

УДК 624.191.22:625

Маковский Лев Вениаминович, канд. техн. наук, проф.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, mosti@list.ru

Боев Артем Олегович, студент,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, mosti@list.ru

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТОВОГО МАССИВА И КОНСТРУКЦИИ ПОДЗЕМНОГО СООРУЖЕНИЯ, ВОЗВЕДЕННОГО ВБЛИЗИ ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ТОННЕЛЯ

Аннотация. В работе рассмотрены особенности напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива и подземных объектов, а также особенности их взаимного влияния. Приведены некоторые результаты численного моделирования работы элементов сооружений.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, котлован, эксплуатируемые тоннели метрополитена, анализ методом конечных элементов.

Makovsky Lev V., Ph. D., Professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, mosti@list.ru

Boev Artem O., student,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, mosti@list.ru

STRESS-STRAIN STATE OF THE SOIL SOLID MASSIF AND UNDERGROUND CONSTRUCTION ERECTED NEAR THE EXPLOITED TUNNEL

Abstract. The paper discusses the features of the stress-strain state (SSS) of the soil massif and underground objects, and features of their mutual influence. Some results of the numerical simulation of operation of construction elements.

Key words: stress-strained state, foundation pit, existing metro structure, finite element analysis.

Введение

Комплексное освоение подземного пространства – естественный процесс градостроительства в современных мегаполисах, поэтому в условиях

сокращения территориальных резервов для создания и развития благоприятной среды жизнедеятельности в целях устойчивого развития города необходимы опережающие темпы освоения подземного пространства.

Возможности использования подземного пространства города Москвы ограничиваются сложными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями, наличием уже построенных и эксплуатируемых подземных сооружений: фундаментов существующих зданий, тоннелей и станций метрополитена и других объектов транспортной и инженерной инфраструктуры города.

Основная часть

Задача обеспечения надежной эксплуатации различных объектов осложняется их взаимным влиянием в условиях плотной городской застройки. Обилие разнотипных взаимовлияющих объектов создает серьезную техногенную нагрузку как на сами сооружения, так и на вмещающие их грунтовые массивы.

Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния таких массивов зачастую является единственным инструментом, способным дать адекватную качественную и количественную картину работы геомеханической системы «грунтовый массив – элементы наземных и подземных сооружений» [1, 2].

Последние годы в Москве активно ведётся развитие улично-дорожной сети, включающие строительство и реконструкций дорожно-транспортных объектов, развитие системы метрополитена и московского железнодорожного узла, транспортно-пересадочных узлов, организации парковочного пространства [3].

Большинство этих объектов строится в охранной зоне метрополитена, что оказывает существенное влияние на НДС и эксплуатационную надежность подземных сооружений [4, 5].

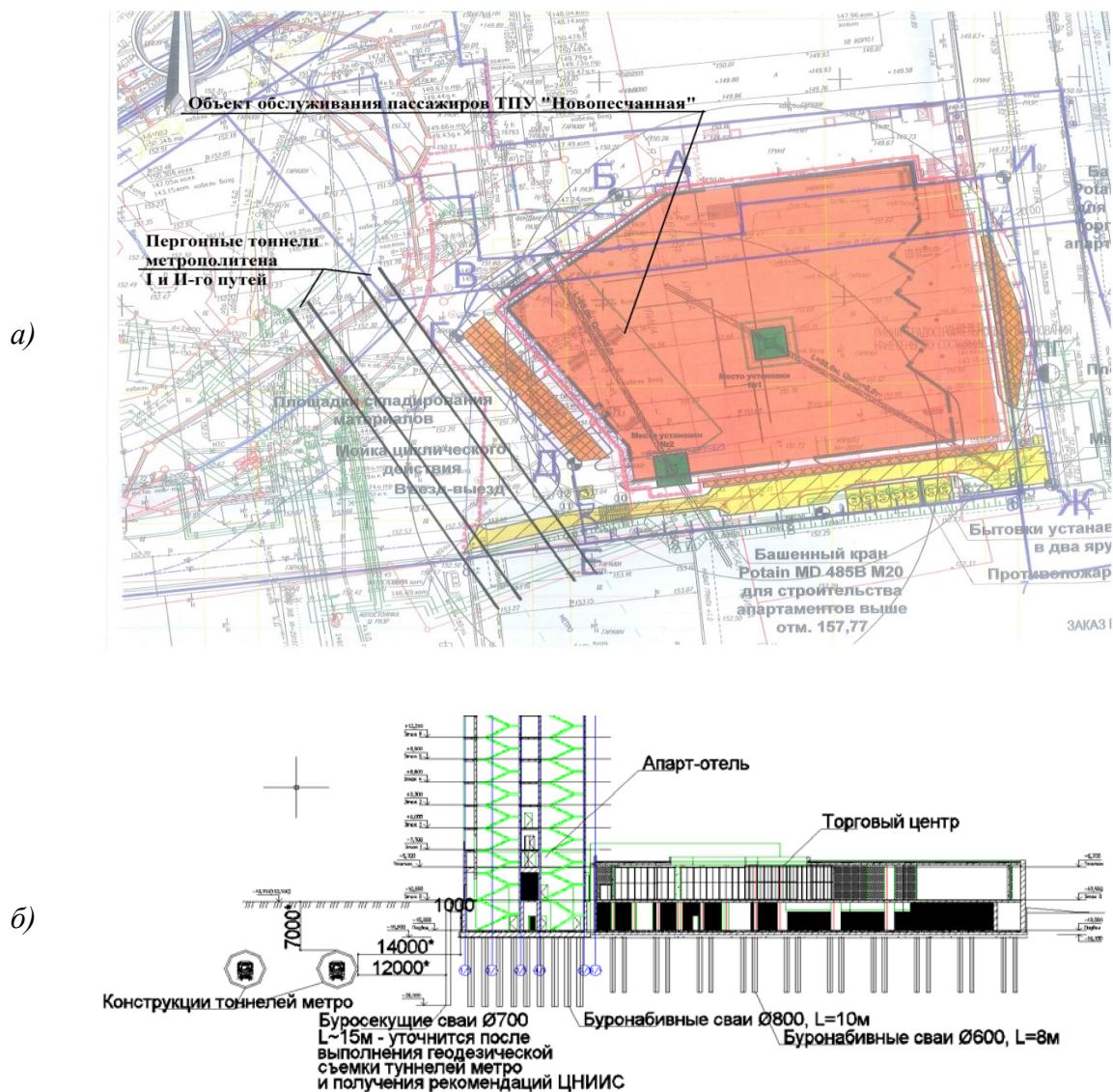


Рис. 1. Фрагмент генплана (а) и поперечное сечение ТПУ и тоннелей метрополитена (б)

Одним из последних примеров объектов Москвы, где необходима оценка напряженно-деформированного состояния грунтового массива и конструкции подземного сооружения, возводимого вблизи эксплуатационного тоннеля, является проект «Второй очереди объекта строительства в составе транспортно-пересадочного узла «Новопесчаная» ТПУ-29 (Объект обслуживания пассажиров ТПУ)».

В зону влияния попадают подземные объекты метрополитена: перегонные тоннели между станциями «Полежаевская» и «Октябрьское

поле» Таганско-Краснопресненской линии, расположенные на минимальном расстоянии в плане 11 м до ограждающей стены котлована из буронабивных свай (БНС) диаметром 0,7 м. Конструкция обделки перегонных тоннелей чугунная, диаметром 5,5 м.

Совмещенный план комплекса и размещения перегонных тоннелей метрополитена представлен на фрагменте генплана (рис. 1а), поперечное сечение, показывающее взаимное расположение ТПУ и сооружений метрополитена на рис. 1б.

ТПУ представлено двумя зданиями:

- высотное здание (20 надземных этажей, один технический и подземный), размеры в плане 16,25 м х 48,90 м. Фундамент – свайный, длина свай имеют длину 10 м и сечение диаметром 0,8 м; Ростверк представляет собой железобетонную плиту толщиной 1,5 м;

- торговый комплекс (один надземный и подземный этажи), размеры в плане 78,8 м х 84,4 м. Фундамент – свайный, длина свай имеют длину 8 м и сечение в плане ϕ 0,6 м; Ростверк представляет собой ж/б плиту толщиной 0,6 м.

Нагрузка под ФП для обоих зданий соответственно 630 и 45 кН/м².

Геологическое строение участка строительства на глубину до 30,0 м представлено: насыпным грунтом, песком средней крупности, песком пылеватым, плотным, супесью пластичной, песком мелким плотным, песком средней крупности. Установившийся уровень грунтовых вод расположен на глубине от поверхности 11,00 м.

Для исследования НДС грунтового массива и подземных конструкций ТПУ и метрополитена, которые работает как единая система, были разработаны две модели (в двухмерной и трехмерной постановке) в программном комплексе PLAXIS (рис. 2).

Расчет производился поэтапно, в соответствии со следующими стадиями строительства:

- исходная стадия – на данной стадии определялись усилия, возникающие в обделке тоннелей до начала строительства комплекса ТПУ;
- строительная стадия – на данной стадии определялись смещения и усилия в конструкции тоннельных сооружений после откопки котлована;
- эксплуатационная стадия – на данной стадии определялись смещения и усилия, возникающие в обделке тоннелей после завершения строительства ТПУ при полной передаче нагрузки на грунтовое основание.

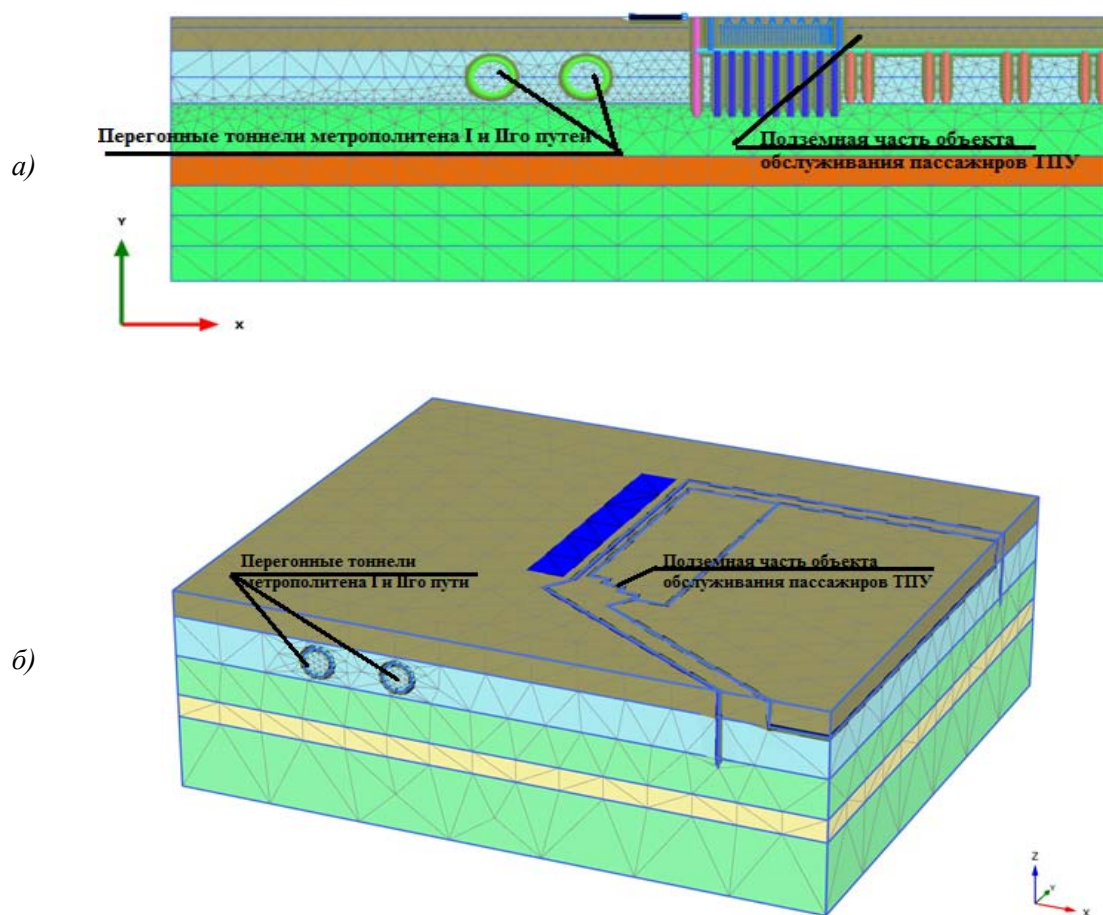


Рис. 2. Расчетная модель: а – двумерная, б – трехмерная

По результатам расчета рассматриваемых моделей были получены значения внутренних усилий и смещения в обделке тоннелей и конструкция подземной части ТПУ (табл. 1). Картины деформированного состояния грунтового массива, обделки перегонных тоннелей и конструкций подземной части ТПУ представлены на рис. 4 и 5.

Таблица 1

Расчетные перемещения и усилия в обделке тоннелей

2D Модель	Тоннель I-го пути			Тоннель II-го пути		
	$U_{\text{общ}}$	$M_{\text{эк}}$	$N_{\text{эк}}$	$U_{\text{общ}}$	$M_{\text{эк}}$	$N_{\text{эк}}$
	(мм)	(кНм/м ²)	(кН/м ²)	(мм)	(кНм/м ²)	(кН/м ²)
Исходная	—	2,418	-353,4	—	2,43	-353,5
		-2,934	-450,7		-2,947	-450,9
Строительная (котлован)	3,674	2,583	-331,7	6,253	3,026	-315,7
		-2,737	-428,9		-2,719	-419,1
Эксплуатационная	6,024	3,344	-313,1	12,45	1,751	-309,3
		-3,055	-421,2		-2,637	-428,6
3D Модель	Тоннель I-го пути			Тоннель II-го пути		
	$U_{\text{общ}}$	$M_{\text{эк}}$	$N_{\text{эк}}$	$U_{\text{общ}}$	$M_{\text{эк}}$	$N_{\text{эк}}$
	(мм)	(кНм/м ²)	(кН/м ²)	(мм)	(кНм/м ²)	(кН/м ²)
Исходная	—	1,151	-308,8	—	1,253	
		-1,334	-431,3		-2,704	-431,4
Строительная (котлован)	1,343	1,116	-297,9	2,648	1,228	-286,7
		-1,312	-425,8		-2,591	-424,1
Эксплуатационная	1,976	1,094	-289,9	4,703	1,238	-273,3
		-1,28	-428,1		-2,553	-428,2

Значения изгибающего момента в ключевых точках тоннелей: блоки ключевой, нормальный и лотковый представлены в табл. 2 и на рис. 3.

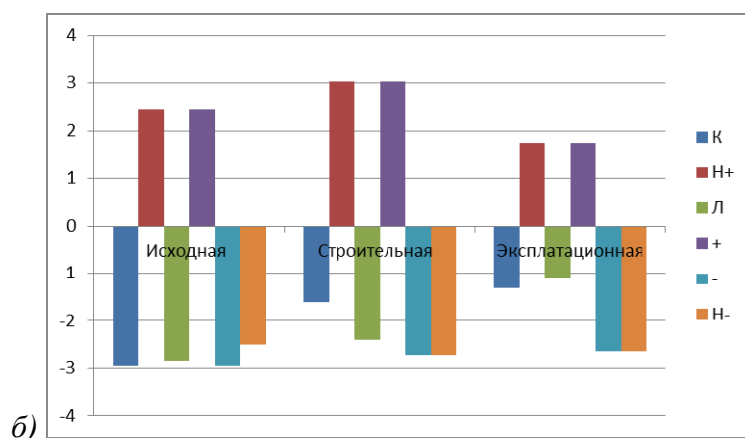
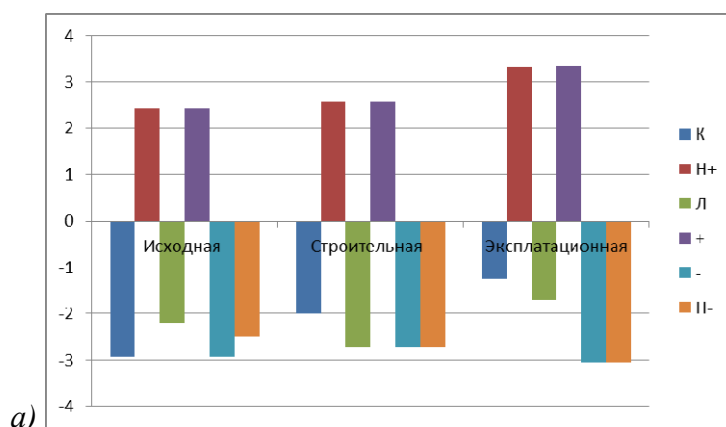


Рис. 3. Диаграмма значения изгибающего момента в ключевых точках тоннелей: I-го пути (а) и II-го пути (б)

Таблица 2

Значения изгибающего момента в ключевых точках тоннелей

Значения изгибающих моментов в ключевых точках тоннелей(кНм)							
Тоннель I-го пути				Тоннель II-го пути			
Ключевые точки	Исходная	Строительная	Эксплуатационная	Ключевые точки	Исходная	Строительная	Эксплуатационная
К	-2,934	-2	-1,25	К	-2,947	-1,6	-1,3
Н+	2,418	2,583	3,337	Н+	2,43	3,026	1,745
Н-	-2,5	-2,737	-3,055	Н-	-2,5	-2,719	-2,637
Л	-2,2	-2,737	-1,7	Л	-2,848	-2,4	-1,1
max(+)	2,418	2,583	3,344	max(+)	2,43	3,026	1,751
min(-)	-2,934	-2,737	-3,055	min(-)	-2,947	-2,719	-2,637

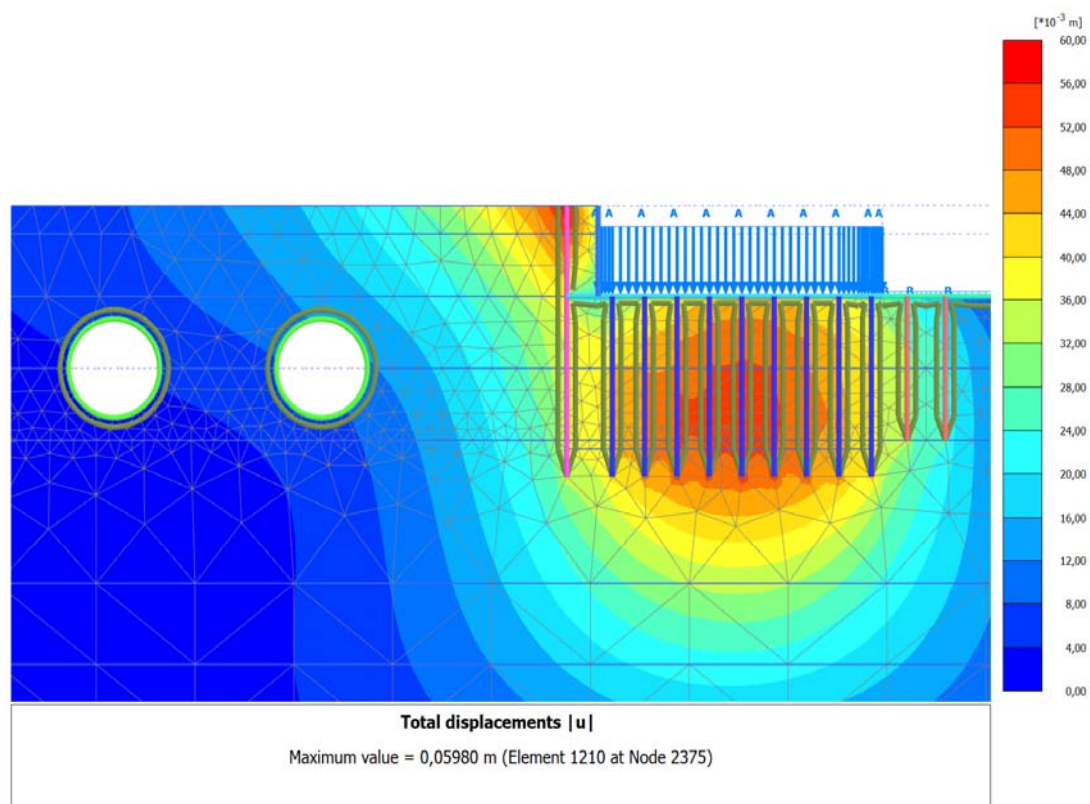


Рис. 4. Изополе полных перемещений грунтового массива

Заключение

По результатам проведенных исследований можно констатировать следующее:

1. Разработана конечно-элементная модель системы «подземная часть ТПУ – грунтовый массив – тоннели метрополитена», в программном комплексе PLAXIS.

2. Выполнены расчеты на модели напряженно-деформированного состояния конструкций подземных сооружений и грунтового массива на различных этапах строительства.

3. Установлено, что при строительстве ТПУ максимальные общие деформации действующих тоннелей в условии плоской задачи составили 12,45 мм, в пространственной задаче 4,703 мм. Это свидетельствует о том, что в трехмерной постановке учитывается пространственная жесткость конструкций, вследствие чего значения деформации конструкции в пространственной задаче в среднем на 40–50% ниже, чем в плоской.

4. Обработка данных численного эксперимента позволит установить зависимости основных параметров НДС системы от влияющих факторов (глубины заложения, этапов строительства и способов крепления и др.).

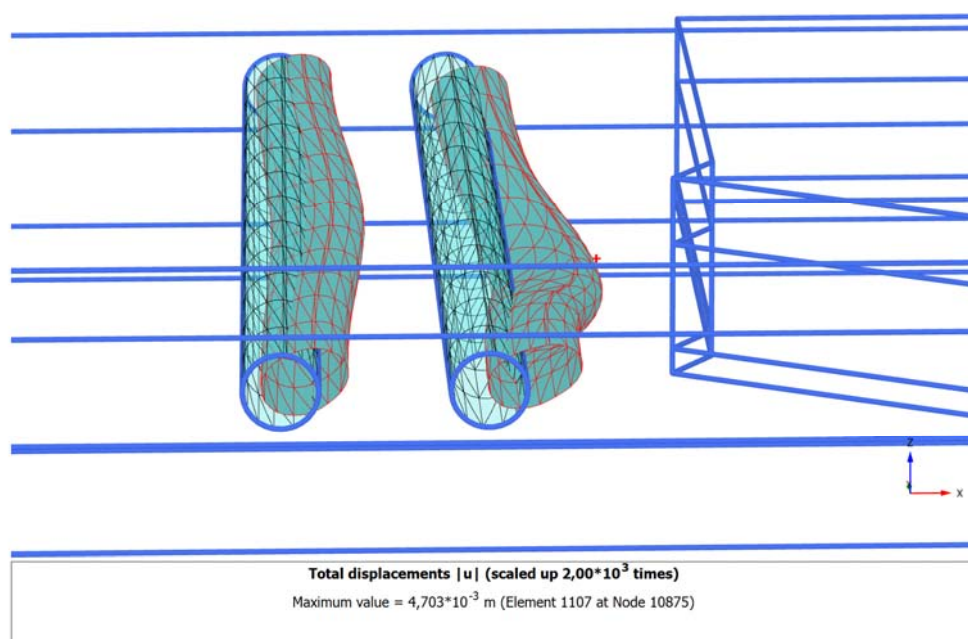


Рис. 5. Деформация обделки тоннелей метрополитена

Список литературы

1. Булычев, Н.С. Теория расчета конструкций подземных сооружений / Н.С. Булычев // ППМ. – 1994. – № 3–4. – С. 43–44.

2. Гарбер, В.А. Научные основы проектирования тоннельных конструкций с учетом технологии их сооружения / В.А. Гарбер. – М.: НИЦ ТМ ОАО ЦНИИС, 1996.

3. Маковский, Л.В. Проектирование автодорожных и городских тоннелей: учебник для вузов / Л.В. Маковский. – М.: Транспорт, 1993. – 352 с.

4. Рекомендации по уменьшению осадок поверхности при сооружении перегонных тоннелей метрополитена мелкого заложения в неустойчивых грунтах. – М.: ЦНИИС, 1987.

5. Handbook of Tunnel Engineering II: Basics and Additional Services for Design and Construction, Bernhard Maidl, Markus Thewes, Ulrich Maidl, ISBN: 978-3-433-03049-3, 458 pages, January 2014.

References

1. Bulychev N.S. *PPM*, 1994, no. 3–4, pp. 43–44.

2. Garber V.A. *Nauchnye osnovy proektirovanija tonnel'nyh konstrukcij s uchetom tehnologii ih sooruzhenija* (Scientific basis for the design of tunnel structures taking into consideration the technology of their construction), Moscow, NIC TM ОАО CNIIS, 1996.

3. Makovskij L.V. *Proektirovanie avtodorozhnyh i gorodskih tonnelej: uchebnik dlja vuzov* (Design of road and urban tunnels: textbook for universities), Moscow, Transport, 1993, 352 p.

4. *Rekomendacii po umen'sheniju osadok poverhnosti pri sooruzhenii peregonnyh tonnelej metropolitena melkogo zalozhenija v neustojchivyh gruntah* (Recommendations for reducing surface subsidence in the construction of tunnels of the subway shallow in unstable soils), Moscow, CNIIS, 1987.

5. Handbook of Tunnel Engineering II: Basics and Additional Services for Design and Construction, Bernhard Maidl, Markus Thewes, Ulrich Maidl, ISBN: 978-3-433-03049-3, 458 pages, January 2014.