

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.152

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.11

Моделирование работы грунтового основания фундамента здания вблизи глубокого котлована

Илизар Талгатович Мирсаяпов, Нияз Наилович Айсин

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КАСУ);
г. Казань, Республика Татарстан, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Уплотнение городской застройки вызывает необходимость в строительстве зданий с развитым подземным объемом. При этом на бровке глубокого котлована находятся фундаменты существующих зданий. Задача по оценке влияния строительства глубоких фундаментов на окружающую застройку является актуальной. Выполнен анализ данных по осадкам фундаментов вблизи бортов глубоких котлованов по результатам численного моделирования и геотехнического мониторинга в исследованиях российских и зарубежных авторов.

Материалы и методы. Для оценки дополнительных осадок фундаментов зданий вблизи глубоких котлованов проведено исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) основания вблизи глубокого котлована на модели, созданной в лабораторных условиях в плоском лотке с прозрачными стенками. Значения перемещений отмечались с помощью видеофиксации и электронных датчиков, затем обрабатывались.

Результаты. Результаты эксперимента согласовываются с результатами других авторов. Определена закономерность распределения горизонтальных напряжений и перемещений в массиве грунта за пределами модели глубокого котлована. На базе выявленных закономерностей предложен метод расчета осадок оснований фундаментов вблизи глубоких котлованов с учетом изменения НДС в окружающем грунтовом массиве.

Выводы. Установлена закономерность неравномерного изменения НДС грунтов в основании фундаментов зданий на бровке котлованов. Деформирование грунтового массива в основании фундаментов зданий, расположенных в призме обрушения, происходит нелинейно и неравномерно. Устройство глубоких котлованов приводит к изменению НДС грунтового массива основания фундаментов, расположенных на бровке котлована. Это ведет к изменению соотношения вертикальных и горизонтальных напряжений, что вызывает изменение деформационных характеристик грунта, вследствие чего происходит увеличение осадки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: котлован, осадки, фундамент, основание, глинистый грунт, ограждение котлована, взаимодействие

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мирсаяпов И.Т., Айсин Н.Н. Моделирование работы грунтового основания фундамента здания вблизи глубокого котлована // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 1. Ст. 11. URL: <http://nsjournal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.11

Автор, ответственный за переписку: Илизар Талгатович Мирсаяпов, mirsayapov1@mail.ru.

Modelling of the soil base of a building foundation near a deep excavation

Ilizar T. Mirsayapov, Niyaz N. Aysin

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE);
Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The densification of urban development necessitates the construction of buildings with a developed underground volume. At the same time, the foundations of existing buildings are located on the edge of the deep excavation. The task of assessing the impact of the construction of deep foundations on the surrounding buildings is important and relevant. The analysis of data on foundation settlements near the sides of deep excavations was carried out based on the results of numerical modelling and geotechnical monitoring in the studies of Russian and foreign authors.

Materials and methods. To assess additional settlements of building foundations near deep excavations, research of the stress-strain state of the foundation near a deep excavation was carried out using a model created in laboratory in a flat tray with transparent walls. The displacement values were recorded using video recording and electronic sensors, then processed.

Results. The results of the experiment are consistent with the results of other authors. A law was established for the distribution of horizontal stresses and displacements in the soil mass outside the deep excavation model. Based on the identified patterns, a method was proposed for calculating the settlement of foundations near deep excavations, taking into account changes in the stress-strain state in the surrounding soil.

Conclusions. Based on the results of the study, a pattern of uneven changes in the stress-strain state of soils at the base of building foundations on the edge of excavations was established. The deformation of the soil mass at the base of the foundations of buildings located in the collapse prism occurs nonlinearly and unevenly. The construction of deep excavations leads to a change in the stress-strain state of the soil mass of the base of the foundations located on the edge of the excavation. This leads to a change in the ratio of vertical and horizontal stresses, which causes a change in the deformation characteristics of the soil, resulting in an increase in settlement.

KEYWORDS: excavation, settlements, foundation, base, clay soil, excavation shoring, mutual influence

FOR CITATION: Mirsayapov I.T., Aysin N.N. Modelling of the soil base of a building foundation near a deep excavation. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(1):11. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.11

Corresponding author: Ilizar T. Mirsayapov, mirsayapov1@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение городской застройки вызывает необходимость в строительстве зданий с развитым подземным объемом. При этом на бровке глубокого котлована находятся фундаменты существующих зданий. Оценка влияния строительства глубоких фундаментов на окружающую застройку — актуальная задача.

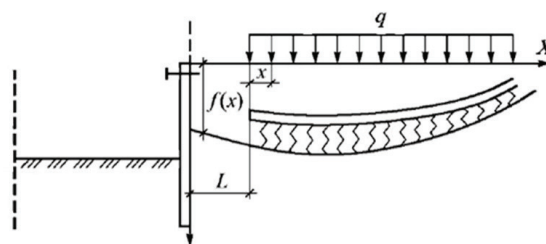
Напряженно-деформированное состояние (НДС) грунтового основания фундамента зданий вблизи бортов котлована является чрезвычайно сложным. В таком основании происходит деформирование грунта в зависимости от воздействия деформации ограждающей конструкции котлована, дефектов и повреждений в грунте, возникающих в процессе устройства ограждающей конструкции, и экскавация грунта из котлована [1]. Значительное влияние оказывает также расстояние от фундамента здания до ограждающей конструкции котлована, вид и жесткость фундаментной конструкции и здания в целом, суммарная нагрузка от здания на грунтовое основание.

В работе Jiang и соавт. [2] отмечается, что при откопке котлована глубиной 18 м максимальные осадки поверхности грунта наблюдались на расстоянии 8 м и равнялись 9,5 мм при максимальном смещении ограждения котлована на 13,9 мм. При этом коэффициент, характеризующий максимальную осадку за пределами котлована $s_{\max}$, отнесенную к глубине котлована H , равен $f_1 = s_{\max}/H \cdot 100\% = 0,05\%$. В исследованиях Dong и соавт. [3] при глубине котлована 12 м максимальные осадки точки на расстоянии 10 м от края котлована на поверхности равны 7,5 мм, горизонтальные перемещения — 5,6 мм при максимальном смещении стенки 14 мм. При этом $f_1 = 0,075\%$.

Результаты мониторинга, приведенные в труде Н.С. Никифоровой [4], показывают, что вблизи котлована на объекте ТРК «Охотный ряд» в г. Москве максимальные осадки достигали значений 13 мм при глубине котлована 16 м. Горизонтальные перемещения этой же точки составляли 10 мм. При этом $f_1 = 0,2\%$.

В исследованиях З.Г. Тер-Мартirosяна и соавт. [5] максимальная осадка фундамента вблизи глубокого котлована при недеформируемом ограждении равна 44 мм при глубине котлована 15 м. При этом

$f_1 = 0,29\%$. В публикации М.Г. Зерцалова и соавт. [6] при глубине котлована 9 м максимальная осадка поверхности грунта на расстоянии 0,5 от края котлована составляла 16 мм, тогда $f_1 = 0,18\%$. Однако коэффициент f_1 находится в пределах от 0,1 до 10,1 % и в среднем составляет 1,1 % [7].



Согласно работе Н.С. Никифоровой и соавт. [8], в инженерно-геологических условиях г. Москвы для снижения дополнительных осадок фундаментов зданий окружающей застройки до нормативных недостаточно применения отсечного экрана без дополнительных мероприятий. В других исследованиях (В.А. Ильичев и соавт. [9, 10], Н.С. Никифорова и соавт. [11], В.Я. Шишкин и соавт. [12]) при строительстве в котлованах глубиной 10–20 м в условиях Москвы и Санкт-Петербурга отсечные экраны, выполненные из буроинъекционных свай, не всегда обеспечивали достаточную защиту грунтов оснований зданий окружающей застройки [13].

Объект исследования — основания фундаментов зданий вблизи глубоких котлованов на глинистых грунтах. Предмет исследования — НДС глинистых грунтов в основании фундаментов зданий, расположенных на бровке котлована. Цель исследования — моделирование деформирования основания фундамента здания, расположенного на бровке котлована, для оценки дополнительных осадок оснований фундаментов. Задачи исследования:

- анализ состояния вопроса в научной литературе;
- моделирование в лабораторных условиях НДС глинистых грунтов в основании фундаментов зданий на бровке котлована;
- обработка результатов исследований;

- разработка методики расчета осадок оснований с учетом изменения НДС грунта основания фундамента здания вблизи глубокого котлована.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При определении деформаций (вертикальных и горизонтальных) грунта оснований фундаментов зданий, расположенных на бровке котлована, в основном рассматривается теория Кулона. Она основана на ряде допущений:

1. Система рассматривается в состоянии предельного равновесия (рис. 1), т.е. в тот момент, когда начинается перемещение стены и оползание призмы разрушения.

2. Призма обрушения оползает по прямолинейной плоскости скольжения по грунту и задней поверхности ограждающей конструкции.

3. Призма обрушения принимается абсолютно твердым телом.

4. В классической теории Кулона рассмотрен только насыпной грунт.

При деформациях ограждающей конструкции давление перераспределяется, уменьшаясь в зоне мак-

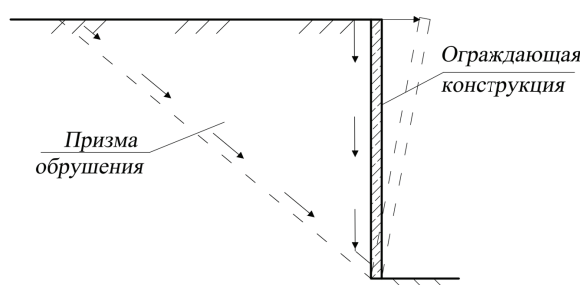


Рис. 1. Предельное состояние по теории Кулона

Fig. 1. Limit state according to Coulomb theory

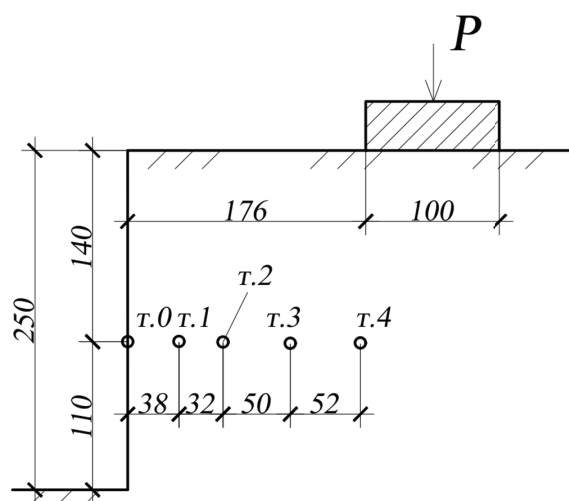


Рис. 2. Схема испытания и расположение рассматриваемых точек

Fig. 2. Test scheme and location of points under consideration

симальных перемещений, возрастает в месте устройства анкерной опоры, а также ниже дна котлована.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что грунт в пределах призмы обрушения деформируется, возникают горизонтальные и вертикальные деформации. Для установления закономерности деформирования грунта в пределах призмы обрушения проведены численные и экспериментальные исследования.

Моделирование основания проводилось в плоском лотке с прозрачными вертикальными стенками АСИС 0.7.1. производства НПП «Геотек». Схема испытания приведена на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполненные экспериментальные и численные исследования поведения грунтового основания фундаментов здания, расположенных на бровке котлована, показывают неравномерность распределения горизонтальных напряжений и деформаций, а также вертикальных деформаций (осадок) на участке между котлованом и фундаментом здания в зависимости от жесткости ограждающей конструкции (рис. 3).

Максимальная величина вертикальных и горизонтальных перемещений наблюдается у ограждающей конструкции, и они равняются друг другу. Затем по мере удаления от бровки котлована уменьшаются как горизонтальные, так и вертикальные перемещения.

На рис. 4, 5 представлены графики развития вертикальных перемещений (осадок), горизонтальных перемещений, полученные с помощью экспериментальных и численных исследований.

Анализ полученных результатов позволяет установить закономерности изменения ключевых параметров НДС грунтового основания фундаментов здания, расположенного на бровке котлована.

На основании приведенных графиков можно заключить, что происходит уменьшение горизонтальных напряжений и, как следствие, коэффициента бокового давления грунта в пределах рассматриваемого массива. Следовательно, в зоне влияния котлована отмечается уменьшение прочности и модуля деформации грунта и увеличение вертикальных деформаций грунта и, как следствие, общих осадок с учетом влияния сдвиговых и вертикальных деформаций.

Для установления дополнительных горизонтальных перемещений грунта в пределах призмы активного давления грунта поступаем следующим образом:

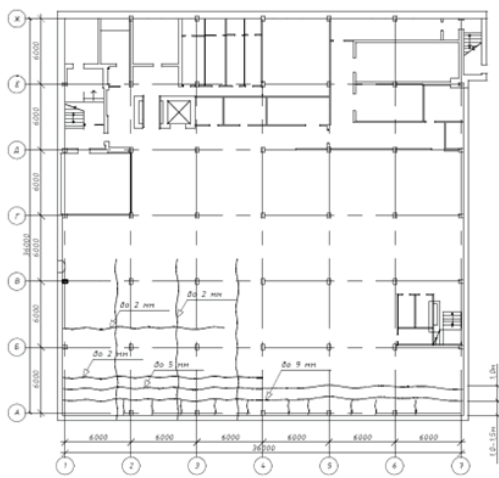
1. Определяются крайние значения горизонтальных перемещений у ограждения котлована Δ (рис. 6):

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3, \quad (1)$$

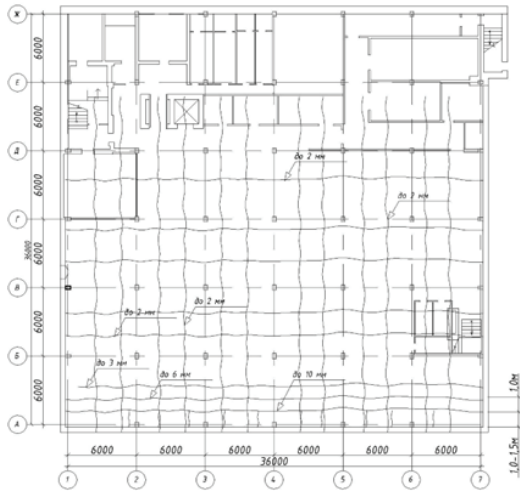
где Δ_2 — смещение сечения стены у дна котлована; Δ_3 — смещение, образующееся вследствие поворота сечения стены у дна котлована; Δ_1 — прогиб стены на участке свободной длины, при трапециевидной



a



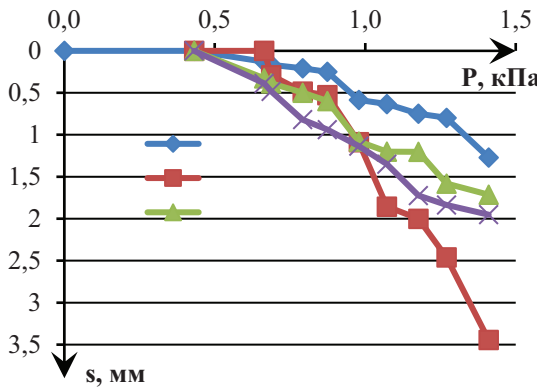
b



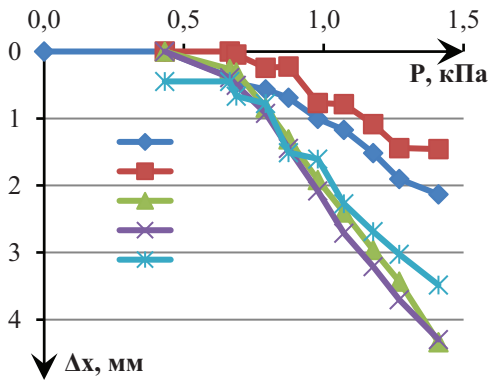
c

Рис. 3. Рассматриваемое здание на бровке котлована (a); схема образования трещин в бетонном полу подвала здания на момент начала обследования (b); схема образования и развития трещин в бетонном полу подвала здания через три месяца с момента начала обследования (c)

Fig. 3. The building in question is on the edge of the excavation (a); scheme of the formation of cracks in the concrete floor of the basement of the building at the time of the start of the survey (b); scheme of the formation and development of cracks in the concrete floor of the basement of the building three months from the start of the survey (c)



a



b

Рис. 4. Осадки рассматриваемых точек по результатам лабораторных испытаний (a); горизонтальные перемещения точек по результатам лабораторных испытаний (b)

Fig. 4. Settlement of the points under consideration according to the results of laboratory tests (a); horizontal movements of the points under consideration according to the results of laboratory tests (b)

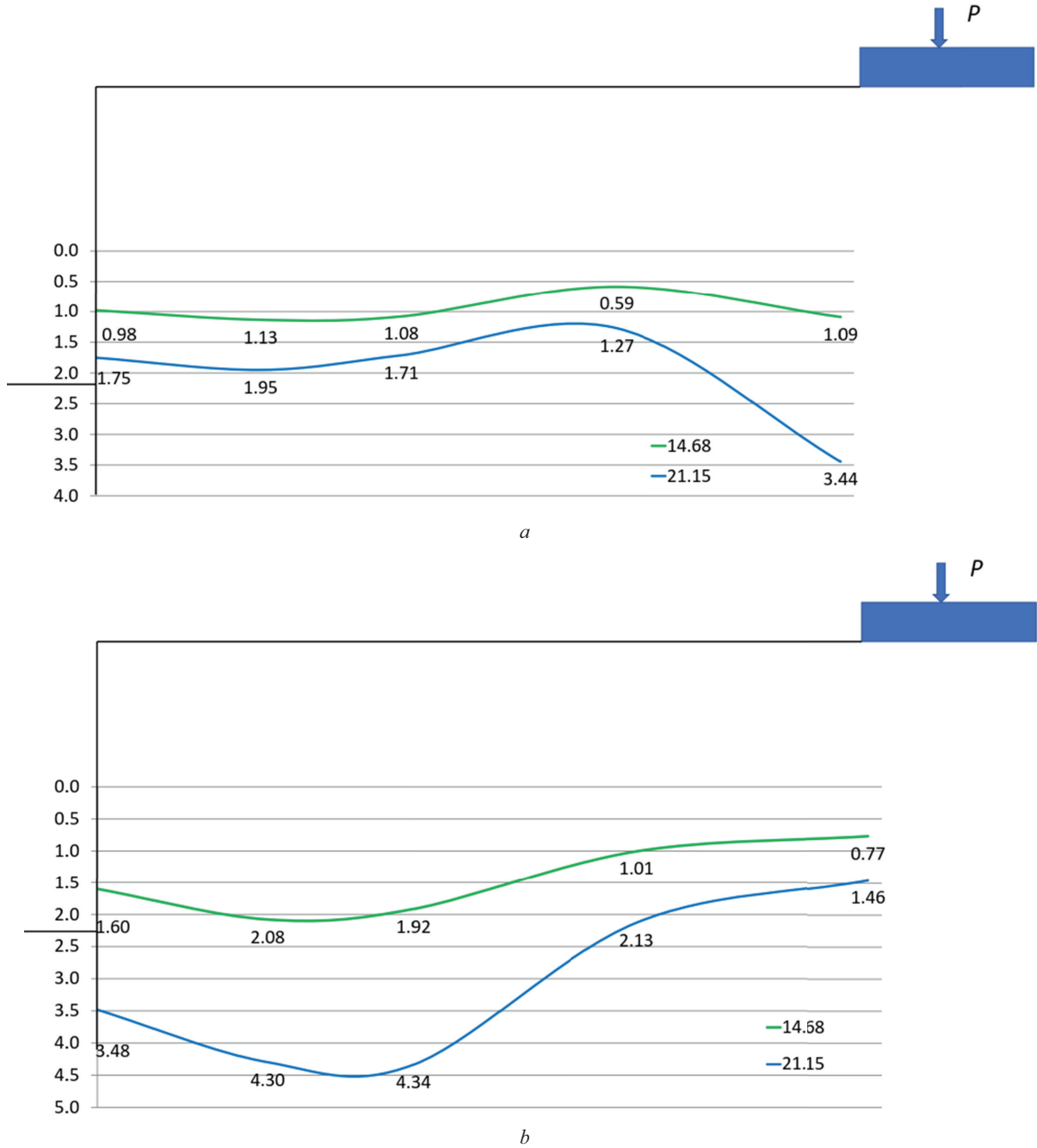


Рис. 5. Смещения рассматриваемых точек по результатам лабораторных испытаний на относительной глубине $z/H = 0,56$ при давлении 14,68 и 21,15 кПа: *a* — горизонтальные; *b* — вертикальные

Fig. 5. Displacements of the points under consideration according to the results of laboratory tests at a relative depth of $z/H = 0.56$ at a pressure of 14.68 and 21.15 kPa: *a* — horizontal; *b* — vertical

эпюре нагрузки при глубине котлована H с верхней ординатой эпюры σ_{ah1} и нижней σ_{ah2} при жесткости ограждения EI равен:

$$\Delta_1 = \frac{H^4}{120EI} (11\sigma_{ah1} + 4\sigma_{ah2}).$$

2. Исходя из графиков, приведенных на рис. 4, устанавливаются дополнительные значения горизонтальных перемещений между котлованом и фундаментом.

3. На основе результатов экспериментальных исследований выявляется неравномерность распределения абсолютных горизонтальных перемещений Δ_{xi} и относительных горизонтальных перемещений ϵ_{xi} в пределах призмы активного давления грунта L (рис. 7):

$$L = k \cdot H \cdot \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right). \quad (2)$$

4. В пределах длины призмы активного давления в разных зонах сжимаемой толщи определяется изменение горизонтального давления по формуле:

$$\Delta\sigma_{xi} = \varepsilon_{xi} \cdot E_0; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{xi} = \frac{\Delta x_i}{L}. \quad (4)$$

Тогда величина полного горизонтального давления равна:

$$\sigma_{xi} = \sigma_{x1} - \Delta\sigma_{xi}; \quad (5)$$

$$\xi_{xi} = \frac{\sigma_{xi}}{\sigma_{zi}} = \frac{\sigma_{x1} - \Delta\sigma_{xi}}{\sigma_{zi}}, \quad (6)$$

где σ_{x1} — горизонтальное давление в грунте основания после приложения нагрузки.

5. Определяется значение вертикального напряжения от действия собственного веса глинистого грунта $\sigma_{zg} = \gamma_i \cdot h_i$.

6. Внешняя нагрузка на основание P делится на ступени, учитывается время и длительность ее приложения.

7. Высота сжимаемой толщи устанавливается по СП 22.13330.2016:

$$H_s = Z; \sigma_{zp} = 0,5 \cdot \sigma_{zg}, \quad (7)$$

где H_s — мощность сжимаемой толщи, принимаемой на глубине Z ; σ_{zp} — вертикальное нормальное напряжение на глубине Z от дополнительной нагрузки на основание по вертикальной оси сооружения; σ_{zg} — вертикальное нормальное напряжение от собственного веса грунта основания на глубине Z .

8. Активная зона сжатия делится по глубине основания на отдельные слои с учетом грунтовых напластований.

9. Определяется природное напряженное состояние от действия собственного веса глинистого грунта. На уровне подошвы фундамента и в середине каждого слоя ниже уровня подошвы вычисляются вертикальные σ_{zg} и горизонтальные напряжения σ_{xgi} , σ_{ygi} от собственного веса грунта. Величина бокового давления σ_{xgi} и σ_{ygi} составляет долю ξ_{xg} и ξ_{yg} от величины вертикального давления σ_{zgi} соответственно. Значения ξ_{xg} и ξ_{yg} приняты равными друг другу и численно равны 0,25.

10. Дополнительные вертикальные напряжения σ_{zpi} устанавливаются с использованием модели основания в виде линейно-деформируемого однородного изотропного полупространства $\sigma_{zpi} = P \cdot \alpha$, где α — коэффициент рассеивания напряжений.

11. Дополнительные горизонтальные напряжения σ_{xpi} и σ_{ypi} определяются из условия одномерного уплотнения с коэффициентом бокового давления $\xi = 0,5$.

12. Вычисляются суммарные значения напряжений от собственного веса грунта и дополнительной нагрузки на основание (рис. 8):

$$\sigma_{zi} = \sigma_{zgi} + \sigma_{zpi}; \quad (8)$$

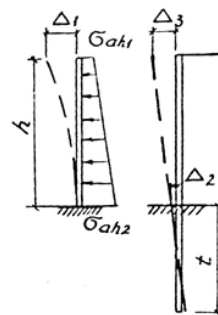


Рис. 6. Схема к расчету деформаций консольной стены

Fig. 6. Scheme for calculating the deformations of a cantilever wall

$$\sigma_{xi} = \sigma_{xgi} + \sigma_{xpi} - \Delta\sigma_{xi}; \quad (9)$$

$$\sigma_{yi} = \sigma_{ygi} + \sigma_{ypi} - \Delta\sigma_{yi}. \quad (10)$$

13. Вычисляются среднее нормальное напряжение и интенсивность напряжений:

$$\sigma = \frac{\sigma_{xi} + \sigma_{yi} + \sigma_{zi}}{3}; \quad (11)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{xi} - \sigma_{yi})^2 + (\sigma_{yi} - \sigma_{zi})^2 + (\sigma_{xi} - \sigma_{zi})^2} + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2). \quad (12)$$

14. При совпадении осей главных напряжений и деформаций с центральной осью фундамента устанавливаются значения объемных деформаций и интенсивности деформаций:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3; \quad (13)$$

$$\Delta\varepsilon_v(t) = \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2 + \Delta\varepsilon_3;$$

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3}(\varepsilon_3 - \varepsilon_1); \quad (14)$$

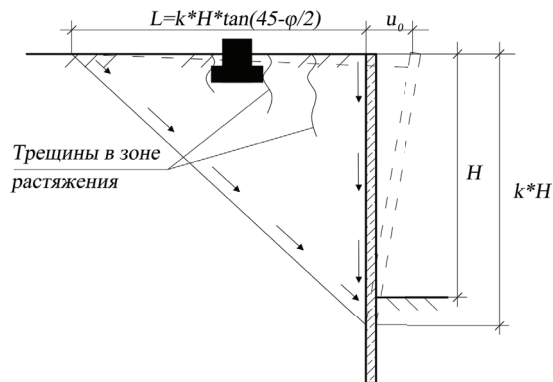


Рис. 7. Схема к определению осадок и горизонтальных перемещений фундаментов вблизи котлованов

Fig. 7. Scheme for determining settlements and horizontal movements of foundations near excavations

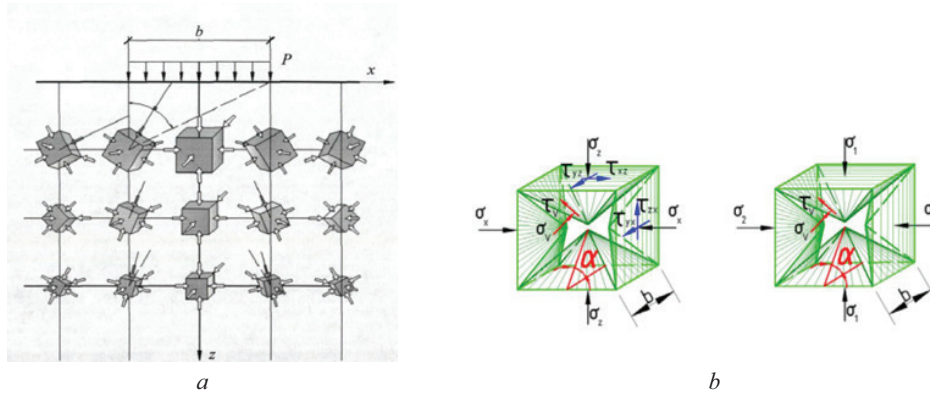


Рис. 8. Схема напряженно-деформированного состояния грта под подошвой фундамента (а); схема напряженно-деформированного состояния в элементарном объеме грта (b)

Fig. 8. Scheme of the stress-strain state of the soil under the base of the foundation (a); scheme of the stress-strain state in an elementary volume of soil (b)

$$\Delta \varepsilon_i = \frac{2}{3}(\Delta \varepsilon_3 - \Delta \varepsilon_1).$$

В иных случаях используем условие соосности тензоров приращений напряжений и деформаций:

$$\Delta \tau = \Delta \sqrt{I_{2\sigma}};$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta(\varepsilon_x - \varepsilon_y)}{\Delta(\sigma_x - \sigma_y)} &= \frac{\Delta(\varepsilon_y - \varepsilon_z)}{\Delta(\sigma_y - \sigma_z)} = \\ &= \frac{\Delta(\varepsilon_z - \varepsilon_x)}{\Delta(\sigma_z - \sigma_x)} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma_i} = \chi. \end{aligned}$$

Значения $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ принимаются по результатам лабораторных испытаний, которые соответствуют напряжениям в грте в каждой точке по паспорту грта и паспорту ползучести.

15. Определяются условные мгновенные модули: K_V — объемный модуль и G_V — модуль сдвига, характеризующие переход из природного состояния основания в состояние после приложения местной нагрузки. Мгновенные модули K_V и G_V учитывают переход в момент приложения дополнительной вертикальной нагрузки:

$$K_V(t) = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon_V + \Delta \varepsilon_V(t)}; \quad (15)$$

$$G_V(t) = \frac{\Delta \sigma_i}{3(\Delta \varepsilon_i + \Delta \varepsilon_i(t))}. \quad (16)$$

16. Приращение осевой деформации i -го слоя после горизонтального перемещения грта в пределах призмы обрушения рассчитывается по формуле:

$$\Delta \varepsilon_{zi} = \frac{\Delta \sigma_z(t)}{G_V(t)} - \Delta \sigma \frac{3K_V(t) - G_V(t)}{3K_V(t) \cdot G_V(t)}. \quad (17)$$

17. Осадка основания, разделенного на равные слои до условной глубины сжимаемой толщи, в момент времени t вычисляется следующим образом:

$$S = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{z0} + \varepsilon_{zpl} + \Delta \varepsilon_{zi}) \Delta h_i, \quad (18)$$

где n — количество слоев; ε_{z0} — приращение осевой деформации в момент приложения внешней нагрузки; ε_{zpl} — приращение осевой деформации вследствие ползучести; $\Delta \varepsilon_{zi}$ — приращение осевой деформации i -го слоя с учетом горизонтального перемещения грта в пределах призмы активного давления грта; h_i — толщина i -го слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам исследования установлена закономерность неравномерного изменения НДС гртв в основании фундаментов зданий на бровке котлованов. Деформирование гртв в основании фундаментов зданий, расположенных в призме обрушения, происходит нелинейно и неравномерно. Устройство глубоких котлованов приводит к изменению НДС гртв в основании фундаментов, расположенных на бровке котлована. Это ведет к изменению соотношения вертикальных и горизонтальных напряжений, что вызывает изменение деформационных характеристик грта, вследствие чего происходит увеличение осадки.

В работах Д.Р. Сафина и соавт. [14], Д.М. Нуриева и соавт. [15] также отмечается, что на определенных участках в грте за пределами котлована происходит неравномерное распределение дополнительных горизонтальных напряжений. Характер развития горизонтальных перемещений в массиве грта вблизи котлована в труде Y. Sanqiang и соавт. [16] согласуется с результатами проведенного лабораторного эксперимента, однако авторы сдела-

ли вывод о том, что модель деформирования нужно создавать не напрямую по результатам мониторинга, а по результатам численного моделирования, который в свою очередь корректируется согласно данным мониторинга. В случае глинистых грунтов,

которые ярко проявляют реологические свойства, в дальнейшем необходимо учитывать фактор времени, оказывающий существенное влияние на деформационные и прочностные характеристики грунтов (И.В. Королева [17], М.И. Шакиров [18]).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Mirsayapov I.T., Aysin N.N.* Evaluation of Subgrade Vertical Deformations of the Building with the Influence of a Deep Excavation // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 126. Pp. 51–58. DOI: 10.1007/978-3-030-64518-2_7

2. *Jiang X., Lu Q., Chen X., Liu J., Li P.* Numerical Analysis of Deep Foundation Pit Excavation Process // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 719. P. 032051. DOI: 10.1088/1755-1315/719/3/032051

3. *Dong Y.P., Burd H.J., Houlby G.T.* Finite element parametric study of the performance of a deep excavation // *Soils and Foundations*. 2018. Vol. 58. Pp. 729–743. DOI: 10.1016/j.sandf.2018.03.006

4. *Никифорова Н.С.* Корректировка метода расчета осадок зданий при подземном строительстве на основе экспериментальных исследований // *Вестник МГСУ*. 2010. № 4. С. 293–300. EDN RTSQTP.

5. *Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Ванина Ю.В.* Осадка и несущая способность оснований и фундаментов вблизи вертикальной выемки // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 4. С. 443–453. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.443-453. EDN GULRMX.

6. *Зерцалов М.Г., Казаченко С.А.* Численно-аналитический метод инженерной оценки влияния разработки котлована на перемещения прилегающего к нему грунтового массива с учетом жесткости ограждающей конструкции // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2021. Т. 27. № 3. С. 396–409. DOI: 10.33113/MKMK.RAS.2021.27.03.396_409.07. EDN FPQJTC.

7. *Мангушев Р.А., Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Сатин Д.А.* Устройство и проектирование котлованов // *Справочник геотехника*. М. : АСВ, 2016. С. 675–758.

8. *Никифорова Н.С., Внуков Д.А.* Защита зданий вблизи глубоких котлованов геотехническими экранами // *Вестник МГСУ*. 2011. № 5. С. 108–112.

9. *Ильичев В.А., Мангушев Р.А., Никифорова Н.С.* Опыт освоения подземного пространства россий-

ских мегаполисов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2012. № 2. С. 15–17.

10. *Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Готман Ю.А., Туников М.М., Трофимов Е.Ю.* Анализ применения активных и пассивных методов защиты существующей застройки при подземном строительстве // *Жилищное строительство*. 2013. № 6. С. 25–27.

11. *Никифорова Н.С., Коновалов П.А., Зехниев Ф.Ф.* Геотехнические проблемы при строительстве уникальных объектов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2010. № 5. С. 2–8.

12. *Шишкин В.Я., Позорелов А.Е., Макеев В.А.* Усиление существующей застройки при строительстве здания с котлованом 18–20 м // *Жилищное строительство*. 2011. № 1. С. 32–38.

13. *Снитко Н.К.* Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стенок. Л. : Госстройиздат, 1963. 297 с.

14. *Safin D.R., Zainullin R.T., Safina A.D.* Experimental Study of Deformation of Soil Berms Retaining Excavation Fence // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Vol. 168. Pp. 200–210. DOI: 10.1007/978-3-030-91145-4_20. EDN CADJVV.

15. *Нуриева Д.М., Агафонов И.В.* Анализ опыта проектирования и строительства подземных сооружений с применением «стены в грунте» // *Известия КГАСУ*. 2023. № 4 (66). С. 61–72. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_61

16. *Sanqiang Y., Zhenyu Y., Leifeng Z., Yapeng G., Ju W., Jingyong H.* Research on deformation prediction of deep foundation excavation excavation based on GWO-ELM model // *Electronic Research Archive*. 2023. Vol. 31. Pp. 5685–5700. DOI: 10.3934/era.2023288

17. *Королева И.В.* Исследование влияния фактора времени на прочность глин // *Известия КГАСУ*. 2023. № 4 (66). С. 53–60. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_53

18. *Шакиров М.И.* Деформации грунтовых оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении // *Известия КГАСУ*. 2022. № 1 (59). С. 19–28. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_19

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 20 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 25 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Илизар Талгатович Мирсаяпов** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оснований, фундаментов, динамики сооружений и инженерной геологии; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, Республика Татарстан, ул. Зеленая, д. 1; ORCID: 0000-0002-6193-0928; mirsayapov1@mail.ru;

Нияз Наилович Айсин — старший преподаватель кафедры оснований, фундаментов, динамики сооружений и инженерной геологии; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, Республика Татарстан, ул. Зеленая, д. 1; ORCID: 0000-0002-8776-768X; zarejay@kgasu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Mirsayapov I.T., Aysin N.N. Evaluation of Subgrade Vertical Deformations of the Building with the Influence of a Deep Excavation. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 126:51-58. DOI: 10.1007/978-3-030-64518-2_7
2. Jiang X., Lu Q., Chen X., Liu J., Li P. Numerical Analysis of Deep Foundation Pit Excavation Process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 719:032051. DOI: 10.1088/1755-1315/719/3/032051
3. Dong Y.P., Burd H.J., Houlsby G.T. Finite element parametric study of the performance of a deep excavation. *Soils and Foundations*. 2018; 58:729-743. DOI: 10.1016/j.sandf.2018.03.006
4. Nikiforova N.S. Adjustment of the method for calculating settlements of buildings during underground construction based on experimental studies. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2010; 4:293-300. EDN RTSQTP. (rus.).
5. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Vanina Yu.V. Settlement and bearing capacity of bases and foundations near a vertical excavation. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(4):443-453. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.443-453. EDN GULRMX. (rus.).
6. Zertsalov M.G., Kazachenko S.A. Numerical-analytical method for engineering assessment of the influence of excavation development on the movements of the adjacent soil mass, taking into account the rigidity of the enclosing structure. *Mechanics of composite materials and structures*. 2021; 27(3):396-409. DOI: 10.33113/MKMK.RAS.2021.27.03.396_409.07. EDN FPQJTC. (rus.).
7. Mangushev R.A., Ilyichev V.A., Nikiforova N.S., Sapin D.A. Construction and design of excavations. *Handbook of geotechnics*. Moscow, ASV, 2016; 675-758. (rus.).
8. Nikiforova N.S., Vnukov D.A. Protection of buildings near deep excavations with geotechnical screens. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2011; 5:108-112. (rus.).
9. Ilyichev V.A., Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Experience in the development of underground space in Russian megacities. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2012; 2:15-17. (rus.).
10. Ilyichev V.A., Nikiforova N.S., Gotman Yu.A., Tupikov M.M., Trofimov E.Yu. Analysis of the use of active and passive methods for protecting existing buildings during underground construction. *Housing Construction*. 2013; 6:25-27. (rus.).
11. Nikiforova N.S., Konovalov P.A., Zekhniev F.F. Geotechnical problems in the construction of unique objects. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2010; 5:2-8. (rus.).
12. Shishkin V.Ya., Pogorelov A.E., Makeev V.A. Strengthening existing buildings during the construction of a building with a foundation excavation of 18–20 m. *Housing Construction*. 2011; 1:32-38. (rus.).
13. Snitko N.K. *Static and dynamic soil pressure and calculation of retaining walls*. Leningrad, Gosstroyizdat, 1963; 297. (rus.).
14. Safin D.R., Zainullin R.T., Safina A.D. Experimental Study of Deformation of Soil Berms Retaining Excavation Fence. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 168:200-210. DOI: 10.1007/978-3-030-91145-4_20. EDN CADJVV.
15. Nurieva D.M., Agafonov I.V. Analysis of experience in design and construction of underground structures using “diaphragm wall”. *News KSUAE*. 2023; 4(66):61-72. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_61. EDN EREYGS. (rus.).
16. Sanqiang Y., Zhenyu Y., Leifeng Z., Yapeng G., Ju W., Jingyong H. Research on deformation prediction of deep foundation excavation excavation based on GWO-ELM model. *Electronic Research Archive*. 2023; 31:5685-5700. DOI: 10.3934/era.2023288
17. Koroleva I.V. Study of the time factor influence on the strength of clays. *News KSUAE*. 2023; 4(66):53-60. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_53. EDN EPCSQR. (rus.).
18. Shakirov M.I. Raft-pile foundation ground base deformation under cyclic loading. *News KSUAE*. 2022; 1(59):19-28. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_19 (rus.).

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on September 20, 2024.

Approved for publication on September 25, 2024.

B I O N O T E S: **Ilizar T. Mirsayapov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Bases, foundations, building dynamics and engineering geology; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6193-0928; mirsayapov1@mail.ru;

Niyaz N. Aysin — senior lecturer of the Department of Bases, foundations, building dynamics and engineering geology; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8776-768X; zarejay@kgasu.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.