

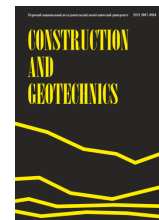


**пермский
политех**

CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 15, № 4, 2024

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



DOI: 10.15593/2224-9826/2024.4.05

УДК 624.154.5

МЕХАНИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ ЛИНЕЙНЫХ И ТОЧЕЧНЫХ ВОДОНЕСУЩИХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Н.А. Перминов

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

О СТАТЬЕ

Получена: 30 апреля 2024
Одобрена: 12 сентября 2024
Принята к публикации:
05 ноября 2024

Ключевые слова:

механическая безопасность, водонесущие подземные сооружения, грунтовый массив, внешние воздействия.

АННОТАЦИЯ

Целью исследования является решение проблемы обеспечения механической безопасности подземных сооружений системы водоотведения и повышения надежности их эксплуатации с учетом текущего технического состояния и спектра природно-техногенных внешних и внутренних воздействий. На основе анализа совместной работы линейных и точечных подземных сооружений в грунтовом массиве при сочетании воздействий различной природы необходимо выявить факторы влияющие на появление риска снижения их механической безопасности. При системном рассмотрении сооружения в целом, его сопряжений или части конструкций выявить дефекты и условия их проявления, которые могут повлечь разрушение или потерю устойчивости сооружения в целом, его сопряжений или части конструкций. По уровню напряженно-деформированного состояния локальных зон сопряжений и границ распространения по сооружению и вмещающему массиву грунта превышений предельно допустимых значений выделены проектные сценарии и ситуации, отвечающие в одном случае нарушению конструктивной безопасности сооружения в целом, в другом – конструкционной безопасности части конструкции (узла) сооружения. Выявлены причины и механизм появления дефектов сопряженных конструкций тоннелей и шахт, работающих в условиях нестационарных воздействий при транспортировании стоков. Предложена методика и алгоритм проведения совместных геотехнических и конструкторских расчетов, позволяющих моделировать процессы взаимодействия оболочки тоннеля с грунтовой средой и прогнозировать параметры их совместной работы, обеспечивающие работу сооружения и его частей в границах механической безопасности. По результатам моделирования взаимодействия определены предельные уровни напряженно-деформированного состояния как частей конструкций и локальных зон сопряжений, отвечающих соответственно за конструкционную и конструктивную безопасность, так и сооружения в целом – его механическую безопасность. Предложены геотехнические методы защиты и система мониторинга обеспечения механической безопасности пространственно и геометрически неоднородных подземных сооружений водоотведения.

© **Перминов Николай Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент, e-mail: perminov-n@mail.ru, Scopus: 56166386300, ORCID: 0000-0003-4894-9023.

Nikolay A. Perminov – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: perminov-n@mail.ru, Scopus: 56166386300, ORCID: 0000-0003-4894-9023.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

MECHANICAL SAFETY OF UNDERGROUND LINEAR AND POINT WATER-CARRYING STRUCTURES UNDER EXTERNAL INFLUENCES

N.A. Perminov

Saint Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I,
Saint Petersburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 30 April 2024
Approved: 12 September 2024
Accepted for publication:
05 November 2024

Keywords:

mechanical safety, water-bearing
underground structures, soil mass,
external influences.

ABSTRACT

The purpose of the study is to solve the problem of ensuring the mechanical safety of underground wastewater disposal facilities and increasing the reliability of their operation, taking into account the current technical condition and the range of natural and man-made external and internal influences. Based on the analysis of the joint work of linear and point underground structures in a ground mass with a combination of influences of various nature, to identify factors influencing the risk of reducing their mechanical safety. When systematically examining the structure as a whole, its interfaces or part of the structures, to identify defects and conditions of their manifestation, which may lead to destruction or loss of stability of the structure as a whole, its interfaces or part of the structures. According to the level of stress-strain state of local interface zones and the boundaries of the distribution of exceedances of maximum permissible values over the structure and the enclosing soil mass, design scenarios and situations are identified that correspond to a violation of the structural safety of the structure as a whole in one case, and in the other – the structural safety of a part of the structure (node) of the structure. The causes and mechanism of defects in coupled structures of tunnels and mines operating under conditions of non-stationary impacts during wastewater transportation have been identified. A methodology and algorithm for conducting joint geotechnical and design calculations are proposed that allow modeling the processes of interaction between the tunnel shell and the ground environment and predicting the parameters of their joint work, ensuring the operation of the structure and its parts within the boundaries of mechanical safety. Based on the results of interaction modeling, the limiting levels of the stress-strain state were determined, both for parts of structures and local interface zones responsible, respectively, for structural and structural safety, and for the structure as a whole - its mechanical safety. Geotechnical protection methods and a monitoring system for ensuring the mechanical safety of spatially and geometrically heterogeneous underground wastewater disposal facilities are proposed.

Введение

Геотехнические исследования, посвященные вопросам конструкционной безопасности подземных сооружений водоотведения в период их эксплуатации как наиболее длительному этапу от всего жизненного цикла объекта, в последние 10–15 лет считаются все более актуальными для отечественных и зарубежных ученых [1–4]. Это можно объяснить следующими основными причинами. Первая причина заключается в том, что возникла необходимость решения вопросов обеспечения продления надежности функционирования длительно эксплуатируемых (до 90 и более лет) подземных сооружений водоотведения. Обширные натурные обследования автора и других исследователей [5–8], проведенные в наиболее крупных городах РФ, имеющих тоннельную систему водоотведения, показали, что до 55–70 % физического объема подземных объектов системы водоотведения имеют текущее техническое состояние, соответствующее ограниченно работоспособному, а 12–17 % относятся к категориям неработоспособного или аварийного состояния. Вторую и третью причины можно рассматривать совместно и определить их как резко возрастающую интенсивность воздействия факторов природного и техногенного характера. Строительство в мегаполисах только жилищно-гражданских строений до 5–10 млн м² в год, сопровождающееся освоением подземного пространства, оказывает существенное влияние на изменение инженерно-геологических и гидрогеологических условий во вмещающем подземные ком-

муникации водоотведения геологическом массиве. При оценке изменения геотехнических условий эти явления имеют подчиненное значение. Отмеченные причины носят системный характер, и они достаточно полно и всесторонне изучены и продолжают исследоваться. Следует отметить, что большинство из выполненных экспериментально-теоретических исследований посвящены изучению взаимодействия локального пространственно-однородного подземного сооружения с грунтовым массивом с учетом статических или динамических воздействий [9–12]. Задачи этих исследований успешно решены и освещены в специальной литературе. Поэтому автор объектом исследования выбрал не отдельные локальные подземные объекты, а сопряженные в грунтовым массиве линейные (канализационные тоннели) и точечные (шахтные стволы, насосные станции) подземные сооружения водоотведения, а предметом исследования – их взаимодействие с вмещающим грунтовым массивом в условиях нестационарных природно-техногенных воздействий. Совместно работая в грунтовым массиве, сопряженные подземные водонесущие сооружения будут совершенно по-разному реагировать на изменение геотехнических условий и изменение режимов различного рода воздействий. Внешние статические и динамические силовые и внутренние воздействия среды в сочетании с гидродинамическими воздействиями транспортируемой жидкости вызывают различное напряженно-деформированное состояние (НДС) сопряженных элементов подземных водонесущих сооружений. В совокупности эти воздействия на сопряженные в неоднородной грунтовой среде водонесущие сооружения, взаимно влияя и накаливаясь друг на друга, приобретают сложный, неординарный характер. Ставится задача на основании полученных результатов моделирования разработать комплексный подход к выбору и обоснованию методов защиты сопряженных подземных объектов водоотведения, длительно эксплуатируемых в сложных грунтовых условиях с учетом различных режимов природно-техногенных воздействий. Показать необходимость первичной защиты от природных и техногенных воздействий сопряженных линейных (тоннелей) и точечных (шахт и насосных станций) сооружений как основы функционально связанных объектов системы водоотведения, обеспечивающих эксплуатационную надежность инженерной инфраструктуры крупных городов. На примере анализа работы сопряжений канализационных тоннелей и шахт в слабых грунтах при различных силовых и средовых воздействиях показать проявление эффекта бинарного воздействия и установить факторы, приводящие к нарушению конструкционной безопасности сооружения в целом. Проведенный анализ научных исследований автора [12], работ отечественных [13, 14] и зарубежных исследователей [15, 16] позволил выявить нерешенные проблемы в вопросах взаимодействия длительно эксплуатируемых в сложных грунтовых условиях сопряжений тоннельных коллекторов при возрастающих техногенных воздействиях в результате активно развивающейся инженерно-транспортной и градостроительной инфраструктуры города.

Известно [17], что для крупных городов длительно эксплуатируемые подземные сооружения системы водоотведения проектировались и строились при обеспечении надежности эксплуатации с учетом актуальных для того времени геотехнических условий. Но по прошествии более 80 лет их функционирования расширился спектр природно-техногенных внешних и внутренних воздействий, включая внештатные запроектные гидродинамические воздействия и экстремальные сочетания внешних статических и динамических воздействий. При однородности по режиму и интенсивности этих воздействий на отдельные фрагменты линейных и точечных подземных сооружений водоотведения и на участки сопряженных тоннельных коллекторов и шахт для последних уровень НДС локальных зон сопряжений, как правило, достигает пределов упругости и влияет на их конструкционную безопасность. Образование зон

концентрации напряжений и пластических деформаций сопровождается перераспределением напряжений, существенными изменениями геометрических форм конструкций сопряжений [18–20]. При повторяющихся экстремальных воздействиях нарушение конструкционной безопасности элементов узлов сопряжений вызывает накопление повреждений материалов конструкций, возникновение дефектов и развитие силовых трещин.

В работе приведены характерные расчетные примеры влияния сочетания экстремальных внешних статических и динамических воздействий на потерю конструкционной безопасности сопряжений канализационных тоннелей и шахт. Использование полученных результатов определило направления в области выбора и обоснования безопасных геотехнических условий функционирования подземных сооружений системы водоотведения с учетом расширяющегося спектра природно-техногенных внешних и внутренних воздействий.

Методика эксперимента и теоретические подходы

Для моделирования неординарного воздействия был принят реальный участок территории в г. Сочи, где проходит коллектор, сопряженный с шахтным стволом и характеризующийся по сейсмическим воздействиям восьмью баллами. При моделировании учитывалось, что кроме нестационарного сейсмического воздействия на сопряженную конструкцию оказывают вертикальное и горизонтальное давление массив грунта, собственный вес элементов конструкции и нагрузка от зданий, а также вибродинамическая нагрузка от транспорта.

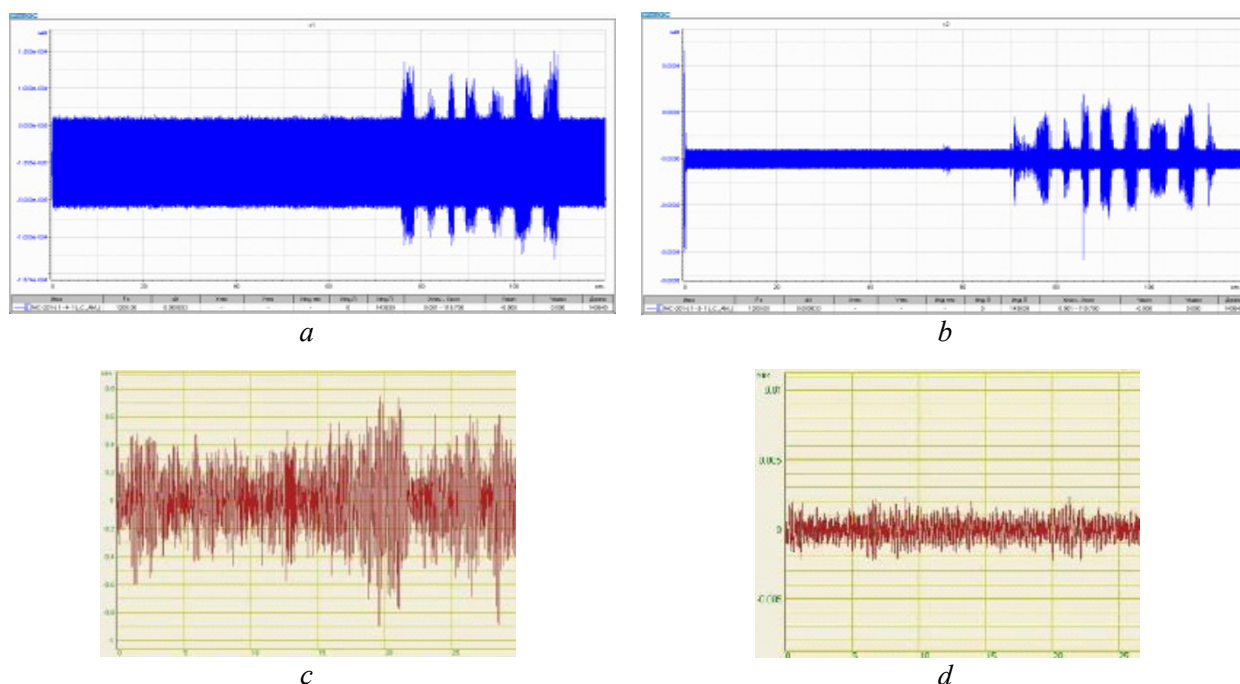


Рис. 1. Акселерограммы вибродинамических измерений: *a, c* – в зоне транспортного воздействия и свода; *b, d* – в зоне сопряжения конструкций до и после усиления узла сопряжения

Fig. 1. Accelerograms of vibrodynamics measurements: *a, c* – in the zone of transport impact and arch; *b, d* – in the zone of coupling of structures before and after strengthening of the conjugation node

Исследуемый участок коллектора расположен в зоне плотной сети магистралей с интенсивным транспортным потоком, создающим высокий уровень вибрации. Оценка вибродина-

мического воздействия от транспорта проводились на поверхности земли и одновременно внутри на конструкциях тоннеля (рис. 1) с помощью измерительно-вычислительного комплекса типа MIG и акселерометров MC-201 и комплектов датчиков СМ-3КВ, установленных внутри коллектора на боковой поверхности и в своде. Применение датчиков этого типа позволяет регистрировать колебания с амплитудой от 0,5 до 2000 мкм, с частотой от 2 до 200 Гц при погрешности не более 10 %. Датчики защищены от наводки внешнего поля, имеют температурный компенсатор, гидроизоляцию (для записи колебаний в воде), характеризуются минимальным взаимным влиянием (до 5 % ортогональных колебаний).

Взаимодействие тоннеля с грунтом определялось величиной коэффициента отпора грунта, в котором расположен тоннель. В данном расчете принята методика расчета коэффициента отпора, рекомендуемая пп. 6.13–6.16 СП 102.13330.2012 «Туннели гидротехнические»:

$$K = 100 \cdot K_o / r_e,$$

где K_o – коэффициент удельного отпора грунта, принимаемый по графику; r_e – наружный диаметр туннеля (рис. 2).

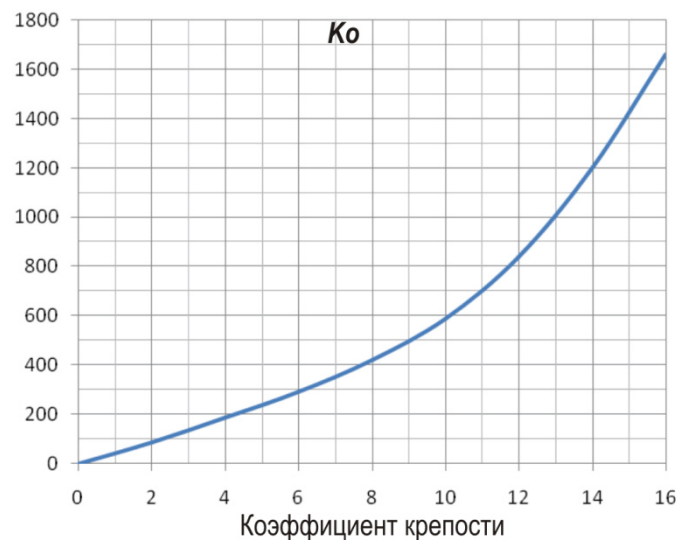


Рис. 2. Коэффициент удельного отпора грунта, вмещающего сопряжения
Fig. 2. Coefficient of specific resistance of the soil containing the interface

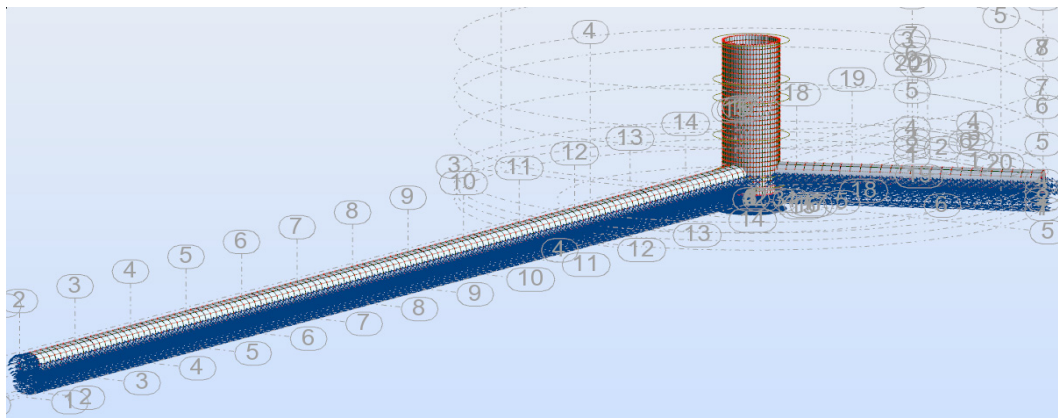


Рис. 3. Расчетные нагрузки и их сочетания. Схемы приложения нагрузок
Fig. 3. Design loads and their combinations. Load application schemes

В каждом узле сетки по поверхностям, взаимодействующим с грунтом, установлены упругие опоры в соответствии с расчетом. Неупругие опоры установлены по свободным торцам тоннелей вдоль их осей. Эти опоры моделируют влияние участков обделки, смежных с расчетными участками (рис. 3, рис. 4, *a–c*).

Характеристики объекта моделирования (тип конструкции): сопряжение пространственных горизонтальной (тоннель) и вертикальной (шахтный ствол) оболочек.

Описание конструкции:

- число узлов: 4108,
- число стержней: 0,
- стержневые конечные элементы: 0,
- плоские конечные элементы: 4126,
- объемные конечные элементы: 0,
- количество статических степеней свободы: 23203.

Нагрузки, м:

$$X = -34,139,$$

$$Y = -1,603,$$

$$Z = 1,930.$$

Центральные моменты инерции конструкции, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$:

$$I_x = 38454988,949,$$

$$I_y = 1638787543,894,$$

$$I_z = 1649160587,828.$$

$$\text{Масса} = 875584,483 \text{ кг}.$$

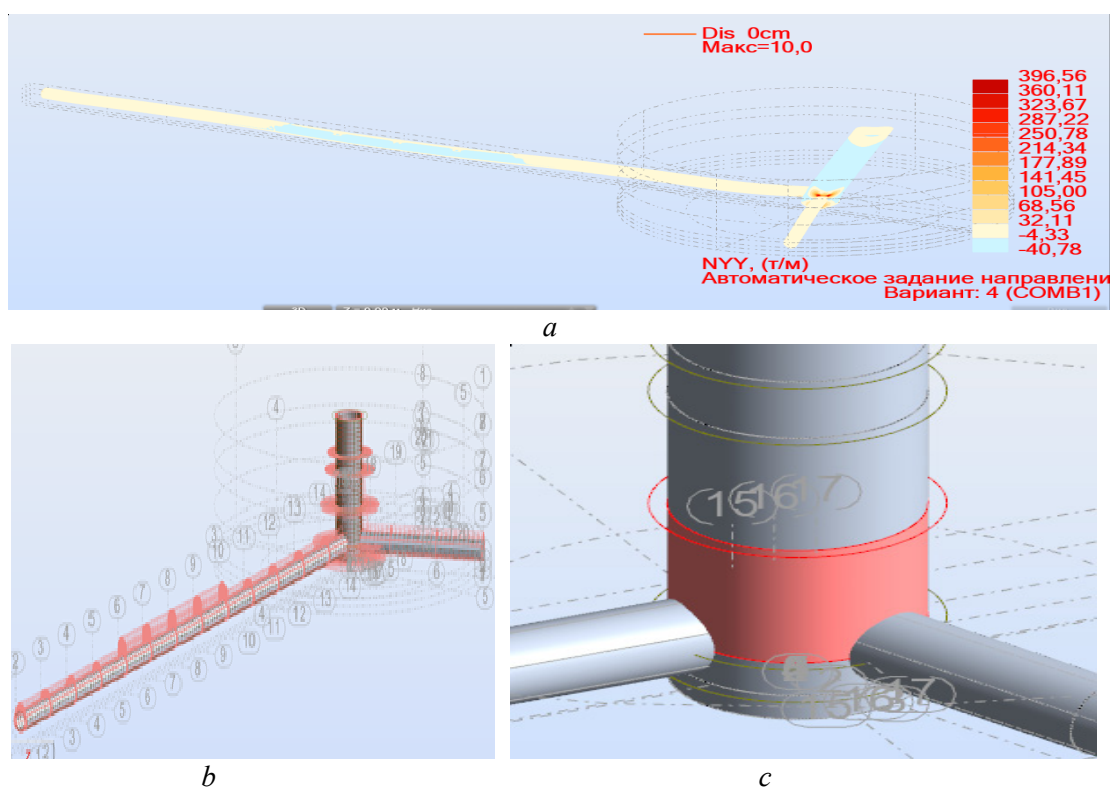


Рис. 4. Расчетные зоны узла сопряжения: *a, b* – зоны запредельных состояний;
c – расчетная схема узла усиления

Fig. 4. Design zones of the interface node: *a, b* – zones of extreme states;
c – design scheme of the amplification node

Результаты и обсуждение

По результатам моделирования установлено, что участки тоннеля и шахт за пределами зоны сопряжения при принятом сочетании и спектре внешних воздействий работают в условиях НДС, не превышающих предельно допустимых значений. Зона сопряжения воспринимает эффект бинарных воздействий от колебаний в системе «тоннель – шахта»: колебания ствола шахты при сейсмических воздействиях вызывают изгиб и кручение тоннельной обделки на стыке конструкций и на некотором расстоянии от него (рис. 4, а, б). Возникающие при этом растягивающие напряжения в бетоне зон сопряжений превышают предельно допустимые значения в несколько раз, что требует усиления конструкций [21, 22]. Предложено зону сопряжения на прилегающих участках усилить по расчету внешним структурным армированием углепластиком SikaWrap (рис. 4, с). По данным проведенного мониторинга установлено: вибродинамические испытания в зоне сопряжения тоннеля до и после ремонта показали уменьшение амплитуды собственных колебаний с $A = 600$ мкм до $A = 35,5$ мкм. Это свидетельствует (рис. 4, б, с) о восстановлении сплошности зон сопряжения конструкций и включении их в совместную работу [22, 23].

На рис. 5 представлены результаты моделирования гидродинамических параметров внутреннего воздействия стоков на конструкцию в зависимости от скорости нарастающего наполнения при разных эквивалентных диаметрах и длинах интервалов заужения.

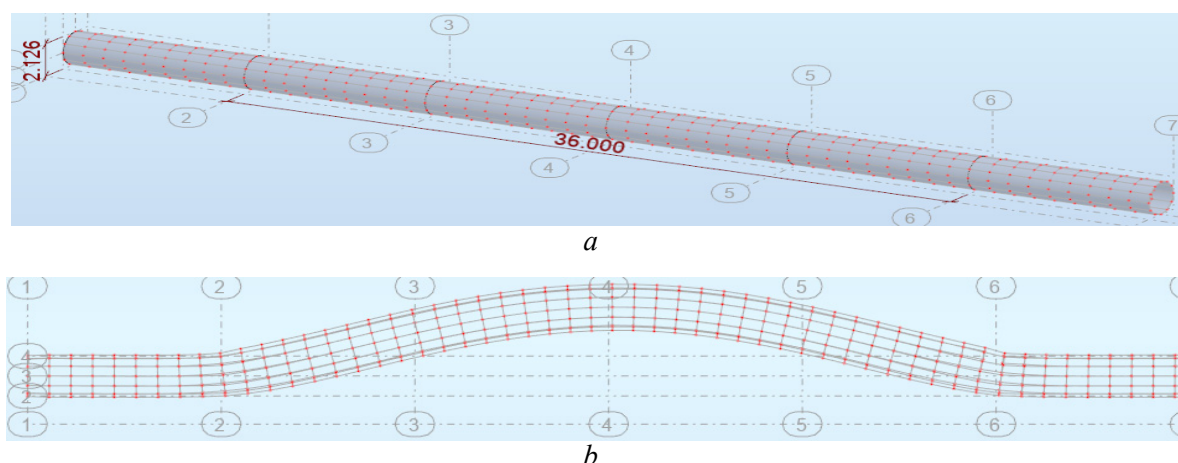


Рис. 5. Расчетные схемы: а – для анализа работы коллектора в обычном режиме;

б – с учетом геотехнического воздействия и гидростатики

Fig. 5. Calculation schemes: а – for analyzing the operation of the collector in normal mode;

б – taking into account geotechnical effects and hydrostatics

Расчеты производились для коллектора на участке заужения с глубиной заложения $H = 30$ м с учетом внутреннего гидростатического давления, составляющего $g = 30000$ кг/м² (рис. 6, а, б).

Результаты моделирования работы канализационных тоннелей и шахт в зонах сопряжений с учетом внешних воздействий (статические от сооружения с учетом динамических воздействий) показаны на рис. 7.

Предельно допустимые напряжения (по СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции») по растяжению (бетон В20 – внутренняя рубашка) $R_{bt,n} = 1,35$ МПа = $= 13,77$ кг/см²; бетон В30 – спинка тьюбинга $R_{bt,n} = 1,75$ МПа = $= 17,85$ кг/см².

Результаты КЭ Слой Средняя Автоматическое задание направления					
	sXX (кг/см ²)	sYY (кг/см ²)	sXY (кг/см ²)	UGY (мм)	UGZ (мм)
MAX	4,984	-0,416	2,046	1,081	0,001
Плита	8	31	17	25	31
Узел	77	1361	488	1126	1364
Напряжение	5 (C)	5 (C)	5 (C)	5 (C)	5 (C)
MIN	-11,024	-9,144	-3,379	-0,019	-0,128
Плита	29	19	29	2	29
Узел	357	357	357	61	128
Напряжение	5 (C)	5 (C)	5 (C)	5 (C)	5 (C)

a

Результаты КЭ Слой Нижняя Автоматическое задание направления					
	sXX (кг/см ²)	sYY (кг/см ²)	sXY (кг/см ²)	UGY (мм)	UGZ (мм)
MAX	102,658	67,501	28,173	0,112	0,113
Плита	7	19	31	3	17
Узел	37	357	145	103	520
Напряжение	6	6	5 (C)	6	6
MIN	-110,162	-43,901	-29,174	-12,797	-0,100
Плита	32	32	19	24	29
Узел	397	397	357	1114	152
Напряжение	6	6	6	6	5 (C)

b

Рис. 6. Результаты расчетного анализа: существующие экстремальные напряжения и перемещения конструкции обделки: *a* – работа коллектора в обычном режиме и *b* – с добавленным внутренним гидростатическим давлением воды
Fig. 6. Results of the computational analysis: the existing extreme stresses and displacements of the lining structure: *a* – collector operation in normal mode and *b* – with added internal hydrostatic water pressure

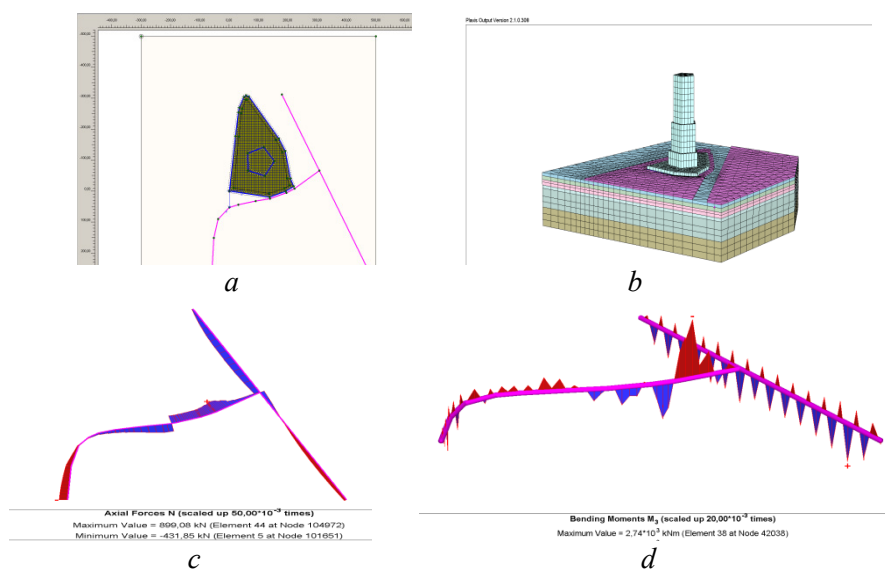


Рис. 7. Моделируемое сопряжение канализационных тоннелей: *a, b* – моделируемая геотехническая ситуация и расчетная модель; *c, d* – эпюры моментов в зонах сопряжений от внешних воздействий (статические от сооружения с учетом динамических воздействий)
Fig. 7. Simulated coupling of sewer tunnels: *a, b* – simulated geotechnical situation and calculation model; *c, d* – diagrams of moments in the interface zones from external influences (static from structures taking into account dynamic influences)

Анализ результатов расчетного моделирования показывает, что экстремальные значения растягивающих напряжений в условиях внешнего геотехнического воздействия без гидростатики ($\sigma_{xx} = 8,345 \text{ кг/см}^2$) находятся в пределах допустимых значений, т.е. меньше нормативных значений. Экстремальные значения растягивающих напряжений с гидростатикой ($\sigma_{xx} = 102,66 \text{ кг/см}^2 = 10,3 \text{ МПа}$) значительно превышают допустимые значения в тубингах и внутренней рубашке. Геометрическая нерегулярность сечений тоннельных коллекторов и, как следствие, непостоянство приведенной плотности и жесткости по длине участков сопряжений тоннелей и разнородность вмещающего массива грунта вызвали скачкообразный характер НДС по длине сопряженных тоннелей.

Результаты моделирования показали, что на границах участков тоннелей, расположенных в разнопрочных (в диапазоне от $E = 4 \text{ МПа}$ до $E = 19 \text{ МПа}$) вмещающих грунтах и

в сечениях, имеющих различные заужения ($K_3 = 0,21$, $K_3 = 0,85$) при совместном действии внешних (статических и динамических) нагрузок и внутренних гидростатических возникают скачки внутренних усилий. На эпюре осевых усилий Q_y и эпюре моментов M_x диапазон скачков изменяется как по величине, так и по знаку. Так, например, по Q_y в диапазоне от $-431,8$ (сжатие) до $+899,1$ кН (растяжение), а по M_x соответственно от $-4,33$ до $+2,74$ МНм. При этом на основе моделирования неординарных (экстремальных) случаев сочетания внешних и внутренних нагрузок и воздействий, когда расчетный прогноз покажет, что растягивающие напряжения в бетонной обделке тоннеля превышают предельно допустимые значения ($R_{bt} = 1,4$ МПа), необходимо расчетным путем определять выбор типа и параметры защитных или компенсирующих мероприятий.

В качестве примера определения границ обеспечения конструкционной безопасности зон сопряжений подземных водонесущих канализационных сооружений для случая нестационарного воздействия внешних и внутренних факторов на рис. 8 представлены результаты совместных геотехнических и гидродинамических расчетов.

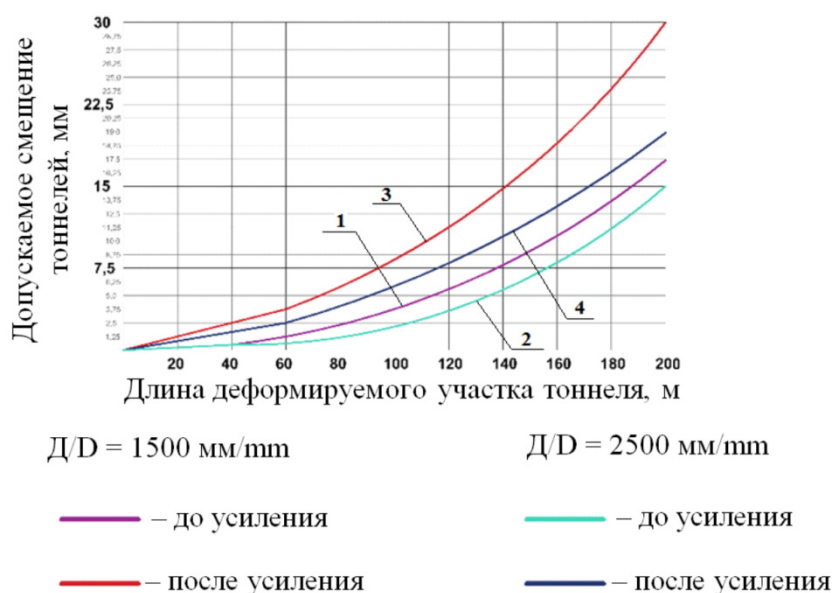


Рис. 8. Границы обеспечения конструкционной безопасности зон сопряжений подземных водонесущих канализационных сооружений (для слабых вибронеустойчивых грунтов):

кривые 1 и 3 для диаметров от 1500 до 2500 мм до применения мер защиты;

кривые 2 и 4 – после усиление узлов сопряжений

Fig. 8. The boundaries of ensuring structural safety of the interface zones of underground water-carrying sewerage facilities (for weak vibration-resistant soils):
 curves 1 and 3 for diameters from 1500 to 2500 mm before the application of protective measures; curves 2 and 4 – after the reinforcement of the coupling nodes

При моделировании работы и расчетном обосновании методов защиты сопряженных подземных сооружений водоотведения в условиях проявления нестационарного воздействия силовых и средовых факторов для выбора рациональных конструктивно-технологических параметров защитных мероприятий рассматривалась геотехническая модель, предусматривающая одновременно режимы работы сопряженных элементов в условиях совместного воздействия внешних природно-техногенных факторов и проявления внутреннего нестационарного гидростатического давления транспортируемой жидкости.

Выводы

Анализ работы водонесущих сооружений в сложных грунтовых условиях с учетом совместных природных и техногенных воздействий показал, что в особой защите нуждаются подземные сооружения водоотведения в зонах сопряжений. Образование зон концентрации напряжений вызывает накопление повреждений материалов конструкций, возникновение дефектов и развитие силовых трещин.

Анализ результатов моделирования и материалов проведенных натурных исследований позволил установить особенности работы и характер напряженно-деформированного состояния зон сопряжений тоннельных коллекторов и шахт при вибродинамических и сейсмических воздействиях и дать рекомендации по выбору границ предельно допустимых смещений сопряжений канализационных тоннелей для слабых вибронеустойчивых грунтов, обеспечивающих из механическую безопасность.

Определены предельные уровни напряженно-деформированного состояния как частей конструкций и локальных зон сопряжений, отвечающих соответственно за конструкционную и конструктивную безопасность, так и сооружения в целом – его механической безопасности, и предложены геотехнические методы их защиты.

***Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.*

***Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.*

***Вклад автора** 100 %.*

Библиографический список

1. Perminov, N.A. Modeling and monitoring of structural safety of long-operating underground structures of the sewage system (the experience of St. Petersburg) / N.A. Perminov, R.A. Mangushev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2022. – Vol. 18, № 3. – P. 95–113. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-3-95-113
2. Отведение и очистка сточных вод Санкт-Петербурга / под ред. Ф.В. Кармазина. – 2-е изд. – СПб., 2002. – 683 с.
3. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: АСВ, 2023. – 1084 с.
4. Федеральный закон. «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» 12.10.2009. №384-ФЗ (the updated version 2016).
5. Бондаренко, В.М. Развитие теории оценки и обеспечения конструктивной безопасности строительных объектов / В.М. Бондаренко, В.И. Травуш // Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли в 2011 г. Научные труды РААСН. – РААСН; Моск. гос. строит. ун-т. – М., 2012. – С. 25–30.
6. Золотозубов, Д.Г. Обеспечение конструкционной безопасности грунтовых оснований при возникновении провалов на карстовых территориях / Д.Г. Золотозубов, А.Б. Пономарев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2009. – № 15 (34). – С. 15–18.

7. Перминов, Н.А. Геотехнический аспект обеспечения безопасности объектов длительного пользования инженерной инфраструктуры крупных городов в сложных природных условиях / Н.А. Перминов // *Геотехника дорог и железных дорог*. – 2014. – С. 1195–1201.
8. Ержанов, Ж.С. Динамика тоннелей и подземных трубопроводов / Ж.С. Ержанов, Ш.М. Айталиев, Л.А. Алексеева // *Алма-Ата: Наука Казахской ССР*, 1989. – С. 240.
9. Пономарев, А.Б. Проблемы исследования вибрации фундаментов зданий, вызываемой движением автотранспорта / А.Б. Пономарев, О.А. Шутова // *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. – 2020. – № 3(46). – С. 26–28.
10. Алексеев, М.И. О специфике показателей надежности водоотводящих сетей / М.И. Алексеев, Ю.А. Ермолин // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2015. – № 1. – С. 41–50.
11. Вознесенский, Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов / Е.А. Вознесенский. – М.: Эдиториал, 1999. – С. 264.
12. Панкратова, К.В. Вибрационное поле Санкт-Петербурга / К.В. Панкратова // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2016. – № 4. – С. 211–216.
13. Variation in the Microstructure of Clay Soil during Deformation under Triaxial Compression with Consideration of the Occurrence of Deformation Instability / E.A. Voznesensky, A.N. Usov, M.S. Chernov, V.N. Sokolov // *Moscow University Geology Bulletin*. – 2018. – No. 1. – P. 83–86. DOI: 10.3103/S014587521801012X
14. Перминов, Н.А. Моделирование и мониторинг конструкционной безопасности уникальных подземных сооружений системы водоотведения крупных городов в сложных грунтовых условиях / Н.А. Перминов // *Construction and Geotechnics*. – 2021. – Т. 12, № 1. – С. 30–45. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.03
15. Алексеев, М.И. Приближенная аналитическая оценка показателей надежности стареющих объектов ВКХ / М.И. Алексеев, Л.А. Баранов, Ю.А. Ермолин // *Вода и экология: проблемы и решения*. – 2019. – № 3 (79). – С. 3–8.
16. Reliability, availability and maintainability analysis of the conveyor system in mechanized tunneling / S. Ahmadi, S. Moosazadeh, M. Hajihassani, H. Moomivand, M.M. Rajaei // *Meas J Int Meas Confed*. – 2019. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.06.009
17. Способ ремонта тоннельных коллекторов и подземных трубопроводов: Патент № 2630629, РФ. МПК F16L 55/165, F16L 55/163, B29C 53/78 / Перминов Н.А., Перминов Ан.Н., Перминов Ал.Н., Сергеев Н.Ю. // *Изобретения. Полезные модели*. – 2017. – № 26.
18. Wang, S. Risk assessment of collapse in mountain tunnels and software development / S. Wang, L. Li, S. Cheng // *Arab J Geosci*. – 2020. – No. 13. DOI: 10.1007/s12517-020-05520-6
19. Risk assessment of loess tunnel collapse during construction based on an attribute recognition model / Z. Xu, N. Cai, X. Li, M. Xian, T. Dong // *Bull Eng Geol Environ*. – 2021. DOI: 10.1007/s10064-021-02300-8
20. Haghshenas, S.S. Utilization of soft computing for risk assessment of a tunneling project using geological units / S.S. Haghshenas, M. Barmal, N. Farzan // *Civ Eng J*. – 2016. – P. 358–364.
21. Real-time risk assessment of tunneling-induced building damage considering polymorphic uncertainty / B.T. Cao, M. Obel, S. Freitag, L. Heußner, G. Meschke, P. Mark // *ASCE-ASME J Risk Uncertain Eng Syst Part A Civ Eng*. – 2022. DOI: 10.1061/ajrua6.0001192
22. Perminov, N. Simulation of defectless lifecycle of unique underground structures of the sewage system at the stage of their construction in difficult soil conditions / N. Perminov // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2019. – Vol. 15, no. 1. – P. 119–130. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-1-119-130

23. Salemi, A. Integration of finite difference method and genetic algorithm to seismic analysis of circular shallow tunnels (Case Study: Tabriz Urban Railway Tunnels) / A. Salemi, R. Mikaeil, S.S. Haghsheenas // *KSCE J Civ Eng.* – 2018. – P. 1978–90. DOI: 10.1007/s12205-017-2039-y

References

1. Perminov N.A., Mangushev R.A. Modeling and monitoring of structural safety of long-operating underground structures of the sewage system (the experience of St. Petersburg). *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2022. T. 18. № 3. S. 95-113. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-3-95-113
2. Wastewater disposal and treatment in St. Petersburg. Ed. F.V. Karmazinov. 2nd ed. Saint Petersburg, 2002, 683 p.
3. Directory geotechnics. Bases, foundations and underground structures. 3rd ed. Eds. V.A. Ilichev, R.A. Mangushev. Moscow, ASV, 2023, 1084 p.
4. Federal'nyy zakon «Tekhnicheskiy reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy» 12.10.2009. №384-FZ.
5. Bondarenko V.M., Travush V.I. *Fundamental researches of RAASN on scientific support of development of architecture, town-planning and construction industry in 2011. Scientific works of RAASN*. Moscow, RAASN, 2012, pp. 25-30.
6. Zolotozubov D.G., Ponomarev A.B. Ensuring structural safety of soil foundations in case of failures in karst territories. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2009, no. 15 (34), pp. 15-18.
7. Perminov N.A. Geotechnical aspect of ensuring safety of durable engineering infrastructure facilities of large cities in complex natural conditions. *Geotekhnika dorog i zheleznikh dorog*, 2014, pp. 1195-1201.
8. Yerzhanov Zh.S., Aytaliyev Sh.M., Alekseyeva L.A. Dynamics of tunnels and underground pipelines. Alma-Ata, Nauka Kazakhskoy SSR, 1989, 240 p.
9. Ponomarev A.B., O.A. Shutova. Problems of research of vibration of building foundations caused by vehicular traffic. *Prirodnyye i tekhnogennyye riski. Bezopasnost' sooruzheniy*, 2020, no. 3(46), pp. 26-28.
10. Alekseyev M.I., Yermolin Yu.A. On the specifics of reliability indicators of drainage networks. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika*, 2015, no. 1, pp. 41-50.
11. Voznesenskiy Ye.A. Dynamic instability of soils. Moscow, Editorial, 1999, 264 p.
12. Pankratova K.V. Vibration field of St. Petersburg. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, 2016, no. 4, pp. 211-216.
13. Voznesenskiy E.A., Usov A.N., Chernov M.S., Sokolov V.N. Variation in the micro-structure of clay soil during deformation under triaxial compression with consideration of the occurrence of deformation instability. *Moscow University Geology Bulletin*, 2018, no. 1, pp. 83-86. DOI: 10.3103/S014587521801012X.
14. Perminov N.A. Modelling and monitoring of structural safety of unique underground structures of the sewage system of large cities in difficult ground conditions. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 1, pp. 30-45. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.03.
15. Alekseyev M.I., Baranov L.A., Yermolin Yu.A. Priblizhennaya analiticheskaya otsenka pokazateley nadezhnosti stareyushchikh ob'yektov VKKH. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*, 2019, no. 3 (79), pp. 3-8.

16. Ahmadi S., Moosazadeh S., Hajihassani M., Moomivand H., Rajaei M.M. Reliability, availability and maintainability analysis of the conveyor system in mechanized tunneling. *Meas J Int Meas Confed*, 2019, DOI: 10.1016/j.measurement.2019.06.009.
17. Perminov N.A., Perminov A.N., Perminov A.N., Sergeyenko N.Yu. Method of repair of tunnel collectors and underground pipelines. Patent Rossiiskaia Federatsiia 2630629 (2017).
18. Wang S., Li L., Cheng S. Risk assessment of collapse in mountain tunnels and software development. *Arab J Geosci*, 2020, no. 13. DOI: 10.1007/s12517-020-05520-6.
19. Xu Z., Cai N., Li X., Xian M., Dong T. Risk assessment of loess tunnel collapse during construction based on an attribute recognition model. *Bull Eng Geol Environ*, 2021, DOI: 10.1007/s10064-021-02300-8.
20. Haghshenas S.S., Barmal M., Farzan N. Utilization of soft computing for risk assessment of a tunneling project using geological units. *Civ Eng J*, 2016, pp. 358–64.
21. Cao B.T., Obel M., Freitag S., Heußner L., Meschke G., Mark P. Real-time risk assessment of tunneling-induced building damage considering polymorphic uncertainty. *ASCE-ASME J Risk Uncertain Eng Syst Part A Civ Eng*, 2022, DOI: 10.1061/ajrua6.0001192.
22. Perminov N. 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, no. 1, pp. 119-130. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-1-119-130.
23. Salemi A., Mikaeil R., Haghshenas S.S. Integration of finite difference method and genetic algorithm to seismic analysis of circular Shallow Tunnels (Case Stud: Tabriz Urban Railway Tunnels). *KSCE J Civ Eng*, 2018, pp. 1978–90. DOI: 10.1007/s12205-017-2039-y.