

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2022, №3, Том 9 / 2022, N 3, Vol. 9 <https://t-s.today/issue-3-2022.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS322.pdf>

DOI: 10.15862/01SATS322 (<https://doi.org/10.15862/01SATS322>)

Расчётно-теоретическое обоснование параметров компенсационного нагнетания для защиты объектов метрополитена от осадочных деформаций

¹Коваль С.В., ¹Пестрякова Е.А., ¹Пискунов А.А., ²Смирнов А.П.,
³Харченко А.И., ¹Сонин А.Н., ¹Идиатулин Д.Р., ³Харченко И.Я.

¹ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет —
МСХА имени К.А. Тимирязева», Москва, Россия

³ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Пестрякова Екатерина Алексеевна, e-mail: Kate.pestriakova@gmail.com

Аннотация. Увеличение объемов и масштабов освоения подземного пространства, включая строительство объектов метрополитена в крупных городах, сопровождается значительным влиянием на окружающую городскую застройку, что требует разработки и реализации комплекса специальных мероприятий, обеспечивающих защиту зданий и сооружений от сверхнормативных деформаций. При этом, в зону влияния строительства вовлекаются многочисленные надземные и подземные сооружения, включая действующие объекты метрополитена, а также жилая застройка и надземные транспортные сооружения.

В настоящее время одним из наиболее эффективных методов, обеспечивающих надёжную защиту объектов от осадочных деформаций, является метод компенсационного нагнетания.

В статье изложены теоретические основы применения технологии компенсационного нагнетания для защиты зданий и сооружений от сверхнормативных осадочных деформаций при строительстве объектов транспортной инфраструктуры в условиях плотной городской застройки.

Разработана математическая модель, соответствующая реальной геометрии расчетной области вестибюля метрополитена с грунтовым основанием, фактическими

физико-механическими характеристиками материалов его конструкций и грунтового массива.

В статье представлены результаты численного моделирования, с помощью которых определены объемы, давление, очередность и места инъектирования. По расчетным данным определена продолжительность компенсационного нагнетания специальных растворов для сохранения стабильного положения фундаментов эскалаторных тоннелей метрополитена путём формирования расчётного напряженно-деформированного состояния грунтового массива в основании фундаментной плиты сооружения для обеспечения заданного превентивного подъема, установлены зависимости деформаций подъема от давления и объёмов нагнетания специальных инъекционных смесей.

На основе полученных данных разработан регламент производства работ по сохранению плано-высотного положения объектов метрополитена на всех этапах строительства и эксплуатации многофункционального комплекса.

Ключевые слова: эскалаторный тоннель метрополитена; метрополитен; численное моделирование; напряженно-деформированное состояние; грунтовый массив; компенсационное нагнетание; технологический регламент; проект производства работ

Calculation-theoretical justification of the compensation grouting parameters for the metropolitan railway protection from sedimentary deformations

¹Sergey V. Koval, ¹Ekaterina A. Pestryakova, ¹Aleksandr A. Piskunov,
²Aleksandr P. Smirnov, ³Aleksei I. Kharchenko, ¹Aleksandr N. Sonin,
¹Daniil R. Idiatulin, ³Igor Ya. Kharchenko

¹Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

²Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

³Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

Corresponding author: Ekaterina A. Pestryakova, e-mail: Kate.pestriakova@gmail.com

Abstract. An increase in the volume and scale of underground space development, including the construction of metropolitan railway facilities in large cities, is accompanied by a significant impact on the surrounding urban development, which requires the development and implementation of a set of special measures to protect buildings and structures from excess deformations. At the same time, numerous above-ground and underground structures are involved in the area of influence of the construction, including existing metropolitan railway facilities, as well as residential buildings and above-ground transport facilities.

Currently, one of the most effective methods that provide reliable facilities protection from sedimentary deformations is the compensation grouting method.

The article outlines the theoretical foundations for the use of compensation grouting technology to protect buildings and structures from excess sedimentary deformations during the construction of transport infrastructure facilities in dense urban areas.

A mathematical model has been developed that corresponds to the actual geometry of the computational area of the

metropolitan railway lobby with a soil base, the actual physical and mechanical characteristics of the materials of its structures, and the soil mass.

The article presents the computer modeling results, with its help determined volumes, pressure, sequence, and injection sites. Based on calculated data, the duration of the special solution compensatory injection was determined to maintain a stable position of the foundations of the metropolitan railway escalator tunnels by forming the calculated stress-strain state of the soil mass at the ground slab base of the structure to provide a given preventive lift, the dependences of the lift deformations on pressure and the grouting volumes of special mixtures were established.

Based on the obtained data, a procedure was developed for the production of work to maintain the planned-altitude position of metropolitan railway facilities at all construction stages and operation of the multifunctional complex.

Keywords: metropolitan railway escalator tunnels; metropolitan railway; computer modeling; stress-strain state; soil massif; compensatory injection; technological schedule; work execution design

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Одним из наиболее эффективных методов, обеспечивающих надёжную защиту объектов от осадочных деформаций, является метод компенсационного нагнетания [1–4].

Классический метод компенсационного нагнетания заключается в компенсации дефицита грунта в основании зданий и сооружений, сформировавшихся в результате земляных работ, суффозионных процессов и других случаев, путём нагнетания специальных инъекционных смесей в соответствии с проектными решениями в виде расчетов и производства работ согласно технологических регламентов.

Инъекционные растворы на минеральной основе, должны иметь заданную вязкость, пенетрационную способность, высокую седиментационную устойчивость и управляемую кинетику затвердевания [5; 6]. Это позволяет сформировать расчётное напряженно-деформируемое состояние массива грунта, обеспечивающее управляемый подъём надземного сооружения, по принципу использования эффекта гидродомкрата, размещённого под всей площадью объекта.

Важным преимуществом классической технологии компенсационного нагнетания, по сравнению с другими методами защиты зданий и 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. Эффективность этой технологии многократно подтверждалась зарубежной и отечественной практикой [4–9].

Выполнению буроинъекционных 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 определением фактических физико-механических характеристик грунта. На этой основе выполняется разработка математической модели, описывающей формирование и развитие напряженно-деформированного состояния (далее — НДС) грунтового массива на всех этапах буроинъекционных работ при компенсационном нагнетании, расчётное обоснование основных 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 в процессе буроинъекционных работ [10–15].

Инъекционные работы выполняются с использованием автоматизированного комплекса, включающего:

- систему слежения за изменениями пространственного положения элементов конструкций вестибюля станций;
- систему слежения за изменением напряжений в грунте;
- систему контроля параметров нагнетания через каждый иньектор;
- систему оперативного управления параметрами нагнетания в зависимости от данных, полученных от систем мониторинга;
- систему оповещения о приближении показателей к критическим значениям.

Системы контроля позволяют получать данные контролируемых параметров с заданной периодичностью и точностью, которые являются основой для обеспечения управляемого процесса компенсационного нагнетания в соответствии с разработанными проектными решениями. Критерии оценки и их предельные значения (относительная разность осадок, максимальная осадка, крен, прогиб, раскрытие трещин или стыков) задаются в соответствии с категорией технического состояния сооружений и определяются требованиями нормативной и проектной документации.

Изложенные выше условия были в полном объёме реализованы при проектировании мероприятий по защите объектов метрополитена при строительстве многофункционального комплекса (далее — МФК) на площади Курского вокзала в г. Москве в крайне стеснённых условиях плотной городской застройки.

1. Характеристика условий строительства многофункционального комплекса

1. Characteristics of the conditions for the construction of a multifunctional complex

Здание многофункционального комплекса возводится рядом с действующими сооружениями метрополитена и представляет стилобат в 3–4 этажа торговой части с внутренним крытым атриумом, на котором располагается 17 этажей апартаментов в виде двух башен (рис. 1).

При этом, 4-х этажный стилобат торговой части возводится над вестибюлем станции метро «Чкаловская» с эскалаторными наклонными тоннелями.

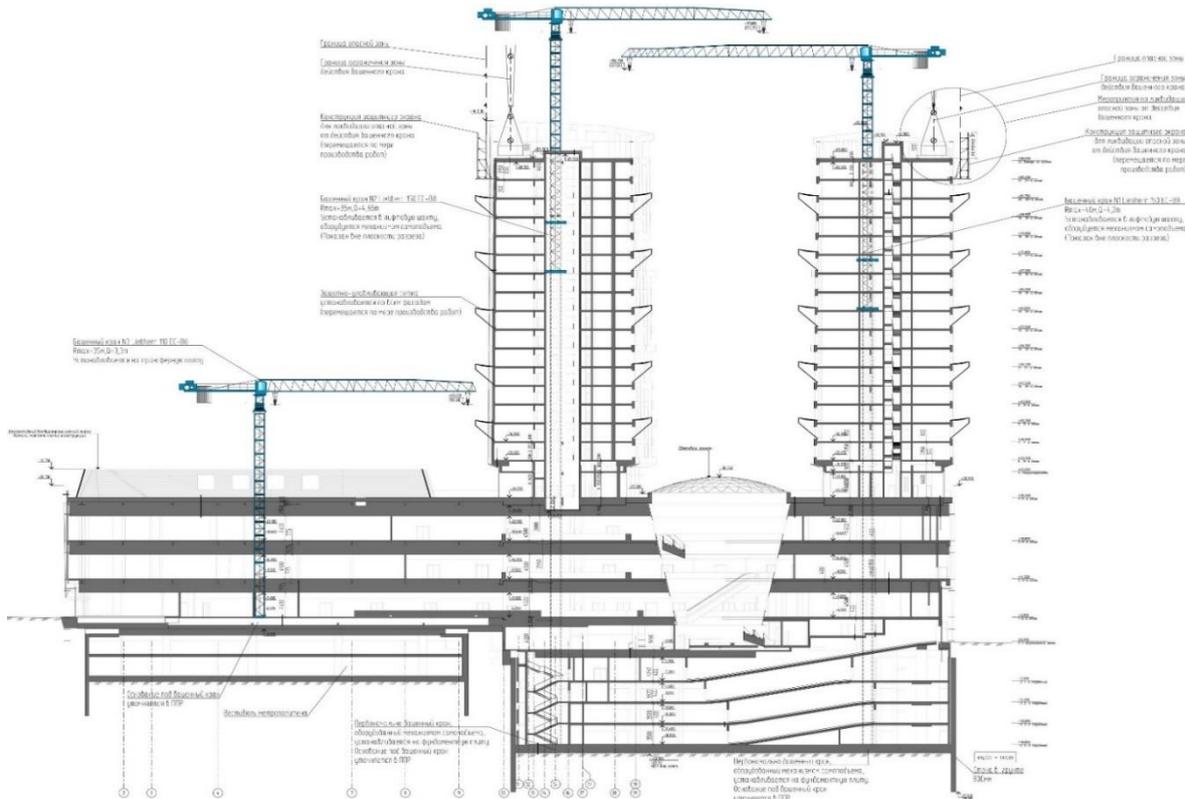


Рисунок 1. Схема строительства МФК (разработано авторами)

Figure 1. Construction scheme of the multifunctional complex (developed by the authors)

Инженерно-технические сооружения станции «Чкаловская» (блоки технических помещений, понизительная подстанция) имеют конструкции кругового очертания из чугунных тубингов наружным диаметром 8,5 м. Внутренние конструкции — сборные железобетонные элементы. Подземный вестибюль имеет сложную конфигурацию в плане и представляет собой двух-трехуровневую сборно-монолитную железобетонную конструкцию, где в верхнем уровне располагается распределительный (кассовый) зал с турникетами для прохода пассажиров и служебные помещения, в нижних уровнях — машинные залы эскалаторов со вспомогательными помещениями и вентиляционный коллектор.

В результате оценки влияния строящегося МФК на существующие объекты метрополитена установлено, что максимально расчётная величина их осадочных деформаций достигает 140 мм при осадочных деформациях эскалаторных тоннелей 90 мм.

В соответствии с требованиями эксплуатирующей организации ГУП «Московский метрополитен» для предотвращения аварийных ситуаций, связанных с возможным появлением перепадов на стыках зон эскалаторов при увеличении нагрузки на станцию «Чкаловская», должны быть исключены вертикальные осадочные смещения фундаментной плиты, на которой расположены приводные группы эскалаторов.

2. Расчётно-теоретическое обоснование параметров компенсационного нагнетания

2. Calculation-theoretical justification of the compensation grouting parameters

Как представлено на рисунке 1, многофункциональный комплекс состоит из 3–4 этажного стилобата, на котором располагаются две 17-этажные башни в составе:

- 4-х ярусного подземного паркинга;
- комплекса апартаментов, расположенных в двух корпусах-башнях с 5-го по 21 этаж;
- торгового центра с объектами общепита, расположенных в стилобатной части здания с 1-го (цокольного) по 4-й этаж.

Четырёхэтажная часть стилобата в осях 1–9 расположена над подземным вестибюлем метрополитена и частично опирается на конструкции объектов метрополитена.

Технология компенсационного нагнетания реализуется для решения 3-х видов геотехнических задач для:

- защиты существующих зданий и сооружений, находящихся на площади Курского вокзала от возможного развития сверхнормативных деформаций под влиянием строящегося МФК;
- устранения сверхнормативных деформаций, подъёма, выравнивания и возврата зданий и сооружений в проектное положение;
- защиты особо ответственных конструкций в составе зданий, сооружений метрополитена (фундаментная плита эскалаторов, верхнее строение пути в метро и др.).

Для определения необходимой последовательности и объемов нагнетания были выполнены серия численных расчетов в объемной постановке задачи методом конечных элементов в специализированном программном комплексе STAR_T, в которых рассматривались два различных подхода в части последовательности нагнетания и распределении инъекционных объемов:

- расчет по теории связной фильтрации и пластичности, в которой предусматривается управляемое изменение порядка и количества нагнетаемого состава в область, моделирующую инъектор, и оценка планово-высотного положения здания;

- расчет по теории пластичности, в которой предусматривается управляемое изменение порядка и количества нагнетаемого состава и его пересчета в объемную деформацию для оценки плано-высотного положения здания.

Выполненные расчеты учитывают фактическую последовательность строительства и инъекционных работ с целью учета в расчете на всех стадиях предшествующих изменений напряженно-деформированного состояния здания и грунтового массива.

Реализация управляемого подъема в соответствии с последовательностью, определенной численным экспериментом, возможна только при компенсационном нагнетании, без гидроразрывов, при котором закачанный объем занимает компактную область и его влияние в этом случае прогнозируемо. Для реализации такого типа компенсационного нагнетания необходимо применение специальных растворов и техники.

Инженерно-геологическое строение грунта на обследуемом участке до глубины 70.0 м составляют отложения четвертичной, юрской и каменноугольной систем. На основании литологического состава и физико-механических свойств грунтов выделено 11 секторов вдоль стилобатной части и 7 секторов поперек, это отображено на рисунке 2.

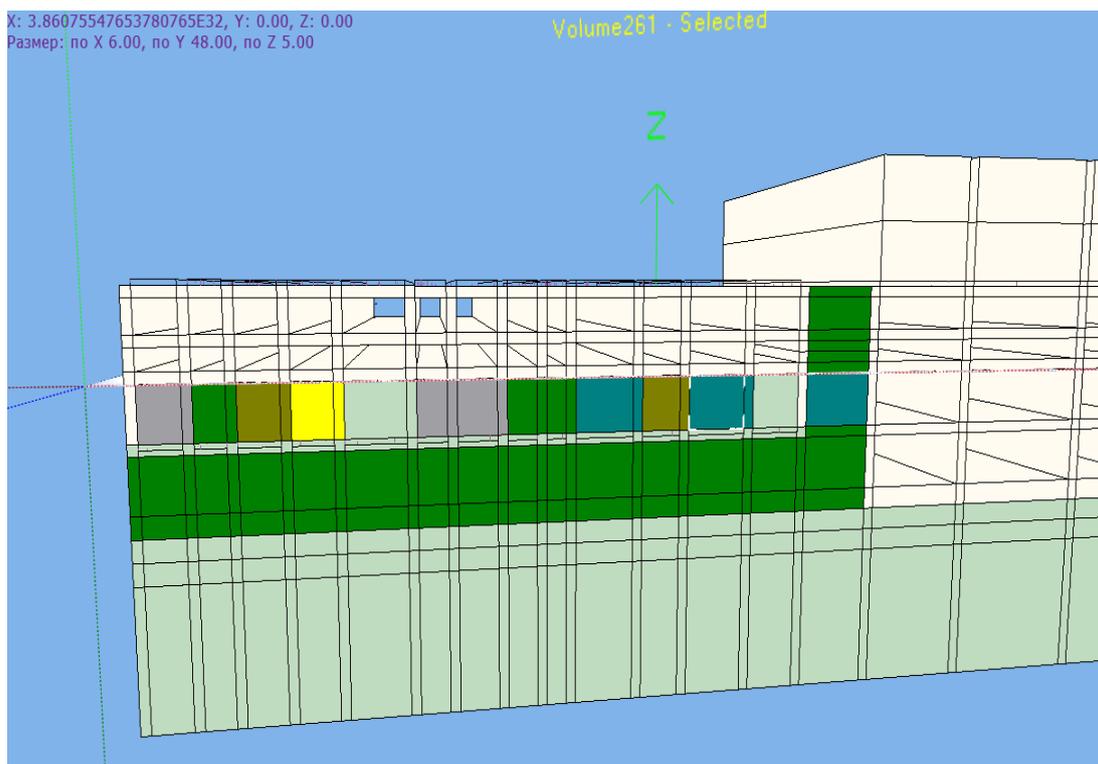


Рисунок 2. Схема разделения грунтового массива на сектора (разработано авторами)

Figure 2. Soil mass separation scheme into sectors (developed by the authors)

Зоны компенсационного нагнетания в основании фундаментной плиты представлены прямоугольными участками, которые пронумерованы от 1 до 77 и состоящие по вертикали из 4 рабочих горизонта, где выполняются работы по компенсационному нагнетанию специальных смесей для обеспечения превентивного подъема фундаментной плиты до 2 мм, для предотвращения осадочных деформаций при сооружении МФК. Примыкание эскалаторов к зонам компенсационного нагнетания и разделение грунтового массива представлено в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Примыкание эскалаторов к зонам компенсационного нагнетания и схема разделения грунтового массива на сектора

Escalators abutting to the compensation grouting zones and the soil mass separation scheme into sectors

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77

Разработано авторами / Developed by the authors

- 0 зона (сектора 1, 2, 12, 13, а также 10, 11, 21, 22) — примыкают непосредственно к эскалаторам.
- Зона 1: (сектора 23, 24, 34, 35, 45, 46, 56, 57, 67, 68).
- Зона 2: (сектора 25–77).
- Зона 3: (сектора 32, 33, 43, 44, 54, 55, 65, 66, 76, 77).
- Зона 4: (сектора 3–20).

В соответствии с описанными выше факторами в основании грунтоцементного массива нагнетание моделируется равномерным по площади, а зависимость объема инъекции от времени носит линейный характер.

Поведение грунтов основания описывается нелинейной моделью упрочняющегося грунта типа Рыкова-Григоряна. Выбор данной модели обусловлен ее полной обеспеченностью константами для всех типов грунтов при действии статических и динамических нагрузок с условиями пластичности типа Мизеса-Шлейхера, Друкера-Прагера, Кулона-Мора.

Главным достоинством этой модели при расчетах компенсационного нагнетания является возможность учёта изменения модуля деформации при изменении меньшего главного нормального

напряжения, что очень важно, так как при нагнетании происходит обжатие грунта и, соответственно, увеличение модуля деформации.

Фактические данные грунтового массива для численного расчета взяты из отчета по инженерно-геологическим изысканиям.

Для учета возможности развития сдвиговых деформаций на контакте грунта, возникающих при компенсационном нагнетании, используется контактный элемент.

Движение жидкости по порам грунта и одновременные деформации грунта моделируются системой уравнений:

$$\begin{cases} (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) = \alpha \frac{\partial p}{\partial x} \\ (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u_z}{\partial y \partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) = \alpha \frac{\partial p}{\partial y} \\ (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} + (\lambda + \mu) \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} \right) = \alpha \left(\frac{\partial p}{\partial z} - n \rho^{\text{ж}} g \right) \end{cases}$$

Из решения данной системы уравнений находят: перемещения u_x , u_y , u_z в твердой фазе грунта и поровое давление p в жидкости.

По найденным перемещениям находят деформации каркаса грунта:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\ \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right), \quad \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right), \quad \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

По найденному в жидкости давлению p находят скорости v_x , v_y , v_z и количество Q протекшей через поверхность Σ жидкости:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{k_{xx}}{\rho^{\text{ж}} g} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, \quad v_y = \frac{k_{yy}}{\rho^{\text{ж}} g} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}, \quad v_z = \frac{k_{zz}}{\rho^{\text{ж}} g} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial z} - \rho^{\text{ж}} g \right), \\ Q &= - \int_{\Sigma} \left(\frac{k_{xx}}{\rho^{\text{ж}} g} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot n_x + \frac{k_{yy}}{\rho^{\text{ж}} g} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \cdot n_y + \frac{k_{zz}}{\rho^{\text{ж}} g} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial z} - \rho^{\text{ж}} g \right) \cdot n_y \right) d\Sigma \end{aligned}$$

Для проведения расчета по данным уравнениям задаются следующие величины:

1. $k_{xx}(x, y, z)$, $k_{yy}(x, y, z)$, $k_{zz}(x, y, z)$ — коэффициенты фильтрации в грунте в направлении осей координат, которые измеряются в м/сут и характеризуют как размер и форму пор в грунте, так и вязкость воды. В каждом слое грунта устанавливаются коэффициенты фильтрации в зависимости от пространственных координат.

2. $\gamma(x, y, z, t)$ — объемный приток или отбор жидкости из пор, который измеряется в $м/сут$. Данная константа задает откачку или закачку жидкости из произвольного подбъема в грунте и с произвольного шага по времени. Является функцией пространственных координат и времени.
3. $\rho^{жс}$ — плотность воды.
4. g — ускорение свободного падения.
5. α — насыщенность грунта водой. Безразмерная величина $0 \leq \alpha \leq 1$. Состоянию полного насыщения соответствует значение $\alpha = 1$, отсутствию жидкости в порах $\alpha = 0$, где α по определению равна: $\alpha = V_{жс}/(V - V_{мс})$, V — полный объем.
6. n — пористость грунта. Безразмерная величина, которая равна: $n = V_{жс}/V$.
7. E, ν — модуль Юнга и коэффициент Пуассона твердой фазы грунта (каркаса).
8. β — сжимаемость воды. Для воды равно: $\beta = 5 \cdot 10^{-10}$, которая измеряется в $1/Па$.

Участвующие в уравнениях λ, μ — коэффициенты упругости Ламе. Вычисляются через модуль Юнга E , и коэффициент Пуассона ν , по формуле:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Методика предполагает численный метод решения представленных уравнений с заданными граничными условиями, начальными давлением и перемещением. Дискретизация задачи по пространственным переменным осуществляется методом конечных элементов.

Для решения получаемой на каждом шаге по времени системы линейных уравнений используются стандартные прямые процедуры типа метода Гаусса или Холецкого, либо итерационные методы. При решении задач с плохо обусловленной матрицей применены итерационные методы типа Удзавы.

В рамках данной работы разработана расчетная модель сооружения совместно с грунтовым основанием, соответствующая реальной геометрии расчетной области и с заданными физико-механическими характеристиками материалов конструкций и грунтового массива.

В математической модели создается напряженно-деформированное состояние, соответствующее начальному состоянию планово-высотного положения вестибюля и будущей высотной части и далее, с помощью

многовариантного численного расчета, анализа полученных результатов (с учетом места приложения нагрузки, ее величины и давления на каждом этапе строительства), определяется порядок, объем смесей, необходимое давление нагнетания инъецируемого раствора в каждую зону, не допускающего смещения вестибюля метро, обеспечивающего на период всего строительства его неизменное пространственно-высотное положение.

3. Анализ результатов расчетно-теоретического обоснования

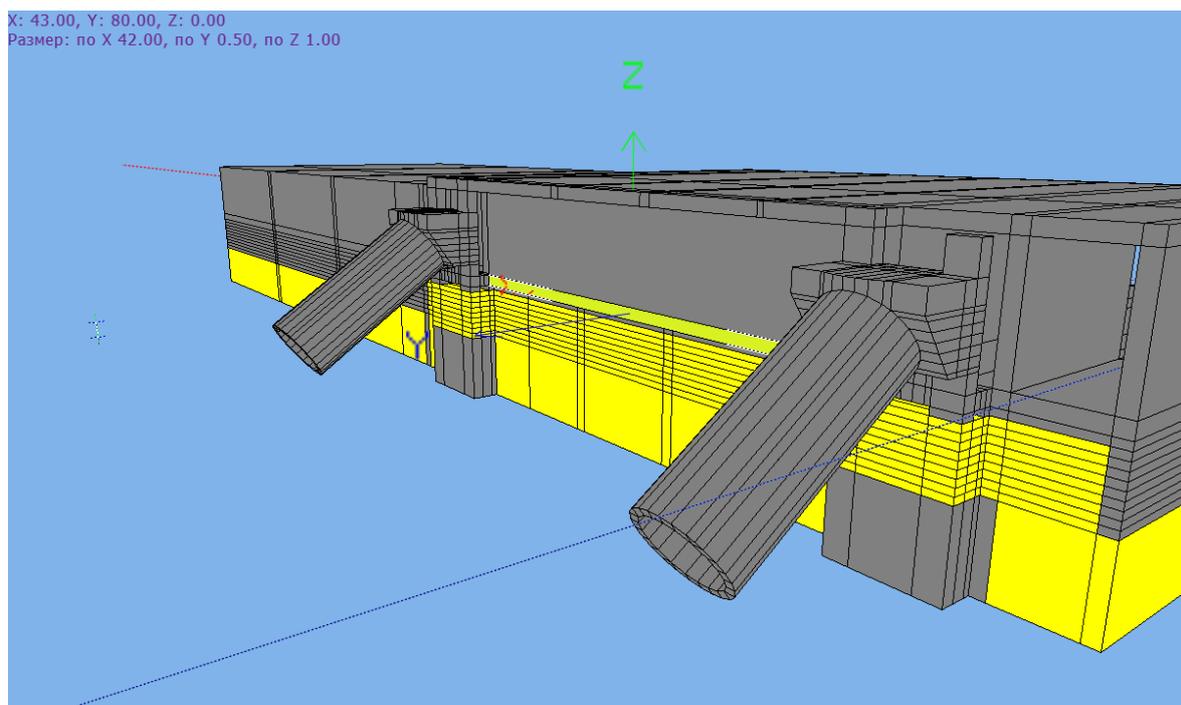
3. Results analysis of the calculation-theoretical justification

При строительстве наземной части высотных объектов определены 3 этапа в последовательности строительства:

1 этап — возведение с 1 по 4 этаж высотной части комплекса вне зоны вестибюля в осях 9–35;

II этап — возведение с 5 по 17 этаж высотной части комплекса и с 1 по 4 этаж торговых площадей над вестибюлем метро;

III этап — возведение с 18 по 21 этаж высотной части комплекса.



1 — здание вестибюля; 2 — эскалаторные наклонные ходы; 3 — уровни компенсационного нагнетания

Рисунок 3. Общий вид расчетной модели (разработано авторами)

1 — lobby building; 2 — escalator inclined tunnel; 3 — compensation grouting levels

Figure 3. General view of the design model (developed by the authors)

В результате расчетов получены результаты рекомендуемых давлений по секторам и этапам, которые в последствии легли в основу технологического регламента и проекта производства работ. Они представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Расчетные давления по секторам и этапам, МПа
Design pressures by sectors and stages, MPa

№	Секторы / Sectors											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Этапа / Stage												
1	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.1	0.12	0.12	0.12	0.15	
2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15	0.2	0.3	0.3	0.3	0.32	
3	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.2	0.25	0.35	0.35	0.35	0.36	

Разработано авторами / Developed by the authors

Распределение вертикальных перемещений после реализации этапа 1 строительства с учетом результата работ по компенсационному нагнетанию приведен на рисунке 4.

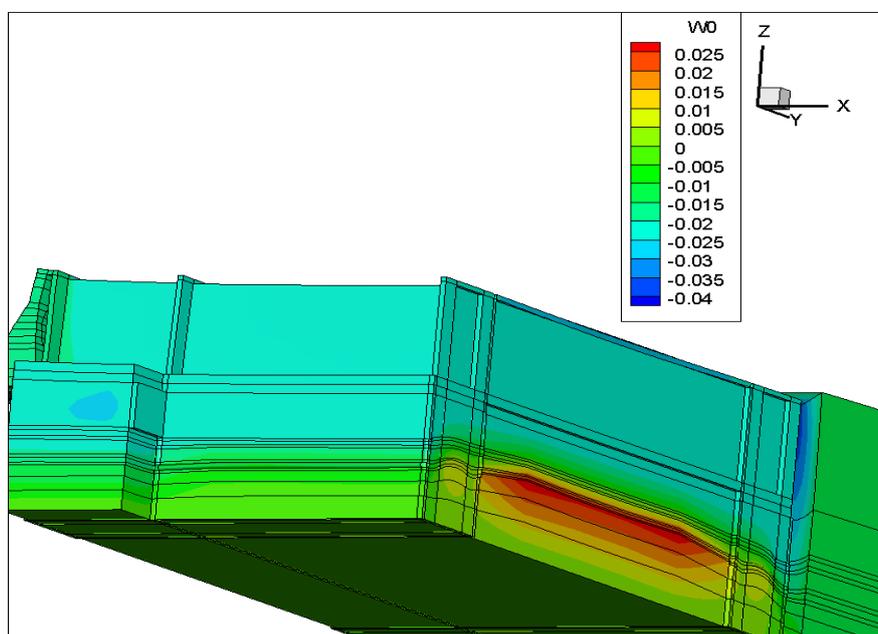


Рисунок 4. Распределение вертикальных перемещений после реализации этапа 1 (разработано авторами)

Figure 4. Distribution of vertical movements after the stage 1 implementation (developed by the authors)

Распределение вертикальных перемещений после реализации этапа 2 строительства с учетом результата работ по компенсационному нагнетанию приведен на рисунке 5.

Распределение вертикальных перемещений после реализации этапа 3 строительства с учетом результата работ по компенсационному нагнетанию приведен на рисунке 6.

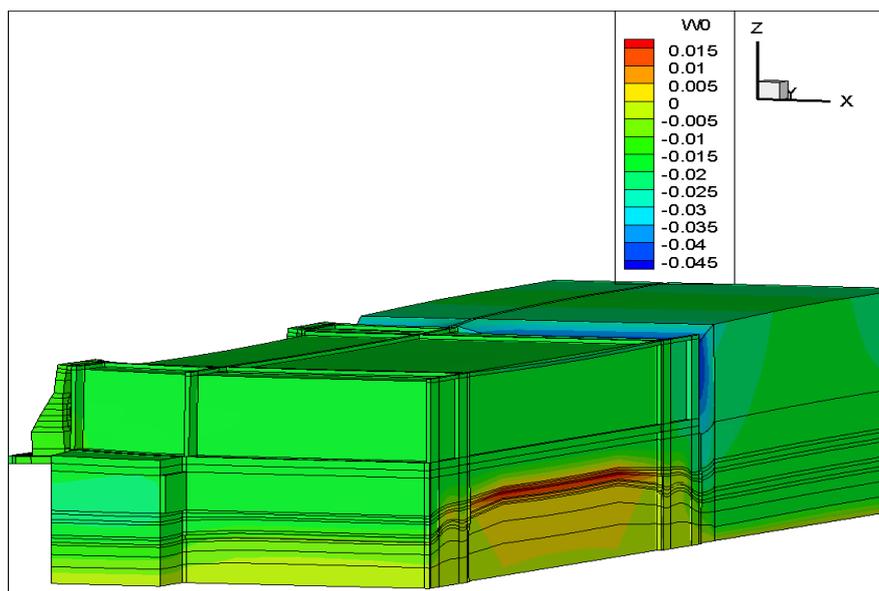


Рисунок 5. Распределение вертикальных перемещений после реализации этапа 2 (разработано авторами)

Figure 5. Distribution of vertical movements after the stage 2 implementation (developed by the authors)

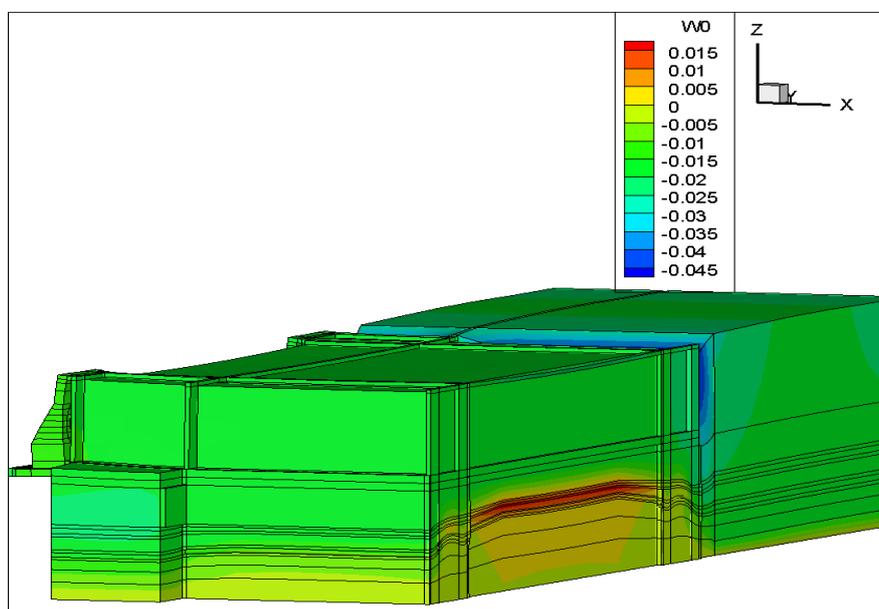


Рисунок 6. Распределение вертикальных перемещений после реализации этапа 3 (разработано авторами)

Figure 6. Distribution of vertical movements after the stage 3 implementation (developed by the authors)

В результате численного моделирования развития НДС грунта на разных стадиях компенсационного нагнетания установлен порядок выполнения инъекционных работ, обеспечивающих удержание на одной отметке стыка эскалаторов и вестибюля при надстройке над ним надземной части МФК.

В соответствии с выполненным расчётом установлены давления нагнетания в инъекционных скважинах с распределением по 4-м ярусам на разных этапах строительства МФК. Результаты расчётов представлены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Давление нагнетания в инъекционных скважинах
Grouting pressure in injection wells

Этапы строительства Construction stages	Давление нагнетания по ярусам, МПа Grouting pressure by layers, MPa			
	1	2	3	4
Этап 1 / Stage 1	0.8/0.7	0.8/0.7	0.8/0.7	0.7/0.6
Этап 2 / Stage 2	0.5	0.5	0.5	0.5
Этап 3 / Stage 3	0.4	0.45	0.45	0.4

Разработано авторами / Developed by the authors

С целью исключения осадочных деформаций на:

- этапе 1 выполняется нагнетание по ярусам 1 и 2 нижнего ряда с давлением нагнетания 0.8 МПа на ярусе 1 и при переходе на верхний ярус 2 — давление 0.7 МПа;
- этапе 2 — нагнетание выполняется при давлении 0,5 МПа;
- этапе 3 — нагнетание при давлении 0,4 МПа на нижнем ярусе и 0,45 МПа — на верхних ярусах.

Кроме того, в соответствии с выполненным расчётным обоснованием установлено распределение инъекционной смеси по каждому из назначенных секторов, которое обеспечивает устранение осадочных деформаций на:

- этапе 1 до 7 мм;
- этапе 2 компенсация осадочных деформаций вестибюля в объёме 16 мм;
- этапе 3 устраняются осадочные деформации вестибюля до 9 мм.

На рисунках 7–9 представлены зависимости величин компенсации осадочных деформаций от объёма нагнетания при соответствующих давлениях при нагнетании на 1–3 этапах строительства МФК.

Выполненное расчётное обоснование является основанием для разработки технологического регламента при производстве инъекционных работ по технологии компенсационного нагнетания, обеспечивающего эксплуатационную надёжность объектов метрополитена при строительстве МФК в крайне стеснённых условиях плотной городской застройки.

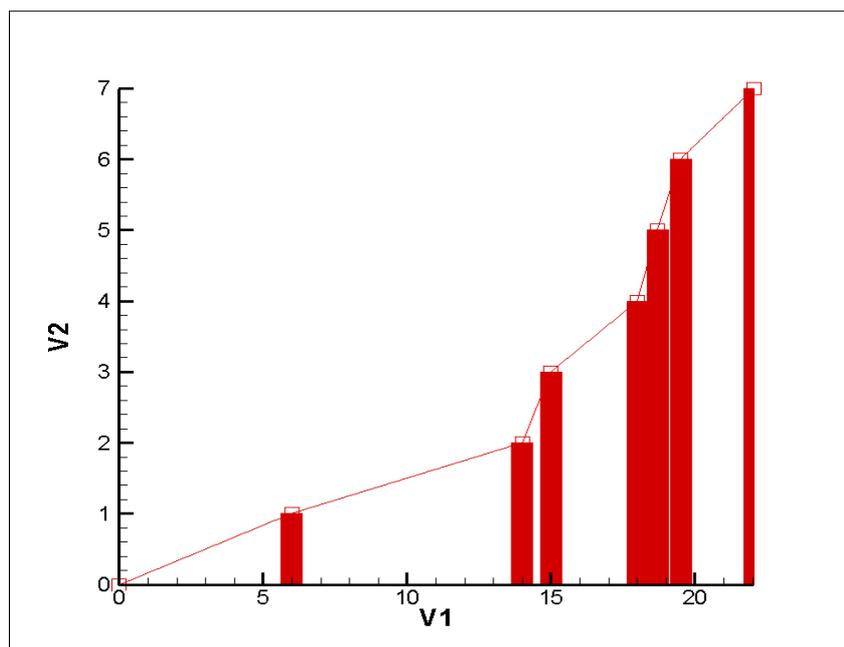


Рисунок 7. Зависимость компенсации осадочных деформаций V_2 от объёма нагнетания V_1 на этапе 1 строительства (разработано авторами)

Figure 7. Dependence of sedimentary deformations compensation V_2 on the grouting volume V_1 at construction stage 1 construction (developed by the authors)

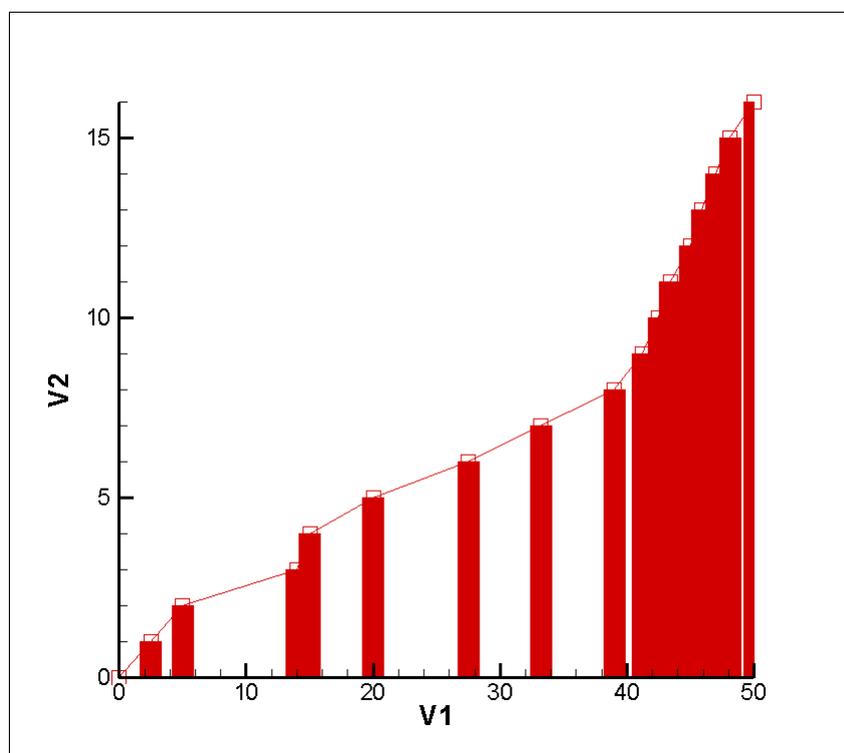


Рисунок 8. Зависимость компенсации осадочных деформаций V_2 от объёма нагнетания V_1 на этапе 2 строительства (разработано авторами)

Figure 8. Dependence of sedimentary deformations compensation V_2 on the grouting volume V_1 at construction stage 2 construction (developed by the authors)

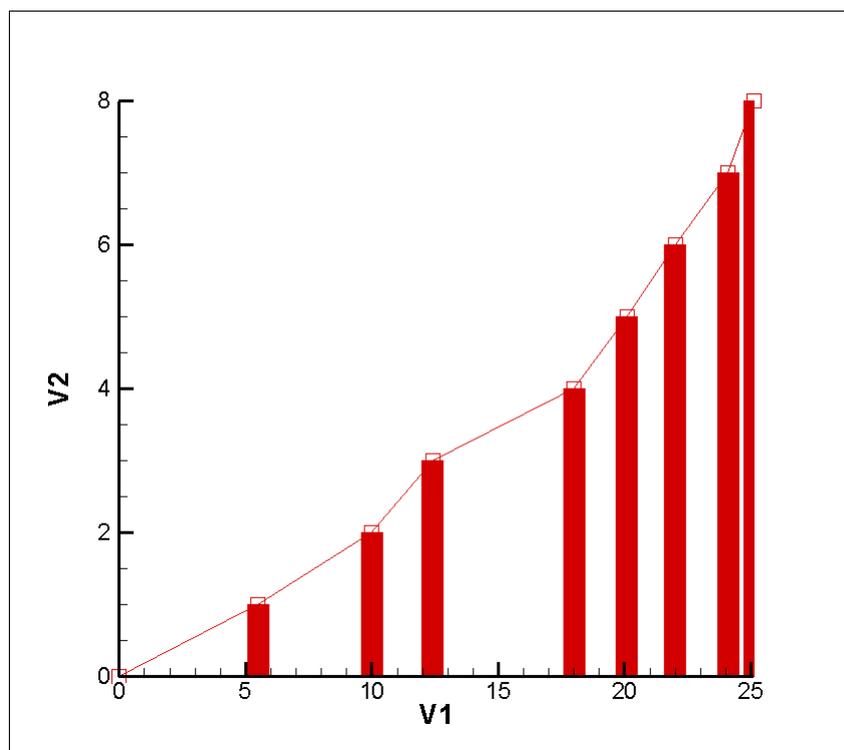


Рисунок 9. Зависимость компенсации осадочных деформаций V2 от объема нагнетания V1 на этапе 3 строительства (разработано авторами)

Figure 9. Dependence of sedimentary deformations compensation V2 on the grouting volume V1 at construction stage 3 construction (developed by the authors)

Выводы

Conclusions

В результате многовариантного численного моделирования выполнено расчётное обоснование основных технологических параметров компенсационного нагнетания, обеспечивающих эксплуатационную надёжность объектов метрополитена на всех этапах строительства и эксплуатации МФК.

Защита эскалаторных сооружений от осадочных деформаций обеспечивается за счёт строго контролируемого превентивного подъёма фундаментной плиты до уровня, не превышающего 2 мм и поддержания его в период выполнения строительно-монтажных работ по сооружению МФК.

ЛИТЕРАТУРА

1. **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).

2. **Moseley, M.P.** Ground Improvement (Second Edition) / M.P. Moseley, K. Kirsch, E. Falk. — Лондон: Spon Press, 2004. — 440 с.
3. **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).
4. **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).
5. **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).
6. **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).
7. **Pleithner, M.** A new method of compensating settlement of buildings by injections of cement grout / M. Pleithner, W. Bernatzik // Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Switzerland, 16–27 August / Цюрих: ICOSOMEF, 1953. — С. 450–453. — (На фр. яз.).
8. **Иванова, И.С.** Особенности процесса гидратации микроцемента / И.С. Иванова, А.П. Пустовгар, А.В. Еремин // Наука, образование и инновации: Сборник статей Международной научно-практической конференции, Челябинск, 28 декабря 2015 года / Ответственный редактор: Сукиасян Асатур Альбертович Челябинск: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2015. — С. 35–42. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25130792&pf=1> (дата обращения: 19.04.2022).
9. **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).
10. **Панкина, С.Ф.** Общая геотехническая концепция строительства туннеля в Лефортово (г. Москва) и мероприятия по защите исторических зданий от деформаций / С.Ф. Панкина, В.В. Чеботаев, В.А. Ильичев, В.П. Петрухин, И.В. Колыбин // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1998. — № 2. — С. 17–21. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26182765> (дата обращения: 12.05.2022).
11. **Bouchelaghem, F.** Multi-scale modelling of the permeability evolution of fine sands during cement suspension grouting with filtration / F. Bouchelaghem. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.03.016> // Computers and Geotechnics. — 2009. — Т 36. — № 6. — С. 1058–1071. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266352X09000615> (дата обращения: 12.05.2022).
12. **Харченко, И.Я.** Особенности проектирования, строительства и эксплуатации туннелей 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).
13. **Меркин, В.Е.** О нормативном обеспечении проектирования городских автотранспортных туннелей. Тоннели XXI века / В.Е. Меркин, Б.Н. Виноградов, Л.В. Маковский // Дороги России XXI века. — 2007. — № 2. — С. 14–19.

14. **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).
15. **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).

Сведения об авторах:

Коваль Сергей Всеволодович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: lavrik2811@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1425-4610>

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

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>

Смирнов Александр Петрович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Основания и фундаменты, строительство и экспертиза объектов недвижимости», ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева», Москва, Россия, e-mail: sxodnyasmirnov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1507-3312>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=826578

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

Сонин Александр Николаевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: axsonin@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1881-8671>

Идиатулин Данил Русланович — аспирант кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: idiatulindanil@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3872-543X>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1047894

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

Статья получена: 05.07.2022. Принята к публикации: 10.09.2022. Опубликовано онлайн: 24.09.2022.

REFERENCES

1. 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.).
2. Moseley M.P., Kirsch K., Falk E. *Ground Improvement (Second Edition)*. London: Spon Press; 2004. (In Eng.).
3. 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.).
4. Irtuganova V.R., Safronova K.V., Chyunuk 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.).
5. 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.).
6. 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.).
7. Pleithner M., Bernatzik W. A new method of compensating settlement of buildings by injections of cement grout [Nouveau procédé de remise à niveau de bâtiments affaissés au moyen d'injections de ciment]. In: *Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Switzerland, 16–27 August*. Zurich: ICOSOMEF; 1953. p. 450–453. (In French).
8. Ivanova I.S., Pustovgar A.P., Eremin A.V. [Features of the microcement hydration process]. In: *[Science, education and innovation: Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference, Chelyabinsk, December 28, 2015]*. Chelyabinsk: ОМЕГА САЙНС; 2015. p. 35–42. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25130792&pff=1> (accessed 19th April 2022). (In Russ.).
9. 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>.
10. Pankina S.F., Chebotayev V.V., Il'ichev V.A., Petrukhin V.P., Kolybin I.V. [General geotechnical concept for the construction of a tunnel in Lefortovo (Moscow) and measures to protect historical buildings from deformation]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1998; (2): 17–21. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26182765> (accessed 19th April 2022). (In Russ.).
11. Bouchelaghem F. Multi-scale modelling of the permeability evolution of fine sands during cement suspension grouting with filtration. *Computers and Geotechnics*. 2009; 36(6): 1058–1071. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.03.016>.
12. 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>.
13. Merkin V.E., Vinogradov B.N., Makovskiy L.V. O normativnom obespechenii proyektirovaniya gorodskikh avtotransportnykh tonneley. Tonneli XXI veka [On regulatory support for the design of urban motor transport tunnels. Tunnels of the 21st century]. *Dorogi Rossii XXI veka [Roads of Russia in the 21st century]*. 2007; (2): 14–19. (In Russ.).
14. 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>.

15. 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.).

Information about the authors:

Sergey V. Koval — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia, e-mail: lavrik2811@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1425-4610>

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

Aleksandr A. Piskunov — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
e-mail: a.piskunov52@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5444-8415>

Aleksandr P. Smirnov — Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, Russia, e-mail: sxodnyasmirnov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1507-3312>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=826578

Aleksei I. Kharchenko — Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
Moscow, Russia, Research Institute of Expertise and Engineering, e-mail: greenstone236@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3850-4285>

Aleksandr N. Sonin — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
e-mail: axsonin@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1881-8671>

Daniil R. Idiatulin — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
e-mail: idiatulindanil@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3872-543X>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1047894

Igor Ya. Kharchenko — Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
Moscow, Russia, Research Institute of Expertise and Engineering, e-mail: iharcenko@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6310-016X>

Submitted: 5th July 2022. Revised: 10th September 2022. Published online: 24th October 2022.