

Изменение напряженно-деформированного состояния
грунтового массива при компенсационном нагнетании
вблизи котлована

Армен Завернович Тер-Мартirosян¹, Валерий Петрович Кивлюк²,
Илья Олегович Исаев²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Мосинжпроект; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительство транспортных линий и вспомогательных сооружений метрополитена часто сопряжено с большими сложностями в обеспечении предельных значений осадок и кренов зданий и сооружений, находящихся в зоне влияния нового строительства. Компенсационное нагнетание является мероприятием, которое позволяет уменьшить скорость нарастания деформаций грунтового основания, а также обеспечить значения осадок и кренов, не превышающие предельных величин. Исследование посвящено постановке и аналитическому решению задачи о напряженно-деформированном состоянии (НДС) массива грунта, обладающего весом, за ограждением котлована глубиной h с учетом влияния распределенной полосовой нагрузки $q = \text{const}$ шириной $b = 2a$ на глубине d и на расстоянии c от края ограждающей конструкции котлована

Материалы и методы. Для задачи о НДС массива грунта, обладающего весом, за ограждением котлована глубиной h с учетом влияния распределенной полосовой нагрузки $q = \text{const}$ шириной $b = 2a$ на глубине d и на расстоянии c от края ограждающей конструкции котлована компоненты напряжений получены на основе решения задачи Э. Мелана. Деформации грунтового массива определены с помощью закона Гука.

Результаты. Разработан аналитический метод количественной оценки НДС основания при действии давления компенсационного нагнетания. Получены изополя напряжений и деформации, которые позволяют установить величины строительного подъема основания и тем самым оценить эффективность метода компенсационного нагнетания.

Выводы. В результате аналитического решения задачи о действии давления нагнетания, направленного вверх и вниз, вблизи ограждающей стены котлована на основании решения Мелана получены формулы для определения компонент нормальных и касательных напряжений. Анализ результатов решения показывает, что действие давления нагнетания, направленного вверх и вниз вблизи ограждающей стены котлована, существенно влияет на НДС всего массива, а в ограждающей конструкции могут возникать значительные горизонтальные напряжения, что требует учета при расчете ограждающих конструкций по I группе предельных состояний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: компенсационное нагнетание, давление нагнетания, манжетная технология, НДС, грунтовое основание, задача Мелана, ограждение котлована

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян А.З., Кивлюк В.П., Исаев И.О. Изменение напряженно-деформированного состояния грунтового массива при компенсационном нагнетании вблизи котлована // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 5. С. 734–744. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.734-744

Автор, ответственный за переписку: Армен Завернович Тер-Мартirosян, gic-mgsu@mail.ru.

A change in the stress-strain state of soil mass due
to compensation grouting near an excavation

Armen Z. Ter-Martirosyan¹, Valery P. Kivlyuk², Ilya O. Isaev²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Mosinzhpromekt; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Construction of transportation lines and auxiliary structures of an underground railway is often cumbersome due to the requirement not to exceed maximum values of subsidence and tilt of buildings and structures in areas affected by new construction projects. Compensation grouting is the action that decelerates soil deformations and prevents the subsidence and tilt of buildings and structures from exceeding the limit values. The study focuses on the formulation of and the analytical solution to the problem of the stress-strain state of the soil mass that has weight and that is located beyond the excavation shoring, if depth equals h , distributed strip load q is constant, width b equals $2a$, depth equals d , and the distance from the edge of the pit retaining wall equals c .

Materials and methods. A solution to the E. Melan problem was applied to obtain normal and tangential stresses to solve the problem of the stress-strain state of the soil mass that has weight and that is located beyond the excavation shoring, if excavation depth equals h , distributed strip load q is constant, width b equals $2a$ at depth d , and the distance from the edge of the excavation shoring equals c . Hooke's law was applied to find the soil mass deformation.

Results. An analytical method was developed to make a quantitative assessment of the stress-strain state of soil under the action of compensation grouting. Isofields of stresses and deformations were obtained to find values of soil uplift and to evaluate the compensation grouting effectiveness.

Conclusions. An analytical solution to the E. Melan problem was applied to solve the problem of injection pressure, acting upward and downward near the excavation shoring, and to derive formulas needed to find components of normal and tangential stresses. The solution analysis shows that the injection pressure, acting upward and downward near the excavation shoring, greatly affects the stress-strain state of the entire soil mass, while large horizontal stresses may occur in the excavation shoring. This issue must be considered in the course of analyzing the strength and stability of excavation shoring.

KEYWORDS: compensatory injection, injection pressure, sleeve-type technology, stress-strain statement, soil, E. Melan task, excavation shoring

FOR CITATION: Ter-Martirosyan A.Z., Kivlyuk V.P., Isaev I.O. A change in the stress-strain state of soil mass due to compensation grouting near an excavation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5): 734-744. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.734-744 (rus.).

Corresponding author: Armen Z. Ter-Martirosyan, gic-mgsu@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Интеграция современных транспортных линий и вспомогательных сооружений метрополитена в уже сложившуюся застройку г. Москвы влечет за собой значительные трудности в обеспечении безопасной эксплуатации зданий и сооружений, находящихся в зоне влияния нового строительства подземных сооружений. Эти здания и сооружения подвергаются дополнительным осадкам и кренам, которые зачастую многократно превышают предельно допустимые значения, установленные СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений». Компенсационное нагнетание — мероприятие, которое трансформирует напряженно-деформированное состояние (НДС) грунтового основания таким образом, что становится возможным уменьшить скорость нарастания деформаций грунтового основания, а также обеспечить значения осадок и кренов, не превышающих предельных величин.

Одними из самых показательных по технологичности и эффективности примеров применения данной технологии в гидротехническом строительстве являются стабилизация имеющихся осадок, вызванных геологическими процессами в основании гидроузла на судоходной р. Неккар вблизи г. Хессигхайм [1], строительный подъем сооружения Загорской ГАЭС-2 (рис. 1) [2–4]. Также технология компенсационного нагнетания имеет успешную реализацию в примерах метростроения (рис. 2), описанных С. Kummerer, E. Falk, F. Gularte [5], S.K.A. Au, K. Soga, M.R. Jafari, M.D. Bolton и K. Komiyu [6] и др. [7–14].

Технология выполнения работ по компенсационному нагнетанию состоит из следующих этапов: бурение скважин и их обустройство; установка манжетного иньектора в манжетную колонну, удаление манжетной колонны и установка двойного пакера в зону нагнетания, фиксация пакера и нагнетание раствора через манжету под давлением от насосной станции. Трубы-иньекторы оснащаются резино-

выми манжетами, выполняющими роль обратного клапана, не позволяющего попадать раствору обратно из скважины в иньектор при снижении давления. Нагнетание ведется точно путем многократной инъекции [4, 15]. Последовательность работ при манжетной технологии нагнетания инъекционного раствора представлена на рис. 3.

Большинство исследований по компенсационному нагнетанию сосредоточены на определении эффективности строительного подъема массива грунта и фундаментных конструкций, находящихся в нем. А.Н. Симутиным рассмотрена задача о радиальных перемещениях для подъема массива грунта в пределах ячейки [16]. Автор И.В. Чубатов [17] разработал специальную методику численного моделирования геомеханических процессов, возникающих в грунте основания при адресном нагнетании строительного раствора. Известно теоретическое решение для определения НДС грунтового основания при появлении нормального и сдвигового напряжений, вызванных в точке объемного расширения из-за гидроразрыва и в точке заполнения пор раствором. Оно разработа-

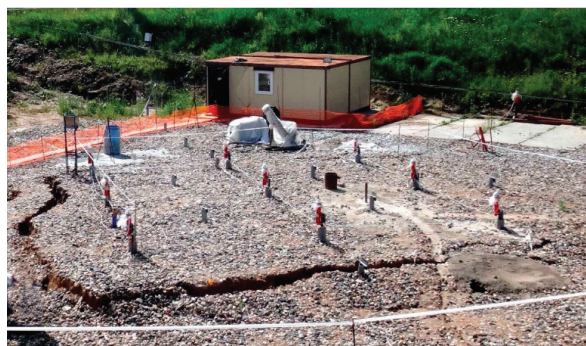


Рис. 1. Проведение работ по подъему массива грунта над моделью фундаментной плиты на площадке опытного участка Загорской ГАЭС-2

Fig. 1. Soil mass uplift above the model of the foundation plate at the experimental site of Zagorsk mixed pumped-storage plant-2

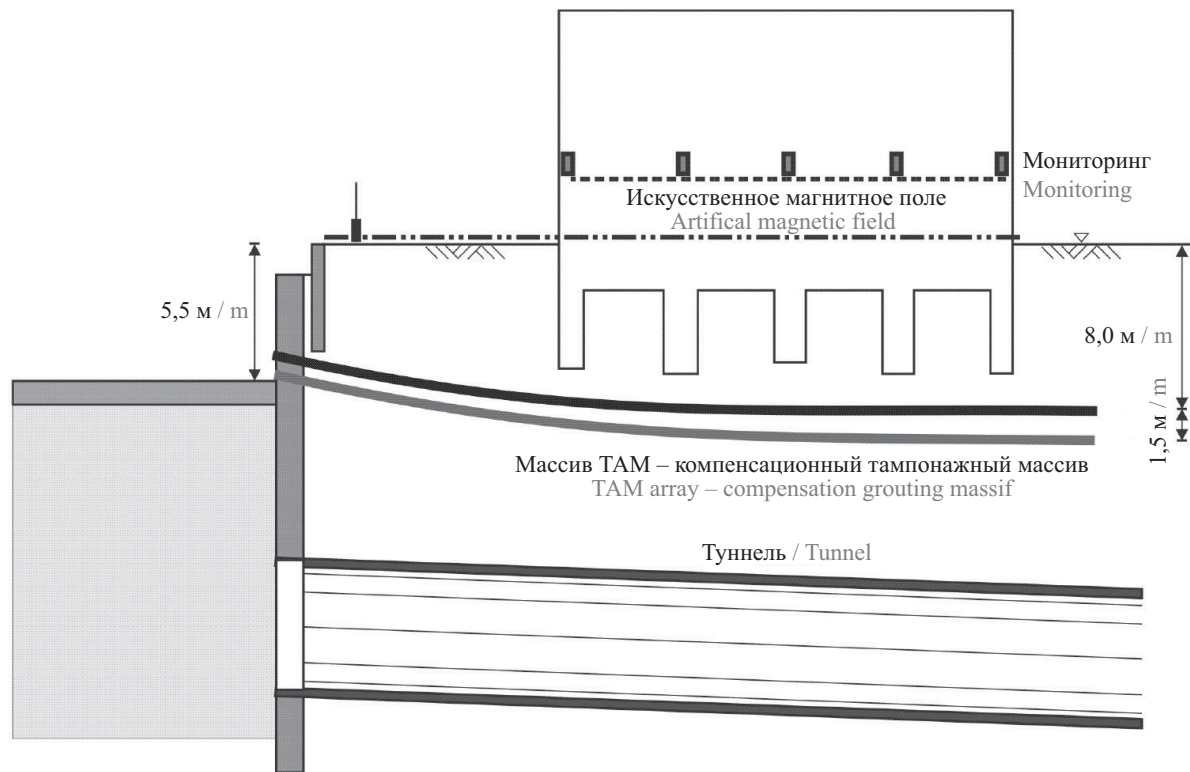


Рис. 2. Пример выполнения компенсационного нагнетания в рамках проходки туннеля (по С. Kummerer, Е. Falk, F. Gularte)

Fig. 2. The case of compensation grouting in the course of tunneling (K. Kammerer, E. Falk, F. Gularte)

но Sagaseta [18], а позже доработано Gollegger [19] на основе метода зеркального отображения, который используется при расчете осадок земной поверхности вследствие перебора грунта при проходке туннелей.

Одним из первых решений по оценке напряженного состояния при действии линейной нагрузки на поверхность полупространства является

решение Фламана (1892 г.) [20, 21]. Также вопросами распределения напряжений в массиве грунта занимались многие ученые: Мелан (1919 г.) [22], Маргер (1931 г.), Бурмистер (1956 г.), О.Я. Шехтер (1937 г.), Г.К. Клейн [23], М.И. Горбунов-Посадов (1946–1953 гг.) [24], К.Е. Егоров (1961 г.) [25], Н.А. Цытович (1943 г.) [26].

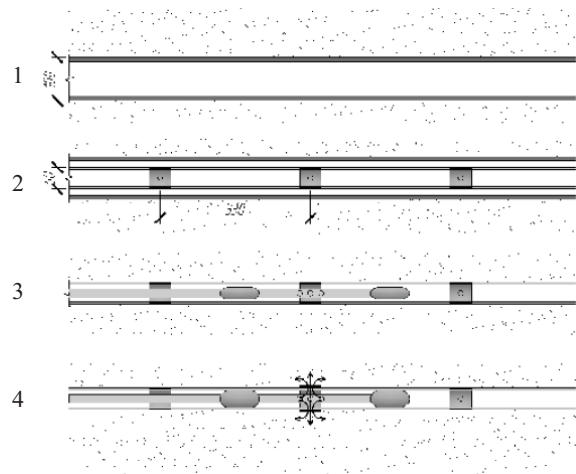


Рис. 3. Последовательность работ при манжетной технологии нагнетания инъекционного раствора

Fig. 3. The sequence of operations performed within the framework of the sleeve-type injection technology

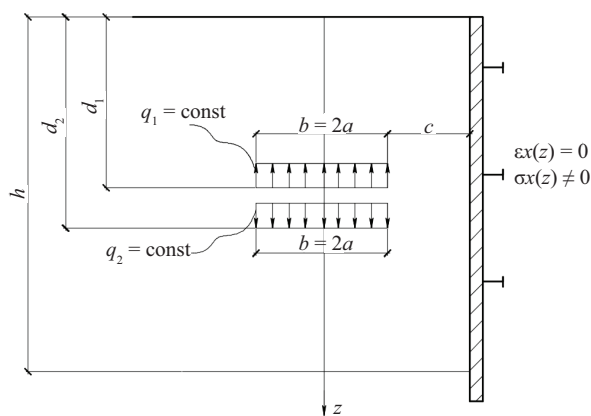


Рис. 4. Расчетная схема для определения НДС при действующих нагрузках $q_1 = \text{const}$ и $q_2 = \text{const}$ по полосе $b = 2a$ на глубине d_1 и d_2 на расстоянии c

Fig. 4. The design scheme for determining the stress-strain state under distributed loading $q_1 = \text{const}$ and $q_2 = \text{const}$ for width $b = 2a$, depth d_1 and d_2 , and distance c

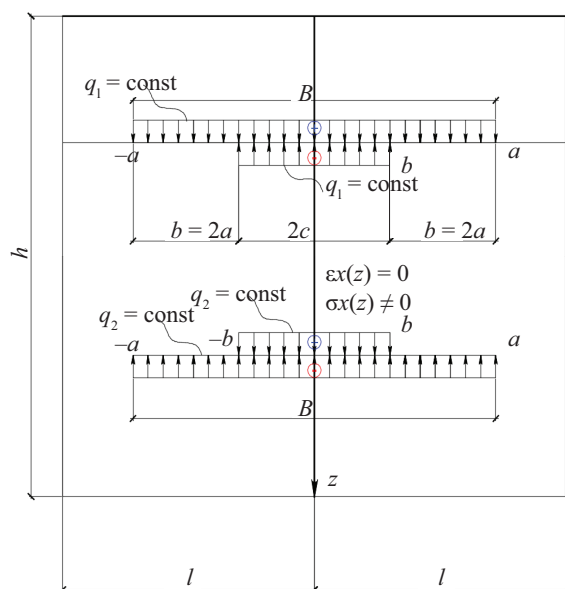


Рис. 5. Эквивалентная расчетная схема для определения НДС при действующей нагрузке $q = \text{const}$ по полосе $b = 2a$ на глубине d на расстоянии c

Fig. 5. The equivalent design scheme for determining the stress-strain state under distributed loading $q = \text{const}$ along strip $b = 2a$ at depth d and at a distance c

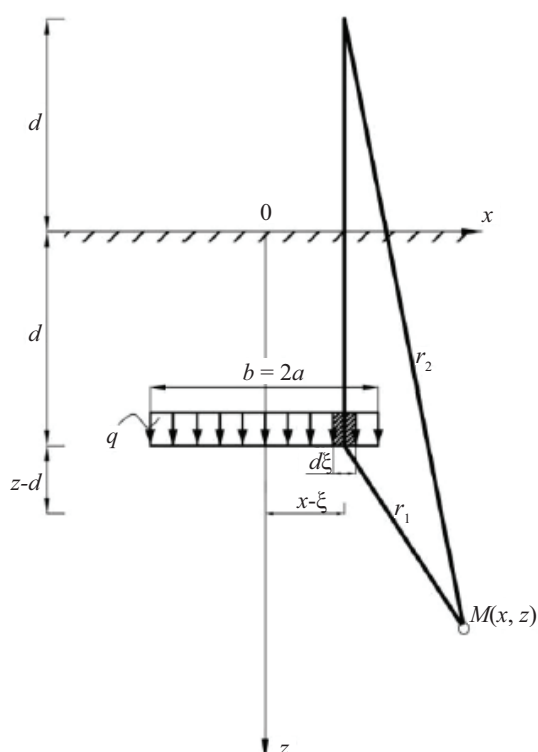


Рис. 6. Расчетная схема по уравнениям Мелана для определения НДС при нагрузке $q = \text{const}$ по полосе $b = 2a$ на глубине d

Fig. 6. The design scheme for determining the stress-strain state under distributed loading $q = \text{const}$ along strip $b = 2a$ at depth d (the E. Melan problem)

Несмотря на развитие новых методов и подходов к определению НДС грунтовых массивов при проведении работ по компенсационному нагнетанию, в настоящее время отсутствуют аналитические решения, позволяющие при этом учесть большой спектр факторов.

Цель исследования — получить аналитическое решение действия давления нагнетания в массиве грунта при выполнении работ по манжетной технологии, позволяющее учесть расстояние от котлована до зоны нагнетания, ширину зоны и величину подаваемого давления.

В статье приведены постановка и аналитическое решение задачи об НДС массива грунта, обладающего весом, за ограждением котлована глубиной h при действии компенсационного нагнетания в виде распределенной полосовой нагрузки $q_1 - q_2 = \text{const}$ шириной $b = 2a$ на глубине d_1 и d_2 на расстоянии s от края ограждения котлована.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчетная схема к задаче приведена на рис. 4. Для создания равномерно распределенной нагрузки на расстоянии s от ограждения котлована использовался принцип симметрично расположенных нагрузок [27–30]. Расчетная схема представлена в виде сложения равномерно распределенных нагрузок интенсивностью q_1 по полосе шириной $2a$ и интенсивностью $-q_1$ по полосе шириной $2c$ с аналогичным действием нагрузок q_2 по полосе шириной $2a$ и интенсивностью $-q_2$ по полосе шириной $2c$. Эквивалентная расчетная схема для моделирования действия давления нагнетания цементного раствора по манжетной технологии в грунтовый массив показана на рис. 5.

Для определения компонент напряжений в однородном по глубине массиве грунта в условиях плоской задачи, когда действует распределенная нагрузка по полосе шириной $b = 2a$ на глубине d и на расстоянии s , необходимо использовать уравнения, полученные Э. Меланом для сосредоточенной силы на глубине. Данные уравнения требуется проинтегрировать в пределах ширины полосы нагрузки от $-a$ до a ($b = 2a$) в соответствии с расчетной схемой (рис. 6). При интегрировании заменить x на $(x - \xi)$, где ξ — переменная интегрирования, и заменить q на $q \cdot d\xi$, где q — интенсивность распределенной нагрузки. Таким образом, будет получено аналитическое решение, учитывающее распределенный характер нагрузки на полосу шириной $2a$.

Результаты интегрирования уравнений Э. Мелана представлены ниже:

$$\sigma_z = \int_{-a}^a \frac{q}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[\frac{(z-d)^3}{r_1^4} + \frac{(z+d)[(z+d)^2 + 2dz]}{r_2^4} - \frac{8dz(z+d)(x+\xi)}{r_2^6} \right] + \right. \\ \left. + \frac{m-1}{4m} \left[\frac{z-d}{r_1^2} + \frac{3z+d}{r_2^2} - \frac{4z(x-\xi)^2}{r_2^4} \right] \right\} d(x-\xi); \tag{1}$$

$$\sigma_x = \int_{-a}^a \frac{q}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[\frac{(z-d)(x-\xi)^2}{r_1^4} + \frac{(z+d)[(x-\xi)^2 + 2d^2]}{r_2^4} - \frac{2d(x-\xi)^2}{r_2^4} + \frac{8dz(z+d)(x+\xi)^2}{r_2^6} \right] + \right. \\ \left. + \frac{m-1}{4m} \left[\frac{z-d}{r_1^2} + \frac{3z+d}{r_2^2} - \frac{4z(x-\xi)^2}{r_2^4} \right] \right\} d(x-\xi); \tag{2}$$

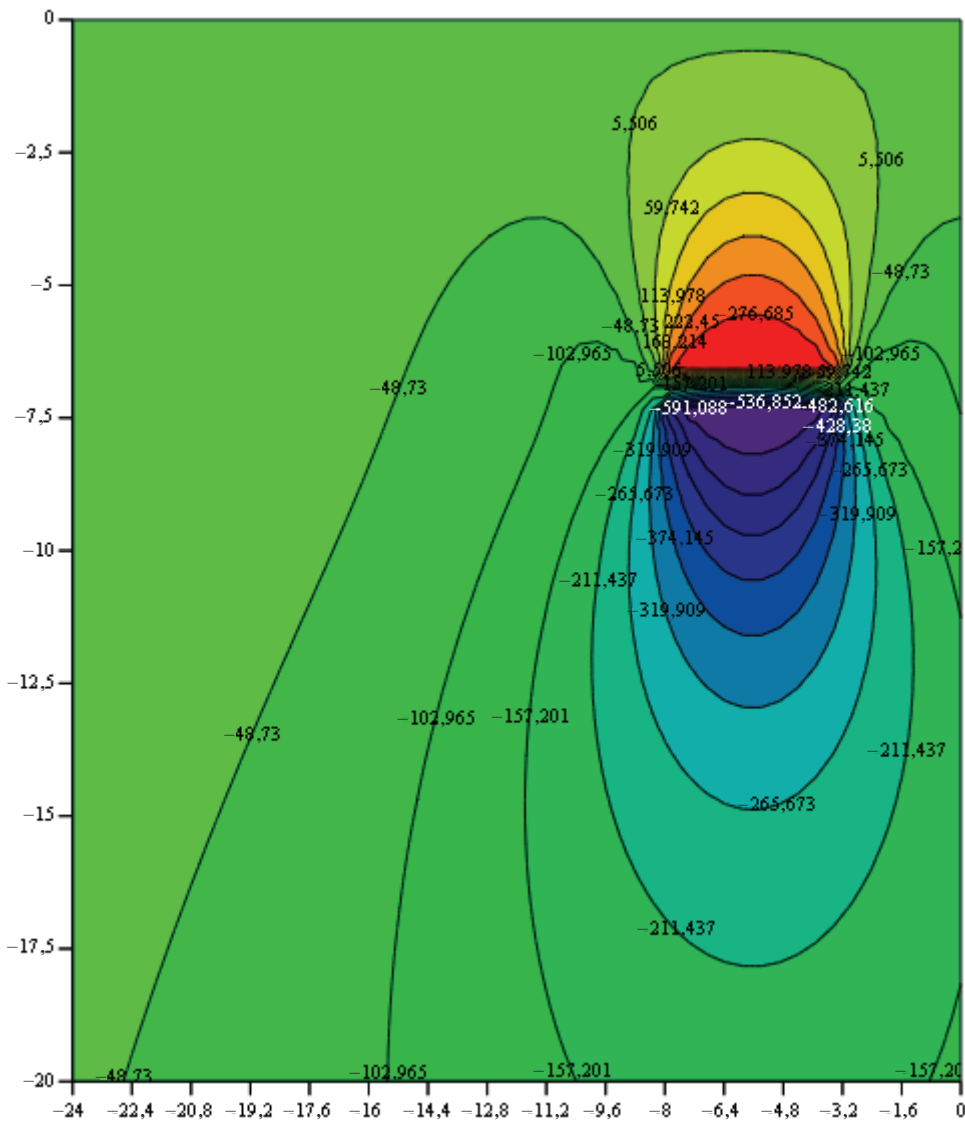


Рис. 7. Изолинии вертикальных напряжений при действии нагрузок $q_1 = \text{const}$ и $q_2 = \text{const}$ по полосе $b = 2a$ на глубине d на расстоянии c

Fig. 7. Isolines of vertical stresses under the action of loads $q_1 = \text{const}$ and $q_2 = \text{const}$ along strip $b = 2a$ at depth d and at distance c

$$\tau_{zx} = \int_{-a}^a \frac{q(x-\xi)}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[\frac{(z-d)^4}{r_1^4} + \frac{z^2-2dz-d^2}{r_2^4} + \frac{8dz(z+d)^2}{r_2^6} \right] + \right. \\ \left. + \frac{m-1}{4m} \left[\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \frac{4z(z+d)}{r_2^4} \right] \right\} d(x-\xi), \quad (3)$$

где переменные r_1 и r_2 могут быть описаны формулами:

$$r_1^2 = (x-\xi)^2 + (z-d)^2; \quad (4)$$

$$r_2^2 = (x-\xi)^2 + (z+d)^2. \quad (5)$$

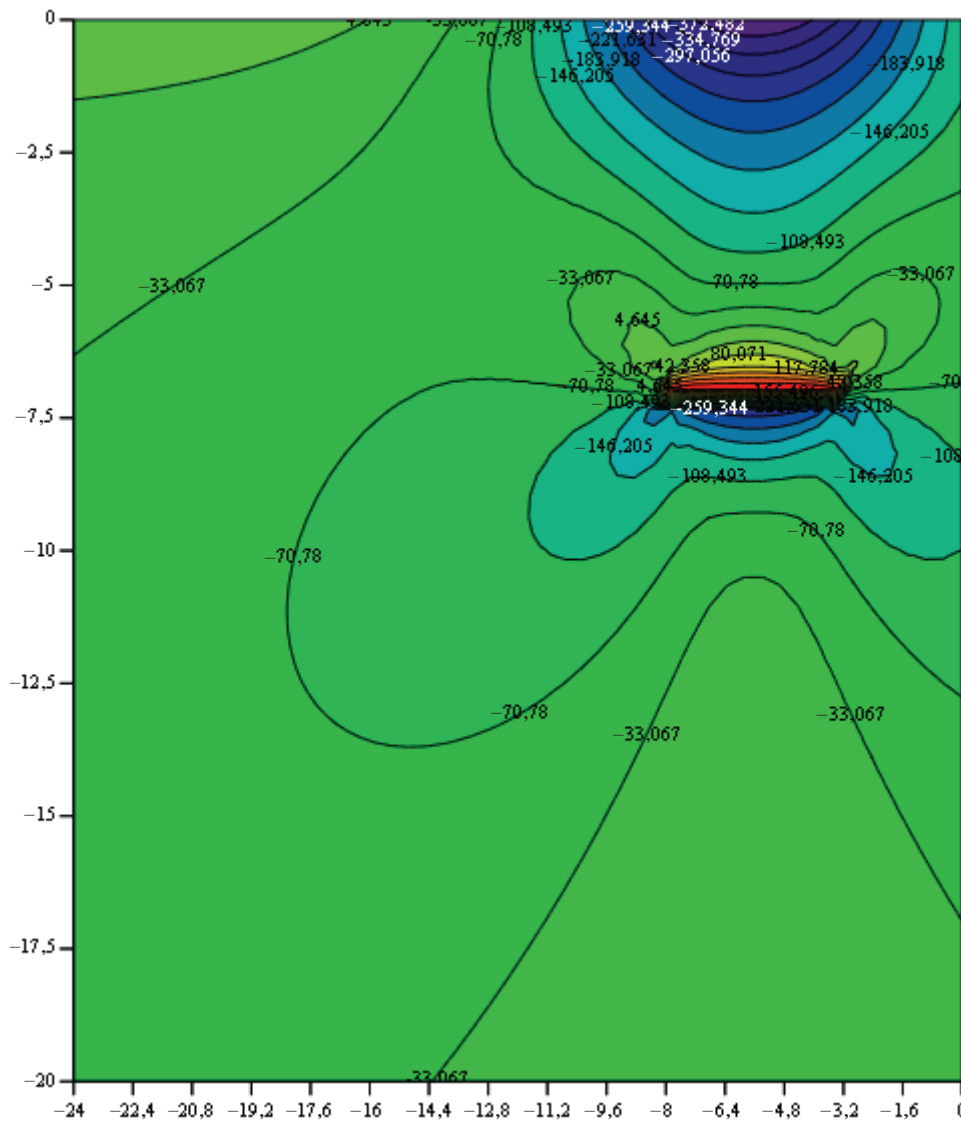


Рис. 8. Изолинии горизонтальных напряжений при действии нагрузок $q_1 = q_2 = \text{const}$ по полосе $b = 2a$ на глубине d на расстоянии c

Fig. 8. Isolines of horizontal stresses under the action of loads $q_1 = \text{const}$ and $q_2 = \text{const}$ along strip $b = 2a$ at depth d and at distance c

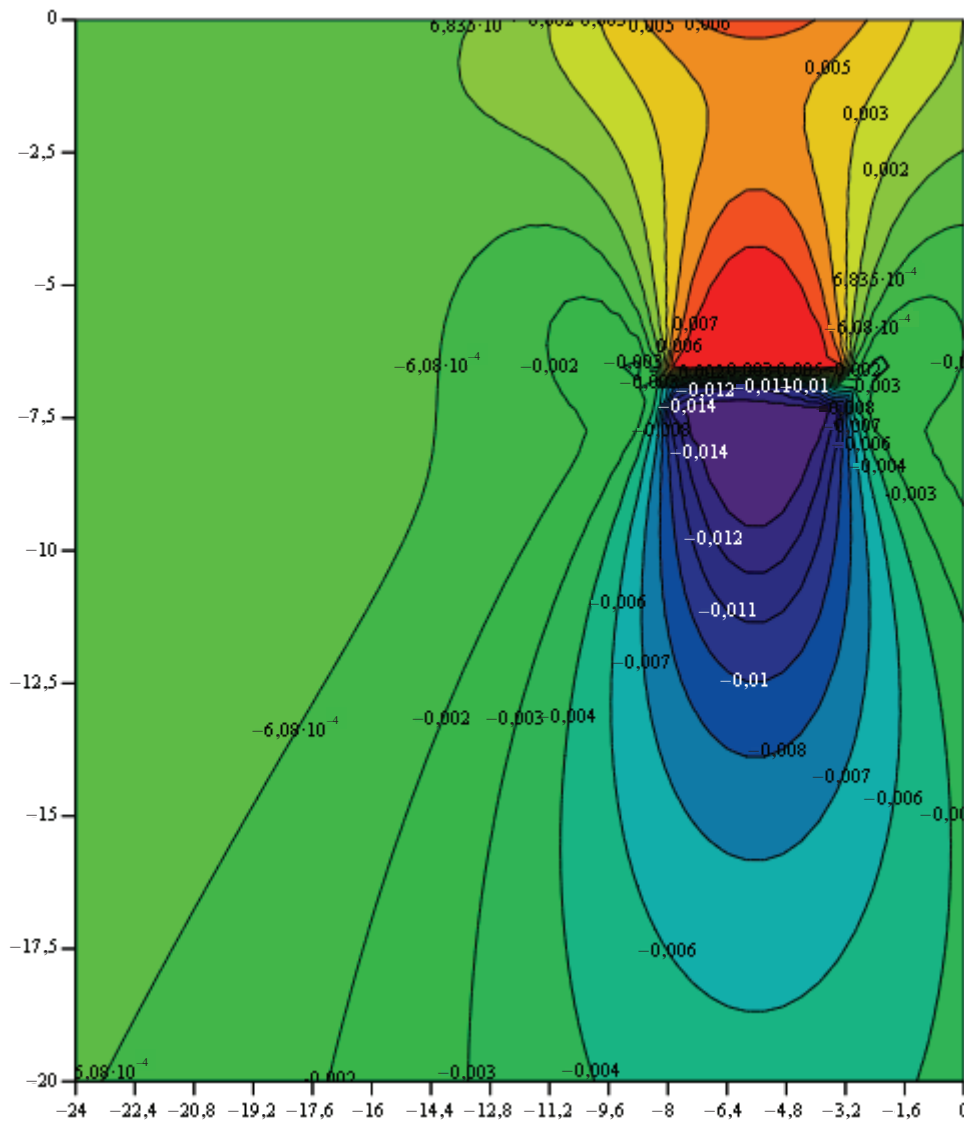


Рис. 9. Изолинии вертикальных перемещений при действии нагрузок $q_1 = q_2 = \text{const}$ по полосе $b = 2a$ на глубине d на расстоянии c

Fig. 9. Isolines of vertical displacements under the action of loads $q_1 = \text{const}$ and $q_2 = \text{const}$ along strip $b = 2a$ at depth d and at distance c

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Аналитический расчет при помощи программного комплекса (ПК) MathCAD позволил определить компоненты напряжений при параметрах задачи $q_1 = 500$ кПа, $d_1 = 7$ м, $q_2 = 250$ кПа, $d_2 = 7,1$ м, $b = 2a = 5$ м, $h = 20$ м, $c = 3$ м. На рис. 7, 8 представлены изолинии компонент напряжений.

Также были получены изополя вертикальных деформаций массива грунта при действии давления нагнетания по предложенной эквивалентной схеме на рис. 5 при параметрах грунта $E = 30$ МПа и $\nu = 0,32$. Для расчета деформаций использована линейная упругая модель, основанная на законе Гука. Результаты приведены на рис. 9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате аналитического решения задачи о действии давления нагнетания, направленного вверх и вниз, вблизи ограждающей стены котлована на основе решения Мелана получены формулы для определения компонент вертикальных и горизонтальных напряжений. Анализ результатов решения показывает, что действие давления нагнетания, направленного вверх и вниз вблизи ограждающей стены котлована, существенно влияет на НДС всего массива, а в ограждающей конструкции могут возникать значительные горизонтальные напряжения, что требует учета при расчете ограждающих конструкций по I группе предельных состояний.

Результаты расчета деформаций основания демонстрируют эффект строительного подъема. Таким образом, данное решение может быть применимо для предварительной оценки необходимых параметров компенсационного нагнетания. Стоит отметить,

что полученное аналитическое решение реализуется в ПК MathCAD без использования метода конечных элементов и при дальнейшей доработке станет альтернативой при текущем уровне развития отечественного программного обеспечения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зерцалов М.Г., Симутин А.Н., Александров А.В. Технология компенсационного нагнетания для защиты зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 32–40. EDN TYCWVL.
2. Александров А.В., Беллендир Е.Н., Лащенков С.Я., Альжанов Р.Ш. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы // Гидротехническое строительство. 2016. № 7. С. 2–10. EDN WHPWUX.
3. Харченко А.И., Харченко И.Я., Панченко А.И., Газданов Д.В. Технология выравнивания здания Загорской ГАЭС-2 методом компенсационного нагнетания // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 4 (115). С. 490–498. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.490-498. EDN OSZROL.
4. Харченко И.Я., Алексеев В.А., Исрафилов К.А., Бетербиев А.С.Э. Современные технологии цементационного закрепления грунтов // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 5 (104). С. 552–558. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.552-558. EDN YQPQYJ.
5. Kummerer C., Schweiger H.F., Otterbein R. Active Settlement Control with Compensation Grouting — Results from a Case Study // Grouting and Ground Treatment. 2003. Pp. 813–823. DOI: 10.1061/40663(2003)16
6. Knitsch H. Visualization of relevant data for compensation grouting // Tunnel. 2008. No. 3. Pp. 38–45.
7. Au S.K.A., Soga K., Jafari M.R., Bolton M.D., Komiya K. Factors Affecting Long-Term Efficiency of Compensation Grouting in Clays // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2003. Vol. 129. Issue 3. Pp. 254–262. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:3(254)
8. Au W., Masini L. Compensation grouting in sandy soils: the influence of TAM installation // Report on the Research collaboration between Deltares, University of Cambridge and “Sapienza” University of Rome. 2008.
9. Page R.J., Ong J.C.W., Osborne N., Shirlaw N. Jet Grouting for Excavations in Soft Clay- Design and Construction Issues // International Conference on Deep Excavations (ICDE) 2006. 2005.
10. Маковский Л.В., Чеботарев С.В. Ограничение осадок поверхности земли путем компенсационного нагнетания при строительстве тоннелей закрытым способом // Транспорт, наука, техника, управление. 2000. № 2. С. 44–47.
11. Demenkov P., Trushko O., Potseshkovskaya I. Numerical experiments on the modeling of compensatory injection for the protection of buildings during tunneling // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13. Issue 23. Pp. 9161–9169.
12. Zuiavska N., Gubashova V., Korobiichuk V. Modeling of the effect of a high-pressure jet of cement mortar on the surrounding soil environment when performing jet grouting columns using jet technology // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 280. P. 03001. DOI: 10.1051/e3sconf/202128003001
13. Qi Y., Wei G., Xie Y. Method of Calculating the Vertical Displacement and Additional Stress of Existing Tunnels under the Influence of Grouting Rings of New Tunnels // Symmetry. 2020. Vol. 12. Issue 10. P. 1623. DOI: 10.3390/sym12101623
14. Wang R.L., Chen Y., Ren J. Application of compensation grouting in the existing tunnels' repair // Underground Eng. Tunn. 2013. Pp. 51–57.
15. Пронозин Я.А., Епифанцева Л.Р., Волосюк Д.В., Горская Я.В. Технология ремонтных и восстановительных работ : учебник. М. : Издательство АСВ, 2016. 148 с.
16. Симутин А.Н. Методики расчета параметров компенсационного нагнетания для управления деформациями оснований зданий и сооружений : дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 165 с. EDN IJMNU.
17. Чубатов И.В. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния оснований гидротехнических сооружений при компенсационном нагнетании : дис. ... канд. техн. наук. М., 2022. 151 с. EDN JBGBXX.
18. Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss // Geotechnique. 1987. Vol. 37. Issue 3. Pp. 301–320. DOI: 10.1680/geot.1987.37.3.301
19. Gollegger J. Numerical and Analytical Studies of the Effects of Compensation Grouting : Ph.D. Thesis. Graz University of Technology, Graz, Austria, 2001.
20. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. 1. М. : Госстройиздат, 1961. 543 с.
21. Flamant A. Sur la répartition des pressions dans un solide rectangulaire chargé transversalement // CR Acad. Sci. 1892. Vol. 114. Pp. 1465–1468.
22. Melan E. Der Spannungszustand der durch eine Einzelkraft im Innern beanspruchten Halbscheibe // Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 1932. Bd. 12. H. 6.
23. Клейн Г.К. Теория неоднородной линейно-деформируемой среды и ее приложение к расчету балок на сплошном основании : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1948. 244 с.

24. Горбунов-Посадов М.И., Шехтер О.Я., Кофман В.А. Давление грунта на жесткий заглубленный фундамент и свободные деформации котлована // Труды НИИ оснований и фундаментов. 1954. № 24.
25. Егоров К.Е. О деформации основания конечной толщины // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1961. № 1.
26. Цытович Н.А. Механика грунтов. М. : Стройиздат, 1963. 730 с.
27. Тер-Мартirosян З.Г., Пак Чун Сун. Консолидация и ползучесть слоя грунта ограниченной ширины под действием местной нагрузки // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1998. № 2. С. 2–6.

28. Ter-Martirosyan Z.G., Vanina Yu.V. Impact of a deep foundation on enclosing wall structure of excavation // Journal of Physics : Conference Series. 2021. Vol. 1928. Issue 1. P. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012004
29. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З. Механика грунтов в высотном строительстве с развитой подземной частью. М. : АСВ, 2020. 912 с.
30. Лузин И.Н. Напряженно-деформированное состояние оснований фундаментов глубокого заложения на однородном и неоднородном переуплотненном грунтовом полупространстве : дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 133 с.

Поступила в редакцию 21 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 12 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 29 апреля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Армен Завенович Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники, проректор по научной работе; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 675967, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017, ORCID: 0000-0001-8787-826X, SciProfiles: 1213926; gic-mgsu@mail.ru;

Валерий Петрович Кивлюк — исполнительный директор — руководитель дивизиона строительства метро; **Мосинжпроект**; 125252, г. Москва, Ходынский бульвар, д. 8, 10; ORCID: 0000-0002-0659-3543; valerykivlyuk@yandex.ru;

Илья Олегович Исаев — руководитель отдела оценки влияния и противоаварийных мероприятий; **Мосинжпроект**; 125252, г. Москва, Ходынский бульвар, д. 8, 10; isaevio@mosinzhproekt.ru.

Вклад авторов:

Тер-Мартirosян А.З. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, научное редактирование текста.

Кивлюк В.П. — произведение аналитических расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Исаев И.О. — научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Zertsalov M.G.E., Simutin A.N., Aleksandrov A.V. Application of compensation grouting technology for protection of buildings and structures. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 6:32-40. EDN TYCWVL. (rus.).
2. Aleksandrov A.V., Belledir E.N., Lashchenov S.Ya., Alzhanov R.Sh. Elimination of the consequences of the subsidence of the station building of Zagorsk PSPP-2 and restoration work. *Hydrotechnical Construction*. 2016; 7:2-10. EDN WHPWUX. (rus.).
3. Kharchenko I.Ya., Panchenko A.I., Kharchenko A.I., Gazdanov D.V. Technology of alignment of the building of Zagorsk pumped storage station by compensation grouting method. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(4):(115):490-498. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.490-498. EDN OSZROL. (rus.).
4. Kharchenko I.Ya., Alekseev V.A., Israfilov K.A., Beterbiev A.S.E. Modern Technologies of Cement Grouting. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(5):(104):552-558. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.552-558. EDN YQPQYJ. (rus.).
5. Kummerer C., Schweiger H.F., Otterbein R. Active Settlement Control with Compensation Grouting — Results from a Case Study. *Grouting and Ground Treatment*. 2003; 813-823. DOI: 10.1061/40663(2003)16
6. Knitsch H. Visualization of relevant data for compensation grouting. *Tunnel*. 2008; 3:38-45.
7. Au S.K.A., Soga K., Jafari M.R., Bolton M.D., Komiya K. Factors Affecting Long-Term Efficiency of Compensation Grouting in Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2003; 129(3):254-262. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:3(254)

8. Au W., Masini L. Compensation grouting in sandy soils: the influence of TAM installation. *Report on the Research collaboration between Deltares, University of Cambridge and "Sapienza" University of Rome*. 2008.
9. Page R.J., Ong J.C.W., Osborne N., Shirlaw N. Jet Grouting for Excavations in Soft Clay- Design and Construction Issues. *International Conference on Deep Excavations (ICDE) 2006*. 2005.
10. Makovskij L.V., Chebotarev S.V. Limiting the precipitation of the earth's surface by compensatory injection during the construction of tunnels in a closed manner. *Transport, science, technology, management*. 2000; 2:44-47. (rus.).
11. Demenkov P., Trushko O., Potseshkovskaya I. Numerical experiments on the modeling of compensatory injection for the protection of buildings during tunneling. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018; 13(23):9161-9169.
12. Zuievskaya N., Gubashova V., Korobiichuk V. Modeling of the effect of a high-pressure jet of cement mortar on the surrounding soil environment when performing jet grouting columns using jet technology. *E3S Web of Conferences*. 2021; 280:03001. DOI: 10.1051/e3s-conf/202128003001
13. Qi Y., Wei G., Xie Y. Method of Calculating the Vertical Displacement and Additional Stress of Existing Tunnels under the Influence of Grouting Rings of New Tunnels. *Symmetry*. 2020; 12(10):1623. DOI: 10.3390/sym12101623
14. Wang R.L., Chen Y., Ren J. Application of compensation grouting in the existing tunnels' repair. *Underground Eng. Tunn*. 2013; 51-57.
15. Pronozin Ya.A., Epifantseva L.R., Volosyuk D.V., Gorskaya Ya.V. *Technology of repair and restoration works*. Moscow, ASV Publishing House, 2016; 148. (rus.).
16. Simutin A.N. *Methods of calculating the parameters of compensatory injection for controlling deformations of the foundations of buildings and structures : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2015; 165. EDN IJMNUE. (rus.).
17. Chubatov I.V. *Numerical modeling of the stress-strain state of the foundation of hydraulic structures under compensatory injection : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2022; 151. EDN JBGBXX. (rus.).
18. Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss. *Geotechnique*. 1987; 37(3):301-320. DOI: 10.1680/geot.1987.37.3.301
19. Gollegger J. *Numerical and Analytical Studies of the Effects of Compensation Grouting : Ph.D. Thesis*. Graz University of Technology, Graz, Austria, 2001.
20. Florin V.A. *Fundamentals of soil mechanics. Vol. 1*. Moscow, Gosstroyizdat, 1961; 543. (rus.).
21. Flamant A. Sur la répartition des pressions dans un solide rectangulaire chargé transversalement. *CR Acad. Sci*. 1892; 114:1465-1468.
22. Melan E. Der Spannungszustand der durch eine Einzelkraft im Innern beanspruchten Halbscheibe. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 1932; 12(6).
23. Klein G.K. *Theory of a non-homogeneous linearly deformable medium and its application to the calculation of beams on a solid foundation : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Moscow, 1948; 244. (rus.).
24. Gorbunov-Posadov M.I., Shekhter O.Ya., Kofman V.A. Soil pressure on a hard buried foundation and free deformations of the excavation. *Proceedings of the Research Institute of Foundations and Foundations*. 1954; 24. (rus.).
25. Egorov K.E. On the deformation of the base of finite thickness. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1961; 1. (rus.).
26. Tsytoich N.A. *Soil mechanics*. Moscow, Gosstroyizdat, 1963; 636. (rus.).
27. Ter-Martirosyan Z.G., Pak Chun Sun. Consolidation and creep of a soil layer of limited width under the influence of local load. *Foundations, Foundations and Soil Mechanics*. 1998; 2:2-6. (rus.).
28. Ter-Martirosyan Z.G., Vanina Yu.V. Impact of a deep foundation on enclosing wall structure of excavation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1928(1):012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012004
29. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z. *Soil mechanics in high-rise construction with a developed underground part*. Moscow, ASV, 2020; 912. (rus.).
30. Luzin I.N. *The stress-strain state of the foundations of deep foundations on a homogeneous and inhomogeneous over-compacted soil half-space : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Moscow, 2017; 133. (rus.).

Received March 21, 2025.

Adopted in revised form on April 12, 2025.

Approved for publication on April 29, 2025.

B I O N O T E S : **Armen Z. Ter-Martirosyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics, Vice-Rector for Research; **Moscow State University of Civil Engineering (National**

Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 675967, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017, ORCID: 0000-0001-8787-826X, SciProfiles: 1213926; gic-mgsu@mail.ru;

Valery P. Kivlyuk — Executive Director — Head of the Metro Construction Division; **Mosinzhproekt**; 8, 10 Khodynsky boulevard, Moscow, 125252, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0659-3543; valerykivlyuk@yandex.ru;

Ilya O. Isaev — Head of the Impact Assessment and Emergency Response Department; **Mosinzhproekt**; 8, 10 Khodynsky boulevard, Moscow, 125252, Russian Federation; isaevio@mosinzhproekt.ru.

Contribution of the authors:

Armen Z. Ter-Martirosyan — scientific guidance, research concept, development of methodology, scientific text editing.

Valery P. Kivlyuk — the product of analytical calculations, writing the source text, final conclusions.

Ilya O. Isaev — scientific text editing.

The authors declare no conflict of interest.