



## CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 1, 2021

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.03

УДК 624.13

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ КОНСТРУКЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УНИКАЛЬНЫХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ СИСТЕМЫ ВОДООТВЕДЕНИЯ КРУПНЫХ ГОРОДОВ В СЛОЖНЫХ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЯХ

**Н.А. Перминов**

Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 18.11.2020

Принята: 20.01.2021

Опубликована: 21.04.2021

#### Ключевые слова:

моделирование, геотехнический анализ, подземные сооружения водоотведения, тоннели, конструкционная безопасность, геомониторинг.

### АННОТАЦИЯ

Антропогенные и динамические воздействия на объекты подземной городской инфраструктуры усиливаются при интенсивном развитии мегаполисов. Уникальные, длительно действующие подземные сооружения канализации требуют особой защиты от антропогенного воздействия, так как степень их износа в сложных почвенных условиях достигает 70 % и более. Поэтому обеспечение конструктивной (механической) безопасности подземных сооружений повышенного уровня опасности и ответственности определяет устойчивое функционирование и дальнейшее развитие геотехнической инфраструктуры мегаполиса в целом.

Многолетнее изучение динамики изменения технического состояния подземных канализационных сооружений мегаполиса, длительно эксплуатирующихся (более 70 лет) в мягких грунтах, позволило установить закономерности влияния интенсивных антропогенных и динамических воздействий на этот процесс. Впервые на основе разработанных непрерывных моделей дефектных конструкций выявлены потенциально опасные участки, подверженные проявлению критических отказов, представлены пути их коррекции. Численное моделирование определило границы бездефектной совместной работы системы «целевой участок – геомассив – подземное сооружение». Научное обоснование границ территорий с потенциально опасными участками подземных канализационных сооружений с учетом внешних антропогенных и динамических воздействий является основой для разработки нормативных документов по безопасному развитию геотехнической инфраструктуры исторической территории Санкт-Петербурга.

Предложенные методы мониторинга и защиты геотехнической инфраструктуры уже много лет успешно применяются ОАО «Водоканал Санкт-Петербурга» в зонах воздействия антропогенных факторов и строящихся объектов на подземные сооружения, обеспечивают оптимальное сочетание устойчивого функционирования и развития геотехнической инфраструктуры мегаполисов.

© ПНИПУ

© **Перминов Николай Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент, e-mail: [perminov-n@mail.ru](mailto:perminov-n@mail.ru).

**Nikolay A. Perminov** – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: [perminov-n@mail.ru](mailto:perminov-n@mail.ru).

## MODELLING AND MONITORING OF STRUCTURAL SAFETY OF UNIQUE UNDERGROUND STRUCTURES OF THE SEWAGE SYSTEM OF LARGE CITIES IN DIFFICULT GROUND CONDITIONS

N.A. Perminov

Emperor Alexander I Saint Petersburg Transport University, Saint Petersburg, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 18.11.2020

Accepted: 20.01.2021

Published: 21.04.2021

#### Keywords:

modeling, geotechnical analysis, underground water disposal structures, tunnels, structural safety, geomonitoring.

### ABSTRACT

Anthropogenic and dynamic impacts on facilities of underground urban infrastructure increase at intensive development of megacities. The unique long-operating underground structures of sewage system require special protection against anthropogenic influence as their wear degree in difficult soil conditions reaches 70 % and more. Therefore, providing structural (mechanical) safety of underground structures of excessive level of danger and responsibility defines sustainable operation and future development of geotechnical infrastructure of the megacity in general.

Long-term studying dynamics of changes of technical state of underground sewage structures of the megacity, long operating (for more than 70 years) in soft soils, allowed establishing regularities of influence of intensive anthropogenic and dynamic impacts on this process. For the first time, based on developed continuous models of defective structures potentially dangerous sections have been identified, they are subjected to manifestation of critical failures; ways of their correction are presented. Numerical simulation has defined borders of defectless joint operation of the system "target area – geomassif – underground structure". Scientific substantiation of boundaries of areas with potentially dangerous sections of underground sewage facilities with account of external anthropogenic and dynamic impacts constitutes the basis for elaborating regulations on safe development of geotechnical infrastructure of the historical area of St. Petersburg.

The proposed methods of monitoring and protection of geotechnical infrastructure have been successfully used for many years by St. Petersburg Vodokanal in areas of influence of anthropogenic factors and objects under construction on underground structures, they ensure an optimal combination of sustainable operation and development of geotechnical infrastructures of megacities.

© PNRPU

---

## Введение

В городах с обширным историческим центром в особой защите от техногенного воздействия нуждаются длительно эксплуатируемые тоннельные канализационные коллекторы. Как объекты, относящиеся к сооружениям повышенного уровня ответственности, тоннельные коллекторы должны отвечать нормативным требованиям безопасной эксплуатации, чтобы исключить риск появления опасных техногенных происшествий [1–4]. Автором собраны и проанализированы материалы о текущем техническом состоянии канализационных коллекторов 15 крупнейших городов России, включая Москву, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Самару, Новосибирск и др., суммарной протяженностью более 2300 км. Для общей выборки были приняты такие признаки, как развитие тоннельной сети (от 100 до 500 км и более), длительность эксплуатации (от 30 до 70 лет и более), сложные инженерно-геологические условия прохождения трассы тоннелей (наличие слабых неустойчивых грунтов, пересечение водоносных горизонтов, включая напорные). На основе моделирования и мониторинга фактического функционирования тоннельных коллекторов появляется возможность разработки геотермических мероприятий по обеспечению надежности и конструктивной безопасности длительно эксплуатируемых в сложных грунтовых условиях подземных сооружений системы водоотведения крупных городов для условий их устойчивого развития.

Практически для большинства рассматриваемых городов сеть тоннельных коллекторов имеет среднее значение степени физического износа в пределах 55–66 %, с динамикой развития 0,5–1,0 % в год. Отмечено, что в городах с обширной исторической застройкой и развитой транспортной инфраструктурой, в первую очередь это относится к Москве и Санкт-Петербургу, степень износа тоннелей имеет значительно большие значения, достигая соответственно 71 и 83 % при более высокой динамике развития до 1,5–2 % в год. Система тоннельной канализации в Москве сложилась к концу 30-х гг., а в Санкт-Петербурге это произошло в конце 50-х гг., но степень износа тоннелей и динамика развития этого процесса в Санкт-Петербурге значительно выше, поэтому именно здесь особенно актуальны задачи защиты тоннельных коллекторов и установления причин высокой степени их износа для устойчивого развития этого уникального исторического города (рис. 1).

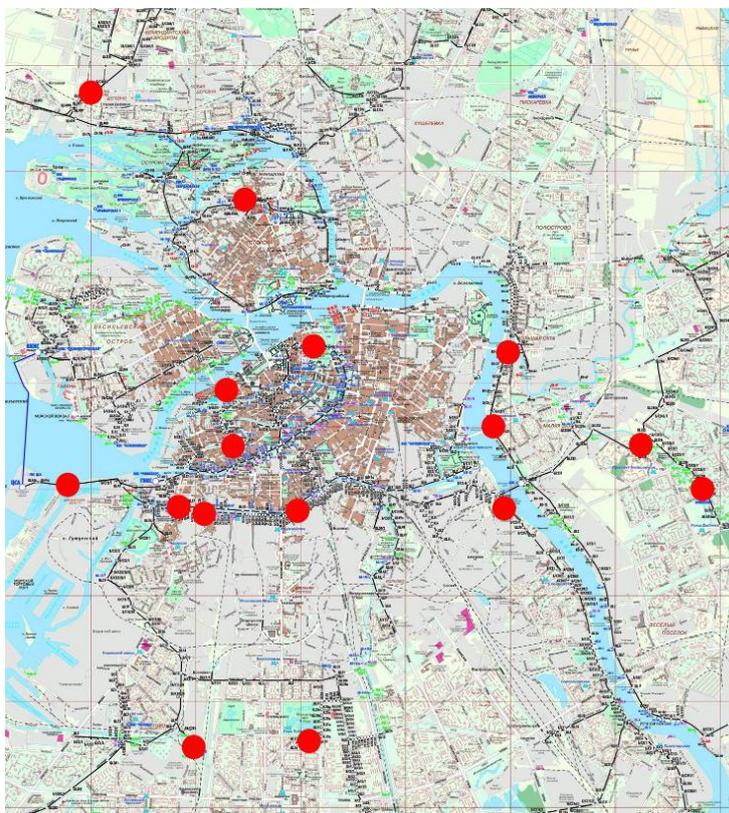


Рис. 1. Участки технического обследования тоннельных коллекторов в зонах техногенного воздействия  
Fig. 1. Sections of technical inspection of tunnel collectors in the zones of technological impact

## 1. Анализ причин появления дефектов длительно эксплуатируемых канализационных тоннелей и интенсивность их развития

Общая сеть тоннельных канализационных коллекторов (ТКК) Санкт-Петербурга в настоящее время составляет около 270 км. Система канализационных тоннелей представляет собой трубопроводы диаметром от 1,2 до 5,6 м, выполненные горным способом с помощью горнопроходческих щитов и проложенные на глубине от 3 до 90 м. Несущая конструкция представлена железобетонными тубингами из бетона класса В25 с устройством внутри армированной бетонной «рубашки» класса В15 или покрытия из торкрет-бетона. Толщина тубинга

обычно составляет 200 мм, и их водонепроницаемость обеспечивается наличием фальца на его гранях шириной 10 мм и глубиной 30 мм. Пространство между массивом вмещающей породы и тубинговой крепью заполняется глинистым раствором через инъекционные отверстия. Большая часть (до 75 %) протяженности ТКК находится в центральной исторической части города, не имеет дублеров и проходит в крайне сложных в строительном отношении инженерно-геологических и гидрогеологических условиях. В пределах центральной части города, прочные кристаллические породы залегают на глубине от 120–220 м. Они перекрыты мощным чехлом осадочных пород. Основная часть территории перекрыта толщей четвертичных отложений  $Q$ . Среди последних особо следует отметить водонасыщенные глинистые грунты, относящиеся к озерно-морским, озерно-ледниковым и моренным отложениям. До глубины 30–120 м грунтовые напластования представлены песками пылеватыми средней плотности, водонасыщенными ( $E = 7...11$  МПа,  $C = 0$  МПа,  $\varphi = 27...30^\circ$ ); супесями пылеватыми пластичными ( $E = 3...5$  МПа,  $C = 0,01...0,02$  МПа,  $\varphi = 12...17^\circ$ ); суглинками пылеватыми слоистыми текуче-пластичными ( $E = 5...8$  МПа,  $C = 0,015...0,025$  МПа,  $\varphi = 10...16^\circ$ ); суглинками пылеватыми полутвердыми с гравием, галькой ( $E = 12...15$  МПа,  $C = 0,016...0,028$  МПа,  $\varphi = 24...28^\circ$ ). Вся эта толща грунтов неустойчива к техногенным воздействиям. Только в южной части города на глубине более 30 м залегают кровля дислоцированных кембрийских отложений ( $E = 19...34$  МПа,  $C = 0,04...0,06$  МПа,  $\varphi = 17...21^\circ$ ). Водоносные горизонты представлены надморенным водоносным горизонтом (поверхностные грунтовые воды); верхним надморенным водоносным горизонтом, расположенным на глубинах от 7 до 30 м с величиной напора 5–28 м, и нижним межморенным горизонтом – на глубинах 25–120 м. Вендский водоносный комплекс (гдовский водоносный горизонт) располагается в дочетвертичных верхне-протерозойских отложениях на глубинах от 70 м и более, где величина напора достигает 80–160 м.

За счет размыва палеореками пород дочетвертичного возраста толща четвертичных отложений характеризуется большим перепадом абсолютных отметок [5–7]. Несимметричные напластования разнопрочных грунтов характеризуются резкими уклонами, достигающими значений до 50 % и более. Этот фактор особо негативно сказывается на длительно эксплуатируемых тоннельных канализационных коллекторах в условиях возрастающих техногенных воздействий, в первую очередь вибродинамических [8–10].

Автором проведен анализ архивных материалов технических осмотров службой эксплуатации тоннельных коллекторов ГУП «Водоканал Спб», а также инструментальные обследования в период с конца 70-х гг. и до настоящего времени технического состояния конструкции тоннелей общей протяженностью около 15 000 м как в центральной исторической части города, глубиной заложения 12–15 м, так и за ее границами при подходах к трем главным канализационным насосным станциям, принимающим все оттоки города, – ГКНС-Ольгино, ГКНС-Юг, ГКНС-Белый остров, заглубленных соответственно на 71,0 м, 58 м и 53 м и на этих же отметках имеющих подсоединение к тоннелям.

Технологические инструментальные обследования включали: натурную тахеометрическую съемку пространственного положения тоннеля в интервалах между шахтами, сканирование с помощью георадара состояний внутренней поверхности тоннеля с оценкой его сплошности (рис. 2); взятие кернов и проведение испытаний по методу отрыва со сканированием для определения прочностных характеристик бетона; взятие проб на химический и биохимический анализы; оценку степени коррозии и арматуры неразрушающими методами; вибродинамические испытания колебаний внутренних конструкций тоннеля от внешних и строительных вибрационных воздействий [11–15].

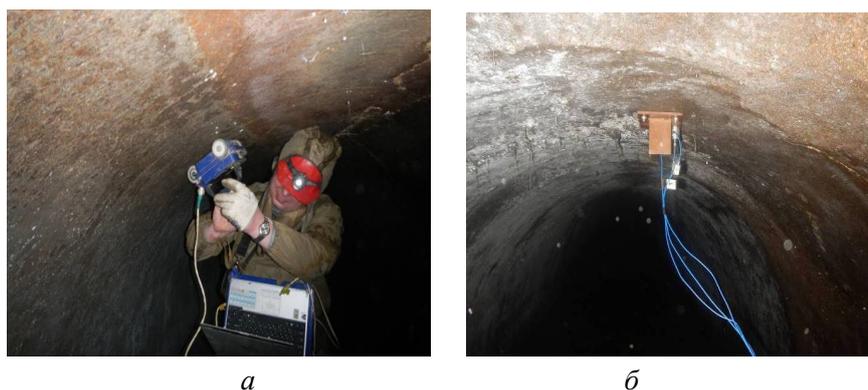


Рис. 2. Проведение испытаний конструкций в действующем ТКК: *a* – измерение вибраций с помощью акселерометра ICP; *б* – сканирование сплошности конструкций тоннеля георадаром OKO-2  
 Fig. 2. Testing of structures in the current TCC: *a* – vibration measurement using the ICP accelerometer; *b* – scanning the continuity of tunnel structures with the OKO-2 GPR

Уникальность материалов наблюдений за состоянием тоннелей заключается в том, что техническое обследование сооружений проводилось в течение длительного времени – с конца 70-х гг. и по настоящее время (конец 2020 г.). За этот период одни и те же интервалы коллекторов удавалось обследовать несколько раз. При этом, как правило, после обследования в течение нескольких лет осуществлялся мониторинг их состояний. Таким образом, появилась возможность проследить динамику развития дефектов.

Временной диапазон наблюдений был разделен на три периода: 1) 1970–1980 гг.; 2) 1980–2000 гг.; 3) 2000–2020 гг. Вскрытые наиболее характерные и влияющие на эксплуатационную надежность и несущую способность тоннеля дефекты удалось сгруппировать в 7 классов [16]:  $d_1$  – усадочные трещины в бетонной рубашке;  $d_2$  – признаки газовой коррозии;  $d_3$  – капельные течи;  $d_4$  – силовые трещины в своде и на боковой поверхности тоннеля;  $d_5$  – признаки биологической коррозии бетона;  $d_6$  – коррозия арматуры, истирание лотка;  $d_7$  – наличие напорных протечек.

На рис. 3 представлена структура проявления и динамика развития дефектов за время эксплуатации ТКК с конца 70-х гг. до 2020 г.

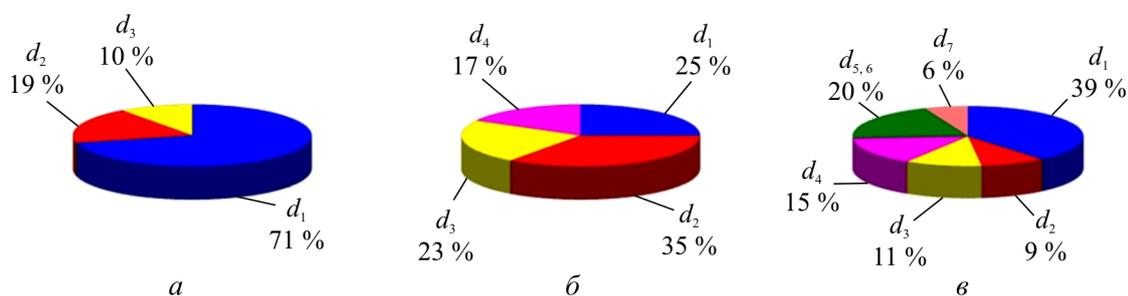


Рис. 3. Динамика и структура проявления дефектов за период длительной эксплуатации ТКК: *a* – 1970–1980 гг.; *б* – 1980–2000 гг.; *в* – 2000–2020 гг. Классификация дефектов:  $d_1$ – $d_7$  – первичные от усадочных трещин и проявления признаков газовой коррозии до развития силовых трещин и появления напорных протечек (см. описание в тексте)

Fig. 3. Dynamics and structure of defects over the period of long-term operation of the TCC: *a* – 1970–1980 years; *b* – 1980–2000 years; *c* – 2000–2020 years. Classification of defects:  $d_1$ – $d_7$  – primary from shrinkage cracks and signs of gas corrosion to the development of force cracks and the appearance of pressure leaks (see the description in the text)

Анализ структуры проявления и динамики развития дефектов показывают, что в начальный период эксплуатации тоннельных коллекторов наблюдались дефекты в виде усадочных трещин в бетонной рубашке с проявлением капельных течей и признаками газовой коррозии. Характер дефектов, преобладающих в первые 15–20 лет эксплуатации тоннелей, и их влияние на несущую способность и эксплуатационную надежность сооружений можно принять незначительным, а их технологическое состояние можно признать работоспособным по действующим в РФ ГОСТам и сводам правил.

Последующие 20 лет эксплуатации тоннелей характеризуются признаками появления силовых трещин и значительным увеличением дефектов бетона в связи с его газовой и биокоррозией. Однако их техническое состояние находится к категории «ограниченно работоспособное».

Особый интерес представляют результаты анализа дефектов, проявление которых приходится на период 2000–2020 гг. Необходимо отметить, что именно в этот период возросло количество дефектов, влияющих на несущую способность конструкций тоннеля: почти 40%-ное увеличение количества силовых трещин в своде и на боковой поверхности тоннеля; признаки коррозии арматуры и истирание лотка; наличие напорных протечек в теле тоннеля; увеличение доли дефектов, связанных с биологической и газовой коррозиями. Категория технического состояния конструкции тоннеля классифицируются как «ограниченно способные». Функционирование ТКК требует мониторинга его технического состояния, проведения мероприятий по восстановлению несущей способности и эксплуатационной надежности сооружения.

Комплексные, проведенные в течение длительного времени технические обследования ТКК позволили выполнить ретроспективный анализ и установить факторы, обуславливающие появление и развитие дефектов. Факторы могут быть сгруппированы по природе влияния на внутренние и внешние.

Природой внутренних факторов являются процессы, связанные с транспортированием канализационных стоков. Основные из них – коррозия внутренних конструкций (газовая, биологическая), истирание лотка, сточные наносы и др. Эти факторы приводят к достаточно статическому развитию дефектов. Определение предельно допустимых значений их воздействия на ТКК является областью исследований и деятельности санитарно-технических специальных служб. Эти задания успешно ими решаются [17, 18].

Внешние факторы характеризуются сложным взаимодействием наземной городской среды, тоннельного сооружения и вмещающего геомассива, образуя природно-техническую систему (ПТС), функционирующую под воздействием техногенных факторов.

Оценка этого взаимодействия и определение области предельно допустимых взаимных влияний элементов системы ПТС является задачей геотехнических прогнозов. Вопросам оптимального управления элементами ПТС посвящены отдельные работы автора [19].

В рамках данного исследования перед нами стоит задача геотехнического обеспечения безопасного уровня внешних техногенных воздействий на тоннельное сооружение с учетом его остаточного ресурса несущей способности.

## **2. Моделирование и геотехнические методы обеспечения конструкционной безопасности тоннельных коллекторов**

Геотехнические и конструкционные мероприятия по обеспечению надежности и безопасности длительно эксплуатируемых ТКК должны выбираться на основе сравнения конкурентных вариантов [20–23], но главным требованием, которому они должны непременно

соответствовать – это возможность превентивного применения, обоснованного геотехническими и конструкторскими расчетами [25].

В табл. 1 приведены примеры некоторых геотехнических мер, успешно примененных в проектах защиты ТКК в Санкт-Петербурге в период 1998–2020 гг.

Таблица 1

Геотехнические меры защиты ТКК

Table 1

Geotechnical protection measures of the TCC

Характер техногенных воздействий	Геотехнические и конструкционные меры	Объект защиты
Сверхнормативные статические и динамические воздействия на кирпичный свод коллектора	Устройство разгружающего экрана и усиление конструкций композиционными материалами, и мониторинг	Канализационный коллектор кирпичной кладки, построен в XVIII в. под Конногвардейским бульваром
Увеличение статической нагрузки на ТКК от веса строящегося над ним здания	Устройство разгрузочного моста с передачей нагрузки на грунты ниже основания тоннеля, мониторинг	ТКК на Наличной улице
Разгрузка массива грунта при строительстве заглубленного транспортного тоннеля над ТКК	Устройство защитного экрана из закрепленного грунта для предотвращения подъема дна котлована, мониторинг	Транспортные тоннели над ТКК вдоль Обводного канала и моста А. Невского
Предотвращение горизонтального смещения ТКК при односторонней разгрузке массива грунта, при реконструкции набережной	Устройство геотехнического барьера, мониторинг	ТКК вдоль трассы по набережной р. Фонтанка
Увеличение зоны предельно допустимых смещений ТКК при односторонней разгрузке массива грунта при реконструкции набережной	Конструкционное усиление и санация ТКК методом спирально навивной технологии для увеличения предельно допустимых смещений тоннеля, мониторинг	ТКК вдоль трассы по набережной Крюкова канала и р. Мойка
Увеличение статических и динамических нагрузок на ТКК от действия большегрузного транспорта и трамваев	Конструкционное усиление и санация ТКК методом навивки для восстановления несущей способности тоннеля до проектного уровня, мониторинг	ТКК протяженностью 840 м на пр. Товарищеском

В табл. 2 из вышеприведенных примеров представлены результаты геотехнического моделирования по обеспечению конструкционной безопасности для защиты подземных сооружений водоотведения, наиболее характерных для крупного города с развитой инженерно-транспортной инфраструктурой, при сложных инженерно-геологических условиях строительства и эксплуатации [25, 26].

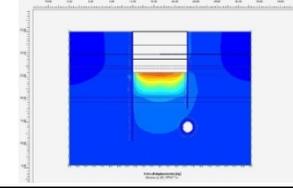
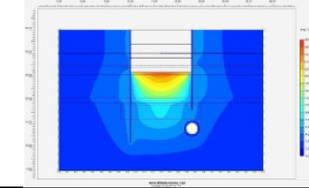
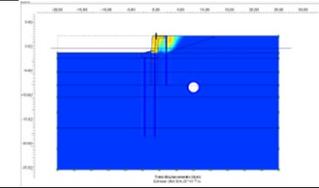
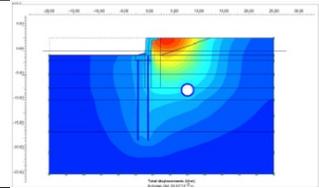
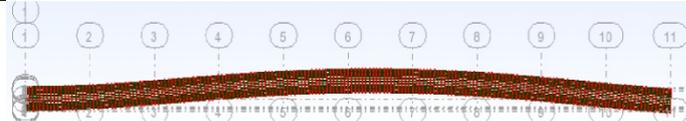
Расчетное обоснование геотехнических защитных мероприятий осуществлялось по алгоритму [27]: сбор нагрузок и воздействий, определение физико-механических характеристик свойств грунта и материалов тоннеля; составление геомеханической расчетной модели и расчет смещений по программе Plaxis3DTunnel; составление расчетной модели для конструкторских расчетов по программе Robot; выбор параметров усиления тоннеля. Расчетный пример показан на рис. 4.

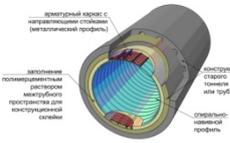
Таблица 2

Примеры расчетного обоснования геотехнических мероприятий  
 по защите тоннелей от недопустимых воздействий

Table 2

Examples of the calculated justification of geotechnical measures  
 to protect tunnels from unacceptable impacts

Характер техногенных воздействий	Геотехнические и конструкционные меры	
Устройство защитного экрана из закрепленного грунта для предотвращения подъема дна котлована		
Разгрузка массива грунта при строительстве заглубленного транспортного тоннеля над ТКК	Вертикальные деформации грунтового массива после откопки строительного котлована, без предварительного закрепления	Вертикальные деформации грунтового массива после откопки строительного котлована с закреплением грунтов над коллектором по технологии Jet Grouting мощностью 3,0 м
		
	Дополнительные вертикальные деформации коллектора по направлению к поверхности земли составили 37 мм	Дополнительные вертикальные деформации коллектора по направлению к поверхности земли составили 3,2 мм
Вариант расчета	Стадия строительства	Деформация коллектора, мм
Без закрепления	–	+37
Закрепление основания котлована по технологии Jet Grouting. Мощность 2,0 м	усиление грунтов	–2,1
	разработка котлована	+10,1
Закрепление основания котлована по технологии Jet Grouting. Мощность 3,0 м	усиление грунтов	–3,0
	разработка котлована	+3,6
Закрепление грунтов над коллектором по технологии Jet Grouting. Мощность 2,0 м	усиление грунтов	–2,6
	разработка котлована	+8,3
Закрепление грунтов над коллектором по технологии Jet Grouting. Мощность 3,0 м	усиление грунтов	–2,9
	разработка котлована	+3,2
Конструктивное усиление ТКК навивной технологией для увеличения предельно допустимых смещений тоннеля		
Увеличение зоны предельно допустимых смещений ТКК при односторонней разгрузке массива грунта при реконструкции набережной	Общие расчетные перемещения при откопке под защитой шпунтового ограждения	Общие расчетные перемещения при откопке с устройством геотехнического барьера
		
	Дополнительные горизонтальные деформации коллектора составили 54 мм	Дополнительные горизонтальные деформации коллектора составили 7 мм
		

Характер техногенных воздействий	Геотехнические и конструкционные меры		
Конструктивное усиление ТКК методом футеровки и спирально-навивной технологии для восстановления несущей способности тоннеля до проектного уровня			
Увеличение статических и динамических нагрузок на ТКК от действия большегрузного транспорта и трамваев			
	Техническое состояние ТКК до ремонта	Конструктивное решение усиления	Техническое состояние ТКК после ремонта

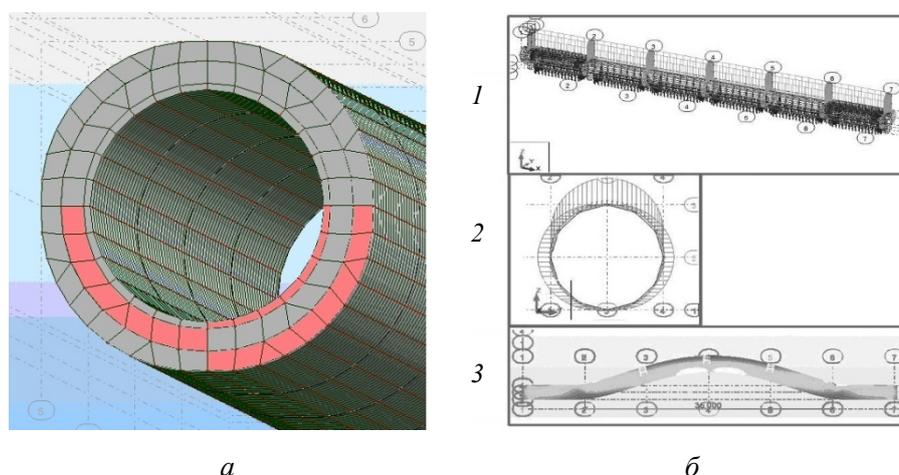


Рис. 4. Из расчетного примера коллектора на техногенное воздействие: *a* – фрагменты расчетной схемы; *b* – моделирование предельно допустимых смещений коллектора: 1 – тубинги коллектора; 2 – бетонная рубашка; 3 – слой усиления и санации методом навивки

Fig. 4. From the calculated example of the reservoir, the natural impact: *a* – fragments of the design scheme; *b* – modeling of the maximum permissible displacements of the collector: 1 – collector tubes; 2 – concrete jacket; 3 – layer of reinforcement and rehabilitation by winding

В рамках данного исследования перед нами стояла задача геотехническими расчетами определить допустимый уровень внешних техногенных воздействий на тоннель с учетом его остаточного ресурса несущей способности. Это обеспечивало конструктивную безопасность сооружения, например, при смещении вмещающего массива грунта или повышенных внешних динамических воздействий. На рис. 5, *a, б* представлены результаты расчетного моделирования предельно допустимых смещений тоннелей (до применения мер защиты и после проведения защитных мероприятий) и данные мониторинговых наблюдений.

### 3. Опыт применения конструктивных способов защиты длительно эксплуатируемых тоннельных коллекторов

Тоннельный коллектор на Товарищеском проспекте с интервалами и диаметрами  $D = 2,5$  м и  $D = 1,5$  м на глубине 1274 м находился в эксплуатации более 40 лет и по результатам обследования имел степень износа более 79 %, просадки на перекрестке улиц до 25 мм. Необходимо было обеспечить защиту ТКК от внешних повышенных статических

и динамических воздействий транспорта. По результатам георадарного сканирования обнаружено повсеместно отслоение бетонной рубашки от тьюбинговой обделки с образованием напорных течей (рис. 6).

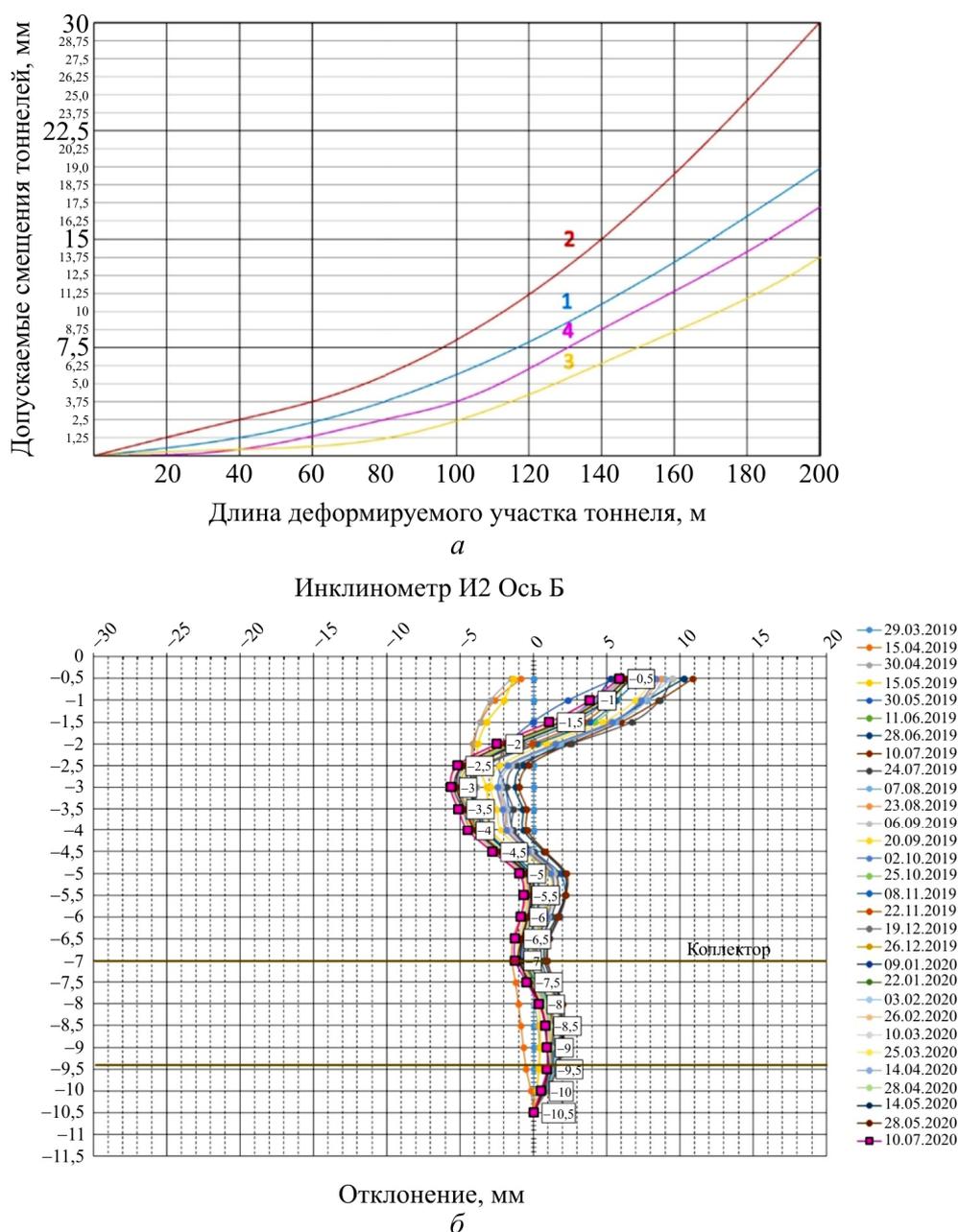


Рис. 5. Предельно допускаемые смещения тоннеля, попадающего в зону влияния техногенных воздействий: *a* – расчетные значения предельно допустимых смещений канализационных тоннелей  $D = 1,5$  и  $D = 2,5$  до (1,3) и после (2,4) усиления конструкции с использованием навивной технологии; *б* – данные мониторингового контроля по показаниям инклинометров за недопущением превышения предельно допустимых смещений тоннеля  $D = 2,5$  м при длине деформируемого участка 70 м

Fig. 5. Maximum permissible displacements of the tunnel falling into the zone of influence of man-made impacts: *a* – calculated values of the maximum permissible displacements of sewer tunnels  $D = 1.5$  and  $D = 2.5$  before (1.3) and after (2.4) strengthening of the structure with the use of winding technology; *b* – monitoring control data on the indications of inclinometers to prevent exceeding the maximum permissible displacements of the tunnel  $D = 2.5$  m with a length of the deformable section of 70 m

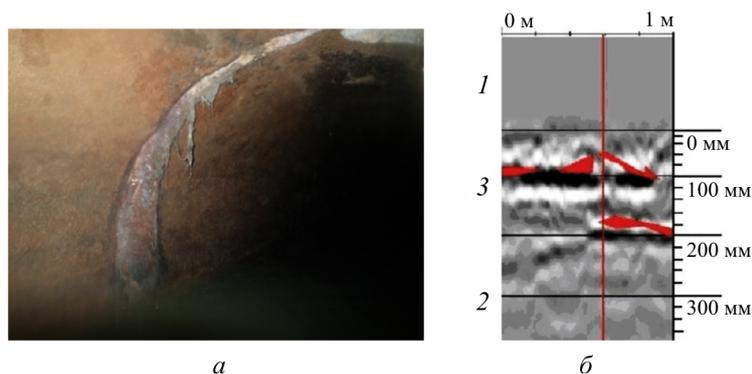


Рис. 6. Дефект в виде расслоения конструкций: *a* – признаки напорных течей; *б* – фрагмент радарограммы с признаками расслоения конструкций тоннеля: 1 – тубинговая обделка; 2 – железобетонная рубашка; 3 – слой напорной воды  
Fig. 6. Defect in the form of stratification of structures: *a* – signs of pressure leaks; *b* – a fragment of a radarogram with signs of stratification of tunnel structures: 1 – tubing lining; 2 – concrete jacket; 3 – a layer of pressure water

Последовательность расчетов выполнялась по алгоритму, изложенному выше в п. 3 статьи, фрагменты расчета представлены на рис. 4, предельно допустимые смещения до применения мер защиты и после защитных мероприятий показаны на графике (см. рис. 5, *a*).

Особым требованием для выполнения защитных мероприятий было использование такой технологии, которая позволяла бы провести ремонтные работы в условиях непрерывного транспортирования канализационных стоков.

Для ремонта и восстановления несущей способности тоннеля была применена технология санации методом навивки «САТУРН», разработанная и адаптированная для специфических условий Санкт-Петербурга [28]: интервалы между шахтами до 1000 м и более; нерегулярность рабочего сечения по длине коллектора, связанного с динамическими воздействиями и просадками тоннеля в слабых тиксотропных грунтах. Состав рабочих операций включал: очистку тоннеля и подготовку поверхности; конструкционную склейку бетонной рубашки и тубинговой обделки инъектированием материала SikaDur; усиление поверхности свода структурным армированием углепластиком SikaWrap; футеровку поверхности тоннеля навивным профилем из ПВХ; инъектирование полимерцементного раствора ( $P_{сж} = 65$  МПа) в межтрубное пространство для конструкционной склейки оболочки из ПВХ с конструкцией тоннеля. Фрагменты операции показаны на рис. 7.

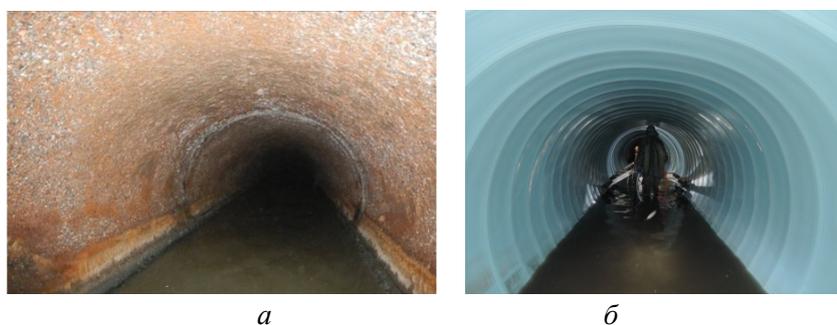


Рис. 7. Состояние ТКК: *a* – до ремонтных работ; *б* – после усиления конструкции и санации методом навивки  
Fig. 7. The state of the TCC: *a* – before the repair work; *b* – after the reinforcement of the structure and rehabilitation by the winding method

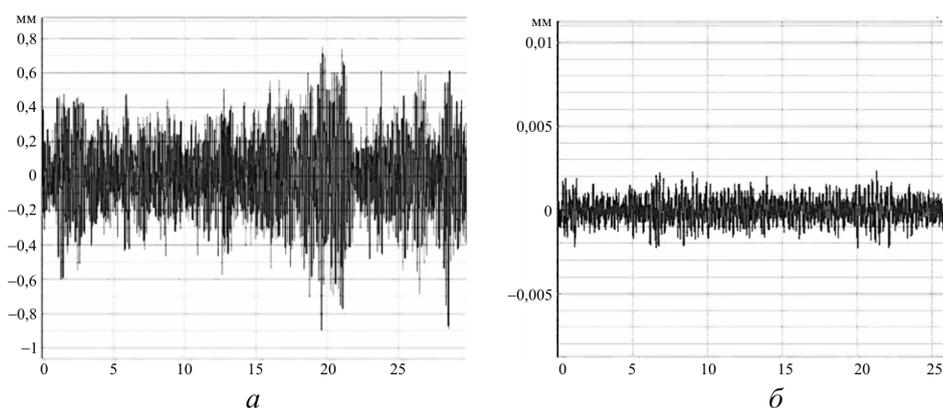


Рис. 8. Сопоставление результатов измерения колебаний конструкций тоннеля при действии внешней вибродинамической нагрузки от транспорта: *a* – осциллограмма колебательного процесса конструкций тоннеля с дефектами расслоения  $A = 300 \dots 800$  мк; *б* – то же, после усиления «конструкционной склейкой» и санации методом навивки  $A = 15 \dots 20$  мк

Fig. 8. Comparison of the results of measuring the vibrations of tunnel structures under the action of external vibration-dynamic load from transport: *a* – oscillogram of the oscillatory process of tunnel structures with delamination defects  $A = 300 \dots 800$  мк; *b* – the same, after strengthening by "structural gluing" and rehabilitation by winding  $A = 15 \dots 20$  мк

По данным проведенного мониторинга установлено: вибродинамические испытания тоннеля до и после ремонта показали изменения периода собственных колебаний коллектора 0,54 с до 0,19 с, т.е. на 58 %, а амплитуда собственных колебаний снизились с  $A = 300$  мкм до  $A = 15$  мкм, т.е. почти на два порядка. Это свидетельствует об обеспечении сплошности конструкции и совместной работе ее слоев (рис. 8). Гарантированный срок после ремонта надежности работы ТКК не менее 50 лет.

## Заключение

Подземные сооружения водоотведения, в первую очередь ТКК, крупных городов России имеют износ до 66 %. Неблагоприятные гидрогеологические условия и возрастающее влияние техногенных факторов привели к износу тоннельных коллекторов в Санкт-Петербурге до 83 %, с высокой динамикой развития до 1,5–2 % в год.

Предложенные и геотехнически обоснованные методы защиты ТКК, включая технологии конструкционного усиления и санации в условиях транспортирования стоков, сопровождаемые системой мониторинга, обеспечивают конструкционную безопасность ТКК и их эксплуатационную надежность.

Разработанные и обоснованные геотехническим моделированием методы обеспечения конструкционной безопасности ТКК рекомендуется применять для крупных городов с обширным историческим центром, стесненными и сложными грунтовыми условиями городской застройки, но имеющих сеть сильно изношенной канализации, как следствие, функционирующей в запроектных режимах.

*Работа выполнена при поддержке гранта РААСН (№ 2020-СН-7.4.1).*

## Библиографический список

1. Отведение и очистка сточных вод Санкт-Петербурга / ред. Ф.В. Кармазинова. – 2-е изд. – СПб.: Новый журнал, 2002. – 683 с.
2. Особенности инженерно-геологических условий в Санкт-Петербурге / Р.Е. Дашко [и др.] // Городское развитие и геотехническая инженерия. – 2011. – № 1. – С. 1–47.
3. Ержанов Ж.С., Айталиев Ш.М., Алексеева Л.А. Динамика тоннелей и подземных трубопроводов. – Алма-Ата: Наука Казахской ССР, 1989. – С. 240.
4. Айталиев Ш.М., Алексеева Л.А., Украинец В.Н. Влияние свободной поверхности на тоннель мелкого заложения при действии подвижных нагрузок // Изв. АН Каз. ССР. Сер. физ.-матем. – 1986. – № 5. – С. 75–80.
5. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федер. закон 12.10.2009. № 384-ФЗ (the updated version 2016) (2009).
6. Алексеев М.И., Баранов Л.А., Ермолин Ю.А. Приближенная аналитическая оценка показателей надежности стареющих объектов ВКХ // Вода и экология: проблемы и решения. – 2019. – № 3 (79). – С. 3–8. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.3-8
7. Баранов Л.А., Ермолин Ю.А. Надежность объектов с нестационарной интенсивностью отказов // Надежность. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 3–9. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-3-9
8. Назарова М.В., Бойко С.Ю., Шипилова Г.С. Разработка алгоритма расчета параметров конструкционного материала, обладающего виброзащитными свойствами // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 1. – С. 73–75.
9. Численное моделирование динамики фундамента существующего здания от грузового автомобиля / В.В. Антипов, В.Г. Оффрихтер, А.Б. Пономарев, О.А. Шутова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 5–14.
10. Пономарев А.Б., Шутова О.А. Проблемы исследования вибрации фундаментов зданий, вызываемой движением автотранспорта // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2020. – № 3 (46). – С. 26–28.
11. Васенин В.А. Анализ процесса развития длительных осадок застройки Санкт-Петербурга по результатам мониторинговых наблюдений // Взаимодействие оснований и сооружений. Подземные сооружения и подпорные стены: тр. междунар. конф. по геотехнике. – СПб., 2014. – С. 8–27.
12. Рябинин И.А. Надежность и безопасность сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
13. Панкова Г.А., Клементьев М.Н. Опыт эксплуатации канализационных тоннелей в Санкт-Петербурге // Водоснабжение и санитарное оборудование. – 2015. – № 3. – С. 55–61.
14. Васильев В.М., Панкова Г.А., Столбихин Ю.В. Уничтожение тоннелей канализации и надстроек из-за воздействия микробиологической коррозии // Водоснабжение и санитарное оборудование. – 2013. – № 9. – С. 55–61.
15. Перминов Н.А. Комплексные геотехнические и мониторинговые услуги для строительства подземного сооружения в мегаполисе // Труды Международной геотехнической конференции. – Алматы, 2004. – С. 361–366.
16. Perminov N.A. Simulation of defectless lifecycle of unique underground structures of the sewage system at the stage of their construction in difficult soil conditions // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2019. – Vol. 15, № 1. – P. 119–130.

17. Прокудин И.В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: дис. ... д-ра техн. наук. – Л., 1983. – 455 с.
18. Панкова Г.А., Клементьев М.Н. Опыт эксплуатации канализационных тоннелей в Санкт-Петербурге // Водоснабжение и санитарное оборудование. – 2015. – № 3. – С. 55–61.
19. Перминов Н.А. Геотехнический аспект обеспечения безопасности объектов длительного пользования инженерной инфраструктуры крупных городов в сложных природных условиях // Труды 15-й Дунайской – Европейской конференции по геотехнической инженерии «Геотехника автомобильных и железных дорог». – Австрия, Вена, 2014. – С. 1195–1201.
20. Надежность технических систем и техногенный риск / В.А. Акимов, В.Л. Лапин, В.М. Попов, В.А. Пучков, В.И. Томаков, М.И. Фалеев. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. – С. 368.
21. Алексеева Л.А., Украинец В.Н. Математическое моделирование динамики тоннелей и трубопроводов мелкого заложения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 45. – С. 1954–1956.
22. Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов. – М.: Эдиториал, 1999. – 264 с.
23. Тсаесанифос С.П., Манезиарас П.М., Георгиу Д. Сопротивление горной реакции на туннелирование НАТМ: тематическое исследование. // Труды Международного симпозиума по геотехническим аспектам подземного строительства в мягком грунте / ред. Кусакабэ, Фуджита и Миядзаки. – Япония: Роттердам, Белькема, 2000. – С. 167–172.
24. Перминов Н.А., Перминов А.Н. Геотехнические аспекты обеспечения безопасности длительно эксплуатируемых объектов инженерной инфраструктуры крупных городов в сложных грунтовых условиях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 111–128.
25. Прокудин И.В. Результаты лабораторных исследований прочностных характеристик глинистых грунтов при динамических нагрузках // Применение ЭВМ при расчете и проектировании железнодорожного пути: сб. науч. тр. ЛИИЖТа. – Л., 1974. – Вып. 366. – С. 60–66.
26. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения // Ред В.А. Ильичева, Р.А. Мангушева. – 2-е изд., доп. и перераб.; Рос. акад. архитектуры и строит. наук, Рос. о-во по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению. – М., 2016. – С. 1040.
27. Перминов Н.А., Свитин В.В., Перминов А.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния тоннельного коллектора в условиях сочетания техногенных воздействий: материалы VII Междунар. симп. «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» APCSCSE. – Новосибирск, 2018. – С. 265–267.
28. Патент № 2630629, РФ. МПК F16L 55/165, F16L 55/163, B29C 53/78. Способ ремонта тоннельных коллекторов и подземных трубопроводов / Перминов Н.А., Перминов А.Н., Сергеев Н.Ю. // Изобретения. Полезные модели. – 2017. – No. 26.

## References

1. Otvedenie i ochistka stochnyh vod Sankt-Peterburga. / Red. F.V. Karmazina – 2-e izdanie – S-Pb.: Novyj zhurnal, 2002. p. 683.

2. Dashko R.E. i dr. Osobennosti inzhenerno-geologicheskikh uslovij v Sankt-Peterburge. – S-Pb.: Gorodskoe razvitie i geotekhnicheskaya inzheneriya. 2011, № 1. p. 1-47.
3. Erzhanov ZH.S., Ajtaliev SH.M., Alekseeva L.A. Dinamika tonnelej i podzemnyh truboprovodov. Alma-ATA: Science of the Kazakh SSR, 1989. p. 240.
4. Ajtaliev SH.M., Alekseeva L.A., Ukrainec V.N. Vliyanie svobodnoj poverhnosti na tonnel' melkogo zalozheniya pri dejstvii podvizhnyh nagruzok // Izv. AN Kaz.SSR. Ser. fiz.-matem. 1986. № 5. p. 75-80.
5. LF "Technical regulations on the safety of buildings and structures" 12.10.2009. No. 384-FZ (the updated version 2016) (2009).
6. Alekseev, M.I., Baranov, L.A. and Ermolin, Yu.A. (2019). An approximate analytical assessment of the reliability indicators of aging WWS facilities. Water and ecology: problems and solutions, no. 3 (79), pp. 3-8. DOI: 10.23968 / 2305-3488.2019.24.3.3-8
7. Baranov, L.A. and Ermolin, Yu.A. (2017). Reliability of objects with non-stationary failure rate. Reliability, v. 17, № 4, pp. 3-9. 10.21683 / 1729-2646-2017-17-4-3-9. DOI: 10.21683 / 1729-2646-2017-17-4-3-9
8. Development of an algorithm for calculating the parameters of a structural material with vibration-protective properties MV Nazarova, S.Yu. Boyko, GS Shipilova Basic research. 2008. № . 1. p. 73-75.
9. Numerical modeling of the dynamics of the foundation of an existing building from a truck VV Antipov, VG Ofrikhter, A.B. Ponomarev, O.A. Shutova. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture. 2017.Vol. 8.№ . 4.p. 5-14.
10. Problems of Research of Vibration of Building Foundations Caused by Motor Transport Ponomarev AB, Shutova OA Natural and man-made risks. Safety of structures. 2020. № 3 (46). p. 26-28.
11. Vasenin V. A. Analysis of the process of development of long-term settlement of St. Petersburg building according to the results of monitoring observations / Proceedings of the international conference on geotechnics "Interaction of foundations and structures. Underground structures and retaining walls". – St. Petersburg: 2014, p. 8-27.
12. Ryabinin, I.A. Reliability and safety of complex systems / I.A. Ryabinin // St. Petersburg: Polytechnic, 2000, p. 248.
13. G.A. Pankova, M.N. Klementyev, Experience in operating sewer tunnels in St. Petersburg, Water supply and sanitary equipment, 2015, № 3, p. 55-61.
14. V.M. Vasiliev, G.A. Pankova, Yu.V. Stolbikhin, Destruction of Sewer Tunnels and Superstructures Due to Microbiological Corrosion, Water Supply and Sanitary Equipment, 2013. № . 9, p. 55-61.
15. N.A. Perminov, Integrated geotechnical and monitoring services for the construction of an underground structure in a metropolis, Proceedings of the International Geotechnical Conference, Almaty, 2004, p.361-366
16. Simulation of defectless lifecycle of unique underground structures of the sewage system at the stage of their construction in difficult soil conditions Perminov N.A. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2019. T. 15. № 1. p. 119-130.
17. Prokudin I.V. Prochnost' i deformativnost' zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna iz glinistyh gruntov, vosprinimayushchih vibrodinamicheskuyu nagruzku: Diss. d-ra.tekhn. nauk. L., S. 1983.p.- 455.

18. Pankova G.A., Klement'ev M.N. Опыт эксплуатации канализационных тоннелей в Санкт-Петербурге. S-Pb.: Vodosnabzhenie i sanitarnoe oborudovanie. 2015, № 3. p. 55-61.

19. Perminov N.A. Geotekhnicheskie aspekty obespecheniya bezopasnosti dlitel'no eksploatiruemykh ob"ektov inzhenernoj infrastruktury krupnykh gorodov v slozhnykh gruntovykh usloviyakh // Proceedings of the 15th Danube – European Conference on Geotechnical Engineering "Geotechnics of Roads and Railways". – Austria, Vienna: 2014.p. 1195-1201.

20. Akimov, V.A., V.L. Lapin, V.M. Popov, V.A. Puchkov, V.I. Tomakov, M.I. Faleev. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyj risk. – M.: ZAO FID «Delovoj ekspress», 2002. – p. 368.

21. Alekseeva L.A., Ukrainec V.N. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki tonnelej i truboprovodov melkogo zalozeniya. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. – Nizhnij Novgorod: Nacional'nyj issledovatel'skij Nizhegorodskij gosudarstvennyj universitet im. N.I. Lobachevskogo, 2011. № 45 p. 1954-1956.

22. Voznesenskij E.A. Dinamicheskaya neustojchivost' gruntov. M.: Editorial. 1999, p. 264.

23. Tsaesanifos S.P., Maneziaras P.M., Georgiu D. Soprotivlenie gornoj reakcii na tunnelirovanie NATM: tematiceskoe issledovanie. // Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma po geotekhnicheskim aspektam podzemnogo stroitel'stva v myagkom grunte. Red. Kusakabe, Fudzhitia i Miyadzaki. – YAponiya: 2000. Izdatel'stvo: Rotterdam, Bel'kema. p. 167-172.

24. Perminov N.A., Perminov A.N. Geotekhnicheskie aspekty obespecheniya bezopasnosti dlitel'no eksploatiruemykh ob"ektov inzhenernoj infrastruktury krupnykh gorodov v slozhnykh gruntovykh usloviyakh // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. 2014. № 4. p. 111–128.

25. Prokudin I.V. The results of laboratory studies of the strength characteristics of clay soils under dynamic loads // Computer use in the calculation and design of a railway track. Leningrad: Collection of Scientific Works of LIIZhT, 1974. Vol. 366 p. 60-66.

26. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya // Red. V. A. Il'icheva, R.A. Mangusheva, Ros. akad. arhitektury i stroit. nauk, Ros. o-vo po mekhanike gruntov, geotekhnike i fundamentostroeniyu. – M.: Izd-vo Associacii stroitel'nyh vuzov, – 2-e izd., dopolnennoe i pererabotannoe 2016. p. 1040.

27. Perminov N. A., Svitin V. V, Perminov A. N. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tunnel'nogo kollektora v usloviyakh sochetaniya tekhnogennykh vozdeystvij: Materialy VII Mezhdunarodnogo simpoziuma «Aktual'nye problemy komp'yuternogo modelirovaniya konstrukcij i sooruzhenij» APCSCCE. Novosibirsk. 1–8 iyulya 2018. p. 265–267.

28. Patent № 2630629, RF. IPC F16L 55/165, F16L 55/163, B29C 53/78. Method of repair of tunnel collectors and underground pipelines / Perminov N. A., Perminov A. N., Perminov A.N., Sergeenko N. Yu. // Inventions. Utility model. 2017. № 26.