

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБДЕЛКИ ТРАВЛАТОРНОГО ТОННЕЛЯ МЕТРОПОЛИТЕНА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

М. О. Лебедев¹, Е. В. Степуков¹, Р. И. Ларионов¹

¹ Открытое акционерное общество «научно-исследовательский проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, 191002, Россия

Аннотация: Для обеспечения доступа ко второму выходу со станции метро «Спортивная» Санкт-Петербургского метрополитена был построен траволаторный (переходной) тоннель между станцией и эскалаторным тоннелем с вестибюлем. В качестве основной несущей конструкции принята обделка из железобетонных блоков, наружный диаметр обделки – 7,9 м, внутренний – 7,2 м. Со стороны станционного комплекса переходной коридор располагается в зоне влияния нескольких перегонных тоннелей, по трассе пересекает забученную выработку. В таких условиях возникает ряд сложных задач, среди которых расчетное определение напряженно-деформированного состояния обделки тоннеля, представленной ребристыми тубингами из железобетона. Для определения фактических усилий в обделке переходного коридора при различных геометрических условиях взаимного расположения с существующими тоннелями были выполнены натурные исследования. Получены закономерности формирования напряженного состояния обделки на всех этапах строительства и в течение 5 лет эксплуатации. Полученные результаты фактического напряженно-деформированного состояния обделки тоннеля явились основой для верификации разработанных расчетных схем для численного моделирования МКЭ. Расчеты выполнены для трёхмерной конечно-элементной математической модели в расчетном комплексе Plaxis 3D. Сопоставление результатов расчетов с данными натурных исследований позволили получить следующий основной вывод: 23 года, прошедшие после сооружения существующих тоннелей, оказывают не большее влияние на формирование напряженно-деформированного состояния обделки траволаторного тоннеля, чем технологические факторы его строительства.

Ключевые слова: транспортные тоннели, взаимное влияние, технология строительства, мониторинг, усилия в обделке, методы расчета, численное моделирование, датчики, длительные исследования.

Для цитирования: Лебедев М. О., Степуков Е. В., Ларионов Р. И. Напряженно-деформированное состояние обделки траволаторного тоннеля метрополитена при строительстве и эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–2. – С. 98–114. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_98.

Stress-and-strain statement of the travolator metro tunnel lining in course of construction and operation

M. O. Lebedev¹, E. V. Stepukov¹, R. I. Larionov¹

¹ Open joint stock company scientific, research, design and surveying institute «Lenmetrogioprotrans», Saint-Petersburg, 191002, Russia

Abstract: A travolator (transitional) tunnel between the station and the escalator tunnel with a lobby was built to provide the access to the second exit from the “Sportivnaya” metro station of the St. Petersburg metro. As the main supporting structure, a lining of reinforced concrete blocks was adopted. The outer diameter of the lining is 7.9 m and the inner diameter is 7.2 m. From the side of the station complex the transitional tunnel is located in the zone of influence of several tunnels, which were built earlier. Moreover, it crosses a backfilled tunnel along the route. In such conditions a number of complex problems arise, including the calculation of the stress-and-strain state of the tunnel lining, represented by ribbed reinforced concrete tubings. In order to determine the actual strength in the lining of the transition tunnel under various geometric conditions of mutual arrangement with existing tunnels, field studies were performed. Regularities of the stress-and-strain state formation of the lining at all stages of construction and during 5 years of operation were obtained. The obtained results of the actual stress-and-strain state of the tunnel lining were the basis for the verification of the design models for the FEM numerical simulation. The calculations were performed for a three-dimensional finite element mathematical model in the Plaxis 3D computational complex. Comparison of the calculation results with the data of field studies made it possible to obtain the following main conclusion: 23 years that have passed since the construction of the existing tunnels have no more influence on the formation of the stress-and-strain state of the travolator tunnel lining than the technological factors of their construction.

Key words: transport tunnel, structure interaction, construction technology, monitoring, strength in the lining, computational method, numerical simulation, sensors, long-term research.

For citation: Lebedev M. O., Stepukov E. V., Larionov R. I. Stress-and-strain statement of the travolator metro tunnel lining in course of construction and operation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6–2):98–114. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_98.

Введение

При строительстве таких подземных сооружений, как объекты метрополитена, крайне редко получается рассматривать отдельную выработку как одиночную. В большинстве случаев строительство ведется в условиях взаимного влияния с другими подземными сооружениями. При проектировании сложной задачей является обоснованный и достоверный выбор метода расчета подземных сооружений для определения усилий в обделках взаимовлияющих тоннелей. Еще более сложной задачей является определение усилий в тоннельных обделках, когда новый объект строится через большой промежуток времени после сооружения существующих тоннелей, поскольку процессы консолидации грунтов весьма продолжительны и оценить измененное состояние вмещающего массива, в котором предстоит строительство, очень сложно.

Для изучения воздействия проходки на существующие тоннели и наоборот, влияние существующих тоннелей на строящийся объект, используются различные подходы. Такие как, например, физическое моделирование, полевые (натурные) исследования, численный анализ, эмпирические и аналитические методы.

Во многих исследованиях рассматриваются взаимодействия между существующим тоннелем и новым возводимым тоннелем путём разработки физических моделей, включая физическое моделирование близко расположенных тоннелей в глине. В работе [1] авторы провели серию испытаний физической модели, включающей близкие параллельные тоннели и перпендикулярные тоннели, для изучения влияния проходки близлежащих тоннелей в глине. Результат испытаний параллельных тоннелей показал, что

существующий тоннель находился преимущественно под влиянием перераспределения напряжений в грунтовом массиве, вызванного выемкой грунта при проходке. В исследовании поведения грунтового массива при подработке существующего тоннеля новым, идущим перпендикулярно существующему [2], были проведены крупномасштабные испытания на физических моделях для изучения поведения грунта во время строительства нового тоннельного перехода под существующим тоннелем. Результаты испытаний показали, что эффект продольного изгиба в значительной степени способствовал перераспределению давления на грунт и осадке грунта в пересеченной зоне при проходке нижнего тоннеля. В работе [3] выполнен ряд тестов физической модели для исследования влияния различных факторов, таких как размер существующего тоннеля, расстояние между центрами двух тоннелей и коэффициент бокового давления грунта, на механическое поведение существующего тоннеля и нового путем количественной оценки смещения и распространения трещин во время проходки нового тоннеля. В результате испытаний получено, что вызванные смещения уменьшаются и стабилизируются по мере увеличения расстояния между центрами тоннелей в зависимости от размера существующего тоннеля. Также тема физического моделирования была рассмотрена в работе [4]. В этой работе приводятся наблюдения за деформациями в существующих тоннелях, вызванными строительством смежных и поперечных выработок. В работе [5] описаны результаты измерений деформаций внутреннего контура существующих тоннелей с чугунной обделкой и выработки, созданной по технологии NATM, вблизи станции метро “Tower

Bridge” в Лондоне во время проходки нового тоннеля под ними. В работе [6] описаны и проанализированы осадки, кручение и искривление в существующих тоннелях Bakerloo и Северной линии в Лондоне, а также район и тоннели кольцевой линии в Вестминстере во время строительства Юбилейного тоннеля и расширения линии под ними. В работе [7] сообщается о результатах краткосрочного и долгосрочного наблюдения за смещениями внутреннего контура существующих тоннелей и деформациями дневной поверхности линии Piccadilly в Лондоне во время строительства трех тоннелей станции “Blow”. Асимметричные деформации существующих тоннелей были вызваны проходкой боковых станционных тоннелей и строительством центрального тоннеля вестибюля. В работе [8] приводятся данные о деформациях старого тоннеля с каменной обделкой из-за строительства нового тоннеля ниже на «Кингс-Кросс» в Лондоне, измеренных с использованием новой оптоволоконной системы измерения пространственного положения внутреннего контура в продольном и поперечном направлениях. Данные мониторинга показали, что, возможно, произошло растрескивание обделки. Поведение при изгибе вдоль продольной оси тоннеля было изучено во время строительства новых нижележащих тоннелей [9]. Измерение вертикальных оседаний в существующих параллельных тоннелях, связанных с проходкой двух новых тоннелей в перпендикулярном направлении, показали деформации до 7 мм.

Моделирование геотехнических процессов, происходящих в грунтовом массиве во время строительства тоннелей с определением деформаций дневной поверхности, выполнялось и аналитическими методами [10 — 13]. Также были разработаны методы прогнозиро-

вания внутренних усилий в обделках тоннелей [14 — 18]. Хотя эти методы все еще применяются в нескольких международных стандартах и нормативах по проектированию, они имеют ряд ограничений, поскольку включают различные упрощения. В результате трудно или даже невозможно воспроизвести реальную картину геомеханических процессов, в частности, сложные условия строительства, которые часто возникают в проектах (взаимодействие с существующей системой подземных сооружений, имеющих сложную пространственную ориентацию).

С быстрым развитием компьютерных технологий численное моделирование с использованием конечных элементов находит широкое применение по всему миру для исследования взаимодействия между существующими и строящимися тоннелями. В работе [19] проведена серия численных расчетов методом конечных элементов в плоской постановке для изучения влияния различного взаимного расположения тоннелей и последовательности строительства на существующий тоннель. В работах [20 — 27] сообщается о результатах численного моделирования методом конечных элементов в объемной постановке для рассмотрения множественных взаимодействий между большими параллельными двойными тоннелями, построенными в жесткой глине с использованием как новоавстрийского метода, так и метода щитовой проходки.

В отечественной практике разработаны аналитические методы расчета [28 — 29] различных видов воздействий для круговых и некруговых тоннелей, в основу которых положены строгие аналитические решения соответствующих плоских задач теории упругости, и реализованы в виде алгоритмов и компьютерных программ, позволяю-

щих выполнять многовариантные расчеты обделок подземных сооружений в научных и практических целях.

Результаты расчета, особенно получаемые с использованием сложных моделей в численных методах [30], практически всегда нуждаются в проверке. Однако не всегда можно корректно выполнить расчет другими методами из-за ограничения их возможностей. Поэтому в таких условиях единственной возможностью проверить результаты расчета являются результаты натурных исследований [31], о чем говорят многие исследователи.

Так, например, А. Томас в работе [32] отмечает, что метод конечных элементов позволяет выявить слабые места принимаемых проектных решений, однако достоверность полученных результатов обязательно должна быть подтверждена с помощью аналитических методов расчета и натурных наблюдений.

Результаты натурных исследований, выполненные для взаимовлияющих выработок станционного комплекса «Проспект Славы» [33], показали значительную разницу в качественном изменении НДС боковых станционных тоннелей по сравнению с результатами численного моделирования [34]. По результатам натурных исследований изменение напряжений составляло до 40% от первоначальных величин, а численное моделирование для аналогичного объекта показало изменение в 2 и более раза.

Обзор проведенных исследований для тоннелей, расположенных в зоне взаимного влияния, показывает, что они имеют либо только теоретический характер, либо определяют только деформации и смещения для тоннелей и поверхности земли для случаев, когда новые тоннели проходятся ниже существующих тоннелей во взаимно

перпендикулярном направлении или параллельно существующим.

Исследования, направленные на определение фактических усилий в обделках взаимовлияющих тоннелей, остаются актуальными, поскольку позволят обоснованно подходить к выбору методов расчета обделки на действующие внешние нагрузки.

Объект исследований

Траволаторный тоннель (переходной коридор), соединяющий нижний зал станции «Спортивная» с эскалаторным тоннелем второго вестибюля станции (рис. 1), расположен в прочных протерозойских аргиллитоподобных глинах. Проходка тоннеля осуществлялась в 2013–2014 гг.

Траволаторный тоннель сооружался эректором способом с разработкой забоя вручную — отбойными молотками. В качестве основной несущей конструкции принята обделка из железобетонных тубингов, наружным диаметром обделки — 7,9 м, внутренним — 7,2 м. Тубинги обделки изготовлены из бетона класса В45. Монтаж колец обделки выполнялся с укладчика ТУ-2ГП (КП21). В процессе разработки грунта кровля забоя крепилась всплошную марчеванами, лоб забоя — рас-

стрелами из труб и досками вразбежку. Первичное нагнетание цементно-песчаного раствора выполнялось за каждое установленное кольцо, контрольное (цементным раствором) — с отставанием не более 30 м.

Траволаторный тоннель располагается в прочных протерозойских аргиллитоподобных глинах (ИГЭ 14/2, табл. 1) — глины легкие пылеватые тонкослоистые, реже — толстослоистые и массивные, с прослоями алевролита (доли см) и песчаника мергелистого (1–5 см).

Шельга свода переходного коридора располагается на глубинах 38,5 — 40,5 м от уровня дна реки Малая Нева, при этом толщина прочных глин над тоннелем составляет 20 — 24 метра.

Методика исследований

Напряжённо-деформированное состояние массива и обделки тоннеля оценивается по нормальным тангенциальным напряжениям в тубингах обделки. По длине переходного коридора датчиками оснащены три опытных участка. Каждый опытный участок состоит из трех следом идущих колец, включающих в себя тубинги, в которых были размещены струнные деформометры (рис. 2). Датчики для опре-

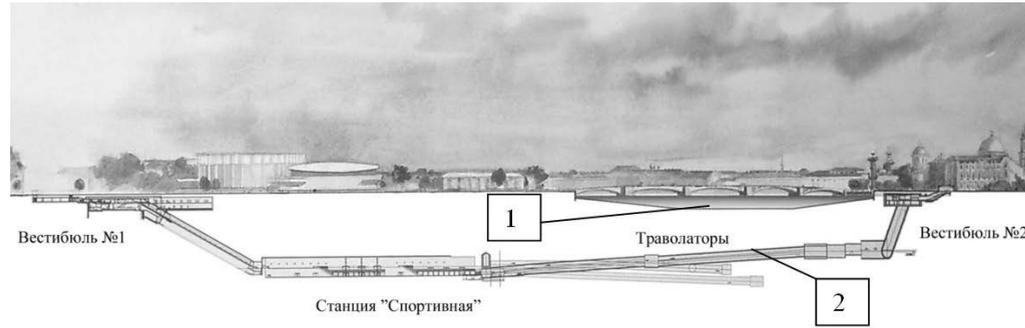


Рис. 1. Схема устройства второго выхода со станции метро «Спортивная»: 1 — река Нева; 2 — траволаторный тоннель

Fig. 1 Layout of the second exit from the metro station “Sportivnaya”: 1 — Neva river; 2 — travolator tunnel

Таблица 1
Нормативные и расчетные значения физико-механических свойств грунтов
Normative and calculated values of physical and mechanical properties of soils

Стратиграфический индекс	ИГЭ	Номенклатура грунта	Влажность W, %	Показатель текучести I_p/C_u	Коэффициент пористости e	Плотность $\rho, \text{г/см}^3$		Угол внутреннего трения $\varphi, \text{град.}$		Сцепление $c, \text{МПа} \cdot 10^{-3}$		Модуль общей деформации $E_{or}, \text{МПа}$
						норм.	I	норм.	I	норм.	I	
Igll lvd	6/15	Глина пылеватая ленточная, текучепластичная и текучая	41	1,03/ 0,53	1,14	1,81± 0,09	1,81	норм.	4	9	6	5
glll' zvd	7/7	Супесь пылеватая, с гравием и галькой, пластичная	14,5	0,36/ 0,16	0,40	2,20± 0,11	2,20	норм.	5	24	16	11
lg,fl -III	8/11	Суглинок пылеватый, полутвердый	19	0,19/ 0,01	0,53	2,11± 0,11	2,11	норм.	4	22	23	12
gll ms	9/7	Супесь пылеватая, с гравием, галькой и валунами, твердая	12	-0,20/-	0,34	2,25± 0,11	2,25	норм.	4	24	42	20
Vkt -Q	12/1	Глина переотложенная, полутвердая и твердая	19	-0,10/-	0,60	2,04± 0,10	2,04	норм.	10	50	34	25
Vkt 22	14/1	Глина с переметой слоистой, твердая	19	-0,34/-	0,56	2,09± 0,10	2,09	норм.	17	70	47	100
Vkt 22	14/2	Глина пылеватая тонкослоистая, твердая	17	-0,42/-	0,50	2,15± 0,11	2,15	норм.	19	16	12	150

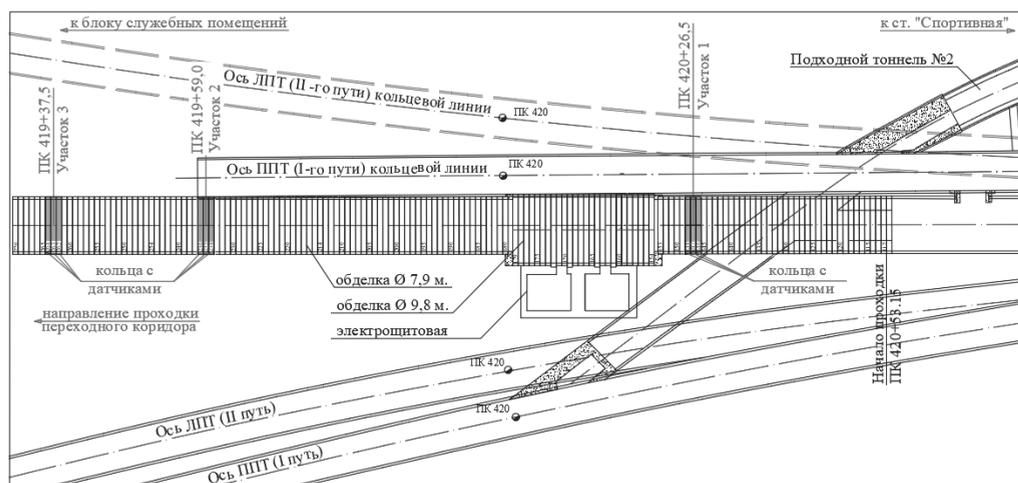


Рис. 2. Размещение опытных участков в переходном коридоре
Fig. 2. Layout of the experimental plots in the transition corridor

деления нормальных тангенциальных напряжений располагаются на внешнем и внутреннем контуре (рис. 3, а). Датчики для определения нормальных тангенциальных напряжений располагаются на внешнем и внутреннем контуре — один в спинке, а второй в ребре.

Выполнение измерений по датчикам начинается сразу после установки кольца в проектное положение. Затем измерения выполняются на каждом

этапе ввода кольца в работу с массивом, начиная с заполнения заобделочного пространства, но не реже одного раза в три дня, с последующим уменьшением частоты измерений по мере стабилизации напряженно-деформированного состояния обделки.

Опытные участки по длине переходного коридора были размещены при различных геометрических условиях взаимного расположения с существующими

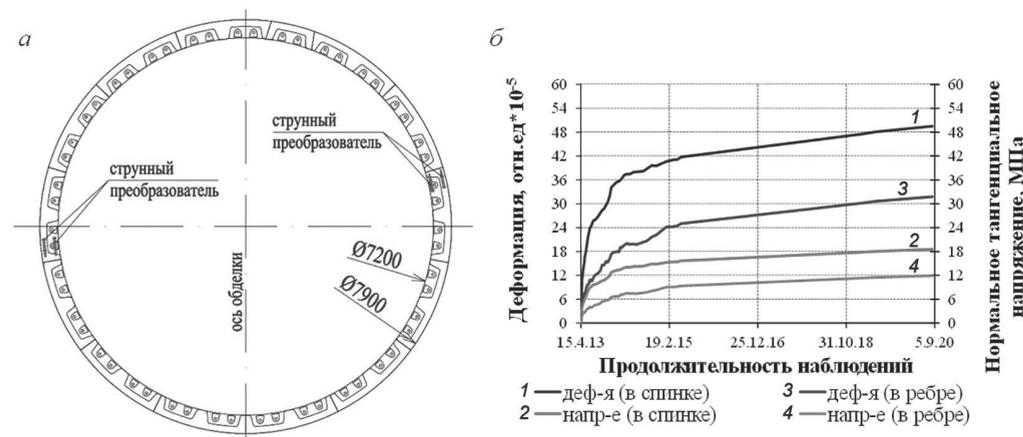


Рис. 3. Схема размещения датчиков в обделке переходного коридора (а) и характерный график формирования усилий в обделке при строительстве (б)
Fig. 3. a — Layout of the string sensors in the lining of the transition corridor; b — a graph of the stress formation in the lining during the construction

тоннелями, при этом во всех случаях переходной коридор расположен выше существующих тоннелей.

Опытный участок № 3 располагается далеко от существующих выработок, поэтому он рассматривается как одиночный. Опытные участки № 2 и № 1 (рис. 4) располагаются в зоне влияния существующих перегонных тоннелей диаметром 5,64 м, причем на опытном участке № 2 ближний перегонный тоннель представлен тупиковой камерой в обделке диаметром 7,9 м. Существующие выработки были построены в 1992 году.

Опытный участок № 1 расположен в зоне влияния ранее построенных перегонных тоннелей Кольцевой линии и Приморского радиуса. В районе опытного участка трассу переходного коридора ранее пересекал подходной тоннель, который в месте пересечения с переходным коридором был забутован тощим бетоном еще при строительстве перегонных тоннелей.

Результаты натурных исследований напряженно-деформированного состояния обделки

На рис. 3, б показаны характерные для всех опытных участков кривые развития относительных деформаций бетона и нормальных тангенциальных напряжений (график приведен для первого опытного участка). Анализ формирования напряженно-деформированного состояния обделки переходного коридора показал, что 60% усилий в обделке реализуется в течение двух месяцев после возведения обделки, затем приращение снижается. Перед началом эксплуатации напряженно-деформированное состояние обделки переходного коридора стабилизируется. Даже в условиях взаимного влияния с другими подземными сооружениями (в отдельных случаях) по всем опытным участкам напряжения на внешнем и внутреннем контуре являются сжимающими (табл. 2, измеренные

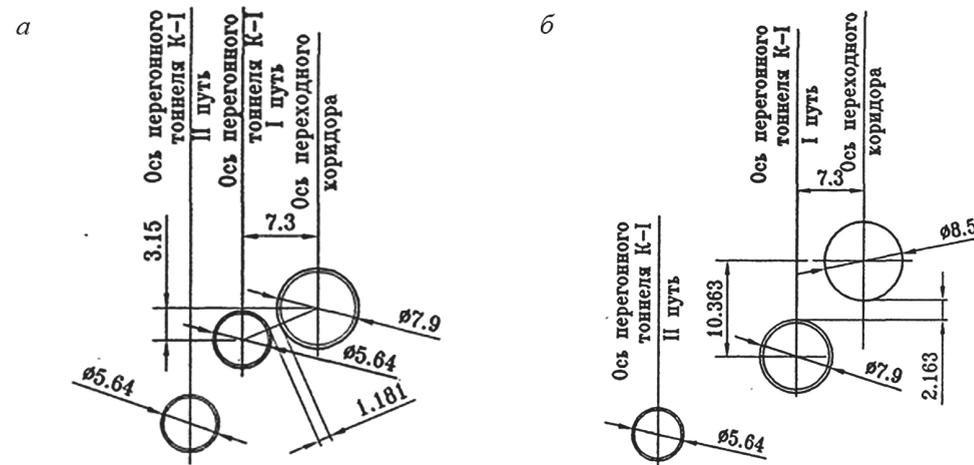


Рис. 4. Расположение опытных участков в траволаторном тоннеле относительно существующих выработок (взгляд в сторону станции): а — опытный участок № 1; б — опытный участок № 2
Fig. 4. Layout of the experimental plots in the travolator tunnel (view towards the station): a — experimental plot № 1; b — experimental plot № 2

Таблица 2

Фактические и расчетные напряжения в тубинговой обделке
Actual and calculated stresses in the tubing lining

№ участка	сторона	Место установки	Измеренное напряжение (при строительстве), МПа	Измеренное напряжение (при эксплуатации), МПа	Расчетные напряжения, МПа
1	Левая	Спинка	10,6	16,5	7
		Ребро	9,4	12,3	10
	Правая	Спинка	9,0	13,5	7
		Ребро	13,7	14,7	10
2	Левая	Спинка	14,1	15,8	10
		Ребро	10,7	15,5	13
	Правая	Спинка	11,3	16,4	10
		Ребро	7,0	13,3	13
3	Левая	Спинка	9,1	12,0	7
		Ребро	10,2	15,8	10
	Правая	Спинка	8,2	12,1	7
		Ребро	11,8	16,7	10

напряжения приведены усредненными по трем кольцам), что свидетельствует о наличии контакта обделки с массивом по всему периметру.

По опытным участкам отмечается неравномерность загрузки тубингов обделки с правой и с левой стороны. Напряжения в обделке с разных сторон относительно оси тоннеля отличаются в 1,2–2,2 раза. Такая разница в первую очередь заставляет думать о влиянии существующих выработок. Но более детальный анализ распределения напряжений вносит большие сомнения на этот счет. Так, на участках 1 и 3 максимальные напряжения возникают в тубингах обделки с правой стороны тоннеля, а на участке № 2 — с левой стороны. Усредненные величины напряжений по опытным участкам несильно отличаются друг от друга.

Еще большую сложность в анализе происходящих процессов в системе «обделка — вмещающий массив» вносит изменение напряженно-деформированного состояния обделки при эксплу-

атации тоннеля. На рис. 5 приведены характерные кривые развития относительных деформаций бетона и нормальных тангенциальных напряжений при эксплуатации (показаны для того же блока, что и на рис. 3, б). По всем опытным участкам происходит увеличение напряженного состояния, при этом большие величины приращений происходят в первый год эксплуатации, с последующим уменьшением приращений. Для всех опытных участков при увеличении напряженного состояния еще отмечается и выравнивание усилий в обделке относительно оси тоннеля.

Численный расчет обделки

Для расчёта напряженно-деформированного состояния обделки тратоватоннельного тоннеля были построены упрощенные трёхмерные конечно-элементные математические модели в расчетном комплексе Plaxis 3D (рис. 6, а) для трех опытных участков. Расчетная модель включает в себя как сам трато-

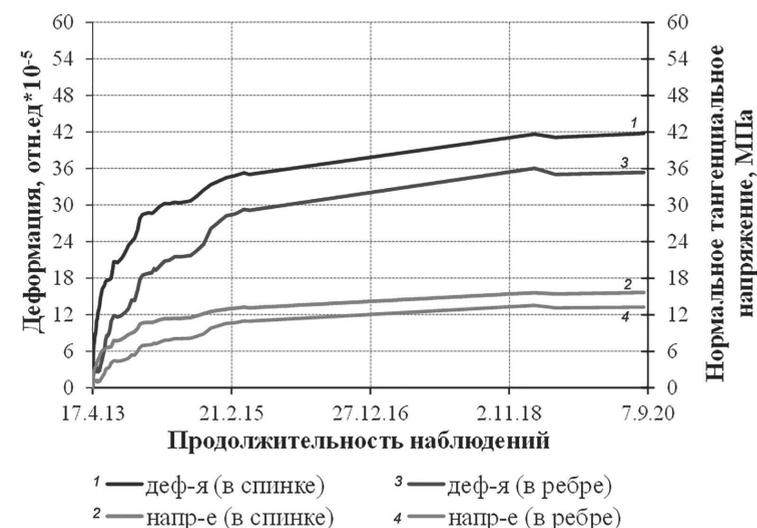


Рис. 5. Характерный график формирования усилий в обделке при эксплуатации
 Fig. 5. A graph of the stress formation in the lining during the exploitation

латорный тоннель, так и окружающие его перегонные тоннели. Для опытного участка № 3 тоннель рассматривался как одиночный.

Вмещающий массив грунта задавался моделью деформирования Hardeningsoilsmallstrain.

Обделка моделировалась детально, объемными элементами (рис. 6, б). В ней были учтены спинка, продольные и поперечные ребра. Моделирование болтовых соединений не производилось из-за особенностей расчетного комплекса.

На каждый из трех опытных участков был выполнен расчет в объемной постановке.

При моделировании учитывалась общая последовательность сооружения тоннелей и технология строительства переходного коридора. Нагнетание в заобделочное пространство моделировалось путем создания небольшого зазора между обделкой и породным контуром. По поверхности породного контура прикладывалась распределенная нагрузка, равная давлению нагнетания. На следующем этапе расчета нагрузка

отключалась, а пространству между обделкой и породным контуром присваивались свойства тампонажного раствора.

Результаты расчета напряжений в обделке представлены на рис. 7 и в табл. 2.

В результате расчётов получено:

- картина распределения напряжений в обделке на всех трех участках показывает практически одинаковые значения, так как вертикальная компонента напряжения меняется незначительно (разница в глубине заложения не превышает 3 метров);

- влияние ранее построенных перегонных тоннелей проявляется слабо. Изменение напряжений в обделке больше вызвано неоднородностью развития сетки конечных элементов, чем наличием старых тоннелей;

- напряжения в обделке на втором участке несколько выше, чем на первом и третьем. Это может быть вызвано наличием выработки аналогичного поперечного сечения в непосредственной близости. Изменение напряжения в обделке не связано с качеством сетки,

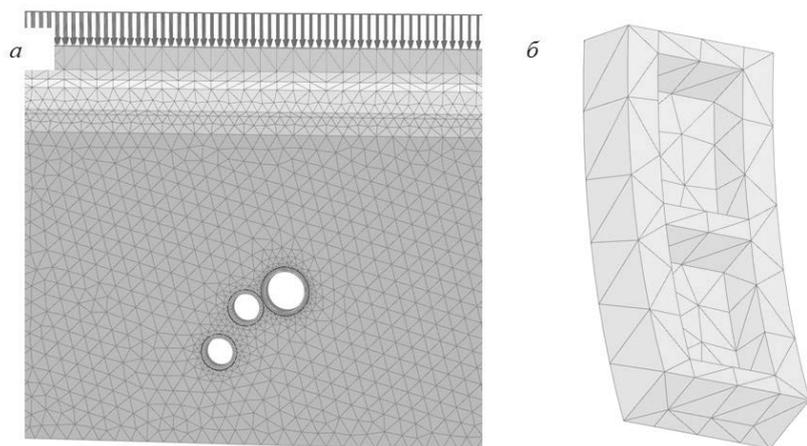


Рис. 6. Расчетная схема для опытного участка № 1 (а) и внешний вид тьюбинга обделки траволаторного тоннеля (б)
 Fig. 6. Design scheme for the pilot site № 1 (a); external look of the tubing of the travolator tunnel (b)

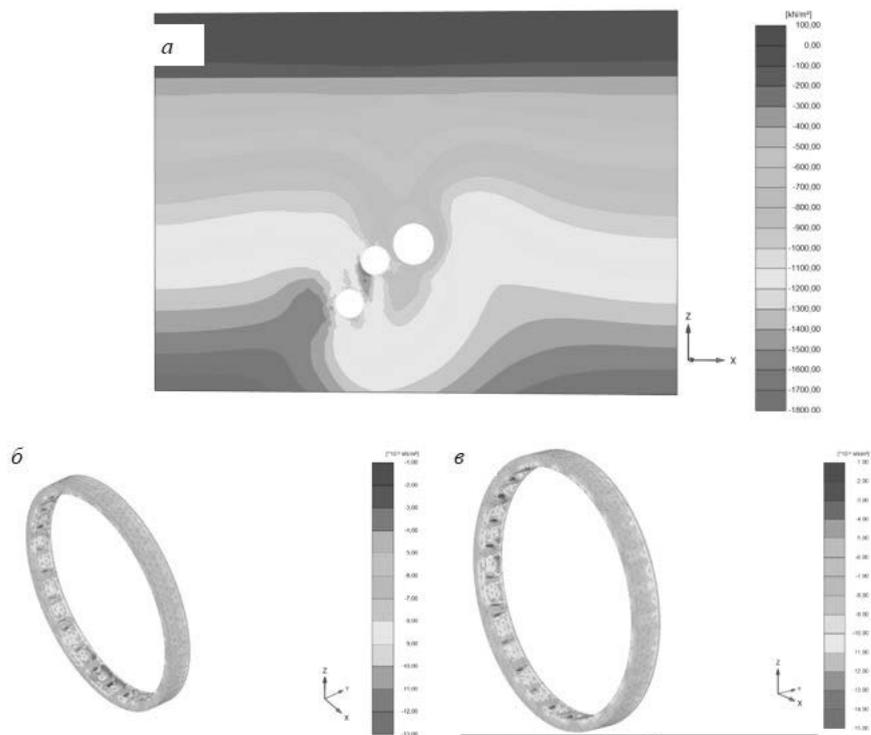


Рис. 7. Поле напряженного состояния массива на первом участке после проходки всех тоннелей (а); расчетные напряжения для опытного участка № 1 (б) и расчетные напряжения для опытного участка № 2 (в).
 Fig. 7. Stress state field of the ground massive at the experimental plot №1 after the construction of all tunnels (a); calculated stresses at the experimental plot № 1 (b); calculated stresses at the experimental plot № 2 (c)

что подтверждено большим количеством дополнительных расчетов.

Сопоставляя результаты расчета напряжений с данными натурных исследований, можно отметить, что они близки только для периода строительства траволаторного тоннеля. При эксплуатации увеличение напряжений по данным натурных исследований значительно увеличивает разницу с выполненными расчетами. В реальность увеличения напряженно-деформированного состояния обделки на первый взгляд сложно поверить, но аналогичные исследования для других транспортных тоннелей, размещаемых в полускальных породах [35], дают основание для доверия к полученным результатам натурных исследований. Это происходит за счет вибродинамических нагрузок, вызываемых машинами и механизмами.

Численные расчеты показывают, что поле напряженного состояния во вмещающем массиве отличается только для второго опытного участка. С учетом результатов натурных исследований можно отметить, что процессы консолидации вмещающего массива вокруг ранее построенных выработок, даже если они еще не закончились, весьма незначительны для того, чтобы оказывать ощутимое влияние на строительство нового тоннеля над существующими. Характер изменения измеряемых величин напряженно-деформированного состояния обделки во времени позволяет говорить, что на него оказывают влияние несимметричные величины переборов грунта при разработке забоя и последовательность заполнения заобделочного пространства.

Заключение

Напряженно-деформированное состояние обделки траволаторного тоннеля после стабилизации к окончанию

его строительства вновь начинает увеличиваться после сдачи тоннеля в эксплуатацию за счет воздействия вибродинамических нагрузок, вызываемых работой машин и механизмов.

Результаты натурных исследований и выполненное численное моделирование методом конечных элементов в объемной постановке показывают, что построенные более 20 лет назад перегонные тоннели, расположенные под строящимся тоннелем, не оказали значительного влияния на его напряженно-деформированное состояние.

Результаты численных расчетов сопоставимы с величинами фактических нормальных тангенциальных напряжений, измеренных в период строительства тоннеля. Имеющиеся различия между величинами напряжений в спинке и ребрах тьюбингов можно было бы объяснить технологическими факторами строительства — несимметричностью величин переборов грунта при разработке забоя и последовательностью заполнения заобделочного пространства. Но последующее изменение напряженного состояния при эксплуатации формирует новые вопросы. По всем опытным участкам происходит увеличение напряженного состояния, при этом большие величины приращений происходят в первый год эксплуатации, с последующим уменьшением приращений. Для всех опытных участков при увеличении напряженного состояния еще отмечается и выравнивание усилий в обделке относительно оси тоннеля.

По результатам длительных исследований напряженно-деформированного состояния обделки траволаторного тоннеля, расположенного в протерозойских глинах, можно сделать вывод о том, что вибродинамические нагрузки, которые передаются от машин и механизмов через обделку на вмещающий массив, способствуют изменению физико-меха-

нических свойств пород в приконтурной зоне, ускорению реологических процессов. Этот процесс способствует изменению напряженно-деформированного состояния системы «обделка — вмещающий массив».

Последующие исследования должны быть направлены на обоснование происходящих процессов во вмещающем массиве и обделке тоннелей при их эксплуатации. В частности, необходимо рассмотреть вопросы длительной ползучести для протерозойских глин и бетона в условиях вибродинамических воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim S. H., Burd H. J., Milligan G. W. E. Model testing of closely spaced tunnels in clay // *Géotechnique*. 1998, vol. 48 (3), pp. 375–388.
2. Byun G. W., Kim D. G., Lee S. D. Behavior of the ground in rectangularly crossed area due to tunnel excavation under the existing tunnel // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2006, vol. 21 (3–4), 361 p.
3. Choi J. I., Lee S. W. Influence of existing tunnel on mechanical behavior of new tunnel // *KSCSE Journal of Civil Engineering*. 2010, vol. 14 (5), pp. 773–783. DOI: 10.1007/S12205-010-1013-8.
4. Marshall A. M., Klar A., Mair R. J. Tunneling beneath buried pipes: view of soil strain and its effect on pipeline behavior // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010, vol. 136 (12), pp. 1664–1672. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000390.
5. Kimmance J. P., Lawrence S., Hassan O., Purchase N. J., Tollinger G. Observations of deformations created in existing tunnels by adjacent and cross cutting excavations. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema, Rotterdam, 1996, pp. 707–712.
6. Selman R. Subsurface settlements induced by tunnelling in London Clay. In: *Proceedings European Young Geotechnical Engineer's Conference*, Tallinn, Estonia, 1998, pp. 1–8.
7. Cooper M. L., Chapman D. N., Rogers C. D. F., Chan A. H. C. Movements in the Piccadilly Line tunnels due to the Heathrow Express construction // *Géotechnique*, 2002, vol. 52 (4), pp. 243–257. DOI:10.1680/geot.52.4.243.41019.
8. Mohamad H., Bennett P. J., Soga K., Mair R. J., Bowers K. Behaviour of an old masonry tunnel due to tunnelling-induced ground settlement // *Géotechnique*, 2010, vol. 60 (12), pp. 927–938. DOI:10.1680/geot.8.P.074.
9. Fang Q., Zhang D., Li Q., Wong L. N. Y. Effects of twin tunnels construction beneath existing shield-driven twin tunnels // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015, vol. 45, pp. 128–137. DOI:10.1016/j.tust.2014.10.001.
10. Atkinson J. H., Potts D. M. Subsidence above Shallow Tunnels in Soft Ground // *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1997, vol. 103 (4), pp. 307–325. DOI:10.1016/0148-9062(77)91056-7.
11. Bobet A. Analytical solutions for shallow tunnels in saturated ground // *Journal of Engineering Mechanics*. 2001, vol. 127(12), pp. 1258–1266. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:12(1258).

Вклад авторов

Лебедев М. О. — определение цели исследований, постановка задач исследований, анализ результатов натуральных исследований и численного моделирования, написание текста статьи;

Стелуков Е. В. — выполнение натуральных исследований, численное моделирование, систематизация материала, написание текста статьи;

Ларионов Р. И. — выполнение натуральных исследований, сбор данных для численного моделирования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Peck R. Deep excavations and tunnelling in soft ground. In 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, 1969, pp. 225–290.

13. Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss // *Geotechnique*. 1987, vol. 37 (3), pp. 301–320. DOI:10.1680/geot.1987.37.3.301.

14. Ahrens H., Linder E., Lux K. H. Zur Dimensionierung von Tunnelausbauten nach den „Empfehlungen zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein (1980)“. *Die Bautechnik*, 1982, vol. 59, 260 p.

15. Blom C. Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils. Ph. D. thesis, Delft University, 2002, 184 p.

16. Duddeck H. Empfehlungen zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein // *Die Bautechnik*. 1980, vol. 10, pp. 349–356.

17. Arnau O, Molins C. Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 2: Numerical simulation // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2011, vol. 26, pp. 778–788. DOI:10.1016/j.tust.2011.05.002.

18. Blom C., Van Der Horst E., Jovanovic P. Three-dimensional structural analyses of the shield-driven “Green Heart” tunnel of the high-speed line south // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1999, vol. 14, pp. 217–224. DOI:10.1016/S0886-7798(99)00035-8.

19. Addenbrooke T. I., Potts D. M. Twin tunnel interaction: surface and subsurface effects // *International Journal of Geomechanics*. 2001, vol. 1 (2), pp. 249–271. DOI: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2001)1:2(249).

20. Ng C. W., Lee K. M., Tang D. K. Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM) twin tunnel interactions // *Canadian Geotechnical Journal*. 2004, vol. 41 (3), pp. 523–539. DOI:10.1139/t04-008.

21. Avgerinos V., Potts D. M., Standing J. R. Numerical investigation of the effects of tunnelling on existing tunnels // *Géotechnique*. 2017, vol. 67 (9), pp. 808–822. DOI:10.1680/jgeot.sip17.p.103.

22. Jiangwei S. B., Xian Z. B., Yonghui C. B., Li C. Numerical parametric study of countermeasures to alleviate basement excavation effects on an existing tunnel // *Tunneling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 72, pp. 145–153. DOI:10.1016/j.tust.2017.11.030.

23. Xing-Tao L., Ren-Peng C., Huai-Na W., Hong-Zhan C. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle // *Tunneling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 89, pp. 78–90. DOI:10.1016/j.tust.2019.03.021.

24. Rongzhu L., Tangdai X., Yi H., Feng Y. Effects of above-crossing tunneling on the existing shield tunnels // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016, vol. 58, pp.159–176. DOI:10.1016/j.tust.2016.05.002.

25. Chang-Koon C., Phill-Seung L. Interaction between two asymmetric noncircular tunnels // *The 2017 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM17)*, 28 August – 1 September, Ilsan(Seoul), Korea, 2017. pp. 1–14.

26. Runke H., Pengyuan Z., Zhanping S., Junbao W., Shihao L., Yuwei Z. Study on the settlement of large-span metro station's baseplate caused by the tunnels newly built beneath it *Advances // Mechanical Engineering*. 2019, vol. 11(2), pp. 1–13. DOI: 10.1177/1687814018825161.

27. Marwan A. Computational Analysis of Segmental Linings in Mechanized Tunneling, Dr.-Ing., Institute for Structural Mechanics Faculty of Civil and Environmental Engineering Ruhr University Bochum, Bochum. 2019, 225 p.

28. Саммаль А. С., Анциферов С. В., Деев П. В. Аналитические методы расчета подземных сооружений. — Тула, 2013. — 111 с.

29. Анциферов С. В., Фомин А. В., Феклин А. А., Кудрявцев М. А. Исследование напряженного состояния массива пород и обделок параллельных тоннелей, сооружаемых вблизи горного склона // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2021. — Т. 8. — № 1. — С. 20–26. DOI: 10.15372/FPVGN2021080103.

30. Месхи Б. Ч., Плешко М. С., Войнов И. В., Кайшау Ж. Ж. З. Обеспечение безопасной эксплуатации транспортных тоннелей на основе прогнозного моделирования интенсивных геомеханических процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 8. — С. 86–96. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-86-96.

31. Костенко Б. В., Ларионов Р. И. Анализ натуральных данных при строительстве эскалаторных тоннелей станций метро «Обводный Канал» и «Адмиралтейская» в г. Санкт-Петербурге при помощи тоннелепроходческого механизированного комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 9. — С. 48–64. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_48.

32. Thomas A. H. New challenges in numerical modeling // Proc. of the 11th Int. Conf. 'Transport and City Tunnels', Prague 14–16 June 2010. — Prague: Czech Tunnel Association ITA-AITES, 2010, pp. 721–725.

33. Лебедев М. О., Романевич К. В., Басов А. Д. Оценка взаимного влияния подземных сооружений метрополитена при строительстве и эксплуатации // Геотехника. — 2018. — Т. X. — № 1–2. — С. 82–92.

34. Деменков П. А., Карасев М. А., Потемкин Д. А. Геомеханическая оценка поэтапного строительства пилонной станции метрополитена глубокого заложения // Записки горного института. — 2011. — Т. 190. — С. 220–224.

35. Лебедев М. О. Влияние эксплуатационных нагрузок на изменение напряженно-деформированного состояния обделки транспортного тоннеля // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2021. — Т. 8. — № 1. — С. 108–114. [PDF](#)

REFERENCES

1. Kim S. H., Burd H. J., Milligan G. W. E. Model testing of closely spaced tunnels in clay. *Geotechnique*. 1998, vol. 48 (3), pp. 375–388.

2. Byun G. W., Kim D. G., Lee S. D. Behavior of the ground in rectangularly crossed area due to tunnel excavation under the existing tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2006, vol. 21 (3–4), 361 p.

3. Choi J. I., Lee S. W. Influence of existing tunnel on mechanical behavior of new tunnel. *KSCSE Journal of Civil Engineering*. 2010, vol. 14 (5), pp. 773–783. DOI: 10.1007/S12205-010-1013-8.

4. Marshall A. M., Klar A., Mair R. J. Tunneling beneath buried pipes: view of soil strain and its effect on pipeline behavior. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010, vol. 136 (12), pp. 1664–1672. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000390.

5. Kimmance J. P., Lawrence S., Hassan O., Purchase N. J., Tollinger G. Observations of deformations created in existing tunnels by adjacent and cross cutting excavations. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema, Rotterdam, 1996, pp. 707–712.

6. Selman R. Subsurface settlements induced by tunnelling in London Clay. *Proceedings European Young Geotechnical Engineer's Conference*, Tallinn, Estonia, 1998, pp. 1–8.

7. Cooper M. L., Chapman D. N., Rogers C. D. F., Chan A. H. C. Movements in the Piccadilly Line tunnels due to the Heathrow Express construction. *Geotechnique*. 2002, vol. 52 (4), pp. 243–257. DOI:10.1680/geot.52.4.243.41019.

8. Mohamad H., Bennett P. J., Soga K., Mair R. J., Bowers K. Behaviour of an old masonry tunnel due to tunnelling-induced ground settlement. *Geotechnique*, 2010, vol. 60 (12), pp. 927–938. DOI:10.1680/geot.8.P.074.

9. Fang Q., Zhang D., Li Q., Wong L. N. Y. Effects of twin tunnels construction beneath existing shield-driven twin tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015, vol. 45, pp. 128–137. DOI:10.1016/j.tust.2014.10.001.

10. Atkinson J. H., Potts D. M. Subsidence above Shallow Tunnels in Soft Ground. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1997, vol. 103 (4), pp. 307–325. DOI: 10.1016/0148-9062(77)91056-7.

11. Bobet A. Analytical solutions for shallow tunnels in saturated ground. *Journal of Engineering Mechanics*. 2001, vol. 127(12), pp. 1258–1266. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:12(1258).

12. Peck R. Deep excavations and tunnelling in soft ground. *In 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, 1969, pp. 225–290.

13. Sagaseta C. Analysis of undraind soil deformation due to ground loss. *Geotechnique*. 1987, vol. 37 (3), pp. 301–320. DOI:10.1680/geot.1987.37.3.301.

14. Ahrens H., Linder E., Lux K. H. Zur Dimensionierung von Tunnelausbautennach den "Empfehlungen zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein (1980)". *Die Bautechnik*. 1982, vol. 59, 260 p.

15. Blom C. Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils. Ph. D. thesis, Delft University, 2002, 184 p.

16. Duddeck H. Empfehlungen zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein. *Die Bautechnik*. 1980, vol. 10, pp. 349–356.

17. Arnau O., Molins C. Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 2: Numerical simulation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2011, vol. 26, pp. 778–788. DOI:10.1016/j.tust.2011.05.002.

18. Blom C., Van Der Horst E., Jovanovic P. Three-dimensional structural analyses of the shield-driven "Green Heart" tunnel of the high-speed line south. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1999, vol. 14, pp. 217–224. DOI:10.1016/s0886-7798(99)00035-8.

19. Addenbrooke T. I., Potts D. M. Twin tunnel interaction: surface and subsurface effects. *International Journal of Geomechanics*, 2001, vol. 1 (2), pp. 249–271. DOI: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2001)1:2(249).

20. Ng C. W., Lee K. M., Tang D. K. Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM) twin tunnel interactions. *Canadian Geotechnical Journal*. 2004, vol. 41 (3), pp. 523–539. DOI:10.1139/t04-008.

21. Avgerinos V., Potts D. M., Standing J. R. Numerical investigation of the effects of tunnelling on existing tunnels. *Geotechnique*, 2017, vol. 67 (9), pp. 808–822. DOI:10.1680/jgeot.sip17.p.103.

22. Jiangwei S. B., Xian Z. B., Yonghui C. B., Li C. Numerical parametric study of countermeasures to alleviate basement excavation effects on an existing tunnel. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 72, pp. 145–153. DOI:10.1016/j.tust.2017.11.030.

23. Xing-Tao L., Ren-Peng C., Huai-Na W., Hong-Zhan C. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2019, vol. 89, pp. 78–90. DOI:10.1016/j.tust.2019.03.021.

24. Rongzhu L., Tangdai X., Yi H., Feng Y. Effects of above-crossing tunneling on the existing shield tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016, vol. 58, pp. 159–176. DOI:10.1016/j.tust.2016.05.002.

25. Chang-Koon C., Phill-Seung L. Interaction between two asymmetric noncircular tunnels. The 2017 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM17), 28 August – 1 September, Ilsan (Seoul), Korea, 2017. pp. 1–14.

26. Runke H., Pengyuan Z., Zhanping S., Junbao W., Shihao L., Yuwei Z. Study on the settlement of large-span metro station's baseplate caused by the tunnels newly built beneath it Advances. *Mechanical Engineering*, 2019, vol. 11(2), pp. 1–13. DOI: 10.1177/1687814018825161.

27. Marwan A. Computational Analysis of Segmental Linings in Mechanized Tunneling, Dr.-Ing., Institute for Structural Mechanics Faculty of Civil and Environmental Engineering Ruhr University Bochum, Bochum. 2019, 225 p.

28. Sammal' A. S., Anciferov S. V., Deev P. V. Analytical methods for underground structures calculating. Tula, 2013, 111 p. [In Russ].

29. Anciferov S. V., Fomin A. V., Feklin A. A., Kudrjavcev M. A. Investigation of the stress state of the rock mass and the lining of parallel tunnels constructed near the mountain slope. *Fundamental and applied issues of mining sciences*. 2021, vol. 8(1), pp. 20–26. [In Russ].

30. Meskhi B. Ch., Pleshko M. S., Voinov I. V., Caixao J. J. Z. Safe operation of transportation tunnels based on predictive modeling of active geomechanical processes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 8, pp. 86–96. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-86-96.

31. Kostenko B. V., Larionov R. I. Field data analysis in construction of escalator tunnels at ObvodnyKanal and Admiralteyskaya Stations of the Saint-Petersburg Metro using tunnel boring machine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 9, pp. 48–64. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_48.

32. Thomas A. H. New challenges in numerical modeling. *Proc. of the 11th Int. Conf. 'Transport and City Tunnels', Prague 14–16 June 2010.* – Prague: Czech Tunnel Association ITA–AITES. 2010, pp. 721–725.

33. Lebedev M. O., Romanovich K. V., Basov A. D. Assessment of the mutual influence of underground subway structures during construction and operation. *Geotechnics*. 2018, vol. X, no. 1–2, pp. 82–92. [In Russ].

34. Demenkov P. A., Karasev M. A., Potemkin D. A. Geomechanical assessment of the phased construction of a deep-laid underground pylon station. *Journal of Mining Institute*. 2011, vol. 190, pp. 220–224. [In Russ].

35. Lebedev M. O. The influence of operational loads on the change in the stress-strain state of the transport tunnel lining. *Fundamental and applied issues of mining sciences*. 2021, vol. 8(1), pp. 108–114. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедев Михаил Олегович — канд. техн. наук, доцент, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе, <http://orcid.org/0000-0002-7749-442X>, ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», 191002, Санкт-Петербург, Большая Московская ул., д.2, Россия, e-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru;

Степуков Евгений Владимирович — младший научный сотрудник, <http://orcid.org/0000-0002-3321-1440>, ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», 191002, Санкт-Петербург, Большая Московская ул., д.2, Россия, e-mail: estepukov_lmgt@mail.ru;

Ларионов Роман Игоревич — канд. техн. наук, заведующий лабораторией геомеханики, <http://orcid.org/0000-0002-1297-6823>, ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», 191002, Санкт-Петербург, Большая Московская ул., д.2, Россия, e-mail: roman.larionov.spmi@gmail.com;

Для контактов: *Лебедев Михаил Олегович*, e-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lebedev M. O., Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director General for research activities, <http://orcid.org/0000-0002-7749-442X>, OJSC “NIPII Lenmetrogioprotrans”, 191002, Saint-Petersburg, BolshayaMoskovskaya, 2, Russia, e-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru;

Stepukov E. V., junior researcher, <http://orcid.org/0000-0002-3321-1440>, OJSC “NIPII Lenmetrogioprotrans”, 191002, Saint-Petersburg, BolshayaMoskovskaya, 2, Russia, e-mail: estepukov_lmgt@mail.ru;

Larionov R. I., Cand. Sci. (Eng.), head of the geomechanics laboratory, <http://orcid.org/0000-0002-1297-6823>, OJSC “NIPII Lenmetrogioprotrans”, 191002, Saint-Petersburg, BolshayaMoskovskaya, 2, Russia, roman.larionov.spmi@gmail.com.

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 05.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 05.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.