирования взаимодействия тоннельных коллекторов и грунтового массива определены границы бездефектной совместной работы системы. При возрастающих внешних антропогенных и динамических воздействий моделирование зон городских территорий с потенциально опасными участками подземных канализационных сооружений является основой для раз-

работки нормативных документов по методам мониторинга и безопасному развитию геотехнической инфраструктуры мегаполиса. Выявление потенциально опасных участков тоннелей, длительно эксплуатируемых в сложных грунтовых условиях, позволит обеспечить надежность их функционирования при возрастающих техногенных и динамических воздействиях и повысить экологическую безопасность при развитии городской инфраструктуры.

Актуальны в изучении участки тоннельных канализационных коллекторов (ТКК), эксплуатируемых в сложных инженерно-геологических условиях, которые работают под воздействием природных и техногенных факторов. В качестве объекта исследования были приняты интервалы канализационных коллекторов в историческом центре Санкт-Петербурга. Из анализа материалов исследований [1–3] установлено, что износ сетей водоотведения крупных мегаполисов достигает 80 %. Чаще всего это объясняется сложными инженерно-геологическими условиями залегания тоннелей (ТКК) и возрастающими техногенными воздействиями. Достаточно часто из-за неудовлетворительного технического состояния ТКК и

интенсивных внешних статических и динамических воздействий происходят аварии на трассе пролегания коллектора с провалами грунта. Эти случаи весьма характерны и для объектов водоотведения Санкт-Петербурга.

Основная часть территории исторической застройки Санкт-Петербурга, характеризующейся густой сетью ТКК, перекрыта толщей неустойчивых к техногенным воздействиям четвертичных отложений Q .

В геологическом строении участки размещения подземных линейных объектов водоотведения представлены участком современных техногенных грунтов (tIV), современных болотных и озёрно-болотных отложений ($b-lbIV$), современными озёрно-морскими (литариновыми) отложениями (mIV), верхне-четвертичными озерно-ледниковыми ($lgIII$), ледниковыми ($gIII$) отложениями, а также породами нижнего кембрия ($\epsilon 1$).

Грунтовая толща вмещающего геомассива представлена грунтами четвертичных напластований с весьма низкими прочностными (удельное сцепление C до 0,01 МПа, при угле внутреннего трения ϕ до 15°) и деформационными (модуль деформации E до 4 МПа) характеристиками.

Это в первую очередь относится к объектам водоотведения городов, как системы обеспечивающей их экологическую безопасность. В этой связи рассматривается задача разработать методику выявления потенциально опасных участков инженерных сооружений, длительно эксплуатируемых в сложных грунтовых условиях, и геотехнического обеспечения их механической безопасности для устойчивого развития инженерно-транспортной инфраструктуры крупных городов.

2.2. Численное моделирование линейных подземных сооружений инженерной инфраструктуры

Целью численного моделирования было определение расчетных дополнительных деформаций существующего железобетонного коллектора, попадающего в зону влияния строительства транспортного заглубленного сооружения на канализационный коллектор на южной стороне набережной канала Санкт-Петербурга с рекомендациями по защитным мероприятиям.

Условная схема прохождения ТКК в зоне строящегося заглубленного сооружения и их взаимное расположение показаны на рис. 1–3.



Рис. 1. Геотехническая расчетная ситуация: схема прохождения ТКК в зоне строящегося заглубленного сооружения

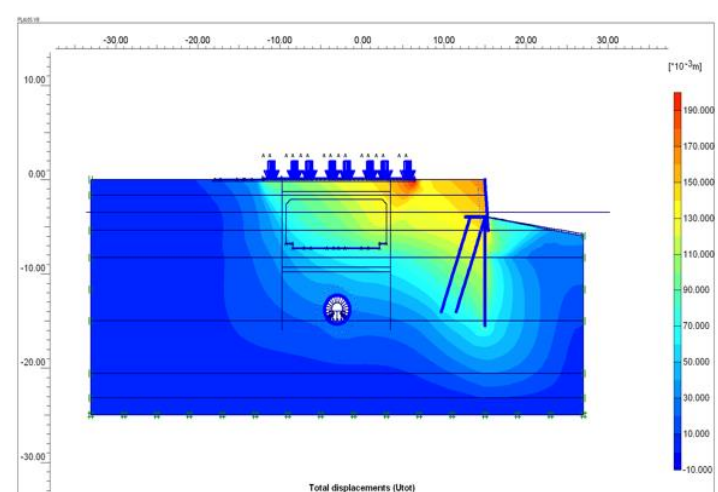


Рис. 4. Общий вид расчетной схемы. Этап до начала работ

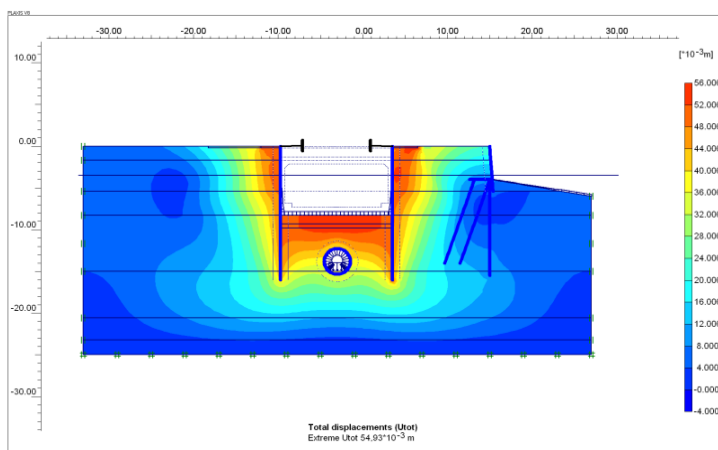


Рис. 5. Этап откопки котлована. Общая схема деформаций

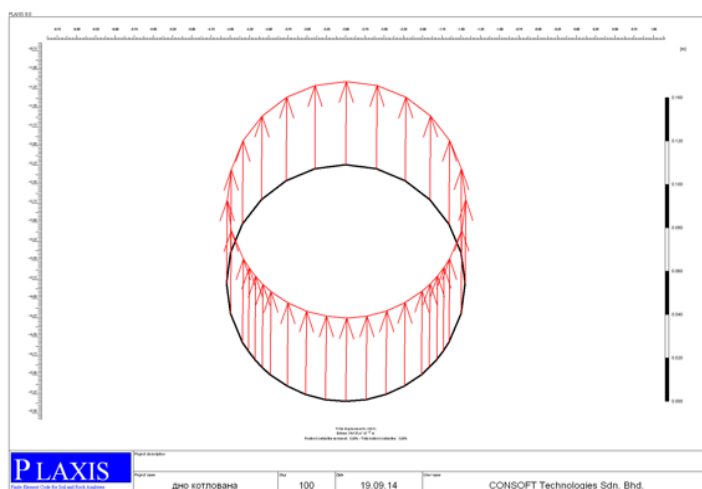


Рис. 6. Деформации коллектора при откопке котлована 38,4 мм

При полученной расчетом деформации коллектора при откопке котлована 38,4 мм был проведен анализ строительной ситуации. Конструкторские расчеты объекта реконструкции выполнялись в среде Autodesk RobotStructuralAnalysisProfessional 2024 [7, 8]. Цель расчета: оценка степени влияния строящегося заглубленного сооружения на напряженно-деформированное состояние (НДС) эксплуатируемый коллектор ТКК, проходящий под ним.

Критерием длительной нормальной

эксплуатации коллекторного тоннеля является обеспечение сохранности несущей способности обделки. В расчете тоннельная конструкция задается двухслойной пространственной оболочкой с разными характеристиками слоев (рис. 7). Расчетные характеристики материалов обделки приведены в таблице 1.

Конструктивный разрез принятой в расчет двухслойной обделки тоннельного канализационного тоннеля представлен на рис. 8.

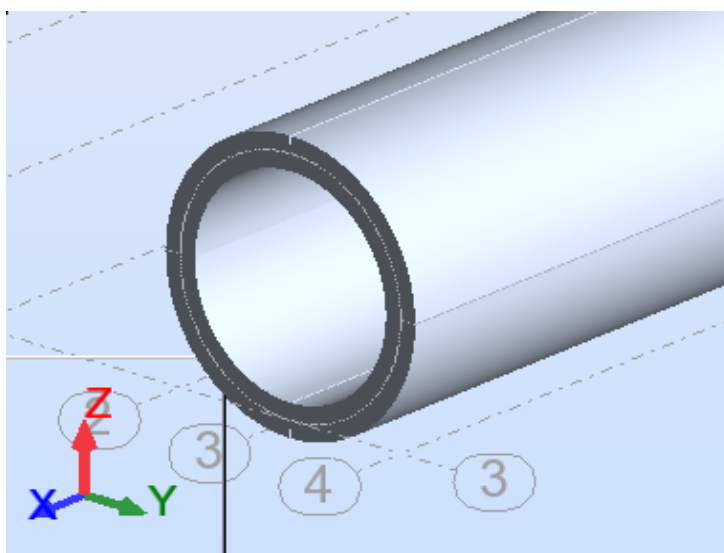


Рис. 7 Расчетная схема двухслойной обделки

Таблица 1

Расчетные характеристики материалов обделки

| № | Материал | E (кг/см ²) | G (кг/см ²) | NI | LX (1/°Ц) | RO (кН/м ³) | Re (кг/см ²) |
|---|----------|---------------------------|---------------------------|-------|-------------|---------------------------|----------------------------|
| 1 | B30 | 331407,77 | 138069,58 | 0,200 | 0,00 | 2501,36 | 224,338 |
| 2 | B20 | 275323,38 | 114718,07 | 0,20 | 0,00 | 24,530 | 152,96 |

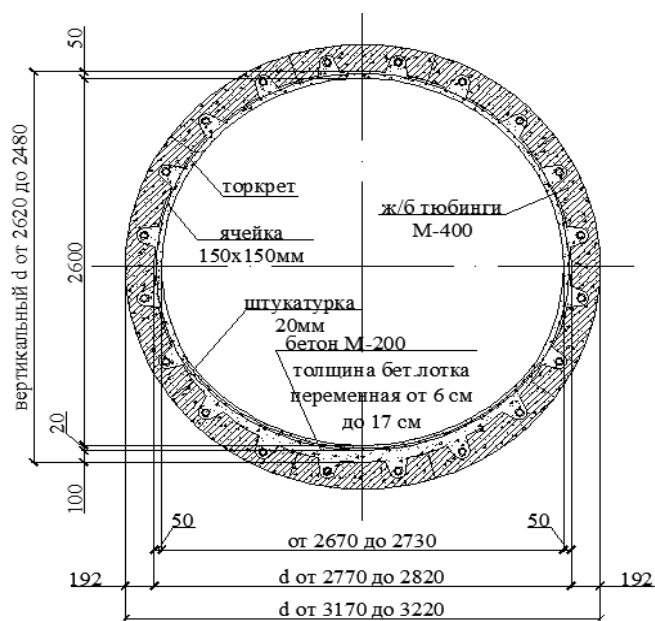


Рис. 8. Конструктивный разрез принятой в расчет двухслойной обделки

Несущая конструкция – обделка тоннеля состоит из восьми отдельных блоков с продольными и поперечными связями толщиной конструкции $h_1 = 0,192$ м, Класс бетона М400 (в расчетах принят В30). Толщина внутренней ЖБ рубашки $h_2 = 0,05$ м. Класс бетона в расчетах принят В20.

При откопке котлована в зависимости от длины фронта работ разгрузка геомассива происходит неравномерно по длине траншеи. Поэтому расчет НДС выполнялся для участков тоннеля различной длины (рис. 9).

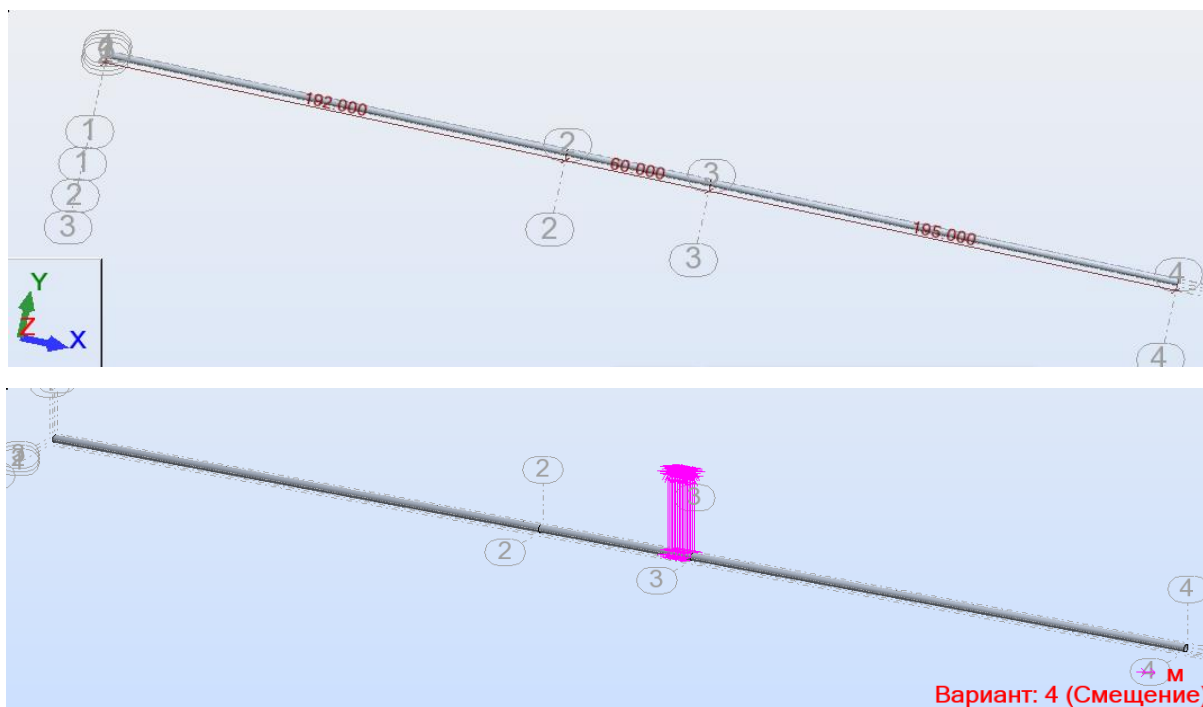


Рис. 9. Расчетные участки тоннеля и схемы приложения нагрузки

Моделировались следующие схемы воздействия строительства транспортного тоннеля:

А. Эксплуатационные нагрузки:

1. Собственный вес.
2. Горное давление.

Б. Воздействие от строительства

Расчеты выполнялись на период нормальной эксплуатации и период строительства при различном сочетании

воздействий. Фрагменты полученных результатов в осях конструкции X, Y и Z по определению глобальных напряжений, изгибающих моментов, нормальных сил и смещений представлены в таблице 2 для схемы А–условий нормальной эксплуатации и в таблице 3 для схемы Б, при учете строительных воздействий.

Таблица 2

Глобальные напряжения, изгибающие моменты, нормальные силы и смещения по схеме – А

| | sXX (МПа) | sYY (МПа) | sXY (МПа) | MXX (МНм/м) | MYY (МНм/м) | MXY (МНм/м) | NXX (МН/м) | NYX (МН/м) | NXY (МН/м) | U (мм) |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|--------|
| MAX | 0.02 | -1.73 | 0.66 | 0.04 | 0.07 | 0.00 | 0.006 | -0.416 | 0.160 | 65.732 |
| Плита | 1 | 4 | 12 | 2 | 10 | 3 | 1 | 4 | 12 | 9 |
| Узел | 7 | 2322 | 4845 | 776 | 5632 | 1547 | 7 | 2322 | 4845 | 4848 |
| Нагружение | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) |
| MIN | -0.54 | -4.23 | -0.66 | -0.04 | -0.07 | -0.00 | -0.130 | -1.016 | -0.160 | 63.399 |
| Плита | 10 | 2 | 11 | 4 | 11 | 11 | 10 | 2 | 11 | 3 |
| Узел | 5632 | 776 | 5632 | 1 | 5632 | 6415 | 5632 | 776 | 5632 | 1548 |
| Нагружение | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) | 5 (С) |

Примечание: знак плюс (+) – напряжения растягивающие, знак минус (–) – сжимающие

Таблица 3

Глобальные напряжения, изгибающие моменты, нормальные силы и смещения по схеме – Б

| | sXX (МПа) | sYY (МПа) | sXY (МПа) | MXX (МНм/м) | MYY (МНм/м) | MXY (МНм/м) | NXX (МН/м) | NYX (МН/м) | NXY (МН/м) | U (мм) |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|--------|
| MAX | 2.53 | 1.95 | 1.59 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.607 | 0.467 | 0.382 | 5.015 |
| Плита | 9 | 11 | 6 | 12 | 12 | 11 | 9 | 11 | 6 | 6 |
| Узел | 3332 | 3576 | 3576 | 3820 | 3820 | 3820 | 3332 | 3576 | 3576 | 3596 |
| Нагружение | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| MIN | -2.84 | -1.81 | -1.59 | -0.01 | -0.02 | -0.00 | -0.682 | -0.434 | -0.382 | 0.000 |
| Плита | 8 | 10 | 5 | 12 | 8 | 12 | 8 | 10 | 5 | 11 |
| Узел | 3820 | 3576 | 3329 | 5680 | 4102 | 3820 | 3820 | 3576 | 3329 | 5895 |
| Нагружение | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

Примечание: знак плюс (+) – напряжения растягивающие, знак минус (–) – сжимающие

Как видно из таблицы, большие по абсолютной величине значения напряжений – сжимающие (–1,73; –4,23). И небольшие по величине – растягивающие напряжения (+0,66).

Таким образом, элементы конструкции коллектора работают на внецентренное сжатие, при этом, растягивающие напряжения не превышают предельных значений.

Максимальные смещения $U = 65,7$ мм. Конструкция имеет одинаковую осадку всех точек коллектора по длине,

которая не приводит к изменению напряженно-деформированного состояния его обделки от действия вертикальных и горизонтальных нагрузок.

Выводы по выполненному конструкторскому расчёту в среде Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2010.

Состояние НДС бетона в пределах допустимых значений:

для бетона класса В30
предельное сжатие $[-S_{пред}] = -22$ МПа

предельное растяжение $[+S_{\text{пред}}] =$
 $= +1,75 \text{ МПа}$

для бетона класса В20

предельное сжатие $[-S_{\text{пред}}] =$
 $= -15 \text{ МПа}$

предельное растяжение $[+S_{\text{пред}}] =$
 $= +1,35 \text{ МПа}$

В таблице 3 при сопоставлении расчетов указаны экстремальные напряжения в разных направлениях осей обделки. Отрицательные значения напряжений (сжимающих) в указанной таблице не превышают предельные значения. Некоторые положительные значения (растягивающие) существенно превышают предельные. В результате, в этих зонах могут образоваться трещины бетона обделки коллектора. Таким образом, необходимо выполнить ряд мероприятий по защите обделки коллекторного тоннеля.

Численное моделирование взаимодействия тоннельных коллекторов и грунтового массива позволяет определить границы бездефектной совместной работы системы. В качестве «пассивных» защитных мероприятий может быть предложено устройство защитных экранов, выполняющих роль барьеров для равномерного перераспределения нагрузки на тоннельное сооружение или «активной» защиты тоннельного сооружения путем создания внутренней высокопрочной футеровки конструкций тоннеля и увеличения его несущей способности для восприятия повышенных нагрузок.

3. Заключение по результатам геотехнических и конструкторских расчетов

На основании анализа результатов геотехнических и конструкторских расчетов влияния строительства транспортного тоннеля на канализационный

коллектор ТКК можно рекомендовать защитные мероприятия, обеспечивающие бездефектную совместную работу сооружений и геомассива бездефектной совместной работы системы.

1. В качестве «пассивных» мероприятий по снижению воздействия строительства транспортного тоннеля на канализационный коллектор предлагается выполнить закрепление грунта на 1,5 метра в уровне котлована по струйной технологии, с прочностью грунта-цемента не ниже 2,5 МПа и модулем деформации 15–20 МПа.

2. Для обеспечения эксплуатационных характеристик существующего коллектора ТКК, его устойчивости и несущей способности, в качестве «активного» мероприятия, необходимо перед началом строительства выполнить работы по усилению тоннеля методом релейнинга, например, трубами «Хобас» или использовать технологию усиления методом «Сатурн» на расчетном участке в зоне строительства транспортной развязки.

3. По отдельному проекту необходимо разработать систему мониторинга и установить систематические наблюдения (мониторинг) за динамикой деформаций коллектора с начала производства работ и в период не менее пяти лет с начала эксплуатации.

4. Совместное выполнение геотехнических и конструкторских расчетов с использованием современных программных комплексов позволит выявить потенциально опасные участки тоннелей и дать расчетное обоснование по выбору рациональных способов обеспечения их конструкционной безопасности инженерной инфраструктуры крупных городов со сложными грунтовыми условиями в целях устойчивого их развития.

Благодарности

Настоящая статья написана при поддержке Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» инициативных научных работ, выполняемых студенческими научными коллективами.

Список используемых источников

1. Cheng, X., Li, Q., Hai, R., Guo, Sh., Xing, X. (2024). Research Progress and Prospects of Seismic Performance on Underground Structure Embedded in Soft Soil Foundation. *Scientific Reports*, 14(1), 21883.
2. Lin, X.-T., Chen, R.-P., Wu, H.-N., Cheng, H.-Z. (2019). Deformation Behaviors of Existing Tunnels Caused by Shield Tunneling Undercrossing with Oblique Angle. *Tunneling and Underground Space Technology*, 89, 78–90. doi: 10.1016/j.tust.2019.03.021.
3. Перминов, А., Перминов, Н. (2019). Геотехнические и геоэкологические основы устойчивого жизненного цикла уникальных длительно эксплуатируемых подземных сооружений систем водоотведения в сложных грунтовых условиях (опыт Санкт-Петербурга). В сб.: Основы геотехники и её применение в строительстве: Новые материалы, конструкции, технологии и расчёты. Международная конференция по основам геотехники и её применению в строительстве: Новые материалы, конструкции, технологии и расчёты, GFAC 2019, с. 231–234. doi: 10.1201/9780429058882-45.
4. Ильичев, В. А., Никифорова, Н. С. (2018). Методы определения кривизны и разности уклонов фундаментов как критерии деформирования оснований зданий и сооружений. *Механика грунтов и фундаментостроение*, 55(3), 168–172. doi: 10.1007/s11204-018-9521-5.
5. Пономарев, А. Б., Калошина, С. В., Захаров, А. В., Безгодков, М. А., Шенкман, Р. И., Золотозубов, Д. Г. (2015). Результаты геотехнического моделирования влияния строительства котлована большого диаметра на существующую историческую застройку Японии. В сб.: Специальная публикация Геотехнического Общества: 15-я Азиатская региональная конференция по механике грунтов и геотехнической инженерии: Геотехническое Наследие. Ч. 2 (Сессия ТС 301/АТС 19), с. 2676–2679. doi: 10.15593/2224-9826/2014.4.18.
6. Перминов, Н. (2019). Моделирование бездефектного жизненного цикла уникальных подземных сооружений канализационной системы на этапе их строительства в сложных грунтовых условиях. *Международный журнал по вычислительной инженерии зданий и сооружений* Издательства ASV, LTD (Москва), 15(1), 119–130. doi: 10.22337/2587-9618-2019-15-1-119-130.
7. Карасев, М. А., Тай Тянь, Н., Вильнер, М. А. (2019). Прогноз напряжённо-деформированного состояния сборных крепей подземных тоннелей криволинейного поперечного сечения. *Вестник Уральского государственного горного университета*, 4(56), 90–97. doi: 10.21440/2307-2091-2019-4-90-97.
8. Перельмутер, А. В., Фиалко, С. Ю. (2019). Неупругий расчёт железобетонных конструкций в программе SCAD. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering Publishing House ASV, LTD*, 15(1), 54–60. doi: 10.22337/2587-9618-2019-15-1-54-60.

References

1. Cheng, X., Li, Q., Hai, R., Guo, Sh., & Xing, X. (2024). *Research progress and prospects of seismic performance on underground structure embedded in soft soil foundation*. *Scientific Reports*, 14(1), 21883.
2. Lin, X.-T., Chen, R.-P., Wu, H.-N., & Cheng, H.-Z. (2019). *Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle*. *Tunneling and Underground Space Technology*, 89, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.021>
3. Perminov, A., & Perminov, N. (2019). *Geotechnical and geoecological foundations of sustainable life cycle of unique long-term underground structures of drainage systems in difficult soil conditions (St. Petersburg experience)*. In *Fundamentals of Geotechnics and its application in construction: new materials, structures, technologies, and calculations* (pp. 231–234). GFAC 2019. <https://doi.org/10.1201/9780429058882-45>
4. Piyichev, V. A., & Nikiforova, N. S. (2018). *Methods for determining the curvature and slope difference of foundations as criteria for deformation of the foundations of buildings and structures*. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 55(3), 168–172. <https://doi.org/10.1007/s11204-018-9521-5>

5. Ponomarev, A. B., Kaloshina, S. V., Zakharov, A. V., Bezgodov, M. A., Shenkman, R. I., & Zolotozubov, D. G. (2015). *Results of geotechnical modeling of the impact of the construction of a large-diameter pit on the existing historical buildings in Japan*. In *Special publication of the Geotechnical Society: 15th Asian regional conference on soil mechanics and geotechnical engineering: Geotechnical heritage* (Vol. 78, pp. 2676–2679). <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2014.4.18>
6. Perminov, N. (2019). *Modeling of defect-free life cycle of unique underground structures of sewage system at the stage of their construction in complex soil conditions*. *International journal on computational engineering of buildings and structures*, 15(1), 119–130. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2019-15-1-119-130>
7. Karasev, M. A., Tai Tian, N., & Vilner, M. A. (2019). *Prediction of stress-strain state of prefabricated supports for underground tunnels with curvilinear cross sections*. *Bulletin of the Ural State Mining University*, 4(56), 90–97. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2019-4-90-97>
8. Perelmuter, A. V., & Fialko, S. Y. (2019). *Inelastic analysis of reinforced concrete structures in SCAD*. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 15(1), 54–60. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2019-15-1-54-60>

Получено: 06.11.25

Прошла рецензирование: 16.12.25

Принята к публикации: 26.12.25

Доступно он-лайн: 29.12.25

Received: 06.11.25

Revised: 16.12.25

Accepted: 26.12.25

Available on-line: 29.12.25