



СТРОИТЕЛЬСТВО ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-49-56>**Анализ параметров механизированной проходки тоннелей для определения характеристик перебора грунта**Д. С. Конюхов  

АО «Мосинжпроект», г. Москва, Российская Федерация

✉ gidrotehnik@inbox.ru**Аннотация**

Ведение горнопроходческих работ в условиях современного города требует проведения дорогостоящих мероприятий по обеспечению сохранности существующих зданий. В среднем на 1 км строящейся линии метрополитена Москвы приходится до 17–20 зданий. Анализ и сопоставление данных геотехнического мониторинга с результатами геотехнических расчетов для подземного строительства открытым и закрытым способами в условиях плотной городской застройки продемонстрировал неудовлетворительную сходимость расчетных и фактических данных. Основными факторами этого явления являются: недостаточность данных инженерно-геологических изысканий; несоответствие принимаемой расчетной модели реальному поведению грунта под нагрузкой; недостаточная квалификация исполнителей; перебор грунта. Публикация направлена на решение актуальной научно-технической задачи определения характеристик перебора грунта при механизированной проходке тоннелей. На первом этапе исследования были направлены на идентификацию ключевых причин и факторов, определяющих количественные параметры перебора грунта в условиях подземного строительства в городах при закрытом способе горностроительных работ. Среди таких факторов выделяются следующие: несоответствие диаметра резания наружному диаметру обделки, перемещения грунтового массива перед забоем, неполное заполнение тампонажным раствором заобделочного пространства, неполное заполнение пространства за оболочкой щита глинистым или медленно твердеющим тампонажным раствором или их отсутствие, человеческий фактор (низкая квалификация персонала). Коэффициент перебора устанавливается на основе предложенной эмпирической зависимости его значений от глубины заложения тоннеля. Экспериментальные данные позволили установить зависимости коэффициента перебора при разных глубинах заложения тоннеля, а также при диаметрах тоннелей от 4 до 10 м для тоннелепроходческого механизированного комплекса с активным пригрузом забоя. Практическое значение проведенных исследований состоит в установлении диапазона изменения значений эмпирического коэффициента – от 0,5 % (для щитов с условным диаметром 10 м) до 5 % (для щитов условным диаметром 4 м). Разработка организационных мероприятий и обоснование технологических решений по обеспечению сохранности существующих зданий в комплексе с научно-техническим сопровождением подземного строительства позволила примерно на 6 мес. сократить срок проходки перегонов между станциями «Окская» и «Нижегородская» Некрасовской линии Московского метрополитена, а также и обеспечить экономию порядка 2,5 млрд руб.

Ключевые слова

подземное строительство, проходка, тоннели, щитовой комплекс, Herrenknecht, Robbins, геотехнический мониторинг, перебор грунта, коэффициент перебора грунта

Для цитирования

Konyukhov D.S. Analysis of mechanized tunneling parameters to determine the overcutting characteristics. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(1):49–56. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-49-56>

CONSTRUCTION OF MINING ENTERPRISES AND UNDERGROUND SPACE DEVELOPMENT

Research article

Analysis of mechanized tunneling parameters to determine the overcutting characteristicsD. S. Konyukhov  

JSC Mosinzhproekt, Moscow, Russian Federation

✉ gidrotehnik@inbox.ru**Abstract**

Tunneling in urban conditions requires costly measures, in order to ensure the safety of existing buildings. On average, there are up to 17–20 buildings per 1 km of Moscow Subway Lines under construction. Analysis and comparison of geotechnical monitoring data and results of geotechnical estimations for underground construction using cut-and-cover and tunneling methods in conditions of high-density urban area shows an unsatisfactory correlation between estimated and actual data. This can be described in the following way:



insufficient geotechnical survey data; discrepancy between the accepted estimation model and the actual behavior of soil under load; insufficient qualification of the construction workers; and overcutting. The study was aimed at solving the urgent scientific and engineering problem of determining the characteristics of overcutting during mechanized tunnel boring. At the first stage, the investigations were aimed at identifying the key reasons and factors which determine the quantitative parameters of overcutting in urban underground construction by tunneling. These factors include the following: mismatch between the cutting diameter and the outer lining diameter; displacement of the soil mass in front of the face; incomplete grouting of voids beyond the lining; incomplete filling of beyond-shield voids with clay mortar or slow-curing grouting mortar or no filling at all; and human factor (low qualifications of personnel). The overcutting coefficient was determined on the basis of the proposed empirical dependence of its values with regard to the depth of tunneling. The experimental data allowed the depth dependence of the overcutting coefficient for different tunneling depths to be defined, as well as for tunnel diameters from 4 to 10 meters in the case of mechanized tunnel boring machine (TBM) using the earth pressure balanced tunneling method. The practical importance of the studies consists in determining the range of the empirical overcutting coefficient variation from 0.5 % (for TBMs with nominal diameter of 10 m) up to 5 % (for TBMs with nominal diameter of 4 m). The development of organizational measures and justification of process solutions, aimed at ensuring the safety of the existing buildings in conjunction with the scientific and technical support of underground construction has led to a shortening of tunneling time between the Okskaya and Nizhegorodskaya stations of Nekrasovskaya Line of Moscow Subway by about six months. It has also provided savings of about 2.5 billion rubles.

Keywords

underground construction, tunneling, tunnel boring machine (TBM, blade shield), Herrenknecht, Robbins, geotechnical monitoring, overcutting, coefficient of overcutting

For citation

Konyukhov D.S. Analysis of mechanized tunneling parameters to determine the overcutting characteristics. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(1):49–56. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-49-56>

Введение

Ведение горнопроходческих работ в условиях современного города требует проведения дорогостоящих мероприятий по обеспечению сохранности существующих зданий [1]. В среднем на 1 км строящейся линии метрополитена Москвы приходится до 17–20 зданий. На основе анализа и сопоставления данных геотехнического мониторинга с результатами геотехнических расчетов для подземного строительства открытым и закрытым способами в условиях плотной городской застройки выявлена неудовлетворительная сходимости расчетных и фактических данных. Основными факторами этого явления являются такие, как: недостаточность данных инженерно-геологических изысканий; несоответствие принимаемой расчетной модели реальному поведению грунта под нагрузкой; недостаточная квалификация исполнителей; перебор грунта.

Анализ материалов геотехнического мониторинга и их сопоставление с результатами расчётов, определяющих влияние подземного строительства на здания и сооружения окружающей застройки, показывает, что для объектов такого рода, возводимых открытым способом в котлованах глубиной до 9–12 м, сходимость между расчетными и фактическими данными не превышает 60 %. При строительстве объектов метрополитена в котлованах глубиной до 35 м сходимость достигает 32 %, при проходке тоннелепроходческими комплексами (ТПМК) условным диаметром 6 м – 70 %, при проходке ТПМК условным диаметром 10 м – 7 %. Представленные данные свидетельствуют о необходимости совершенствования как расчетных методик, так и методик геотехнического мониторинга [2–4]. Основные причины неудовлетворительной сходимости геотехнических расчётов и фактических данных геотехниче-

ского мониторинга были выявлены в более ранних исследованиях [5–7].

При моделировании закрытого способа строительства важное значение имеет параметр, зависящий от технологии производства работ, – это перебор грунта. Указанный расчетный параметр задается при моделировании деформаций грунтового массива как характеристика проходки выработки закрытым способом, равная отношению площади удаляемого при проходке грунта, расположенного в пределах контура выработки, к площади поперечного сечения выработки [8].

В более ранних исследованиях показано, что причиной перебора грунта при проходке тоннелей закрытым способом являются [9, 10]:

1. Несоответствие диаметра резания наружному диаметру обделки. При применении ТПМК с внешним расположением рабочего органа (что характерно для большинства современных ТПМК с активным пригрузом забоя), в среднем диаметр ротора на 3–5 % больше диаметра обделки тоннеля.

2. Перемещения грунтового массива перед забоем. Этот фактор характерен в первую очередь для щитов без активного пригруза забоя, а также при переборе грунта.

3. С перебором грунта связан и человеческий фактор, т. е. недостаточная квалификация персонала.

4. Неполное заполнение тампонажным раствором заобделочного пространства.

Необходимо к этому перечню добавить еще один фактор:

5. Отсутствие заполнения или неполное заполнение пространства за оболочкой щита глинистым или медленно твердеющим тампонажным раствором.

Все перечисленные факторы свидетельствуют о том, что перебор грунта приводит к технологическим деформациям поверхности [11].



Модели определения коэффициента перебора грунта при механизированной проходке тоннеля

Объём потерь грунта (коэффициент перебора V_L) принято определять как отношение площади оседания поверхности V_s к площади поперечного сечения тоннеля F_t :

$$V_L = \frac{V_s}{F_t} 100\%. \quad (1)$$

Основные положения в области прогнозирования коэффициента перебора были изложены в более ранних исследованиях [9]. Позднее показано, что V_L может быть определён только на основании данных натурных наблюдений, и для слабых грунтов величина потерь грунта не превышает 2 % [12]. В работе [13] приводятся данные о зависимости V_L от диаметра тоннеля, глубины его заложения и инженерно-геологических условий строительства при прокладке тоннелей диаметром до 4 м на глубине до 8,1 м.

Исследования [14, 15] показали, что при проходке ТПМК с грунтовым пригрузом забоя диаметром 9,15 м в водонасыщенных песках, перекрытых сверху мергелями, V_L не превышает 0,3...0,5 %. Действующими в России нормативными документами¹ величины коэффициента перебора при строительстве тоннелей диаметром до 4 м нормируются в зависимости от типа грунта в забое в размере от 1,5 до 5,5 % в зависимости от типа грунта в забое щита. Указанные величины существенно превышают значения V_L , полученные зарубежными исследователями [12, 14, 15].

Необходимо учитывать, что в настоящее время при проходке тоннелей метрополитена механизированным способом в условиях плотной городской застройки:

- глубина заложения тоннеля составляет в основном не менее $1d$ (d – диаметр тоннеля), при этом в своде тоннеля располагаются песчаные или глинистые грунты;

- конструкции ТПМК с грунтовым пригрузом забоя, используемые в основном при проходке тоннелей метрополитена в нескальных грунтах (из всего парка ТПМК г. Москвы: 24 имеют грунтовой пригруз забоя и 1 – бентонитовый), предполагают нагнетание тампонажного раствора через хвостовую часть оболочки одновременно с продвижением щита.

Таким образом, на основании анализа ранее выполненных исследований можно заключить, что при механизированной проходке тоннелей на величину коэффициента перебора грунта влияют:

- относительная глубина заложения тоннеля h/d ;
- связность грунта;
- отношение величины зазора между диаметром режущего органа ТПМК и наружным диаметром обделки.

¹ СП 249.1325800.2016. Коммуникации подземные. Проектирование и строительство закрытым и открытым способами

Цифровые расчетные модели технологических процессов и состояния горного массива и при проходке ТПМК в условиях городской застройки реализуются в программных комплексах PLAXIS, GEOWALL, COMSOL и другие [16, 17]. Для повышения достоверности цифровых моделей также большое значение имеет определение параметров перебора грунта при проходке.

Результаты геотехнического мониторинга при проходке перегонных тоннелей

В качестве примера рассмотрим результаты мониторинга при проходке перегонных тоннелей Некрасовской линии и Западного участка Большой Кольцевой линии (БКЛ) Московского метрополитена.

При проходке Западного участка БКЛ был задействован ТПМК «ROBBINS» с грунтовым пригрузом забоя, диаметром рабочего органа $d_r = 6,6$ м и диаметром тоннеля $d = 6,3$ м.

Коэффициент ζ , характеризующий соотношение величины зазора между диаметром режущего органа ТПМК d_r и наружным диаметром обделки d к диаметру тоннеля

$$\zeta = \frac{d_r - d}{d} \quad (2)$$

равен 0,048.

Проходка осуществлялась в водонасыщенных песках мелких и средней крупности.

Эмпирический коэффициент перебора V_{le} рассчитывался методом обратного анализа по зависимости

$$V_{le} = \frac{s_f i \sqrt{2\pi}}{S}, \quad (3)$$

где s_f – фактическая осадка в точке наблюдений, расположенной на расстоянии i от оси тоннеля; S – площадь забоя.

Приведенный коэффициент перебора V_{Lp} рассчитывался по выражению

$$V_{Lp} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{lp_i} S_i}{S}, \quad (4)$$

где S_i – площадь участка забоя с коэффициентом перебора V_{lp_i} .

Результаты расчёта коэффициентов перебора в виде графических зависимостей

$$V_L = f\left(\frac{h}{d_r}, \xi\right) \quad (5)$$

приведены на рис. 1 и 2.

При строительстве Некрасовской линии метрополитена от ст. «Окская улица» до ст. «Стахановская улица» применяли ТПМК «Herrenknecht ТМВ ЕРВ» с грунтовым пригрузом забоя, диаметром рабочего органа $d_r = 10,69$ м, диаметром тоннеля $d = 10,3$ м, и коэффициент $\zeta = 0,038$. Перегонные тоннели располагаются в основном в верхнеюрских глинах, однако шельга свода практически на всём протяжении трассы вскрывает четвертичные отложения.

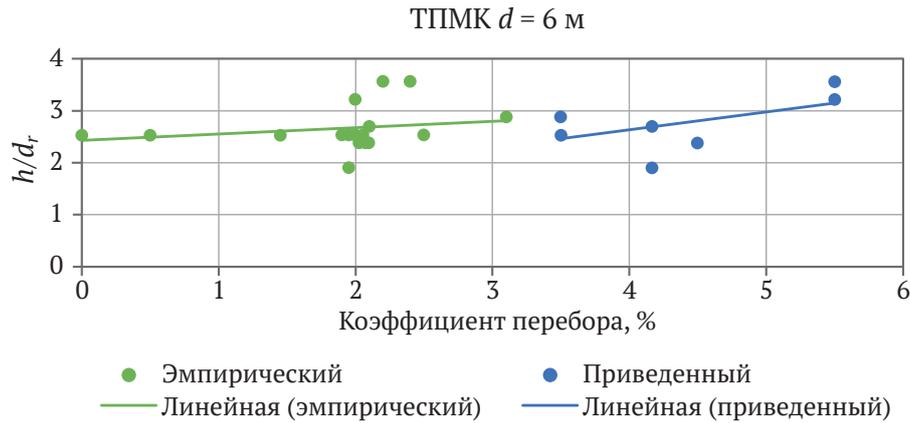


Рис. 1. Зависимость эмпирического V_{ie} и приведённого V_{ip} коэффициентов перебора от относительной глубины заложения тоннеля h/d_r при проходке ТПМК с условным диаметром 6 м

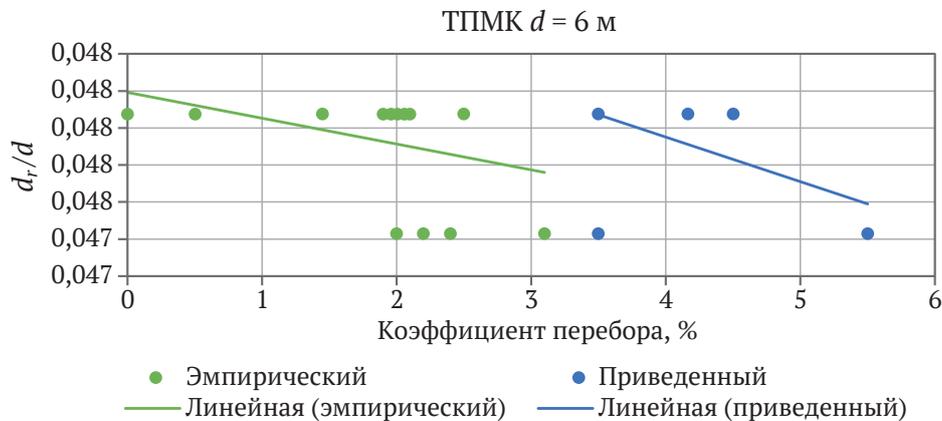


Рис. 2. Зависимость эмпирического V_{ie} и приведённого V_{ip} коэффициентов перебора от коэффициента ζ при проходке ТПМК с условным диаметром 6 м

На соседнем участке, от ст. «Косино» до ст. «Юго-Восточная», проходку вели ТПМК «Herrenknecht ТМВ ЕРВ» с грунтовым пригрузом забоя, диаметром рабочего органа $d_r = 10,82$ м, диаметр тоннеля был $d = 10,5$ м, коэффициент $\zeta = 0,03$. Максимальная дополнительная осадка здания, под фундаментами которого на глубине 13 м прошёл ТПМК, составила 6,7 мм [18].

Значения эмпирического коэффициента перебора на этих участках варьировались от 0,5 до 1,25% в зависимости от глубины заложения тоннеля и инженерно-геологических условий в забое.

На рис. 3 и 4 приведены обобщенные зависимости (5) для ТПМК условным диаметром 4–10 м.

Необходимо отметить, что коэффициент ζ не является достаточно надежной характеристикой вследствие постоянства значений ζ для разных типов ТПМК, в то же время величина коэффициента перебора зависит от диаметра ТПМК.

Методом обратного анализа установлены эмпирические величины коэффициента перебора для ТПМК условным диаметром 4...10 м. Значение эмпирического коэффициента изменяется в пределах от 0,5 % (для ТПМК с условным диаметром 10 м) до 5 % (для ТПМК с условным диаметром 4 м). Приведённые на рис. 3

графические зависимости позволяют при проходке в смешанных грунтах рассчитывать коэффициент перебора в зависимости от относительной глубины заложения тоннеля по эмпирическому выражению

$$V_{ie} = 0,49 \frac{h}{d_r} + 0,96. \quad (6)$$

Аналогичная зависимость между эмпирическим и приведённым коэффициентами перебора имеет вид

$$V_{ie} = 0,69V_{ip} + 0,53 \quad (7)$$

и позволяет, базируясь на нормативных значениях СП 249.1325800.2016 «Коммуникации подземные. Проектирование и строительство закрытым и открытым способами» (Приказ Минстроя России от 8 июля 2016 г. № 485/пр), рассчитывать эмпирический коэффициент перебора с учётом инженерно-геологических условий по трассе проходки.

На основании проведённых исследований предложена схема расчёта коэффициента перебора, представленная на рис. 5. Эта схема предусматривает расчет коэффициента перебора грунта на основе различных зависимостей, учитывающих однородность грунта, устанавливаемой на основе анализа инженерно-геологических условий в забое.

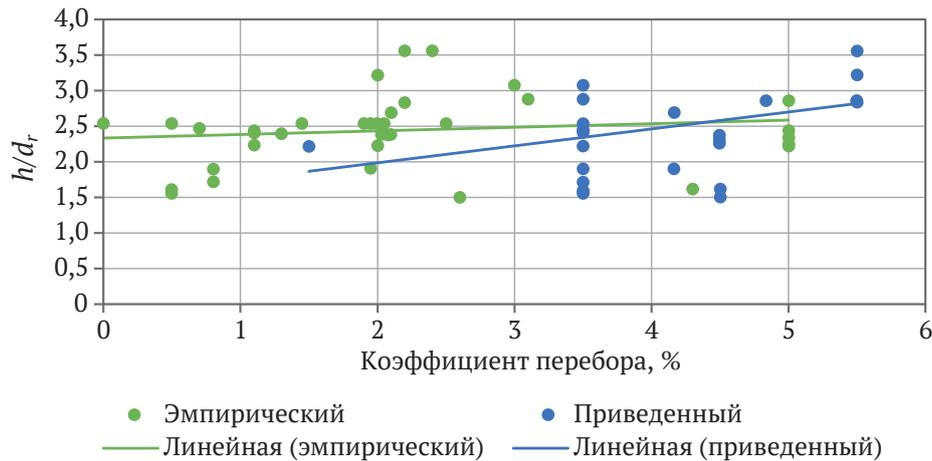


Рис. 3. Обобщённая зависимость эмпирического V_{ie} и приведённого V_{ip} коэффициентов перебора от относительной глубины заложения тоннеля h/d_r при проходке тоннелей диаметром 4–10 м ТПМК с активным пригрузом забоя

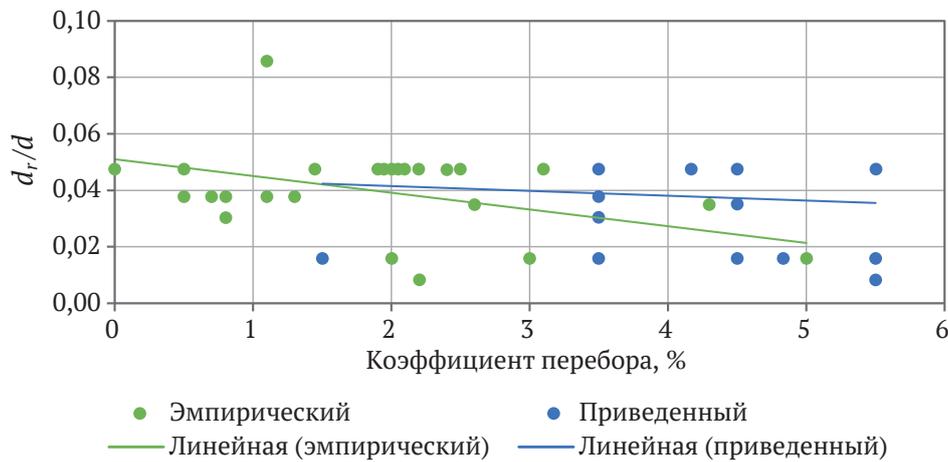


Рис. 4. Обобщённая зависимость эмпирического V_{ie} и приведённого V_{ip} коэффициентов перебора от коэффициента ζ при проходке тоннелей диаметром 4–10 м ТПМК с активным пригрузом забоя

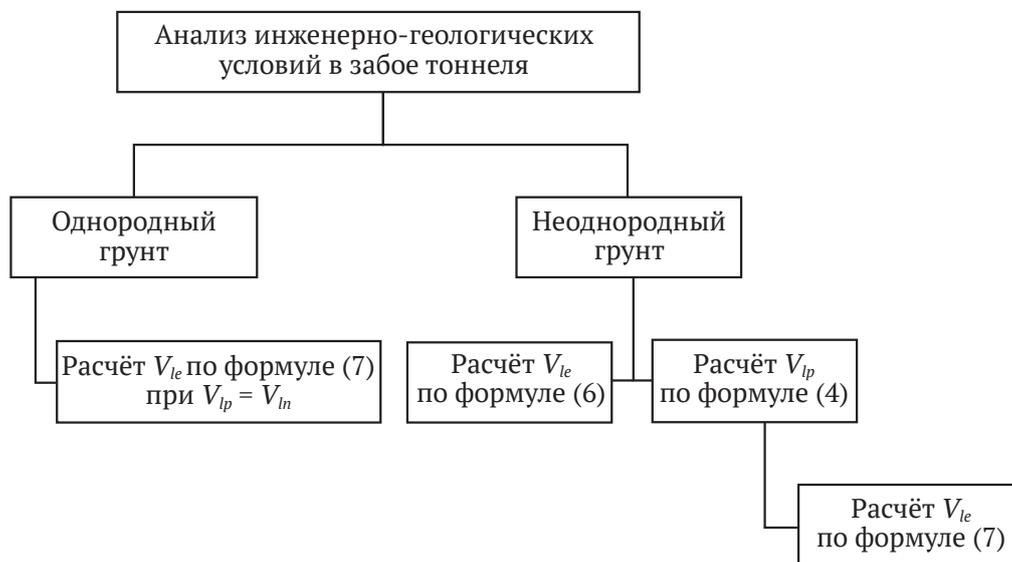


Рис. 5. Схема расчёта эмпирического коэффициента перебора V_{ie}



Заключение

Методом обратного анализа установлены эмпирические величины коэффициента технологического перебора грунта для щитов с условным диаметром 4...10 м. Значение эмпирического коэффициента изменяется в пределах от 0,5 % (для щитов с условным диаметром 10 м) до 5 % (для щитов с условным диаметром 4 м). Показанная на рис. 5 схема расчета позволяет определять коэффициент технологического перебора при проходке тоннелей щитами с активным пригрузом забоя с учётом диаметра ТПМК и типов грунтов, слагающих забой тоннеля (однородные, неоднородные).

Предлагаемый метод был успешно реализован при строительстве перегонных тоннелей Некрасовской и Большой Кольцевой линий Московского метрополитена. Оптимизация мероприятий по обеспечению сохранности существующих зданий в комплексе с научно-техническим сопровождением подземного строительства позволила примерно на 6 мес. сократить срок проходки перегонов между станциями «Окская» и «Нижегородская» Некрасовской линии, а также обеспечить экономию порядка 2,5 млрд руб.

Список литературы

1. Потапова Е. В. Типология сооружений метрополитена для задач классификации геотехнических рисков. *Горные науки и технологии*. 2021;6(1):52–60. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60>
2. Мангушев Р. А., Сапин Д. А., Кириллов В. М. Влияние типа конечных элементов при численном моделировании ограждений котлованов на конечную осадку фундаментов соседних зданий. В: *Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: Материалы международной научно-технической конференции*. Новочеркасск; 2018. С. 708–718.
3. Куликова Е. Ю. Методические основы повышения эколого-технологической надежности городских подземных сооружений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(6–1):176–185. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-176-185>
4. Никифорова Н. С., Коннов А. В. Прогноз деформаций оснований окружающей застройки с учетом защитных мероприятий. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2020;(6):7–12.
5. Gong Zh., Li Y., Liu M., Tang C. A case study for large excavation constructed by open cutting with under mining method in Xuzhou, China. In: *World Tunnel Digital Congress and Exhibition (WTC) 2020 and the 46th General Assembly*. 11–17 September 2020. Kuala Lumpur, Malaysia. 2020. Pp. 721–724.
6. Hewitt P., Suthagaran V. Dealing with the challenges of ground response on deep urban excavations adjacent to underground transport infrastructure in Australia. In: *World Tunnel Digital Congress and Exhibition (WTC) 2020 and the 46th General Assembly*. 11–17 September 2020. Kuala Lumpur, Malaysia. 2020. Pp. 801–806.
7. Konyukhov D. S., Polyankin A. G., Kazachenko S. A. An analysis of the factors which influence geotechnical calculations and monitoring data agreement. In: *Proceedings of International Tunneling Symposium in Turkey. Challenges of Tunneling*. Istanbul, Turkey. 2017. Pp. 51–63.
8. Устинов Д. В. Влияние выбора модели вмещающего массива на результаты моделирования проходки перегонных тоннелей метрополитена. *Геотехника*. 2018;(5–6):34–50.
9. Lee Ch.-J., Wu B.-R., Chiou Sh.-Y. Soil Movements Around a Tunnel in Soft Soils. In: *Proceedings of the National Science Council, Republic of China (A)*. China. 1999;23(2):235–247.
10. Bourget A. P. F., Chiriotti E., Patrineri E. Evolution of risk management during an underground project's life cycle. In: Peila D., Viggiani G., Celestino T. (eds.). *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art*. London: Taylor & Francis Group; 2019. Pp. 4375–4385. <https://doi.org/10.1201/9780429424441-463>
11. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С. *Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства*. Под ред. Мангушева Р. А. М.: Изд-во АСВ; 2017. 168 с.
12. Discussion sessions. Session 2: Bored tunnels: Construction. In: Bakker K. J., Bezuijen A., Broere W., Kwast E. A. (eds.) *Proc. of the 5th International symposium "Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground"*. Netherlands, 2005. Pp. 945–950.
13. Тупиков М. М. *Особенности деформирования грунтового массива и сооружений при строительстве мелкозаглубленных коммуникационных тоннелей в городских условиях*. [Автореферат дис.... канд. техн. наук]. М.: МГУПС, 2011. 24 с.
14. Mahdi S., Gastbled O., Khodr S. Back analysis of ground settlements induced by TBM excavation for the north extension of Paris metro, line 12. In: Peila D., Viggiani G., Celestino T. (eds.). *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art*. London: Taylor & Francis Group; 2019. Pp. 2606–2615. <https://doi.org/10.4324/9781003031635-6>
15. Mahdi S., Gastbled O., Ningre H., Senechal M. Grand Paris Express, Line 15 East – predictive damage analysis combining continuous settlement trough modelling, risk management, automated vulnerability checks and visualization in GIS. In: Peila D., Viggiani G., Celestino T. (eds.). *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art*. London: Taylor & Francis Group; 2019. Pp. 5855–5864. <https://doi.org/10.4324/9781003031871-9>



16. El Houari N., Allal M.A., Abou Bekr N. Numerical simulation of the mechanical response of the tunnels in the saturated soils by Plaxis. *Jordan Journal of Civil Engineering*. 2011;5(1):9–31. URL: https://jjce.just.edu.jo/issues/show_paper.php?pid=171

17. Voznesensky A.S., Kidima-Mbombi L.K. Formation of synthetic structures and textures of rocks when simulating in COMSOL Multiphysics. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):65–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-65-72>

18. Тер-Мартиросян А.З., Кивлюк В.П., Исаев И.О., Шишкина В.В. Определение фактического коэффициента перебора (участок «Косино» – «Юго-Восточная»). *Construction and Geotechnics*. 2021;12(2):5–14. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.2.01>

References

1. Potapova E.V. Typology of metro structures for the tasks of geotechnical risk classification. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):52–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60>

2. Mangushev R.A., Sapin D.A., Kirillov V.M. Effect of finite element type on ultimate subsidence of neighboring building foundations in numerical modeling of shoring of excavation. In: *Soil Mechanics in Geotechnics and Foundation Engineering: Proceedings of the International Research-to-Practice Conference*. Novocheerkassk. 2018. P. 708–718 (In Russ.)

3. Kulikova E.Yu. Methodical principles for improving the ecological and technological reliability of urban underground structures. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(6–1):176–185. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-61-0-176-185>

4. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Predicting deformations of the surrounding buildings foundations with regard to protective measures. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2020;(6):7–12. (In Russ.)

5. Gong Zh., Li Y., Liu M., Tang C. A case study for large excavation constructed by open cutting with under mining method in Xuzhou, China. In: *World Tunnel Digital Congress and Exhibition (WTC) 2020 and the 46th General Assembly*. 11–17 September 2020. Kuala Lumpur, Malaysia. 2020. Pp. 721–724.

6. Hewitt P., Suthagaran V. Dealing with the challenges of ground response on deep urban excavations adjacent to underground transport infrastructure in Australia. In: *World Tunnel Digital Congress and Exhibition (WTC) 2020 and the 46th General Assembly*. 11–17 September 2020. Kuala Lumpur, Malaysia. 2020. Pp. 801–806.

7. Konyukhov D.S., Polyankin A.G., Kazachenko S.A. An analysis of the factors which influence geotechnical calculations and monitoring data agreement. In: *Proceedings of International Tunneling Symposium in Turkey. Challenges of Tunneling*. Istanbul, Turkey. 2017. Pp. 51–63.

8. Ustinov D.V. Impact of the enclosing massif model selection over the results of subway tunnels excavation modelling. *Geotechnics*. 2018;(5–6):34–50. (In Russ.)

9. Lee Ch.-J., Wu B.-R., Chiou Sh.-Y. Soil Movements Around a Tunnel in Soft Soils. In: *Proceedings of the National Science Council, Republic of China (A)*. China. 1999;23(2):235–247.

10. Bourget A.P.F., Chiriotti E., Patrineri E. Evolution of risk management during an underground project's life cycle. In: Peila D., Viggiani G., Celestino T. (eds.). *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art*. London: Taylor & Francis Group; 2019. Pp. 4375–4385. <https://doi.org/10.1201/9780429424441-463>

11. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. *Process subsidence of buildings and structures in the underground construction affected zone*. Moscow: ASV Publishing House; 2017. 168 p. (In Russ.)

12. Discussion sessions. Session 2: Bored tunnels: Construction. In: Bakker K.J., Bezuijen A., Broere W., Kwast E.A. (eds.) *Proc. of the 5th International symposium "Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground"*. Netherlands, 2005. Pp. 945–950.

13. Tupikov M.M. *Peculiarities of straining soil mass and structures during construction of shallow utility tunnels in urban conditions*. [Ph.D. thesis in Engineering Science]. Moscow: MGUPS Publishing House; 2011. 24 p. (In Russ.)

14. Mahdi S., Gastebled O., Khodr S. Back analysis of ground settlements induced by TBM excavation for the north extension of Paris metro, line 12. In: Peila D., Viggiani G., Celestino T. (eds.). *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art*. London: Taylor & Francis Group; 2019. Pp. 2606–2615. <https://doi.org/10.4324/9781003031635-6>

15. Mahdi S., Gastebled O., Ningre H., Senechal M. Grand Paris Express, Line 15 East – predictive damage analysis combining continuous settlement trough modelling, risk management, automated vulnerability checks and visualization in GIS. In: Peila D., Viggiani G., Celestino T. (eds.). *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art*. London: Taylor & Francis Group; 2019. Pp. 5855–5864. <https://doi.org/10.4324/9781003031871-9>

16. El Houari N., Allal M.A., Abou Bekr N. Numerical simulation of the mechanical response of the tunnels in the saturated soils by Plaxis. *Jordan Journal of Civil Engineering*. 2011;5(1):9–31. URL: https://jjce.just.edu.jo/issues/show_paper.php?pid=171



17. Voznesensky A. S., Kidima-Mbombi L. K. Formation of synthetic structures and textures of rocks when simulating in COMSOL Multiphysics. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):65–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-65-72>

18. Ter-Martirosian A. Z., Kivliuk V. P., Isaev I. O., Shishkina V. V. Determination of the actual excess excavation ratio (section “Kosino” – “Yugo-Vostochnaya”). *Construction and Geotechnics*. 2021;12(2):5–14. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.2.01>

Информация об авторе

Дмитрий Сергеевич Конюхов – кандидат технических наук, доцент, Руководитель отдела научного сопровождения строительства, АО «Мосинжпроект», г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8635-232X](https://orcid.org/0000-0001-8635-232X), Scopus ID [6507981388](https://scopus.com/authorid/6507981388); e-mail gidrotehnik@inbox.ru

Information about the author

Dmitrii S. Konyukhov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Head of the Department of Scientific Support for Construction, Mosinzhprouekt JSC, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8635-232X](https://orcid.org/0000-0001-8635-232X), Scopus ID [6507981388](https://scopus.com/authorid/6507981388); e-mail gidrotehnik@inbox.ru

Поступила в редакцию	18.12.2021	Received	18.12.2021
Поступила после рецензирования	05.01.2022	Revised	05.01.2022
Принята к публикации	01.02.2022	Accepted	01.02.2022