



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.2.01

УДК 624.159.2

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕБОРА (УЧАСТОК «КОСИНО» – «ЮГО-ВОСТОЧНАЯ»)

А.З. Тер-Мартirosян<sup>1</sup>, В.П. Кивлюк<sup>2</sup>, И.О. Исаев<sup>2</sup>, В.В. Шишкина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

<sup>2</sup>АО «Мосинжпроект», Москва, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 21 апреля 2021

Принята: 24 мая 2021

Опубликована: 13 июля 2021

#### Ключевые слова:

тоннелирование; щитовая проходка; коэффициент перебора грунта; геодезический мониторинг; зона влияния; осадка земной поверхности; дисперсный грунт; сборная обделка тоннеля; закрытый забой; кривая Гаусса; моделирование; грунтопригруз.

### АННОТАЦИЯ

Ведение тоннелепроходческих работ на любой глубине вызывает деформации земной поверхности и, как следствие, дополнительные перемещения окружающей застройки, а также изменение напряженно-деформированного состояния грунтового массива. При моделировании участка проведения работ для оценки влияния строительства тоннелей необходимо учитывать перебор грунта. Целью данной работы является определение технологического параметра с дальнейшим усреднением и применением при проектировании в дисперсных грунтах.

В статье рассматривается влияние на здания строительства двухпутного тоннеля от ст. «Косино» до ст. «Юго-Восточная» в Plaxis в плоской и пространственной постановке с проектным коэффициентом перебора 1,5 %. Строительство перегонных тоннелей осуществлялось щитом с грунтопригрузом диаметром резания 10,8 м. Максимальная глубина заложения свода тоннеля от земной поверхности составляет порядка 27,0 м, на участке строительства преобладают дисперсные грунты.

Для рассматриваемого участка строительства перегонного тоннеля расчетный коэффициент перебора для двухмерной задачи варьируется в диапазоне от 0,32 до 0,41 %, для пространственной – от 0,52 до 0,78 %. При одинаковой дополнительной осадке здания наблюдается процентный прирост от 62 до 90 % между расчетными параметрами, полученными в схемах в обеих постановках.

Учет расчетных коэффициентов перебора на стадии проектирования, полученных по результатам данного исследования, в схожих инженерно-геологических условиях, способствует рациональному распределению денежных средств, сокращению объемов геотехнического мониторинга и мероприятий по сохранности зданий с соблюдением требуемых норм и техники безопасности.

© ПНИПУ

© Тер-Мартirosян Армен Заверенович – д-р техн. наук, профессор, e-mail: gic-mgsu@mail.ru.

Кивлюк Валерий Петрович – заместитель генерального директора по строительству объектов метрополитена, e-mail: VP@mosinzhproekt.ru.

Исаев Илья Олегович – начальник отдела предпроектной проработки, e-mail: IsaevIO@mosinzhproekt.ru.

Шишкина Виктория Владимировна – инженер 2-й категории, e-mail: Shishkina.VV@mosinzhproekt.ru.

Armen Z. Ter-Martirosyan – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: gic-mgsu@mail.ru.

Valery P. Kivliuk – Deputy Director-General for Subway Construction, e-mail: VP@mosinzhproekt.ru.

Ilya O. Isaev – Head of the Department of Predesign, e-mail: IsaevIO@mosinzhproekt.ru.

Viktoriya V. Shishkina – Engineer of 2nd category, e-mail: Shishkina.VV@mosinzhproekt.ru.

## **DETERMINATION OF THE ACTUAL EXCESS EXCAVATION RATIO (SECTION “KOSINO” – “YUGO-VOSTOCHNAYA”)**

**A.Z. Ter-Martirosian<sup>1</sup>, V.P. Kivliuk<sup>2</sup>, I.O. Isaev<sup>2</sup>, V.V. Shishkina<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation,

<sup>2</sup>Mosinzhproekt” JSC, Moscow, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 21 April 2021

Accepted: 24 May 2021

Published: 13 July 2021

#### *Keywords:*

tunneling; TBM tunneling; ground loss of soil; geodetic monitoring; influence zone; ground surface settlement; dispersed ground; segmental tunnel lining; shield closed face; the Gaussian curve; modeling; earth pressure balance.

### ABSTRACT

Conducting tunneling construction at any depth causes deformations of the earth's surface and, as a result, additional movements of the surrounding buildings, as well as changes in the stress-strain state of the ground mass. When modeling the site of work to assess the impact of the construction of tunnels, it is necessary to take into account the volume loss of soil. The purpose of this work is to determine the technological parameter with further averaging and application in the design of dispersed soils.

The article considers the impact on buildings from the construction of a two-track tunnel from the «Kosino» station to the «Yugo-Vostochnaya» station in Plaxis in a two-dimensional and three-dimensional with a design volume loss of soil of 1.5 %. The construction of the tunnels was carried out by a shield with earth pressure balance with a cutting diameter of 10.8 m. The maximum depth of the tunnel from the ground surface is about 27.0 m, the construction site is dominated by dispersed soils.

For the considered section of the construction of the distillation tunnel, the calculated volume loss of soil for the two-dimensional problem varies in the range from 0.32 to 0.41 %, for the spatial problem – from 0.52 to 0.78 %. With the same additional draft of the building, there is a percentage increase from 62 to 90 % between the calculated parameters obtained in the schemes in both settings.

Taking into account the calculated volume loss of soil at the design stage, obtained from the results of this article, in similar engineering and geological conditions, contributes to the rational distribution of funds, reducing the volume of geotechnical monitoring and measures for the preservation of buildings in compliance with the required standards and safety regulations.

© PNRPU

---

## **Введение**

Строительство метрополитена с каждым годом усложняется по причине строительства перегонных тоннелей и станционных комплексов в районах с более высокой освоенностью. Важно отметить, что строительно-монтажные работы должны сопровождаться соблюдением требований безопасности объектов окружающей застройки [1]. Для создания благоприятных условий строительства тоннелей необходимо выявлять и предупреждать аварийные ситуации, а также обладать современными техническими средствами для исчерпывающего геотехнического мониторинга [2] и быстрой ликвидации нештатных и опасных обстоятельств. Одним из известных случаев экстремальной осадки поверхности земли и железнодорожного полотна вследствие перебора грунта является происшествие при строительстве соединительной ветки на Северо-Восточном участке ТПК в 2017 г. [3]. В.С. Елгаев и Е.Н. Курбацкий в своей работе [4] воздействие щита при проходке на окружающую застройку и массив грунта относят к вибрациям умеренной продолжительности, которые могут способствовать резонансному состоянию несущих конструкций и вызывать разжижение грунтов, в результате чего могут пострадать объекты окружающей застройки и инженерные коммуникации. Подобный опыт и уже полученные знания должны учитываться при разработке новых нормативных документов, усовершенствовании расчетных моделей и технологий освоения подземного пространства. Примером относительно недав-

ней технологии является строительство однопутных тоннелей, которое приводит к сокращению сроков проходки и стоимости работ без ущерба окружающей застройке. Однако завышение технологического, эмпирически расчетного параметра, коэффициента перебора грунта, на стадии разработки проекта приводит к увеличению стоимости строительства. Определение фактического коэффициента перебора на основе эмпирических данных строительства в аналогичных плано-высотных и грунтовых условиях позволяет вычислить его реальное значение для дальнейшего проектирования с целью оптимизации затрат на строительство и мероприятий по сохранности зданий и сооружений.

Мульда оседания земной поверхности была впервые достаточно хорошо исследована Мартосом [5] с целью предположить, что осадки земной поверхности в поперечном сечении тоннеля могут быть представлены кривой Гаусса. Позднее, в 1969 г., Пек [6] и Шмидт<sup>1</sup> представили свою работу и доказали, что перемещения дневной поверхности действительно можно описать кривой нормального распределения.

Проблема теоретического определения смещения грунта от тоннелепроходческих работ является важной задачей уже многие десятилетия, поэтому развитие параметрического исследования, связанного с тоннелированием, получило устойчивое развитие в конце XX в. при строительстве Лондонского метрополитена [7].

Впервые объем накопленного опыта по данным мониторинга земной поверхности позволил впоследствии использовать эти данные для определения величины зоны распространения вертикальных перемещений массива грунта от оси тоннеля.

Нью и Бауэрс [8] описали новую методику, которая позволяет моделировать задачу в трехмерном пространстве с более точным определением расчетной зоны влияния, где в качестве исходных данных необходимо задавать геометрию участка тоннеля и объем перебора грунта, примерные значения которого было определены в лабораторных условиях. Эта модель была подтверждена обширными полевыми измерениями, проведенными во время строительства испытательного тоннеля Хитроу-Экспресс в Лондонском аэропорту. Определением технологического параметра по результатам проектирования и строительства в Лондонской глине Маклинном установлена зависимость [9] объема перебора грунта от устойчивости массива.

Вместе с тем определено, что перебор грунта имеет накопительный характер и складывается из потери объема в забое из-за проникновения грунта в осевом направлении, из-за наклона щита или так называемых «ныряний», в результате снятия усилия от домкрата для продвижения машины до установки блока нового кольца [10], недостаточного заполнения пустот в заобделочное пространство и последующей деформации обделки тоннеля [11].

В работе С.В. Мазейна выведен точный расчет средних прогнозных осадок в центре мульды с учетом коэффициента перебора, корреляционно связанного с давлением пригруза забоя, наклоном щита и скоростью проходки [12]. Дополнительно известно, что наличие в забое смешанных пород в большинстве случаев приводит к повышенному объему перебора, а залегание прочной прослойки грунта над сводом тоннеля свидетельствует о пониженном фактическим параметре [13].

Авторы И.О. Исаев и Р.Ф. Шарафутдинов в своей работе отмечают, что перебор грунта в наибольшей степени зависит от типа оборудования и вида разрабатываемого грунта в забое щита [13]. Также установлено, что коэффициент перебора имеет наиболее выра-

<sup>1</sup> Schmidt B. Settlements and ground movements associated with tunneling in soils. Ph.D. Thesis. University of Illinois, Urbana, 1969.

женную корреляционную зависимость с продолжительностью деформаций грунта [14], потери разрабатываемой породы больше проявляются со стороны слабых пород, что приводит к асимметричной мульде оседания [15].

По результатам численного моделирования и данным геотехнического мониторинга Л.А. Строкова определила фактический коэффициент перебора грунта и установила, что для более точного пересчета параметра и прогноза необходимо использовать упругопластическую модель с изотропным упрочнением с учетом жесткости малых деформаций (HSS – hardening soil with small – strain stiffness) [16].

Благодаря научным работам других зарубежных авторов описаны зависимости коэффициента перебора и глубины залегания тоннеля [17], а также коэффициента перебора и параметра ширины зоны влияния [18], зависящего от типа грунта<sup>2</sup>. Установлено, что при уменьшении данных параметров происходит приращение объема перебора грунта.

Ранее авторами в статьях по смежным этапам проводилось определение расчетного коэффициента перебора с помощью данных геотехнического мониторинга, описывались факторы, влияющие на его величину, задаваемую при проектировании, также методы его определения.

Авторами отмечалось, что дополнительные осадки зданий при проектном коэффициенте перебора в двухмерной постановке значительно выше, чем в трехмерной [19], поэтому завышение данного параметра наиболее выражено в задачах в плоской постановке.

Дополнительно установлено, что по результатам пересчета коэффициент варьируется в пределах от 0,1 до 1,3 %, [20] и, как правило, его значение превышает 1 % с обеспеченностью 0,1.

Целью настоящего исследования является дальнейшая корректировка технологического параметра, при строительстве двухпутного тоннеля с помощью ТПМК диаметром резания 10 м в программном комплексе Plaxis. Данные, изложенные в этой статье, могут также использоваться для составления нормативной документации, определяющей коэффициент перебора для дисперсных грунтов.

## **Материалы и методы**

В данной статье рассматривается участок строительства перегонного двухпутного тоннеля от переходной камеры за ст. «Косино» до ст. «Юго-Восточная» на ПК 70.00 до ПК 79.00 с помощью тоннелепроходческого механизированного комплекса Herrenknecht TMB EPB 10850 с грунтопригрузом. Диаметр резанья 10 820 мм. Диаметры обделки: наружный – 10 500 мм, внутренний – 9600 мм.

В геологическом строении преимущественно располагаются пески разной крупности, влажные, реже – супеси пластичные и суглинки тугопластичные, характеризующиеся как слабо- и среднепучинистые (рис. 1).

Оценка влияния от строительства тоннеля осуществлялась в Plaxis в плоской и пространственной постановке с проектным коэффициентом перебора 1,5 %. Результаты расчетов представлены в табл. 1. На рис. 2 приведен план участка трассы со зданиями. В качестве примера расчетных схем на рис. 3, 4 представлены плоская и объемная модели со зданием по адресу: ул. Ферганская, д. 25, стр. 2 (№ 2 на плане).

<sup>2</sup> Moller S.C. Tunnel induced settlements and structural forces in linings. Stuttgart: Sven Christian Moller Publ., 2006.

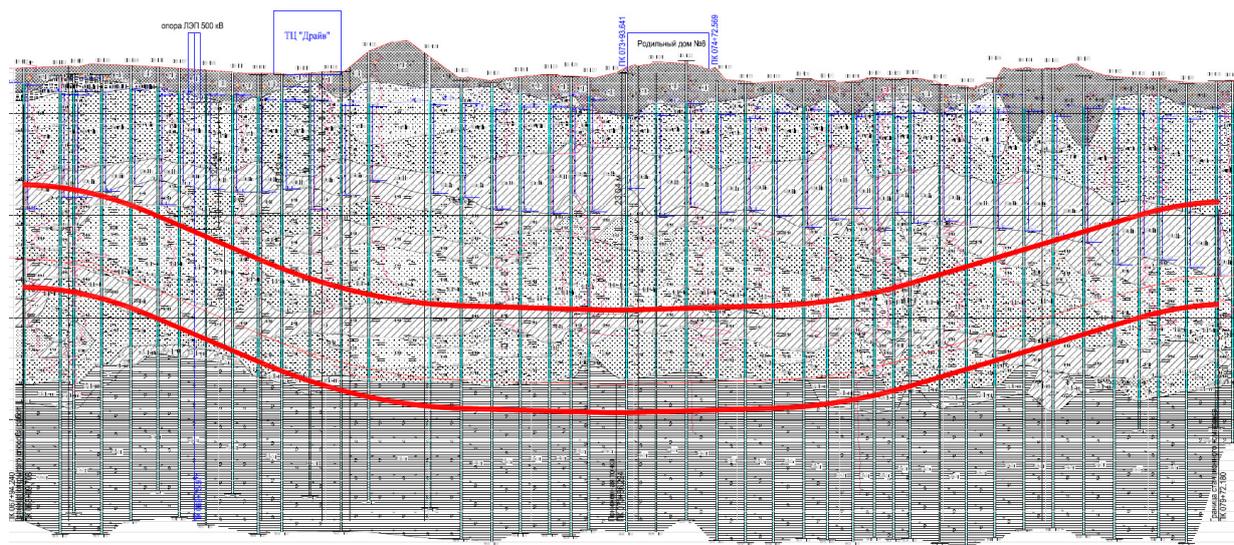


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез с продольным профилем трассы  
 Fig. 1. Engineering and geological section with longitudinal profile of track

Таблица 1

Расчетные дополнительные перемещения зданий и сооружений

Table 1

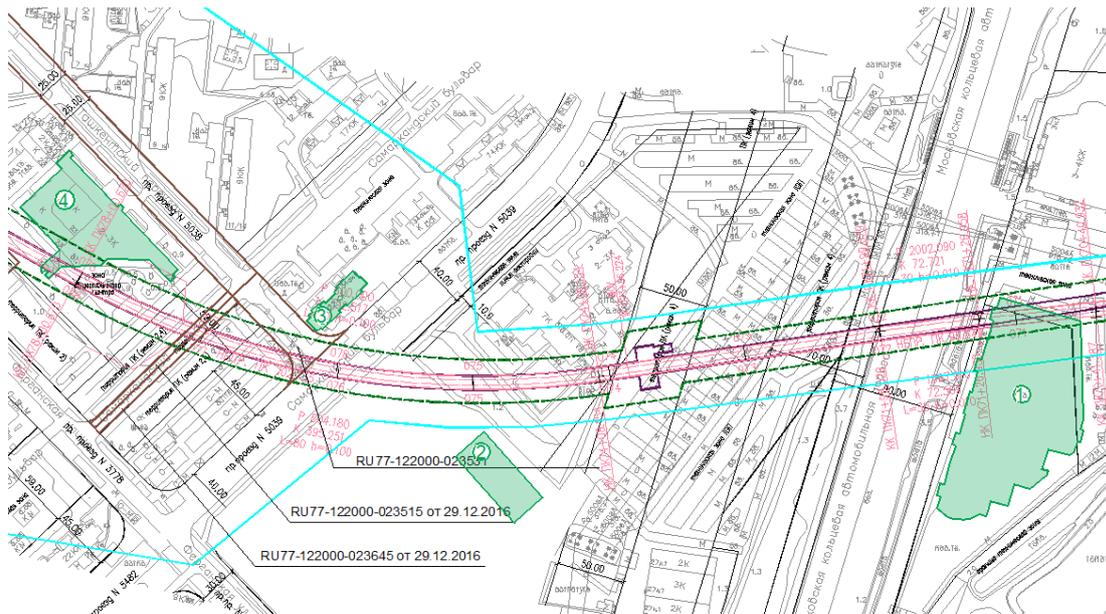
Estimated additional movement of buildings and structures

Номер на плане	Адрес здания или сооружения	Номер сечения	Глубина заложения до оси тоннеля, м	Расстояние от здания до оси тоннеля в плане, м	Осадка в ПВК Plaxis 2D, мм	Осадка в ПВК Plaxis 3D, мм
1	МКАД, 8-й километр, д. 3, к. 2	1–1	25,6	0*	32,6	24,8
2	Ул. Ферганская, д. 25, стр. 2	2–2	27,3	35,2	2,2	1,4
3	Самаркандский бульвар, д. 134, к. 5	3–3	26,4	23,2	9,1	6,7
4	Ул. Ферганская, д. 23	4–4	22,2	0*	28,0	22,6

Приведенные в табл. 1 данные подтверждают завышение осадок здания в плоской постановке. Дополнительно видна зависимость осадки фундамента от расстояния между зданием и тоннелем в плане (здание находится над тоннелем).

На время строительства тоннеля были выполнены работы по наблюдению за изменением планово-высотного положения несущих конструкций зданий и сооружений с целью фиксации деформационных процессов на ранней стадии, чтобы в случае приближения к предельным значениям выполнить комплекс противоаварийных мероприятий. Фактическая осадка фундамента, по которой осуществлялся пересчет параметра, представлена в табл. 2.

Началом работ по мониторингу считается приближение забоя до 50 м к габаритам зданий, отдаление забоя более 50 м от здания является моментом окончания работ [4].



Условные обозначения:

-  – контур здания, на которое оценивается влияние от строительства
- 075 – пикет перегонных тоннелей

Рис. 2. План трассы со зданиями  
 Fig. 2. Road plan with buildings

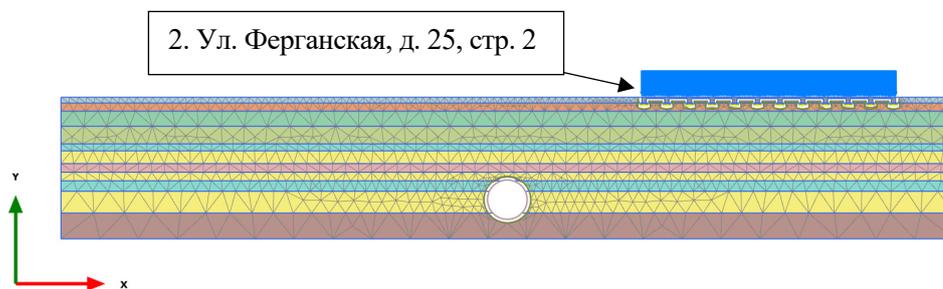


Рис. 3. Двухмерная расчетная схема сечения 2–2 в створе здания, ул. Ферганская, д. 25, стр. 2  
 Fig. 3. Two-dimensional estimated scheme of the section 2–2 within the building, Ferganskaya st., Bld. 25, Pde. 2

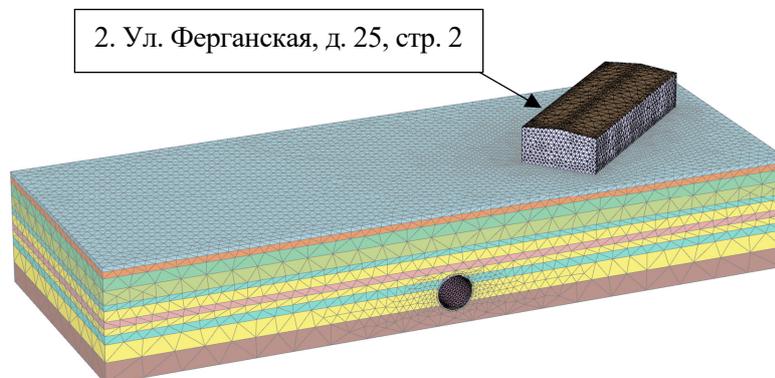


Рис. 4. Трехмерная расчетная схема сечения 2–2 в створе здания, ул. Ферганская, д. 25, стр. 2  
 Fig. 4. Three-dimensional estimated scheme of the section 2–2 within the building, Ferganskaya st., Bld. 25, Pde. 2

Таблица 2

Фактические вертикальные перемещения зданий и сооружений

Table 2

Actual vertical displacements of buildings and structures

Номер на плане	Адрес здания или сооружения	Фактическое вертикальное перемещение, мм
1	МКАД, 8-й километр, д. 3, к. 2	6,7
2	Ул. Ферганская, д. 25, стр. 2	1,8
3	Самаркандский бульвар, д. 134, к. 5	1,8
4	Ул. Ферганская, д. 23	3,5

### Результаты исследования

По результатам мониторинга, отражающего реальные перемещения фундаментов здания, была осуществлена корректировка коэффициента перебора методом постепенных итераций. Расчетный коэффициент перебора каждой расчетной схемы для двухмерной и трехмерной задачи представлен в табл. 3.

Таблица 3

Данные обратного расчета

Table 3

Data back calculation

Номер на плане	Адрес здания или сооружения	$C_{ref}$ проектный	$C_{ref}$ расчетный, Plaxis 2D	$C_{ref}$ расчетный, Plaxis 3D	Процентный прирост, %
1	МКАД, 8-й километр, д. 3, к. 2	1,5	0,35	0,61	74,3
2	Ул. Ферганская, д. 25, стр. 2	1,5	1,24	2,35	89,5
3	Самаркандский бульвар, д. 134, к. 5	1,5	0,41	0,78	90,2
4	Ул. Ферганская, д. 23	1,5	0,32	0,52	62,5

Анализ результатов табл. 3 позволяет отметить, что расчетный коэффициент перебора для двухмерной постановки преимущественно варьируется в пределах от 0,35 до 0,64 %, а для трехмерной постановки – от 0,52 до 0,79 %. Из общей статистики выбивается коэффициент перебора для здания по адресу: ул. Ферганская, д. 25, стр. 2 (№ 2 на плане). Это можно объяснить развитием дополнительных деформаций, близких к прогнозным значениям вследствие повторного запуска ТПМК после его остановки для замены режущего органа, что объясняет соответствующий коэффициент перебора.

### Заключение и обсуждение

Согласно данным геотехнического мониторинга можно сделать вывод о завышении расчетных значений вертикальных перемещений фундамента здания на стадии проектирования при использовании в расчетах значений коэффициента перебора, представленных в действующей справочной и нормативной литературе.

Расчетный коэффициент перебора для двухмерной постановки, согласно обратным расчетам по результатам фактического мониторинга осадок, варьируется в диапазоне от 0,32 до 0,41 %, для трехмерной – от 0,52 до 0,78 %.

Между расчетным значением перебора для двухмерной и трехмерной постановки наблюдается прирост от 62,5 до 90,2 %. Наименьшая разница для двух методов численного моделирования наблюдается в расчетных схемах, где здание располагается над тоннелем.

Осадки, полученные в расчетных схемах со зданием по адресу: ул. Ферганская, д. 25, стр. 2 (№ 2 на плане), не учитывались в статистических данных в связи с превышением им пределов варьирования по причине остановки ТПМК на данном участке. Рекомендуется осуществлять остановку тоннелепроходческого комплекса только в крайних случаях. Замену режущего органа и другие технологические остановки ТПМК производить в местах, свободных от застройки.

Дополнительно рекомендуется при моделировании задачи по определению влияния закрытой проходки на здания и сооружения повышенного уровня ответственности в рамках оценки рисков учитывать коэффициент перебора, представленный в действующей нормативной литературе.

Данная статья является заключительной среди работ, посвященных корректировке коэффициента перебора в дисперсных грунтах. По результатам этой и предыдущих работ [19, 20] можно сделать вывод о явном приросте в процентном соотношении между расчетными коэффициентами, полученными по результатам корректировки в плоской и пространственной модели. Также можно отметить меньшее расхождение между параметрами, полученными в схемах, где здание находится в пределах проходки.

## **Библиографический список**

1. Анализ применения активных и пассивных методов защиты существующей застройки при подземном строительстве / В.А. Ильичев, Н.С. Никифорова, Ю.А. Готман, М.М. Тупиков, Е.Ю. Трофимов // *Жилищное строительство*. – 2013. – № 6. – С. 25–27.
2. Гаврилов А.Н., Грязнова Е.М. Экспресс методы в геотехническом мониторинге // *Вестник МГСУ*. – 2010. – Вып. 4. – С. 61–66.
3. Мазеин С.В., Вознесенский А.С., Панкратенко А.Н. Инженерные изыскания и геотехнические проблемы для строительства тоннелей с помощью тоннельных буровых машин (ТБМ) под городской застройкой // *Геотехника*. – 2017. – № 4. – С. 42–50.
4. Елгаев В.С., Курбацкий Е.Н. Воздействие на здания при проходке тоннелей // *Мир транспорта*. – 2012. – Т. 10, № 2 (40). – С. 162–167.
5. Martos F. Concerning an approximate equation of the subsidence trough and its time factors. In: *International Strata Control Congress, Leipzig // Deutsch Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Section für Bergbau*. – 1958. – P. 191–205.
6. Peck R.B. Deep excavations and tunneling in soft ground. In: *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City State-of-the-Art volume*. – 1969. – P. 225–290.
7. O'reilly M.P., New B.M. Settlements above tunnels in the United Kingdom their magnitude and prediction // *Proc. of Tunnelling'82 Symposium, London*. – 1982. – P. 173–181.
8. New B.M., Bowers K.H. Ground. Movement Model Validation at the Heathrow Express Trial Tunnel // *Tunneling 94*. – 1994. – P. 301–328.
9. Macklin S.R. The prediction of volume loss due to tunnelling in overconsolidated clay based on heading geometry and stability number // *Ground engineering*. – 1999. – Vol. 32 (4). – P. 30–33.

10. Standing J.R., Burland J.B. Unexpected tunnelling volume losses in the Westminster area // *London. Geotechnique* 56. – 2006. – No. 1. – P. 11–26. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.1.11>
11. Chakeri H., Ünver B. A new equation for estimating the maximum surface settlement above tunnels excavated in soft ground // *Environ Earth Sci* 71. – 2014. – P. 3195–3210. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2707-2>
12. Мазеин С.В. Разработка математических моделей для прогнозных осадок дневной поверхности по данным контроля грунта и технологических показателей ТПМК // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2009. – № 2. – С. 98–109.
13. Исаев О.Н., Шарафутдинов Р.Ф. Перебор грунта при строительстве коммуникационных тоннелей щитовым способом // *Механизация строительства*. – 2012. – № 6. – С. 2–7.
14. Петрухин В.П., Исаев О.Н., Шарафутдинов Р.Ф. Геотехнический прогноз при строительстве коммуникационных тоннелей методом щитовой проходки // *Вестник НИЦ «Строительство»*. – 2014. – № 10. – С. 114–131.
15. Карасев М.А. Анализ причин деформации земной поверхности и характер формирования мульды оседания, вызванной строительством транспортных тоннелей // *Записки Горного института*. – 2011. – Т. 190. – С. 163–170.
16. Строкова Л.А. Моделирование оседания поверхности при проходке туннеля щитовым способом // *Известия Томского политехнического университета*. – 2008. – № 1. – С. 45–50.
17. Ngan M., Broere W., Bosch J. Volume loss in shallow tunnelling. // *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*. – 2016. – № 59. – P. 77–90. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2016.06.011>.
18. Nor Aziah Ishak, Rini A. Abdullah. Review of volume loss with respect to the tunnel construction techniques, soil properties and geometrical condition. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/318468058\\_REVIEW\\_OF\\_VOLUME\\_LOSS\\_WITH\\_RESPECT\\_TO\\_THE\\_TUNNEL\\_CONSTRUCTION\\_TECHNIQUES\\_SOIL\\_PROPERTIES\\_AND\\_GEOMETRICAL\\_CONDITION](https://www.researchgate.net/publication/318468058_REVIEW_OF_VOLUME_LOSS_WITH_RESPECT_TO_THE_TUNNEL_CONSTRUCTION_TECHNIQUES_SOIL_PROPERTIES_AND_GEOMETRICAL_CONDITION) (дата обращения: 20.04.2021).
19. Тер-Мартиросян А.З., Исаев И.О., Алмакаева А.С. Определение фактического коэффициента перебора (участок «Стахановская улица» – «Нижегородская улица» // *Вестник МГСУ*. – 2020. – Т. 15, вып. 12. – С. 1644–1653. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.12.1644-1653>
20. Определение фактического коэффициента перебора грунта путем анализа данных мониторинга / А.З. Тер-Мартиросян, Н.Ф. Бабушкин, И.О. Исаев, В.В. Шишкина // *Геотехника*. – 2020. – Т. 7, № 1. – С. 34–42. <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2020-12-1-6-14>.

## References

1. Ilyichev V.A., Nikiforova N.S., Gotman Yu.A., Tupikov M.M., Trofimov E.Yu. Analysis of the use of active and passive methods of protecting existing buildings in underground construction. *Zhilishchnoe stroitelstvo*, 2013, no. 6, pp. 25–27.
2. Gavrillov A.N., Gryaznova E.M. Express methods in geotechnical monitoring. *Vestnik MGSU*, 2010, iss. 4, pp. 61–66.
3. Mazein S.V., Voznesensky A.S., Pankratenko A.N. Engineering surveys and geotechnical problems for tunnel construction using tunnel boring machines (TBM) under urban development. *Geotechnics*, 2017, no. 4, pp. 42–50.

4. Elgaev V.S., Kurbatsky E.N. Impact on buildings during tunneling. *Mir transporta*, 2012, vol. 10, no. 2 (40), pp. 162–167.
5. Martos F. Concerning an approximate equation of the subsidence trough and its time factors. *International Strata Control Congress*, Leipzig. Deutsch Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Section für Bergbau, 1958, pp. 191–205.
6. Peck R.B. Deep excavations and tunneling in soft ground. *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City State-of-the-Art volume, 1969, pp. 225–290.
7. O'Reilly M.P., New B.M. Settlements above tunnels in the United Kingdom their magnitude and prediction. *Proc. of Tunnelling'82 Symposium*, London, 1982, pp. 173–181.
8. New B.M., Bowers K.H. Ground. Movement model validation at the heathrow express trial tunnel. *Tunneling* 94, 1994, pp. 301–328.
9. Macklin S.R. The prediction of volume loss due to tunnelling in overconsolidated clay based on heading geometry and stability number. *Ground engineering*, 1999, no. 32 (4), pp. 30–33.
10. Standing J.R., Burland J.B. Unexpected tunnelling volume losses in the Westminster area. *Geotechnique* 56, 2006, no. 1, pp. 11–26. doi: <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.1.11>.
11. Chakeri H., Ünver B. A new equation for estimating the maximum surface settlement above tunnels excavated in soft ground. *Environ Earth Sci* 71, 2014, pp. 3195–3210. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2707-2>.
12. Mazein S.V. Development of mathematical models for predictive precipitation of the daily surface according to the data of soil control and technological indicators of TBM. *Gorny informatsionno-analiticheskiy bulletin*, 2009, no. 2, pp. 98–109.
13. Isaev O.N., Sharafutdinov R.F. Volume loss of soil in the construction of communication tunnels by shield method. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*, 2012, no. 6, p. 2–7.
14. Petrukhin V.P., Isaev O.N., Sharafutdinov R.F. Geotechnical predict in the construction of communication tunnels by the shield tunneling. *Vestnik NIC «Stroitel'stvo»*, 2014, no. 10, pp. 114–131.
15. Karasev M.A. Analysis of the causes of deformation of the earth's surface and the nature of the formation of the sedimentation mould caused by the construction of transport tunnels. *Journal of Mining Institute*, 2011, vol. 190, pp. 163–170.
16. Strokova L.A. Modeling of surface subsidence during tunneling by shield tunneling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, no. 1, p. 45–50.
17. Ngan M., Broere W., Bosch J. Volume loss in shallow tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2016, no. 59, pp. 77–90. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2016.06.011>.
18. Nor Aziah Ishak, Rini A. Abdullah. Review of volume loss with respect to the tunnel construction techniques, soil properties and geometrical condition. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/318468058\\_REVIEW\\_OF\\_VOLUME\\_LOSS\\_WITH\\_RESPECT\\_TO\\_THE\\_TUNNEL\\_CONSTRUCTION\\_TECHNIQUES\\_SOIL\\_PROPERTIES\\_AND\\_GEOMETRICAL\\_CONDITION](https://www.researchgate.net/publication/318468058_REVIEW_OF_VOLUME_LOSS_WITH_RESPECT_TO_THE_TUNNEL_CONSTRUCTION_TECHNIQUES_SOIL_PROPERTIES_AND_GEOMETRICAL_CONDITION) (accessed 20 April 2021). – <https://www.researchgate.net/>.
19. Ter-Martirosyan A.Z., Isaev I.O., Almakaeva A.S. Determination of the actual excess excavation ratio (section "Stakhanovskaya Street" – "Nizhegorodskaya Street". *Vestnik MGSU*, 2020, vol. 15, iss. 12, pp. 1644–1653. doi: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.12.1644-1653>.
20. Ter-Martirosyan A.Z., Babushkin N.F., Isaev I.O., Shishkina V.V. Determination the actual ground loss of soil by analyzing monitoring data. *Geotechnics*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 34–42. doi: <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2020-12-1-6-14>.