

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1563-1573

Влияние возрастания характеристик грунтов в основании реконструируемых зданий на их осадку при устройстве подземной части

Надежда Сергеевна Никифорова, Николай Сергеевич Семенов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. С течением времени эксплуатации зданий и сооружений происходит уплотнение грунтов под подошвой их фундаментов от всех действующих нагрузок от здания. Цель исследования — изучение перемещений фундаментов здания во время устройства подземной части с возможным их превентивным усилением при реконструкции с учетом изменения прочностных и деформационных характеристик грунтов. Решение данной задачи позволит наиболее детально рассмотреть осадки зданий при реконструкции.

Материалы и методы. Выполнена серия численных расчетов в программном комплексе PLAXIS 2D взаимодействия фундамента с грунтом основания при реконструкции здания с освоением подземного пространства, включающего устройство двух или трех подземных этажей.

Результаты. Изучено влияние улучшенных характеристик грунта с учетом времени эксплуатации здания на осадку существующих фундаментов при реконструкции с освоением подземного пространства. Выявлено, что усиление фундаментов грунтоцементными элементами снижает осадку при реконструкции приблизительно в 2 раза. Рассмотрено влияние этажности проектируемой подземной парковки на напряженно-деформированное состояние грунтового массива.

Выводы. Проведенные численные исследования показали, что упрочнение грунтов под подошвой существующих фундаментов приводит к уменьшению осадки здания при реконструкции с освоением подземного пространства. Усиление существующего фундамента грунтоцементными элементами позволяет не превысить предельную дополнительную осадку реконструируемого здания. Выявлено снижение осадки существующих фундаментов при уменьшении этажности проектируемой подземной части.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подземное строительство, численное моделирование, реконструкция с освоением подземного пространства, усиление фундамента грунтоцементными элементами, окружающая застройка, изменение физико-механических грунтов под подошвой фундамента за время эксплуатации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Никифорова Н.С., Семенов Н.С. Влияние возрастания характеристик грунтов в основании реконструируемых зданий на их осадку при устройстве подземной части // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1563–1573. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1563-1573

Автор, ответственный за переписку: Николай Сергеевич Семенов, 89252009999@mail.ru.

Influence of increasing soil characteristics at the base of reconstructed buildings on their settlement during the construction of the underground part

Nadezhda S. Nikiforova, Nikolai S. Semenov

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

ABSTRACT

Introduction. With the time of operation of buildings and structures, soil compaction occurs under the base of their foundations from all the acting loads from the building. The purpose of the research is to study the movements of the building foundations during the construction of the underground part with their possible preventive reinforcement during reconstruction, taking into account changes in the strength and deformation characteristics of soils. The solution of this problem will allow the most detailed consideration of buildings settlement during reconstruction.

Materials and methods. A series of numerical calculations in the PLAXIS 2D software package of the interaction of the foundation with the foundation soil during the reconstruction of a building with the development of underground space, including the construction of two or three underground floors, were carried out.

Results. The effect of taking into account the improved soil characteristics with regard to the time of building operation on the settlement of existing foundations during reconstruction with the development of underground space is studied. It was

revealed that the reinforcement of foundations with soil-cement elements reduces the settlement during reconstruction approximately in two times. The influence of the number of floors of the designed underground car park on the stress-strain state of the soil massif is considered.

Conclusions. Numerical studies show that strengthening of soils under the base of existing foundations leads to a decrease in the building settlement during reconstruction with the development of underground space. Reinforcement of the existing foundation with soil-cement elements makes it possible not to exceed the maximum additional settlement of the reconstructed building. A decrease in the settlement of existing foundations with a decrease in the number of storeys of the designed underground part is revealed.

KEYWORDS: underground construction, numerical modelling, reconstruction with the development of underground space, foundation reinforcement with soil-cement elements, surrounding buildings, change of physical and mechanical soils under the base of the foundation during operation

FOR CITATION: Nikiforova N.S., Semenov N.S. Influence of increasing soil characteristics at the base of reconstructed buildings on their settlement during the construction of the underground part. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1563-1573. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1563-1573 (rus.).

Corresponding author: Nikolai S. Semenov, 89252009999@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

С увеличением плотности городской застройки крупных городов и мегаполисов возрастает необходимость освоения подземного пространства зданий и сооружений. В связи с этим появляется потребность в решении задач по обеспечению сохранности окружающей застройки. Основной причиной освоения подземного пространства городов является нехватка свободных территорий из-за сформировавшейся исторической застройки, в частности, в центральной части населенных пунктов.

Данными проблемами занимались отечественные и зарубежные авторы [1–10]. Перспективы освоения подземного пространства урбанизированных территорий рассматривались в работах [11–15], а их риски — в публикациях [16–18]. Для сохранения целостности окружающей застройки и уменьшения влияния на нее при строительстве могут использоваться различные защитные мероприятия, описанные в исследованиях [19–22]. О методике расчетов технологических осадок оснований при устройстве котлованов писал Р.А. Мангушев [23]. Подобные расчеты с помощью численного моделирования влияния строительства на окружающую застройку приведены в трудах [24, 25].

Основная задача настоящей статьи — расчет осадок фундаментов реконструируемого здания с их возможным усилением по технологии струйной цементации при устройстве подземной парковки под пятном застройки с учетом изменения во времени физико-механических характеристик грунтов под подошвой фундаментов за период длительной эксплуатации здания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно п. 9.33 СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83, при устройстве глубоких котлованов следует выполнять геотехнический прогноз влияния изменения напряженно-деформированного

состояния (НДС) грунтового массива на фундаменты существующих зданий.

В качестве объекта исследования рассмотрено историческое здание, расположенное в центральной части Москвы, под пятном застройки которого устраивается три подземных этажа автостоянки. Для изучения влияния этажности подземной части на фундаменты реконструируемого здания анализируется случай с двухуровневой подземной парковкой. Для решения поставленной в статье задачи проводилось численное моделирование с помощью программного комплекса PLAXIS 2D.

Реконструируемое здание построено в 1927 г., пятиэтажное с подвальным помещением, в плане сложной формы. В осях максимальные размеры здания составляют 107,4 × 65,0 м. Конструктивная схема здания — с полным железобетонным монолитным каркасом. Наружные стены — кирпичные, толщиной от 700 до 1000 мм с учетом отделки. Колонны каркаса здания выполнены из монолитного железобетона. Колонны подвала имеют сечение 1000 × 800 мм, колонны среднего ряда — 700 × 700 мм. Фундаментом здания служит ленточный фундамент из монолитного железобетона. Глубина заложения подошвы фундаментов от уровня пола подвала составляет 500–3200 мм. Ширина подошвы ленточного фундамента колеблется от 1000 до 4500 мм.

По категории технического состояния несущих строительных конструкций здание оценивается как работоспособное (II категория). Согласно СП 22.13330.2016 приложение Е, предельные дополнительные деформации основания фундаментов реконструируемых зданий и сооружений от влияния нового строительства не должны превышать: максимальная дополнительная осадка — 15,0 мм, дополнительная относительная разность осадок — 0,0009. Нагрузка на фундаменты здания принята равной 350 кПа.

Физико-механические характеристики грунтов приведены в табл. 1. В гидрогеологическом соотношении участок строительства характеризуется подземными безнапорными водами, вскрытыми на глубине 11,3–16,5 м от поверхности земли.

Табл. 1. Физико-механические характеристики грунтов

Table 1. Physical and mechanical characteristics of soils

Описание грунта Soil description	Плотность ρ , г/см ³ Density ρ , g/cm ³	Коэффициент пористости e Porosity coefficient e	Угол внутреннего трения φ , град / Angle of internal friction φ , deg	Сцепление C , МПа Coupling C , MPa	Модуль деформации E , МПа Deformation modulus E , MPa
Насыпной грунт Bulk soil	1,69	0,86	29	2	12
Песок мелкий, средней плотности Sand fine, medium density	1,87	0,61	33	3	29
Песок средней крупности, средней плотности Sand of medium size, medium density	1,91	0,62	33	1	30
Суглинок Loam	2,13	0,49	22	39	23
Глина полутвердая Semi-hard clay	1,80	1,15	13	76	19
Известняк низкой прочности Low strength limestone	2,12	Предел прочности на одноосное сжатие $R_{ск} — 0,75$ МПа Ultimate strength for uniaxial compression $R_{sch} — 0.75$ MPa			
Известняк низкой прочности Low strength limestone	2,15	Предел прочности на одноосное сжатие $R_{ск} — 2,1$ МПа Ultimate strength for uniaxial compression $R_{sch} — 2.1$ MPa			

С течением времени от веса конструкций и полезных нагрузок, передающихся от здания на грунт, происходит увеличение прочностных и деформационных характеристик грунтов под подошвой фундамента. На основе натурных исследований, реализовавшихся в ЦНИИПромзданий [26], получены эмпирические зависимости, дающие возможность прогнозировать изменение угла внутреннего трения φ и удельного сцепления C песчаных грунтов от периода эксплуатации здания:

- пески крупные и средней крупности:

$$\varphi_t = \varphi_0 + 0,0614 \cdot t; \tag{1}$$

$$C_t = C_0 + 0,0372 \cdot t; \tag{2}$$

- пески мелкие:

$$\varphi_t = \varphi_0 + 0,0369 \cdot t; \tag{3}$$

$$C_t = C_0 + 0,0490 \cdot t; \tag{4}$$

- пески пылеватые:

$$\varphi_t = \varphi_0 + 0,0662 \cdot t; \tag{5}$$

$$C_t = C_0 + 0,0190 \cdot t; \tag{6}$$

где φ_t , C_t — угол внутреннего трения и удельное сцепление уплотненного грунта соответственно для прогнозируемого времени t ; φ_0 , C_0 — то же для грун-

та, находившегося до обжатия его давлением от здания; t — время эксплуатации основания (годы).

В монографии П.А. Коновалова «Основания и фундаменты реконструируемых зданий» [26] описаны закономерности изменения физико-механических свойств грунтов под подошвой фундаментов при их длительной эксплуатации для песков в зависимости от действующей нагрузки на фундамент (табл. 2). Помимо этого, А.И. Полищук в работе «Основы проектирования и устройства фундаментов реконструируемых зданий» [27] приводит коэффициенты, позволяющие устанавливать соотношение значений характеристик уплотненных и неуплотненных грунтов (табл. 3).

Для установления изменения свойств глин и суглинков вычисляется расчетное сопротивление грунта под подошвой фундаментов под наружную и внутреннюю стену, так как фундаменты имеют различные габариты в плане и по глубине заложения. Определение расчетного сопротивления грунта основания R производится согласно СП 22.13330.2016 (формула (5.7)), после чего с учетом коэффициентов, выявленных А.И. Полищуком, вычисляются увеличенные характеристики грунта.

В настоящих расчетах учитываются возможные варианты предварительного усиления фундаментов здания грунтоцементными сваями Ø300 и Ø800 мм в непосредственной близости к проектируемому котловану по технологии Jet-Grouting.

Для моделирования НДС грунта основания использовалась математическая упругопластическая

Табл. 2. Изменение модуля деформации песка в зависимости от степени его уплотнения [26]

Грунт Soil	Отношение модуля деформации уплотненных $E_{уп}$ и неуплотненных E грунтов ($E_{уп}/E$) при давлении, кПа The ratio of the deformation modulus of compacted E_{com} and non-compacted E soils (E_{com}/E) at pressure, kPa					
	100	200	300	400	500	600
Песок мелкий Fine sand	–	2,7	3,8	3,9	3,9	4,2
Песок средней крупности Medium-sized sand	–	2,2	2,1	1,9	1,7	1,6

Табл. 3. Значения коэффициентов K_γ , K_ϕ , K_c для определения измененных прочностных характеристик грунта [27]

Грунты основания реконструируемых и восстанавливаемых зданий The soils of the foundations of reconstructed and restored buildings	Параметр P/R The P/R parameter	Коэффициенты Coefficients		
		K_γ	K_ϕ	K_c
1. Глинистые грунты с $I_L \leq 0,5$ и при сроке эксплуатации здания более 15 лет 1. Clay soils with $I_L \leq 0.5$ and the service life of the building is more than 15 years	Более 0,8 More than 0.8	1,07–1,17	1,10	1,6
	0,8–0,5	1,03–1,05	1,05	1,32
	Менее 0,5 Less than 0.5	1,0	1,0	1,05
2. Глинистые грунты с $I_L > 0,5$ и при сроке эксплуатации здания более 15 лет 2. Clay soils with $I_L > 0.5$ and the service life of the building is more than 15 years	Более 0,8 More than 0.8	1,05–1,15	1,08	1,45
	0,8–0,5	1,0–1,05	1,04	1,25
	Менее 0,5 Less than 0.5	1,0	1,0	1,05
3. Глинистые грунты при наличии подземной воды в уровне заложения фундаментов и сроке эксплуатации здания более 15 лет 3. Clay soils in the presence of underground water at the foundation level and the service life of the building is more than 15 years	Более 0,8 More than 0.8	1,03	0,97	1,3
	0,8–0,5	1,03	0,88	1,06
	Менее 0,5 Less than 0.5	1,0	0,8	0,85

модель Кулона – Мора. Рассмотрено 5 вариантов устройства подземной парковки под пятном реконструируемого здания.

Вариант 1. Разработка грунта до проектной отметки с помощью устройства ограждения котлована из железобетонной «стены в грунте» толщиной 800 мм, длиной 12,0 м, заглубленной в грунт ниже проектируемой поверхности откопки дна котлована на 2,0 м. Раскрепление выполняется при помощи стальных обвязочных балок и распорок из стальных труб в 3 уровня сечениями 426 × 10 мм, 530 × 11 мм с шагом 4 м.

Вариант 2. Разработка грунта до проектной отметки с помощью устройства ограждения котлована из железобетонной «стены в грунте» толщиной 800 мм, длиной 12,0 м, заглубленной в грунт ниже проектируемой поверхности откопки дна котлована на 2,0 м с усилением существующего ближайшего к котловану фундамента здания грунтоцементными элементами по технологии струйной цементации Jet-Grouting. Раскрепление выполняется при

помощи стальных обвязочных балок и распорок из стальных труб в 2 уровня сечениями 426 × 10 мм, 530 × 11 мм с шагом 4 м.

Варианты 3 и 4 аналогичны вариантам 1 и 2 соответственно, но при этом учитывают изменения прочностных и деформационных характеристик грунтов под подошвой фундаментов здания от времени эксплуатации.

Вариант 5. Строительство двухэтажной подземной парковки с помощью устройства ограждения котлована из железобетонной «стены в грунте» толщиной 800 мм, длиной 12,0 м, заглубленной в грунт ниже проектируемой поверхности откопки дна котлована на 5,1 м. Раскрепление выполняется при помощи стальных обвязочных балок и распорок из стальных труб в 2 уровня сечениями 426 × 10 мм и 530 × 11 мм с шагом 4 м. Учитывается изменение прочностных и деформационных характеристик грунтов под подошвой фундаментов здания от времени эксплуатации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе зависимостей (1)–(4) и данных табл. 2, 3 получены увеличенные физико-механические характеристики грунтов с учетом времени эксплуатации здания (табл. 4), составляющего 96 лет.

В ходе численного моделирования выполнены расчеты влияния устройства подземной парковки на существующее реконструируемое здание.

Полученные результаты зависели от следующих условий:

- 1) изменение физико-механических характеристик грунтов под фундаментами за время длительной эксплуатации здания;
- 2) усиление фундамента грунтоцементными элементами;
- 3) учет этажности подземной части здания.

Результаты расчетов для пяти вариантов представлены на рисунке и сведены в общую таблицу (см. табл. 5).

Осадки фундамента с учетом коэффициентов, увеличивающих физико-механические характеристики грунтов, выявленных исследованиями П.А. Коновалова и А.И. Полищука, уменьшаются на 4,0 мм для случаев, не предусматривающих усиление существующего фундамента (варианты 1, 3), и уменьшаются на 1,8 мм для случаев с превентивным усилением фундамента грунтоцементными элементами (варианты 2, 4), т.е. учет данных коэффициентов снижает осадку фундамента приблизительно на 13–14 %. Усиление ближайшего к котловану фундамента здания грунтоцементными элементами позволяет снизить его осадку приблизительно в 2 раза.

При уменьшении этажности проектируемой парковки на один этаж осадка фундамента составляет 19,5 мм (вариант 5), что на 20 % меньше, чем при строительстве трехэтажной, осадка при строительстве которой составляет 24,1 мм (вариант 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнен расчет изменения физико-механических характеристик грунта во время эксплуатации, опираясь на экспериментальные зависимости П.А. Коновалова и А.И. Полищука. Увеличение угла внутреннего трения при использовании эмпирических зависимостей для песков составило 3,5–5,9 град, а удельного сцепления — в 2–4 раза. Для глинистых грунтов угол внутреннего трения изменился на 1,1 град, а удельное сцепление — в 1,1–1,3 раза.

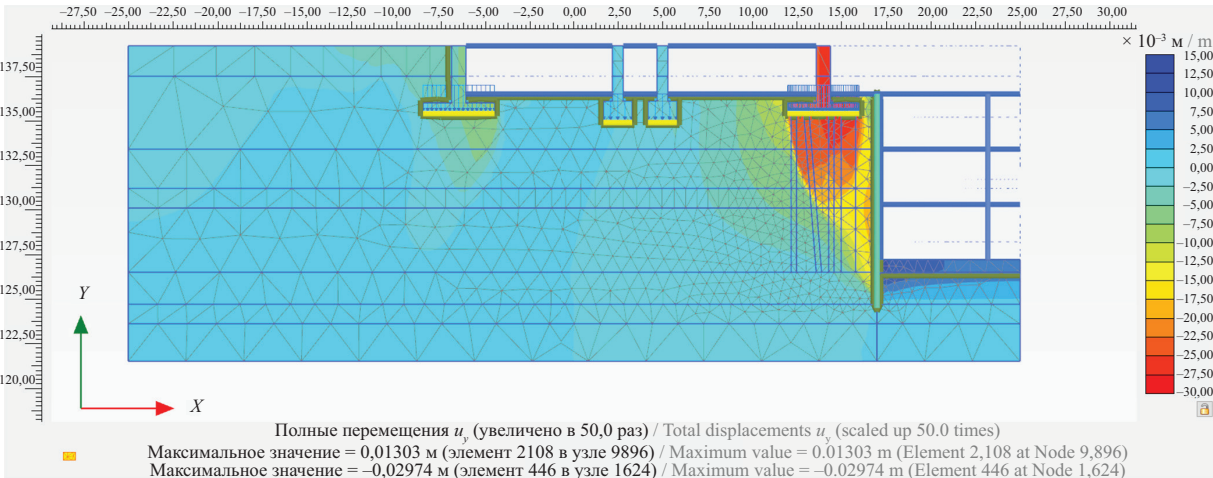
Проведенные расчеты показали, что:

- превентивное усиление существующего фундамента грунтоцементными элементами (вариант 2, 4) позволяет не превышать дополнительные предельные значения деформаций основания для

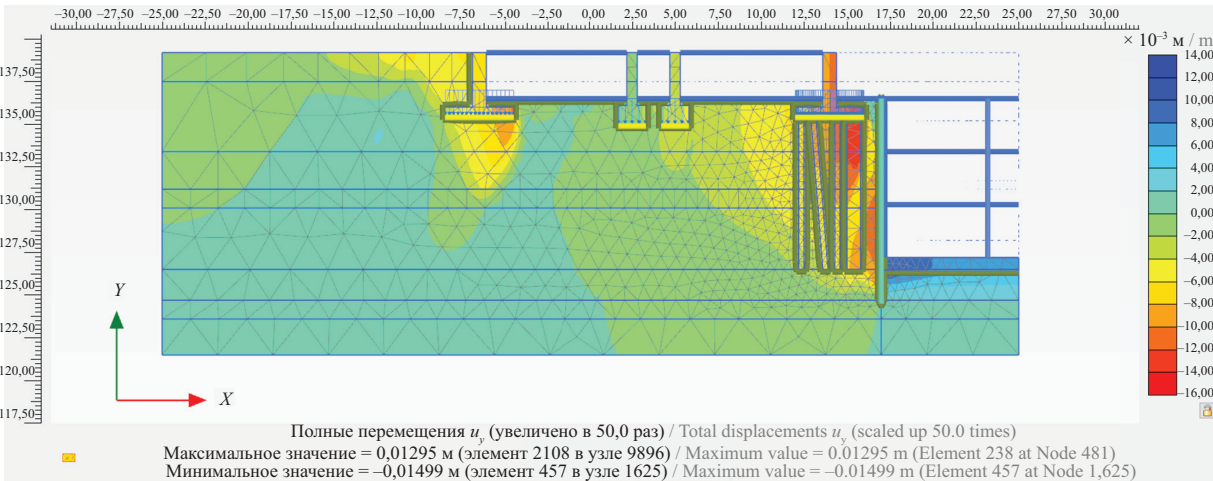
Табл. 4. Увеличенные физико-механические характеристики грунтов

Table 4. Increased physical and mechanical characteristics of soils

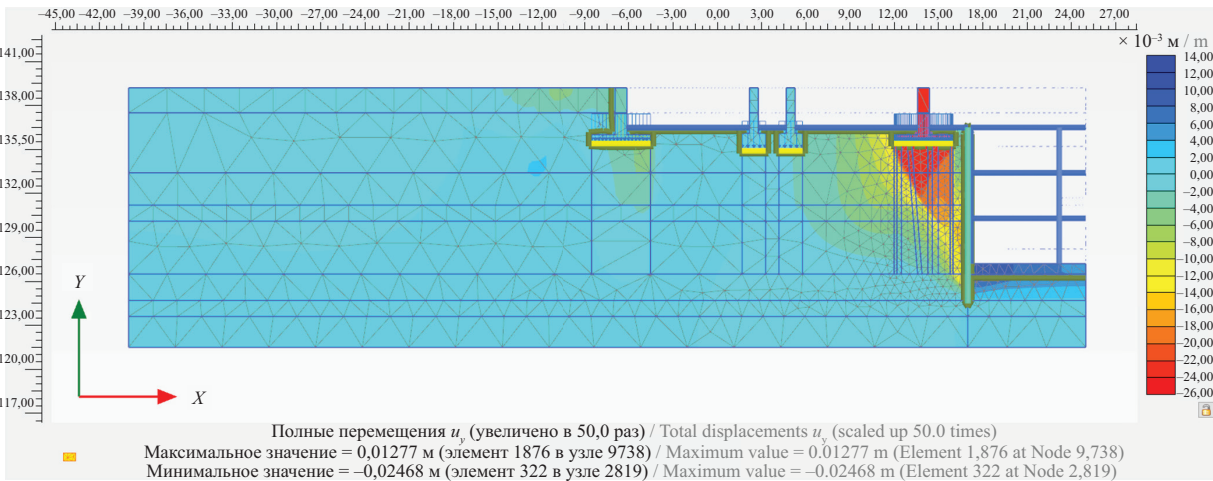
Описание грунта Soil description	Плотность ρ , г/см ³ Density ρ , g/cm ³	Коэффициент пористости e Porosity coefficient e	Угол внутреннего трения φ , град / Angle of internal friction φ , deg	Сцепление C , МПа Coupling C , MPa	Модуль деформации E , МПа Deformation modulus E , MPa
Песок мелкий, средней плотности Sand fine, medium density	1,87	0,61	36,5	7,7	111,7
Песок средней крупности, средней плотности Sand of medium size, medium density	1,91	0,62	38,9	4,6	115,5
Суглинок (под фундаментами наружных стен) Loam (under the foundations of the exterior walls)	2,13	0,45	22	41,0	34
Суглинок (под внутренними фундаментами) Loam (under internal foundations)	2,24	0,45	23,1	51,5	34
Глина полутвердая (под фундаментами наружных стен) Semi-hard clay (under the foundations of the exterior walls)	1,80	0,65	13	79,8	24
Глина полутвердая (под внутренними фундаментами) Semi-hard clay (under internal foundations)	1,90	0,65	13,7	100,3	28



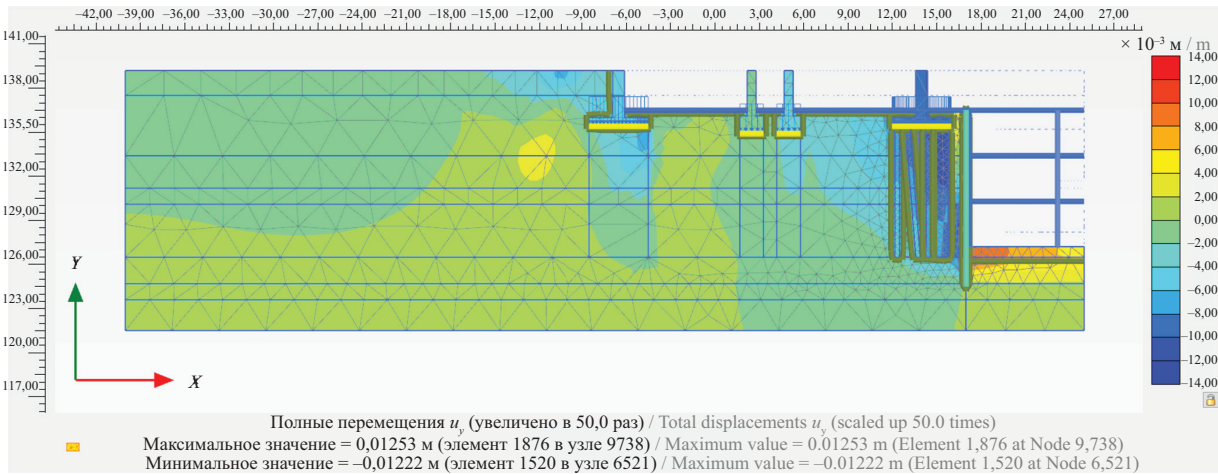
a



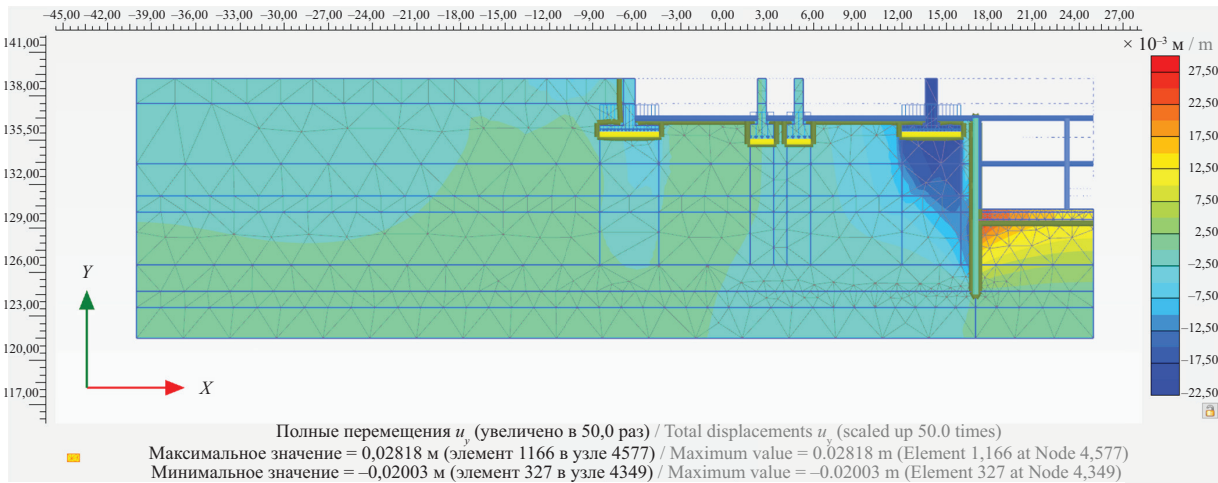
b



c



d



e

Поля вертикальных перемещений после завершения строительства подземной автопарковки: *a* — вариант 1; *b* — вариант 2; *c* — вариант 3; *d* — вариант 4; *e* — вариант 5

Fields of vertical movements after the completion of the construction of an underground car park: *a* — option 1; *b* — option 2; *c* — option 3; *d* — option 4; *e* — option 5

Табл. 5. Основные расчетные варианты и полученные значения деформаций оснований фундаментов

Table 5. Main design options and obtained values of foundation deformations

Рассмотренные варианты Considered options	Осадка ближайшего к котловану фундамента после завершения строительства парковки, мм Settlement of the foundation closest to the foundation pit after the completion of the construction of the parking lot, mm	Относительная разность осадок Relative sediment difference
Вариант 1. Ограждение из «стены в грунте» толщиной 800 мм без усиления фундамента Option 1. Fence from “wall in the ground” 800 mm thick without strengthening the foundation	28,1	0,0025
Вариант 2. Ограждение из «стены в грунте» толщиной 800 мм с усилением фундамента Option 2. Fence from “wall in the ground” 800 mm thick with foundation reinforcement	13,6	0,0008

Рассмотренные варианты Considered options	Осадка ближайшего к котловану фундамента после завершения строительства парковки, мм Settlement of the foundation closest to the foundation pit after the completion of the construction of the parking lot, mm	Относительная разность осадок Relative sediment difference
Вариант 3. Ограждение из «стены в грунте» толщиной 800 мм без усиления фундамента (с измененными физико-механическими характеристиками) Option 3. Fence from a “wall in the ground» 800 mm thick without strengthening the foundation (with changed physical and mechanical characteristics)	24,1	0,0021
Вариант 4. Ограждение из «стены в грунте» толщиной 800 мм с усилением фундамента (с измененными физико-механическими характеристиками) Option 4. Fence from a “wall in the ground” 800 mm thick with foundation reinforcement (with changed physical and mechanical characteristics)	11,8	0,0007
Вариант 5. Ограждение из «стены в грунте» толщиной 800 мм без усиления фундамента со строительством двухэтажной подземной парковки (с измененными физико-механическими характеристиками) Option 5. Fence from a “wall in the ground” 800 mm thick without strengthening the foundation with the construction of a two-story underground car park (with modified physical and mechanical characteristics)	19,5	0,0017

реконструируемых зданий, согласно приложению Е СП 22.13330.2016, что обеспечивает конструктивную безопасность существующего исторического здания;

- учет изменения физико-механических характеристик грунтов дает возможность снизить осадки здания при реконструкции с освоением подземного пространства;
- уменьшение этажности проектируемой подземной части на один этаж (с трех до двух этажей) снижает осадку ближайшего к котловану фундамента здания до 20 %.

В инженерно-геологических условиях, характерных для центральной части г. Москвы, в плотной городской застройке возможно производить реконструкцию исторического здания с устройством под ним подземной автостоянки с превентивным усилением существующих фундаментов грунтоцементными элементами. Учет уплотнения грунтов под существующими фундаментами здания за период его длительной эксплуатации снижает осадку до 14 %, что может иметь значение для реконструируемых зданий при решении вопроса о необходимости применения защитных мероприятий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мангушев Р.А., Осокин А.И. Опыт реконструкции шестизэтажного здания с подземным пространством в центральной части Санкт-Петербурга // Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение : мат. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 80-летию образования каф. геотехники СПбГАСУ (механики грунтов, оснований и фундаментов ЛИСИ) и 290-летию российской науки. СПб. : СПбГАСУ, 2014. Ч. 1. С. 60–72.

2. Савинов А.В. Освоение подземного пространства при реконструкции Саратовской областной филармонии им. А. Шнитке // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2014. № 3. С. 217–230.

3. Мангушев Р.А. Устройство подземного пространства при реконструкции административного здания // Жилищное строительство. 2014. № 9. С. 3–9. EDN SMVCMJ.

4. Чистяков Д.А., Калугин А.Н., Туркина Е.А. Реконструкция зданий в условиях исторической застройки города (на примере реконструкции Политехнического музея в Москве) // Инновации и инвестиции. 2021. № 3. С. 293–296. EDN WIOPIU.

5. Мангушев Р.А., Конюшков В.В., Сапин Д.А. Инженерно-геотехнические изыскания при строительстве и реконструкции в условиях плотной городской застройки // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 47–54. EDN VZDPZF.

6. Pilat S.Z. Reconstructing Italy: The Ina-Casa neighborhoods of the Postwar Era. Farnham : Ashgate, 2016. 306 p.

7. Коносова А.Е., Ламута В.В. Анализ существующих методов устройства подземного пространства под зданиями при их реконструкции // Colloquium-journal. 2020. № 14 (66). С. 61–64. DOI: 10.24411/2520-6990-2020-11898

8. Орехов В.В., Алексеев Г.В. Прогноз влияния строительства подземного комплекса на окружающую застройку // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 8 (107). С. 839–845. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.8.839-845

9. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Prediction of technological settlements for existing buildings during underground construction // 17th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, ECSMGE 2019 — proceedings. 2019. DOI: 10.32075/17ECSMGE-2019-0194. EDN RIVUEE.

10. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Technological Settlements of the Surrounding Buildings during the Construction of Deep Pit Fences // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2023. Vol. 60. Issue 1. Pp. 15–21. DOI: 10.1007/s11204-023-09858-3

11. Wang H. Earth human settlement ecosystem and underground space research // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 765–781. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.774

12. Chen J., Huang L., Su L. Toward a more compact and sustainable city — the use of underground space for Chinese mainland cities // Green Building, Environment, Energy and Civil Engineering. 2016. Pp. 341–344. DOI: 10.1201/9781315375106-73

13. Храбатина Н.В., Пусный Л.А., Дубино А.М. Освоение подземного пространства мегаполисов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 1. С. 61–65. DOI: 10.12737/article_5a5dbf083529a8.09766561. EDN YNSCND.

14. Осокин А.И., Денисова О.О., Шахтарина Т.Н. Технологическое обеспечение подземного строительства в условиях городской застройки // Жилищное строительство. 2014. № 3. С. 16–24. EDN RXOKJB.

15. Мангушев Р.А., Осокин А.И., Левинская П.Г. Перспективы устройства подземных паркингов в условиях стесненной застройки исторического центра Санкт-Петербурга // Жилищное строительство. 2019. № 4. С. 3–18. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-4-3-18. EDN MDIWKD.

16. Долев А.А. Риски при устройстве котлованов для строительства Московского метрополитена // Метро и тоннели. 2022. № 1. С. 13–16. EDN OSXMBV.

17. Lebedev M.O., Romanevich K.V. Risk management in the development of underground space in Russian cities // Reliability: Theory & Applications. 2022. Vol. 17.

Special Issue 4 (70). Pp. 146–159. DOI: 10.24412/1932-2321-2022-470-146-159

18. Mikhaylova T., Parshin D., Shoshinov V., Trebukhin A. Architectural and town-planning reconstruction problems of the city of Voronezh // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 33. P. 01033. DOI: 10.1051/e3sconf/20183301033

19. Ponomarev A.B., Kaloshina S.V. Influence of Slab Foundations Constructed in Dense Urban Settings on Settlement of Existing Buildings // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2013. Vol. 50. Issue 5. Pp. 194–199. DOI: 10.1007/s11204-013-9233-9

20. Ильичев В.А., Никуфорова Н.С., Готман Ю.А., Туликов М.М., Трофимов Е.Ю. Анализ применения активных и пассивных методов защиты существующей застройки при подземном строительстве // Жилищное строительство. 2013. № 6. С. 25–27. EDN QILIVF.

21. Калюшина С.В., Кудашева М.И., Золотозубов Д.Г. Исследование влияния разработки траншей на дополнительные осадки существующего здания // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2018. Т. 9. № 4. С. 115–130. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.4.11

22. Nikiforova N., Konnov A., Zakirova A. The choice of effective geotechnologies to ensure the preservation of historic buildings during their renovation with the underground space development // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 042012. DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042012

23. Мангушев Р.А., Конюшков В.В., Кондратьева Л.Н., Кириллов В.М. Методика расчета технологической осадки основания фундаментов зданий соседней застройки при устройстве котлованов // Жилищное строительство. 2019. № 9. С. 3–11. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-9-3-10. EDN FMGQTO.

24. Пономарев А.Б., Калюшина С.В., Захаров А.В., Безгодов М.А., Шенкман Р.И., Золотозубов Д.Г. Результаты геотехнического моделирования влияния устройства глубокого котлована на существующую застройку // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2014. № 4. С. 188–201. EDN SFACJP.

25. Строкова Л.А., Тарек С.С.Т., Голубева В.В., Иванов В. Численное моделирование влияния упрочнения грунтового массива цементно-песчаной инъекцией на деформации основания // Известия Томского политехнического университета. 2017. Т. 328. № 10. С. 6–17. EDN ZWHCVH.

26. Коновалов П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. 4-е издание. М., 2000. 318 с.

27. Полищук А.И. Основы проектирования и устройства фундаментов реконструируемых зданий. Нортхэмптон; Томск : STT, 2004. 476 с.

Поступила в редакцию 25 мая 2023 г.

Принята в доработанном виде 30 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 3 июля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Надежда Сергеевна Никифорова — доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 546750, Scopus: 7005513559, ResearcherID: P-3429-2015, ORCID: 0000-0002-0611-4354; n-nikiforova@yandex.ru;

Николай Сергеевич Семенов — магистрант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; 89252009999@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Mangushev R.A., Osokin A.I. Experience in the reconstruction of a six-story building with underground space in the central part of St. Petersburg. *Modern geotechnologies in construction and their scientific and technical support : materials of the international. sci-tech. conf., dedicated 80th anniversary of the formation of the department. geotechnics of SPbGASU (mechanics of soils, bases and foundations LISI) and the 290th anniversary of Russian science*. St. Petersburg, SPbGASU, 2014; 1:60-72. (rus.).
2. Savinov A.V. The underground space utilization in reconstruction of Saratov regional Alfred Schnittke philharmonia. *Bulletin of PNRPU. Construction and architecture*. 2014; 3:217-230. (rus.).
3. Mangushev R.A. Arrangement of the underground space when reconstructing administrative building. *Housing Construction*. 2014; 9:3-9. EDN SMVCMJ. (rus.).
4. Chistyakov D.A., Kalugin A.N., Turkina E.A. Reconstruction of buildings in the context of the historical development of the city (on the example of the reconstruction of the polytechnic museum in Moscow). *Innovation and investment*. 2021; 3:293-296. EDN WIOPIU. (rus.).
5. Mangushev R.A., Konyushkov V.V., Sapin D.A. Engineering and geotechnical surveys during construction and reconstruction in conditions of dense urban development. *Industrial and civil engineering*. 2016; 5:47-54. EDN VZDPZF. (rus.).
6. Pilat S.Z. *Reconstructing Italy: The Ina-Casa neighborhoods of the Postwar Era*. Farnham, Ashgate, 2016; 306.
7. Kuposova A.E., Latuta V.V. Analysis of existing methods for device underground space under buildings during reconstruction. *Colloquium-journal*. 2020; 14(66):61-64. DOI: 10.24411/2520-6990-2020-11898 (rus.).
8. Orekhov V.V., Alekseev G.V. Forecast of Influencing the Underground Complex Construction on a Context Area. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12(8):(107):839-845. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.8.839-845 (rus.).
9. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Prediction of technological settlements for existing buildings during underground construction. *17th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, ECSMGE 2019 — proceedings*. 2019. DOI: 10.32075/17ECSMGE-2019-0194. EDN RIVUEE.
10. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Technological Settlements of the Surrounding Buildings during the Construction of Deep Pit Fences. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2023; 60(1):15-21. DOI: 10.1007/s11204-023-09858-3
11. Wang H. Earth human settlement ecosystem and underground space research. *Procedia Engineering*. 2016; 165:765-781. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.774
12. Chen J., Huang L., Su L. Toward a more compact and sustainable city — the use of underground space for Chinese mainland cities. *Green Building, Environment, Energy and Civil Engineering*. 2016; 341-344. DOI: 10.1201/9781315375106-73
13. Hrabatina N.V., Pusnyj L.A., Dubino A.M. Development of the underground space of megacities. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018; 1:61-65. DOI: 10.12737/article_5a5dbf083529a8.09766561. EDN YNSCND. (rus.).
14. Osokin A.I., Denisova O.O., Shahtarina T.N. Technological support of underground construction in the conditions of urban development. *Housing Construction*. 2014; 3:16-24. EDN RXOKJB. (rus.).
15. Mangushev R.A., Osokin A.I., Levinskaya P.G. Prospects for the construction of underground parkings under conditions of tight development of the historic center of St. Petersburg. *Housing Construction*. 2019; 4:3-18. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-4-3-18. EDN MDIWKD. (rus.).
16. Dolev A.A. Pits construction risks during Moscow metro construction. *Metro and Tunnels*. 2022; 1:13-16. EDN OSXMBV. (rus.).
17. Lebedev M.O., Romanovich K.V. Risk management in the development of underground space in Russian cities. *Reliability: Theory & Applications*. 2022; 17(4):(70):146-159. DOI: 10.24412/1932-2321-2022-470-146-159
18. Mikhaylova T., Parshin D., Shoshinov V., Trebukhin A. Architectural and town-planning reconstruction problems of the city of Voronezh. *E3S Web of Conferences*. 2018; 33:01033. DOI: 10.1051/e3s-conf/20183301033

19. Ponomarev A.B., Kaloshina S.V. Influence of Slab Foundations Constructed in Dense Urban Settings on Settlement of Existing Buildings. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2013; 50(5):194-199. DOI: 10.1007/s11204-013-9233-9

20. Il'ichev V.A., Nikiforova N.S., Gotman Yu.A., Tupikov M.M., Trofimov E.Yu. Analysis of the application of active and passive protection methods in underground construction. *Housing Construction*. 2013; 6:25-27. EDN QILIVF. (rus.).

21. Kaloshina S.V., Kudasheva M.I., Zolotozubov D.G. Study of the effect of trenching on additional settlements of an existing building. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018; 9(4):115-130. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.4.11 (rus.).

22. Nikiforova N., Konnov A., Zakirova A. The choice of effective geotechnologies to ensure the preservation of historic buildings during their renovation with the underground space development. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 463:042012. DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042012

23. Mangushev R.A., Konyushkov V.V., Kondrat'eva L.N., Kirillov V.M. Method for calculat-

ing the technological settlement of the foundations of the foundations of buildings of neighboring buildings when arranging pits. *Housing Construction*. 2019; 9:3-11. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-9-3-10. EDN FMGQTO. (rus.).

24. Ponomarev A.B., Kaloshina S.V., Zaharov A.V., Bezgodov M.A., Shenkman R.I., Zolotozubov D.G. Results of geotechnical modeling of the impact of a deep pit on the existing building. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture*. 2014; 4:188-201. EDN SFACJP. (rus.).

25. Strokova L.A., Tarek S.S.T., Golubeva V.V., Ivanov V. Numerical modeling of the effect of soil mass hardening by cement-sand injection on base deformations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2017; 328(10):6-17. EDN ZWHCVH. (rus.).

26. Kononov P.A. *Bases and foundations of reconstructed buildings. 4-th edition*. Moscow, 2000; 318. (rus.).

27. Polishchuk A.I. *Fundamentals of design and installation of foundations for reconstructed buildings*. Northampton; Tomsk, STT, 2004; 476. (rus.).

Received May 25, 2023.

Adopted in revised form on May 30, 2023.

Approved for publication on July 3, 2023.

BIONOTES: Nadezhda S. Nikiforova — Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 546750, Scopus: 7005513559, ResearcherID: P-3429-2015, ORCID: 0000-0002-0611-4354; n-nikiforova@yandex.ru;

Nikolai S. Semenov — master student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; 89252009999@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.