Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering https://t-s.today
2022, Том 9, № 4 / 2022, Vol. 9, No 4 https://t-s.today/issue-4-2022.html
URL: https://t-s.today/PDF/01SATS422.pdf
DOI: 10.15862/01SATS422 (https://doi.org/10.15862/01SATS422)

Защита зданий и тоннельных сооружений от сверхнормативных осадочных деформаций в зоне влияния строительства котлованов

[1]Харченко А.И., [2]Кунеевский А.А., [3]Пискунов А.А.,
[1]Харченко И.Я., [3]Пестрякова Е.А., [3]Мазур Е.В., [3]Телятникова Н.А., [3]Немцова С.А.

[1]ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия
[2]ООО «Эссет менеджмент», Москва, Россия
[3]ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Немцова Софья Александровна, e-mail: nemtsova.sa@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается процесс выполнения строительно-монтажных работ по сооружению котлованов рядом с тоннелями действующего метрополитена в плотной городской застройке. Авторами рассматривается один из наиболее эффективных способов снижения негативного воздействия от устройства котлована на два действующих однопутных тоннеля — компенсационное нагнетание.

Компенсационное нагнетание выполняется с целью обеспечения сохранности и эксплуатационной надежности существующих объектов метрополитена, расположенных в зоне влияния строящихся объектов, в рассматриваемом авторами случае — в зоне влияния сооружаемого котлована. В статье изложены основные положения по выполнению буро-инъекционных работ.

Технологический процесс производства работ на основе компенсационного нагнетания способен обеспечивать практически полное отсутствие осадок при эксплуатации тоннелей в процессе сооружения котлована. Сохранение тоннелей в планово-высотном положении осуществляется на основе мониторинга за состоянием расчетного уровня предварительного напряжения в объёме грунта, который размещен между тоннелем и ограждением котлована.

Авторами описаны конструктивно-технологические особенности применения компенсационного нагнетания для обеспечения эксплуатационной надёжности тоннелей метрополитена, представлено расчётное обоснование основных технологических параметров, созданы расчетные схемы, представлены результаты расчетов в виде таблиц, описана технология выполнения работ. Проведен анализ результатов, для которого использовались значения предварительного напряжения в грунте, а также возможные перемещения рельсовых путей в перегонных тоннелях при разработке котлована под защитой компенсационного нагнетания.

Предложенные авторами проектные решения, основанные на технологии компенсационного нагнетания для создания предварительного напряжения в грунте, позволяют обеспечить сохранение эксплуатационного режима тоннельных сооружений вблизи строящихся объектов.

Ключевые слова: тоннель метрополитена; эксплуатационная надежность метрополитена; компенсационное нагнетание; грунтовый массив; плотная городская застройка; осадочные деформации; буро-инъекционные работы

Buildings and tunnel structures protection from excess sedimentary deformations in the area of foundation pits construction influence

[1]Aleksei I. Kharchenko, [2]Aleksei A. Kuneevskii, [3]Aleksandr A. Piskunov, [1]Igor Ya. Kharchenko, [3]Ekaterina A. Pestryakova, [3]Evgeny V. Mazur, [3]Natalia A. Telyatnikova, [3]Sofya A. Nemtsova

[1]Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia
[2]LLC «Asset management», Moscow, Russia
[3]Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Corresponding author: Sofya A. Nemtsova, e-mail: nemtsova.sa@yandex.ru

Abstract. The article discusses the process of performing construction and installation work on the foundation pits construction near the existing metropolitan railway tunnels in dense urban areas. The authors consider one of the most effective ways to reduce the negative impact of excavation on two existing single-track tunnels — compensation grouting.
Compensation grouting is performed to ensure the safety and operational reliability of existing metropolitan railway facilities located in the area of influence of objects under construction, in the case considered by the authors, in the area of influence of the foundation pit being constructed. The article outlines the main provisions for the implementation of drill and injects work.
The technological process of work performance based on compensation grouting is capable of ensuring the almost complete absence of sediment during the operation of tunnels during the construction of the excavation. Preservation of tunnels in the planned — high-altitude position is carried out based on monitoring the state of the calculated level of pre-stress in the soil volume, which is located between the tunnel and the excavation fence.
The authors describe the design and technological features of the use of compensation grouting to ensure the metropolitan railway tunnels' operational reliability, provide a calculation justification for the main technological parameters, create design schemes, present the results of the calculation in the form of tables, and describe the technology for performing work. The results analysis was performed, for which the values of the prestress in the soil were used, as well as the possible movements of the rail tracks in the distillation tunnels during the excavation under the compensation grouting protection.
The design solutions proposed by the authors, based on the compensation grouting technology to create preliminary stress in the soil, make it possible to ensure the maintenance of the operating regime of tunnel structures near the objects under construction.

Keywords: subway tunnel; the operational reliability of the subway; compensation grouting; soil massif; dense urban development; sedimentary deformations; drilling-injection works

Введение

Introduction

Освоение подземного пространства в условиях плотной городской застройки неизбежно сопровождается влиянием на существующие здания и сооружения, что предусматривает применение различных конструктивных и технологических решений по их защите от развития сверхнормативных осадочных деформаций. Исходя из анализа международного и отечественного опыта, наиболее эффективным мероприятием, обеспечивающим защиту сооружений от осадочных деформаций, является применение метода компенсационного нагнетания [1–4]. Опыт применения метода компенсационного нагнетания в России подтвердил его эффективность в сравнении с другими геотехническими мероприятиями для превентивной защиты сооружений от сверхнормативных осадочных деформаций [5–7]. Выполнению буро-инъекционных работ по технологии компенсационного нагнетания предшествует комплекс подготовительных мероприятий, предусматривающий тщательное обследование состояния основных несущих конструкций зданий и сооружений, нуждающихся в защите развития возможных деформаций или подъёме, выполнение инженерно-геологических и геофизических исследований оснований фундамента с определение фактических физико-механических характеристик грунта. На этой основе выполняется разработка математической модели, адекватно описывающей формирование и развитие напряженно-деформируемого состояния (далее — НДС) грунтового массива на всех этапах процесса компенсационного нагнетания, расчётное обоснование технологических параметров (количество инъекционной смеси, давление и интенсивность нагнетания, распределение инъекционной смеси по площади и высоте грунтового основания), а также прогноз развития перемещений основных строительных конструкций [8; 9].

Компенсации дефицита грунта в основании существующих зданий и сооружений, сформировавшегося в результате земляных работ, суффозионных процессов и т. п. выполняется практически в любых нескальных грунтах путём нагнетания специальных инъекционных смесей, в установленном порядке и в соответствии с обоснованным расчетом технологическим регламентом.

Инъекционные растворы на минеральной основе должны иметь заданную вязкость, пенетрационную способность, высокую седиментационную устойчивость и управляемую кинетику затвердевания. Это позволяет сформировать расчётное напряженно-деформируемое состояние массива грунта, обеспечивающее управляемый подъём надземного сооружения, по принципу использования эффекта

гидродомкрата, размещённого под всей площадью объекта. При этом возможно многократное повторное выполнение инъекций с технологическими перерывами между ними, необходимыми для затвердевания раствора после инъектирования во вмещающий массив на предыдущей стадии [10; 11]. Как показала практика геотехнического строительства в России, важным преимуществом технологии компенсационного нагнетания, по сравнению с другими методами защиты сооружений, является возможность прогнозирования с высокой степенью достоверности процессов развития вероятных деформаций и технологических параметров нагнетания как аналитическими, так и численными методами расчетов практически для всех видов грунтов [12; 13].

1. Конструктивно-технологические особенности применения компенсационного нагнетания для обеспечения эксплуатационной надёжности тоннелей метрополитена

1. Constructional and technological characteristics of the use of compensation grouting to ensure the operational reliability of metropolitan railway

Разработка котлованов в непосредственной близости от объектов метрополитена предполагает разработку и реализацию комплекса мероприятий, исключающих вертикальное или горизонтальное смещение действующих тоннельных как в процессе устройства ограждений котлованов, так и в процессе выполнения земляных работ и устройства распорных металлоконструкций. С этой целью, между ограждением котлована и действующими тоннелями предусматривается устройство вертикального компенсационного экрана. В случае, если компенсационное нагнетание выполняется только вследствие установленных, по итогам мониторинга, перемещений тоннелей, учитывая значительную инерционность системы, оперативно обеспечить их сохранение в проектном положении не представляется возможным. Наиболее эффективным защитным мероприятием является формирование начального предварительно напряженного состояния в массиве грунта величиной до 0,5 МПа, которое является безопасным как для тоннельных сооружений, так и для ограждений котлована. В случае недостаточной устойчивости или сплошности ограждения котлована, снижение величины сформированного предварительного напряжения в структуре является характерным признаком последующего перемещения грунта и действующих тоннельных сооружений. В этой связи, поддержание заданной величины предварительного напряжения путём нагнетания

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

инъекционной смеси, обеспечивает надёжное сохранение тоннельных сооружений в проектном положении.

В качестве дополнительного мероприятия по контролю за перемещением грунтового массива предусматривается устройство инклинометрических скважин, которые располагаются между инъекционными скважинами компенсационного нагнетания и перегонными тоннелями линии метрополитена. Такое расположение скважин инклинометрии позволяет определить происходящие текущие деформации в грунтовом массиве раньше, чем волна распространения напряжённо-деформированного состояния грунта при выполнении строительных работ дойдёт до конструкций тоннелей и окажет на них влияние.

Вышеизложенная схема компенсационного нагнетания была реализована при защите от возможных перемещений действующих тоннельных сооружений в ходе разработки стартового котлована, размещённого по адресу: г. Москва, проспект Андропова, владение 39, строение 65. Котлован имел форму неправильного многоугольника с шириной до 80 м и длиной до 245 м. Общая протяженность ограждения строительной площадки составляла 565 п.м. В непосредственной близи от проектируемого котлована расположены два перегонных однопутных тоннеля $Д_н/Д_{вн}$ = 5,5/5,1 Замоскворецкой линии. Обделка перегонных тоннелей кругового очертания сборная железобетонная. Кольцо обделки имеет ширину 1,0 м и состоит из 8 блоков (6 рядовых, 1 лотковый, 1 замковый).

Ограждение котлована сооружалось из буросекущихся свай диаметром 1200 мм. Заглубление ограждающей конструкции составляет 43,6 м при глубине разработки котлована до 37,2 м. Устойчивость ограждения котлована обеспечивалась двумя типами крепления, состоящими из пяти ярусов стальных труб с опорными поясами из двутавров.

По результатам оценки влияния сооружения котлована на окружающую застройку и выполненного численного моделирования, максимальный радиус зоны влияния составил 80,0 м. По результатам выполненных численных расчетов, максимальные дополнительные горизонтальные и вертикальные перемещения обделки существующих перегонных тоннелей Замоскворецкой линии, вызванные устройством котлована, составили 35 и 41 мм соответственно. Следствием этого является снижение коэффициента запаса по прочности обделки существующих перегонных тоннелей с 1,03 до 0,75, т. е. прочность не обеспечена.

Резюмируя, применение технологии компенсационного нагнетания является обоснованным и наиболее эффективным мероприятием, обеспечивающим их эксплуатационную надёжность действующих тоннельных сооружений.

2. Расчётное обоснование основных технологических параметров компенсационного нагнетания

2. Justifying calculations of the main compensation grouting technological parameters

Для определения деформаций грунтового массива, конструкций существующих перегонных тоннелей при выполнении мероприятий по обеспечению их сохранности, были выполнены численные расчеты в трехмерной постановке методом конечных элементов в программном комплексе ZSoil. На рисунках 1 и 2 показаны общий вид расчетной схемы конструкций и вмещающего грунтового массива для двух вариантов мероприятий по сохранности. Конструкции смоделированы в соответствии с их фактическим расположением. Численный расчет учитывает последовательность строительства с целью учета в расчете на всех стадиях предшествующего изменения напряженно-деформированного состояния и развития зон предельного состояния грунта.

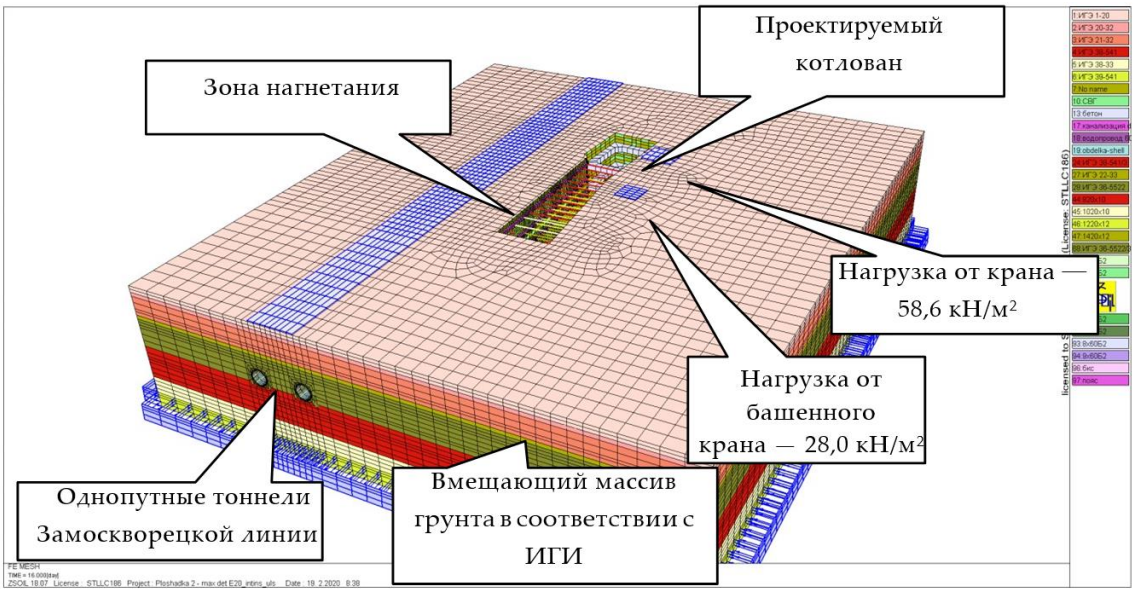


Рисунок 1. *Общий вид расчетной схемы на момент завершения строительства (разработано авторами)*

Figure 1. *General view of the design scheme at the time of construction completion (developed by the authors)*

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

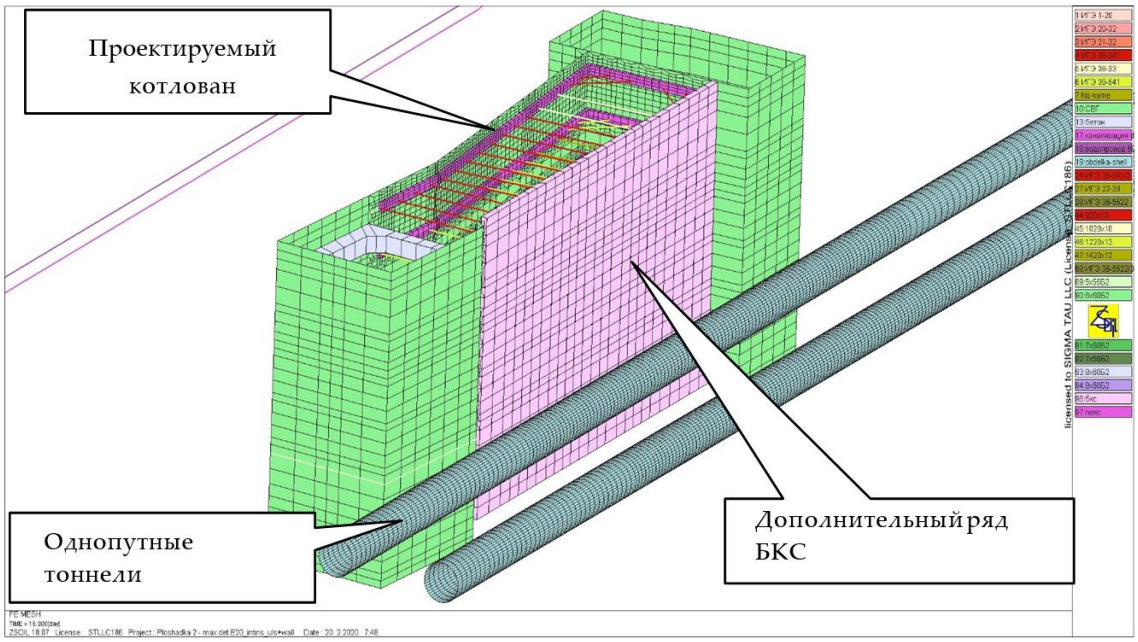


Рисунок 2. *Общий вид расчетной схемы на момент завершения строительства (разработано авторами)*

Figure 2. *General view of the design scheme at the time of completion of construction (developed by the authors)*

Компенсационное нагнетание моделируется увеличением объёмов конечных элементов, находящихся в зоне расположения инъектора, на заданный объем нагнетания. Для моделирования компенсационного нагнетания выбранным конечным элементам присваивается функция нагрузки и коэффициент начальной деформации, который фиксирует их увеличение на заданный объем. Объем нагнетания в зависимости от начальной деформации для выбранного шага определяется по следующей формуле:

$$V = V_0 ((\Delta\varepsilon_{0i} + 1)^3 - 1)$$

где V_0 — начальный объем конечных элементов, м^3;

$\Delta\varepsilon_{0i}$ — коэффициент начальной деформации для рассматриваемого шага.

Значение давления можно определить по действующим нормальным напряжениям на границе зоны нагнетания с окружающим грунтом.

Учитывая, что проектный объем нагнетается не единовременно, а порционно, максимально 100 литров за заходку, функция закачек разбивается на несколько этапов.

Выбранная последовательность задается с помощью соответствующего графика линейной зависимости изменения коэффициента начальной деформации от расчетного шага, как на рисунке 3.

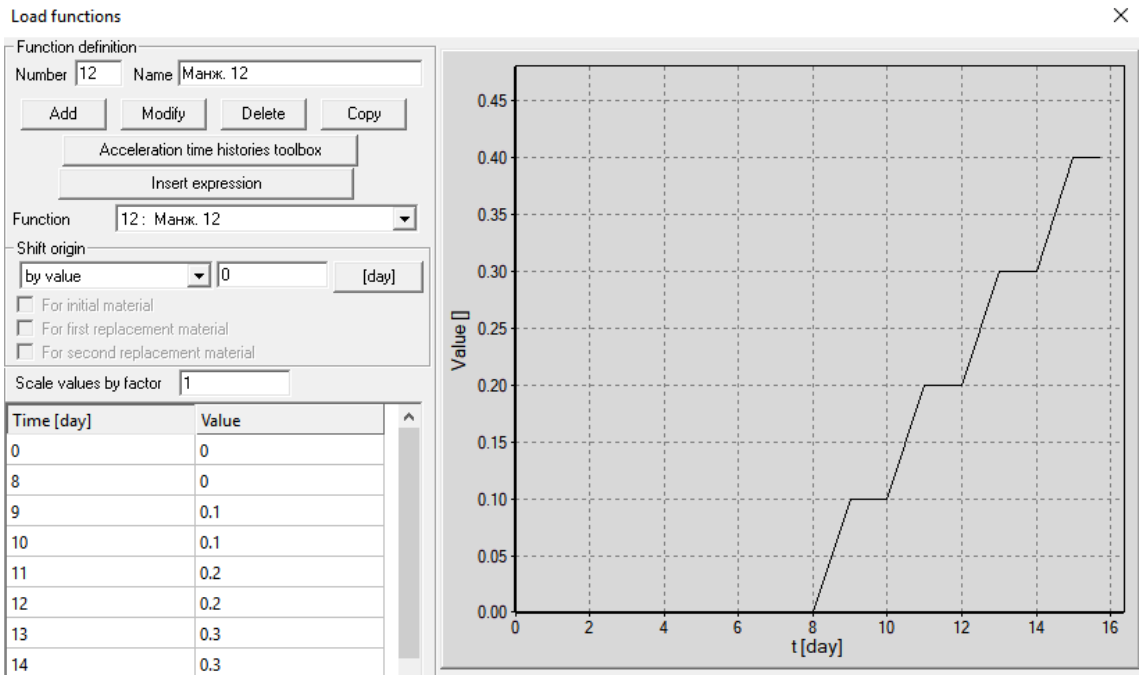


Рисунок 3. *График зависимости коэффициента начальных напряжений от расчетного шага (разработано авторами)*

Figure 3. *Dependence graph of the initial stresses coefficient on the calculated step (developed by the authors)*

По результатам расчетов, получены значения дополнительных деформаций и внутренних усилий в обделке перегонных тоннелей. Выполненные поверочные расчеты позволили определить значения коэффициентов запаса прочности обделки перегонных тоннелей при каждом рассмотренном варианте мероприятий по обеспечению сохранности. Расчеты компенсационных мероприятий базируются на серии предварительных расчетов, в ходе которых были подобраны зона нагнетания, объемы и последовательность нагнетания, позволяющие добиться допустимых деформаций перегонных тоннелей.

Таблица 1 / Table 1

Максимальные дополнительные деформации тоннельной обделки Замоскворецкой линии, попадающей в зону влияния строительства котлована

Maximum additional strain of the Zamoskvoretskaya line tunnel lining, falling within the area of influence of the foundation pit construction

Расчетный случай Design case	Перемещения, мм Displacements, mm	
	вертикальные vertical	горизонтальные horizontal
Без мероприятий по сохранности No safety measures activities	61	55
С компенсационным нагнетанием With compensation grouting	3,8	2,4

Разработано авторами / Developed by the authors

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Расчетные значения деформаций действующих перегонных тоннелей на каждой стадии выполнения работ с учетом компенсационных мероприятий представлены в таблице 2. Результаты оценки влияния устройства котлована на перемещение рельсовых нитей представлены в таблице 3.

Таблица 2 / Table 2

Результаты оценки влияния устройства котлована на действующие тоннельные сооружения метрополитена

The assessment results of the foundation pit structure impact on the existing metropolitan railway tunnel structures

№	Этап Stage	Максимальные перемещения ЛПТ, мм Maximum displacements of LMLT, mm		Максимальные перемещения ППТ, мм Maximum displacements of RMLT, mm	
		вертикальные vertical	горизонтальные horizontal	вертикальные vertical	горизонтальные horizontal
1	Устройство БСС SP device	0	0	0	0
2	Разработка грунта 1-го яруса котлована Soil development of the 1st tier of the foundation pit	2	0	0	0
4	Разработка грунта 2-го яруса котлована Soil development of the 2nd tier of the foundation pit	4	1	1	0
6	Разработка грунта 3-го яруса котлована Soil development of the 3rd tier of the foundation pit	7	2	2	1
8	Разработка грунта 4-го яруса котлована Soil development of the 4th tier of the foundation pit	11	3	3	1
10	Разработка грунта 5-го яруса котлована Soil development of the 5th tier of the foundation pit	15	5	4	2
12	Разработка грунта до отметки дна котлована Development of soil up to the level of the bottom of the foundation pit	16	7	4	2

Сокращения: ЛПТ — левый перегонный тоннель; ППТ — правый перегонный тоннель; ББС — буросекущие сваи. Разработано авторами / Abbreviations: LMLT — left main line tunnel; RMLT — right main line tunnel; SP — Secant piles. Developed by the authors

Для определения объема нагнетания специальных инъекционных смесей в объём грунтоцементного массива выполняется выгрузка относительных деформаций конечных элементов, расположенных в зоне нагнетания.

$$V_{\text{наг}} = l_1(1 + \varepsilon_1) \cdot l_2(1 + \varepsilon_2) \cdot l_3(1 + \varepsilon_3) - V_0,$$

где l_1, l_2 и l_3 — размеры конечного элемента, м;

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

e_1, e_2 и e_3 — относительная деформация ребер конечного элемента;

V_0 — начальный объем конечного элемента, м^3.

Таблица 3 / Table 3

Результаты оценки влияния устройства котлована на перемещение рельсовых нитей

The assessment results of the foundation pit structure impact on the track rail moving

№	Вариант расчета Calculation option	Максимальные отклонения рельсовых нитей ЛПТ, мм Maximum track rail deviations LMLT, mm		Максимальные отклонения рельсовых нитей ППТ, мм Maximum track rail deviations RMLT, mm	
		по уровню by level	в плане on plan	по уровню by level	в плане on plan
Без мероприятий по обеспечению сохранности No safety measures activities					
1	Без мероприятий по обеспечению сохранности No safety measures activities	58	52	55	52
2	С учетом компенсационных мероприятий With the account of compensation events	1,2	1,0	1,3	1,1

Сокращения: ЛПТ — левый перегонный тоннель; ППТ — правый перегонный тоннель. Разработано авторами / Abbreviations: LMLT — left main line tunnel; RMLT — right main line tunnel. Developed by the authors

Максимальные напряжения в элементах, подвергающихся увеличению объема в момент компенсационного нагнетания, достигают значений в 4480 кН/м^2, что соответствует давлению нагнетания в 45 бар.

Суммарный объем нагнетания на момент завершения строительства составляет 2195,13 м^3, что соответствует занимаемому объему раствора в грунте после нагнетания, т. е. данное значение должно быть увеличено на коэффициенты, учитывающие водоотдачу и усадку инъекционной смеси. При суммарном проценте водоотдачи и усадки, равным 30 %, требуемый объем инъекционной смеси КН-2 составляет 2853,67 м^3.

3. Технология выполнения работ по компенсационному нагнетанию

3. Compensation grouting technology

После бурения и обустройства скважин выполняются инъекционное нагнетания специальной смеси на основе «КН-1» для подготовки вмещающего массива грунта с целью исключения неуправляемого гидроразрыва при нагнетании «КН-2», в период активной фазы нагнетания [14; 15].

Работы по компенсационному нагнетанию, в период активной фазы, выполняют с использованием специальных инъекционных смесей на основе «КН-2» в 2 этапа:

- формирование предварительного напряжения в грунте величиной до 0,5 бар;
- нагнетание для сохранения расчётных напряжений в грунте и исключения перемещений массива грунта, размещённого между компенсационным экраном и левым перегонным тоннелем, что обеспечивает сохранение тоннельных сооружений в проектном положении.

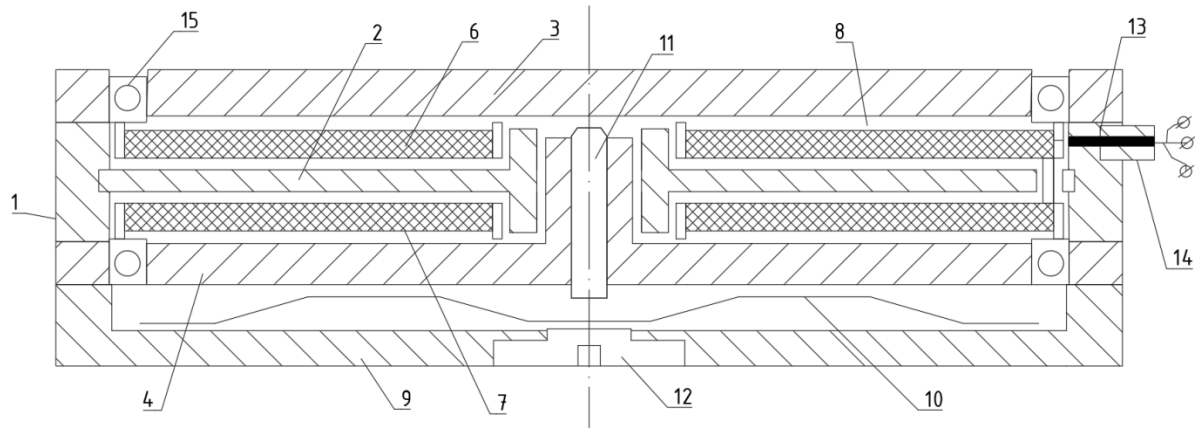
При выполнении компенсационного нагнетания контролируется величина напряжений в структуре грунта и перемещения, являющиеся следствием изменения НДС грунта. Измерение давления в грунте выполняется с использованием мембранных датчиков, предназначенных для измерения активного давления и его приращения в грунтовом массиве. Технические характеристики датчиков давления в грунте (ТДДГ-2) представлены следующими параметрами: диапазон измеряемых давлений 0...3 МПа; чувствительность, МПа 0,05; модуль упругости, МПа 80…100; коэффициент тензочувствительности > 100; геометрические размеры датчика: 70 мм, высота 20мм; диапазон рабочей температуры, С° -30...+50.

Фотография датчика давления в грунте представлена на рисунке 4, а принципиальная схема представлена на рисунке 5.

Рисунок 4. *Фотография датчика для измерения давления в грунте (сделано авторами)*

Figure 4. *Photo of a sensor for measuring pressure in the ground (taken by the authors)*

Для выполнения работ по компенсационному нагнетанию предусмотрено устройство 54 вертикальных скважин с шагом 2 м, с глубиной 36,3 м, от поверхности земли. Процесс бурения скважин сопровождается принудительной подачей бурового раствора, состоящего из бентонита, полимеров и других добавок для обеспечения устойчивости стенок скважин и выравнивания гидростатического давления на время производства работ.



1 — корпус; 2 — жёсткая перегородка; 3 — рабочий штамп; 4 — вспомогательный штамп; 5 — верхний пьезорезистор; 6 — нижний пьезорезистор; 7 — токосъёмные обкладки; 8 — изолирующие прокладки; 9 — нижняя крышка; 10 — плоская пружина; 11 — микровинт; 12 — заглушка; 13 — сальник; 14 — уплотнительный элемент; 15 — заполнитель

1 — body; 2 — rigid partition; 3 — working stamp; 4 — auxiliary stamp; 5 — upper piezoresistor; 6 — lower piezoresistor; 7 — current collector plates; 8 — insulating gaskets; 9 — bottom cover; 10 — flat spring; 11 — microscrew; 12 — plug; 13 — collar bush; 14 — sealing element; 15 — filler

***Рисунок 5.** Схема датчика для измерения давления в грунте (разработано авторами)*

***Figure 5.** Scheme of the sensor for measuring pressure in the soil (developed by the authors)*

В зоне манжетной части инъектора скважина заполняется обойменным раствором. Сущность метода компенсационного нагнетания в рассматриваемом случае заключается в нагнетании в предварительно подготовленную структуру грунта, размещённую между проектируемым котлованом и существующими перегонными тоннелями, расчётного объёма медленно твердеющего раствора на минеральной основе, имеющего заданную вязкость и кинетику затвердевания. Это позволяет сформировать расчётное напряженно-деформируемое состояний массива грунта, обеспечивающее минимизацию в управляемом режиме горизонтальных перемещений существующего сооружения, используя эффект гидродомкрата. Нагнетание выполняется точечно, в установленные расчётом зоны, по манжетной технологии.

Компенсационное нагнетание реализуется в 6 этапов:

1-й этап: подготовительный — лабораторно-экспериментальные исследования, математическое моделирование, проектирование, полевые

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

испытания с целью оптимизации основных технологических параметров с учётом реальных геотехнических условий.

2-й этап: выполнение буроинъекционных работ по проекту с обустройством скважин и формированием системы управления подъёмом или защиты зданий от сверхнормативных деформаций.

3-й этап: «пассивная» фаза — выполняется с целью подготовки вмещающего объёма грунта для исключения неуправляемого гидроразрыва в период «активной» фазы компенсационного нагнетания, соответствует нулевой фазе подъёма. На этом этапе нагнетание инъекционной смеси в капиллярно-пористую структуру несвязанного грунта выполняется в режиме пропитки при следующих условиях:

- использование высокопроникающих специальных инъекционных смесей с регулируемой структурной «прочностью»;
- проектное давление нагнетания до 0,5 МПа;
- повышенный расход инъекционной смеси до 400 л/м³ для заполнения открытых пор и капилляров, формирования связанной структуры грунта.

В результате заполнения пор и пустот на этапе подготовки массива к компенсационному нагнетанию обеспечивается:

- снижение коэффициента пористости, что приводит к увеличению модуля деформации массива (снижение потерь при подъёме на деформации уплотнения массива);
- исключение неконтролируемого выхода инъекционного раствора из рабочей зоны в процессе компенсационного нагнетания и тем самым обеспечение управляемости силового воздействия при нагнетании.

4-й этап: «условно активная» фаза — соответствует нулевой фазе подъёма. На этом этапе обеспечивается формирование предварительно напряжённого состояния в грунтовом массиве для обеспечения первой реакции сооружения. В качестве инъекционного материала применяются инъекционные смеси с повышенной вязкостью и управляемой кинетикой набора прочности в зависимости от требований технологического регламента и количества повторных нагнетаний в одну манжету. Этот этап характеризуется следующими условиями:

- проектное давление нагнетания до 20 бар;
- проектная прочность (28 суток) инъекционного раствора на сжатие до 2,0 МПа.

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Проектный расход инъекционного материала и обеспечение равномерности его распределения в заданном горизонте характеризуется коэффициентом эффективности нагнетания, величина которого на каждой из стадий различна. На стадии формирования предварительно напряжённого состояния грунта величина коэффициента эффективности нагнетания не превышает 5 %. При этом расчётный расход инъекционного материала на 1 манжету разово может достигать 50 л и суммарно до 500 л при интенсивности нагнетания до 3 л/мин.

5-й этап: «активная» фаза — обеспечивает сохранение сооружения в проектном положении с применением инъекционных смесей, что и на 4-ом этапе. Инъекционные работы выполняются с использованием автоматизированного комплекса, включающего:

- систему слежения за изменениями пространственного положения элементов;
- систему контроля напряжений в грунтобетонном массиве;
- систему контроля параметров нагнетания через каждый инъектор;
- систему оперативного управления параметрами нагнетания в зависимости от данных, полученных от систем мониторинга;
- систему оповещения о приближении показателей к критическим значениям.

Каждый инъектор обслуживается одним растворонасосом с регулятором расхода и давления. На стадии «активной» фазы подъёма величина коэффициента эффективности нагнетания достигает значений 15…20 %. При этом, расчётный расход инъекционного материала на 1 манжету разово, как правило, не превышает 50 л при интенсивности нагнетания до 3 л/мин. Гарантируемая подача инъекционного материала в проектный горизонт через манжету обеспечивается применением двухсторонних разжимных пакеров (обтюраторов).

Применение инъекционных насосов с программируемым управлением позволяет управлять в автоматизированном режиме процессом нагнетания в соответствии с проектными параметрами: давление, интенсивность и количество нагнетания инъекционного материала.

6-й этап: фаза «ликвидация». После компенсации возможных осадок и полной планово-высотной стабилизации сооружения комиссионно принимается решение о ликвидации инъекционных скважин. Ликвидация инъекционных скважин выполняется путём их тампонирования раствором с повышенной вязкостью и ускоренным набором прочности (типа «КН-2»), что обеспечивает сплошность и однородность массива грунта в основании

конструкции. В отдельных случаях, при прогнозируемых динамических или вибрационных воздействиях в период эксплуатации сооружений и связанной с этим вероятности проявления осадочных деформаций, целесообразным является не ликвидация, а временная консервация с заполнением тела скважин специальными закладочными смесями со слабой гидравлической активностью. Извлечение затвердевшей закладочной смеси из тела скважин осуществляется путём разбуривания с последующей промывкой.

Управление процессом и корректировка технологических параметров компенсационного нагнетания, при реализации указанных выше этапов, выполняется в соответствии с программой научно-технического сопровождения.

На протяжении всех инъекционных работ ведётся регистрация данных относительно каждой манжеты, а именно: дата инъекции, её порядковый номер, объём, давление и расход. По результатам суммирования данных строятся изополя и диаграммы, отображающие параметры инъецирования за выбранный промежуток времени.

4. Анализ результатов буро-инъекционных работ по компенсационному нагнетанию

4. Analysis of the drilling and injection works results on compensation grouting

Управление процессом компенсационного нагнетания обеспечивалось на основании анализа результатов комплексного мониторинга, включающего измерение давлений в массиве грунта, размещённого между ограждением котлована и компенсационным экраном; контролем за перемещением массива грунта, размещённого между компенсационным экраном и действующими тоннельными сооружениями; геодезическим мониторингом за перемещениями обделки тоннелей и оголовками рельсовых путей.

Преобразование свойств вмещающего массива грунта в результате пропитки его структуры инъекционными смесями на основе «КН-1» является следствием уменьшения пористости, пластических сдвигов, взаимного смещения частиц в отдельных точках грунта, деформаций самих частиц вместе с водными пленками, выдавливания через поры грунта воды и воздуха. Это обеспечивает исключение развития неуправляемого гидроразрыва в период «активной» компенсационного нагнетания.

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Поскольку удельное давление на грунт от сооружений метрополитена сравнительно невелико, то усреднённые напряжения грунта в основании сооружений с достаточной степенью точности подчиняются законам линейно-деформируемых тел. При выполнении компенсационного нагнетания фиксируется величина деформаций, являющихся следствием изменения НДС грунта (табл. 4). Измерение давления в грунте выполняется с использованием датчиков, предназначенных для измерения активного давления и его приращения в грунтовом массиве в процессе компенсационного нагнетания. Технические характеристики применяемых датчиков позволяют фиксировать измеряемые давления в грунте до 10 Мпа с чувствительностью до 0,05 МПа.

Таблица 4 / Table 4

Предварительное напряжение в грунте при компенсационном нагнетании

Prestressing in the soil during compensation grouting

Данные Data	Скважины Wells								
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9
Датчики Sensors	ДДГ-1.1 GPS-1.1	ДДГ-1.2 GPS-1.2	ДДГ-1.3 GPS-1.3	ДДГ-2.1 GPS-1.4	ДДГ-2.2 GPS-1.5	ДДГ-2.3 GPS-1.6	ДДГ-3.1 GPS-1.7	ДДГ-3.2 GPS-1.8	ДДГ-3.3 GPS-1.9
Глубина установки, м Installation depth, m	15	22,5	30	15	22,5	30	15	22,5	30
Давление в грунте, бар Ground pressure, bar	0,57	0,45	0,46	0,36	0,50	0,46	0,47	0,35	0,44

Сокращения: ДДГ — датчики давления в грунте. Разработано авторами / Abbreviations: GPS — Ground Pressure Sensors. Developed by the authors

В результате выполненных инъекционных работ было обеспечено формирование предварительного напряжения в объёме грунта, размещённого между ограждением котлована левым перегонным тоннелем. При этом величина преднапряжения составляла 0,35…0,57 МПа, и распределялась в структуре грунта достаточно равномерно с поддерживанием на этом уровне в течение всего периода разработки котлована. В качестве дополнительного мероприятия, обеспечивающего контроль за состоянием тоннельных сооружений, выполнялся их геодезический мониторинг, а контроль за перемещениями массива грунта выполнялся с использованием вертикальных инклинометрических скважин. В результате реализованных мероприятий было обеспечено сохранение проектного положения действующих тоннельных сооружений на всех этапах разработки котлована и строительства станционного комплекса. Установленная величина вертикальных перемещений рельсовых путей не превышала 2,1 мм, а величина горизонтальных перемещений не превышала 1,5 мм, результаты представлены в таблице 5.

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Таблица 5 / Table 5

Перемещение рельсовых путей при разработке котлована под защитой компенсационного нагнетания

Rail tracks movement during foundation pit construction under the compensation grouting protection

№	Условия Terms	Макс. отклонения рельсовых нитей ЛПТ, мм Max. deviations of LMLT rail threads, mm		Макс. отклонения рельсовых нитей ППТ, мм Max. deviations of rail threads RMLT, mm	
		по уровню by level	в плане in terms of	по уровню by level	в плане in terms of
Без мероприятий по обеспечению сохранности No security measures					
1	Без мероприятий по комп. Нагнетанию No computer events injection	58	52	45	22
2	Факт. перемещ. по итогам мониторинга Fact. moved monitoring results	1,2	1,5	2,1	1,0

Сокращения: ЛПТ — левый перегонный тоннель; ППТ — правый перегонный тоннель. Разработано авторами / Abbreviations: LMLT — left main line tunnel; RMLT — right main line tunnel. Developed by the authors

Как видно из результатов представленный исследований, фактические деформации рельсовых путей существенно ниже расчётных и предельно допустимых значений. Это является следствием реализации разработанных проектных решений по защите тоннельных сооружений по технологии компенсационного нагнетания.

Заключение

Conclusion

Разработанные и реализованные проектные решения, основанные на технологии компенсационного нагнетания, с целью обеспечения предварительного напряжения в объёме грунтобетонного массива, а также комплексном мониторинге за перемещениями грунта и конструкций метрополитена, позволили обеспечить сохранение эксплуатационного режима тоннельных сооружений, размещённых в непосредственной близости от ограждающих конструкций сооружаемого котлована.

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

ЛИТЕРАТУРА

1. **Moseley, M.P.** Ground Improvement (Second Edition) / M.P. Moseley, K. Kirsch, E. Falk. — Лондон: Spon Press, 2004. — 440 с.
2. **Bezuijen, A.** Compensation grouting in sand, fractures and compaction / A. Bezuijen, A.F. van Tol // XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Madrid 2007 / Роттердам: Millpress Science Publishers, 2007. — URL: https://www.kivi.nl/uploads/media/57e59e0e2f0f4/Compensation%20grouting%20in%20sand,%20fractures%20and%20compaction.pdf (дата обращения: 02.04.2022).
3. **Chambosse, G.** State of the art of compensation grouting in Germany / G. Chambosse, R. Otterbein // 15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Istanbul) / Лиссе: Balkema, 2001. — С. 1511–1514. — URL: https://www.issmge.org/publications/publication/state-of-the-art-of-compensation-grouting-in-germany (дата обращения: 02.04.2022).
4. **Gafar, K.** Fracturing of sand in compensation grouting / K. Gafar, K. Soga, A. Bezuijen [и др.] // Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground / Под ред. Ng, Huang & Liu Лондон: Taylor & Francis Group, 2009. — С. 281–286. — URL: https://www.issmge.org/uploads/publications/6/12/2008_033.pdf (дата обращения: 02.04.2022).
5. **Рашендорфер, Ю.** Компенсационное нагнетание как способ обеспечения устойчивости зданий и сооружений при проходке тоннелей / Ю. Рашендорфер, В.Н. Жуков, К. Майер // Метро и тоннели. — 2008. — № 4. — С. 26–28. — URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=24300951 (дата обращения: 19.04.2022).
6. **Smoldyrev, A.E.** Production scheme for compensation injection of hardening mixtures in soils during the construction of a tunnel in Lefortovo / A.E. Smoldyrev. — DOI https://doi.org/10.1007/BF02484322 // Soil Mechanics and Foundation Engineering. — 2000. — Т 37. — № 1. — С. 21–23. — URL: https://link.springer.com/article/10.1007/BF02484322 (дата обращения: 12.05.2022).
7. **Иртуганова, В.Р.** Влияние геотехнического барьера, устроенного методом компенсационного нагнетания, на деформацию существующего здания при строительстве туннеля / В.Р. Иртуганова, К.В. Сафронова, Д.Ю. Чунюк // Естественные и технические науки. — 2015. — № 4. — С. 245–247. — URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=23662049 (дата обращения: 02.04.2022).
8. **Беллендир, Е.Н.** Защита и выравнивание зданий и сооружений с помощью технологии компенсационного нагнетания / Е.Н. Беллендир, А.В. Александров, М.Г. Зерцалов, А.Н. Симутин // Гидротехническое строительство. — 2016. — № 2. — С. 15–19. — URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=25522351 (дата обращения: 12.05.2022).
9. **Зерцалов, М.Г.** Технология компенсационного нагнетания для защиты зданий и сооружений / М.Г. Зерцалов, А.Н. Симутин, А.В. Александров // Вестник МГСУ. — 2015. — № 6. — С. 32–40. — URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=23676415 (дата обращения: 12.05.2022).
10. **Харченко, И.Я.** Особенности проектирования, строительства и эксплуатации тоннелей метрополитена и притоннельных сооружений в условиях плотной городской застройки / И.Я. Харченко, Е.А. Пестрякова, А.А. Пискунов, А.И. Харченко, А.С.-Э. Бетербиев, А.Н. Сонин. — DOI https://doi.org/10.15862/35SATS319 // Транспортные сооружения. — 2019. — Т 6. — № 3. — С. 35SATS319. — URL: https://t-s.today/35SATS319.html (дата обращения: 12.05.2022).
11. **Шевченко, П.А.** Применение метода компенсационного нагнетания для исключения недопустимых кренов фундаментов / П.А. Шевченко, И.В. Носков // Наука и молодежь : Материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (01–05 июня 2020 года, г. Барнаул): в 8 ч., Барнаул, 01–05 июня 2020 года / Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2020. — С. 210–211. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44516922 (дата обращения: 25.05.2022).
12. **Лузин, И.Н.** Расчет напряженно-деформированного состояния оснований фундаментов в процессе компенсационного нагнетания / И.Н. Лузин. — DOI https://doi.org/10.29039/2308-0191-2020-8-1-33-38 // Строительство и архитектура. — 2020. — Т 8. — № 1. — С. 33–38. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42975126 (дата обращения: 27.05.2022).

13. **Балафендиева, И.С.** Моделирование процессов компенсационного нагнетания при строительстве оснований зданий и подземных сооружений / И.С. Балафендиева, Д.В. Бережной, Н.Р. Вильданова [и др.] // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : Материалы XXVII Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова, Вятичи, 17–21 мая 2021 года / М.: Общество с ограниченной ответственностью "ТРП", 2021. — С. 35–36. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46366047 (дата обращения: 29.05.2022).
14. **Коваль, С.** Обоснование параметров компенсационного нагнетания инъекционных смесей в грунтовые массивы в процессе защиты от деформаций и восстановления планово-высотного положения зданий, сооружений, опор мостов, тоннелей, метрополитенов и других объектов транспортной инфраструктуры / С. Коваль, И. Харченко, А. Харченко [и др.] // Русский инженер. — 2022. — № 2. — С. 34–39. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48557493 (дата обращения: 19.06.2022).
15. **Нефедьева, А.К.** Комплексные решения при применении технологии компенсационного нагнетания / А.К. Нефедьева, А.П. Нефедьев, М.И. Баженов [и др.] // Метро и тоннели. — 2020. — № 3. — С. 32–33. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43927697 (дата обращения: 15.06.2022).

Сведения об авторах:
Харченко Алексей Игоревич — кандидат технических наук, доцент, заведующий сектором внедрения, Научно-исследовательский институт экспертизы и инжиниринга, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия, e-mail: greenstone236@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3850-4285

Кунеевский Алексей Александрович — генеральный директор, ООО «Эссет менеджмент», Москва, Россия, e-mail: Kuneevsky@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3780-0610

Пискунов Александр Алексеевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: a.piskunov52@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5444-8415

Харченко Игорь Яковлевич — доктор технических наук, профессор, начальник отдела, Научно-исследовательский институт экспертизы и инжиниринга, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия, e-mail: iharcenko@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6310-016X

Пестрякова Екатерина Алексеевна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: Kate.pestriakova@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3441-1011
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=898914

Мазур Евгений Витальевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: Genha345@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5340-0863

Телятникова Наталья Александровна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и строительство железных дорог», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: sharklike@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9686-3681

Немцова Софья Александровна — аспирант кафеды «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: nemtsova.sa@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7216-0914

Статья получена: 11.08.2022. Принята к публикации: 15.11.2022. Опубликована онлайн: 29.11.2022.

REFERENCES

1. Moseley M.P., Kirsch K., Falk E. Ground Improvement (Second Edition). London: Spon Press; 2004. (In Eng.).
2. Bezuijen A., A.F. van Tol Compensation grouting in sand, fractures and compaction. In: *XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Madrid 2007*. Rotterdam: Millpress Science Publishers; 2007. Available at: https://www.kivi.nl/uploads/media/57e59e0e2f0f4/Compensation%20grouting%20in%20sand,%20fractures%20and%20compaction.pdf (accessed 2nd April 2022). (In Eng.).
3. G. Chambosse, R. Otterbein. State of the art of compensation grouting in Germany. In: *15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Istanbul)*. Lisse: Balkema; 2001. p. 1511–1514. Available at: https://www.issmge.org/publications/publication/state-of-the-art-of-compensation-grouting-in-germany (accessed 2nd April 2022). (In Eng.).
4. Gafar K., Soga K., Bezuijen A., Sanders M.P.M., and A.F. van Tol Fracturing of sand in compensation grouting. In: Ng, Huang & Liu (eds). *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. London: Taylor & Francis Group; 2009. p. 281–286. Available at: https://www.issmge.org/uploads/publications/6/12/2008_033.pdf (accessed 2nd April 2022). (In Eng.).
5. Rashendorfer Yu., Zhukov V.N., MayYer K. [Compensatory injection as a way to ensure the stability of buildings and structures during tunneling]. *Metro i tonneli [Metro and tunnels]*. 2008; (4): 26–28. Available at: https://elibrary.ru/item.asp?id=24300951 (accessed 19th April 2022). (In Russ.).
6. Smoldyrev A.E. Production scheme for compensation injection of hardening mixtures in soils during the construction of a tunnel in Lefortovo. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2000; 37(1): 21–23. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/BF02484322.
7. Irtuganova V.R., Safronova K.V., Chunyuk D.Yu. [Influence of a geotechnical barrier, arranged by the method of compensatory injection, on the deformation of an existing building during the construction of a tunnel]. *Natural and technical sciences*. 2015; (4): 245–247. Available at: https://elibrary.ru/item.asp?id=23662049 (accessed 2nd April 2022). (In Russ.).
8. Bellendir E.N., Aleksandrov A.V., Zertsalov M.G., Simutin A.N. Building and Structure Protection and Leveling Using Compensation Grouting Technology. *Power Technology and Engineering*. 2016; 50(2): 142–146. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/s10749-016-0674-y.
9. Zertsalov M.G., Simutin A.N., Aleksandrov A.V. Application of Compensation Grouting Technology for Protection of Buildings and Structures. *Vestnik MGSU*. 2015; (6): 32–40. Available at: https://elibrary.ru/item.asp?id=23676415 (accessed 12th May 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
10. Kharchenko I.Ya., Pestryakova E.A., Piskunov A.A., Kharchenko A.I., Beterbiev A.S.-E., Sonin A.N. Features of design, construction and operation of underground tunnels and tunnel structures in dense urban areas. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2019; 6(3): 35SATS319. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.15862/35SATS319.
11. Shevchenko P.A., Noskov I.V. [Application of the Compensatory Injection Method to Eliminate Unacceptable Heels of Foundations]. In: [*Science and youth: Materials of the XVII All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists (June 01–05, 2020, Barnaul): in 8 parts., Barnaul, June 01–05, 2020*]. Barnaul: Polzunov Altai State Technical University; 2020. p. 210–211. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44516922 (accessed 25th May 2022).
12. Luzin I. Calculation of the Foundation Settlement During Compensation Grouting. *Construction and Architecture*.; 8(1): 33–38. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.29039/2308-0191-2020-8-1-33-38.
13. Balafendiyeva I.S., Berezhnoy D.V., Vil'danova N.R. et al. [Simulation of Compensatory Injection Processes in the Construction of Building Foundations and Underground Structures]. In: *[Dynamic and technological problems of structural mechanics and continuous media: Proceedings of the XXVII International Symposium. A.G. Gorshkova, Vyatichi, May 17–21, 2021*]. Moscow: Limited Liability Company "TRP"; 2021. p. 35–36. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46366047 (accessed 29th May 2022).

14. Koval S., Kharchenko I., Kharchenko A., Piskunov A., Smirnov A., Pestriakova E., Mazur E. Determination of Parameters of Compensatory Injection into Ground Massifs for The Deformation Protection and Safety of Planned Position of Buildings, Structures, Bridges, Tunnels, Subways and Other Objects of Transport Infrastructure. *Russian engineer*. 2022; (2): 34–39. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48557493 (accessed 19th June 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
15. Nefed'yeva A.K., Nefed'yev A.P., Bazhenov M.I., Aleksandrov A.V., Alekseyev V.A. [Comprehensive solutions for the use of compensation injection technology]. *Metro and tunnels*. 2020; (3): 32–33. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43927697 (accessed 15th June 2022). (In Russ.).

Information about the authors:
Aleksei I. Kharchenko — Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia, e-mail: greenstone236@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3850-4285

Aleksei A. Kuneevskii — LLC «Asset management», Moscow, Russia, e-mail: Kuneevsky@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3780-0610

Aleksandr A. Piskunov — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: a.piskunov52@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5444-8415

Igor Ya. Kharchenko — Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia, e-mail: iharcenko@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6310-016X

Ekaterina A. Pestryakova — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: Kate.pestriakova@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3441-1011
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=898914

Evgeny V. Mazur — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: Genha345@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5340-0863

Natalia A. Telyatnikova — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: sharklike@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9686-3681

Sofya A. Nemtsova — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: nemtsova.sa@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7216-0914

Submitted: 11th August 2022. Revised: 15th November 2022. Published online: 29th November 2022.