СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

УДК 624.1

DOI: 10.22227/2305-5502.2018.2.1

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОМПЛЕКСА СООРУЖЕНИЙ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ

В.В. Орехов, Г.В. Алексеев¹

Научно-исследовательский институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП)

им. Н.М. Герсевича, 109428, г. Москва, Рязанский пр-т, д. 59;

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Предмет исследования: рассматриваются постановка задачи и результаты численных исследований изменения напряженно-деформированного состояния грунтового основания в результате строительства сооружений стадиона. В конструктивном отношении он включает четыре прямоугольных трибуны и офисно-административные здания. Трибуны, опирающиеся на железобетонные плиты переменной жесткости, отделены от фундаментных плит офисно-административных зданий деформационными швами.

Цель: оценка взаимовлияния сооружений стадиона на совместные деформации их фундаментов и грунтового основания.

Материалы и методы: для оценки учета фактора взаимовлияния строящихся сооружений разработана математическая модель системы: «сооружения стадиона — плитный фундамент — грунтовый массив». Учет жесткости и нагрузок от возводимых на фундаментных плитах сооружений осуществлялся на основе включения в расчетную модель восьми суперэлементов, созданных в программе ANSYS для верхних строений сооружений стадиона. Поскольку перед началом строительства под фундаментами зданий в зоне распространения грунтов, обладающих низкими значениями деформационных характеристик, были предусмотрены мероприятия по улучшению их свойств, в расчетных исследованиях были рассмотрены два варианта мероприятий: замена слабых грунтов или их укрепление цементацией.

Результаты: результаты численных исследований показали, что сложный характер взаимовлияния всех сооружений стадиона и неравномерность распределения нагрузки приводят к неравномерной осадке и изгибу их фундаментных плит.

Выводы: на характер распределения вертикальных перемещений всех плитных фундаментов офисно-административных зданий оказывают влияние возводимые рядом трибуны стадиона, а именно значения вертикальных перемещений сторон фундаментов, примыкающих к трибунам — несколько больше чем противоположных сторон. В то же время вертикальные перемещения фундаментов офисно-административных зданий оказывают влияние на характер деформирования плитных фундаментов менее жестких сооружений трибун стадиона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: расчет, напряженно-деформированное состояние, грунтовое основание, упругопластическая модель, взаимовлияние, сооружения стадиона

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Орехов В.В., Алексеев Г.В. Взаимодействие комплекса сооружений с грунтовым основанием // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. Вып. 2 (28). Ст. 1. Режим доступа: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.2.1

INTERACTION OF A COMPLEX OF BUILDINGS WITH SOIL BASE

V.V. Orekhov, G.V. Alekseev¹

Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP),

59 Ryazanskiy prospekt, Moscow, 109428, Russian Federation;

*¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavlshoshe, Moscow, 129337, Russian Federation*

Subject: we consider formulation of the problem and the results of numerical studies of the change in the stress-strain state of the soil base resulting from construction of stadium structures. In terms of structures, the stadium includes four rectangular stands and office and administrative buildings, located in the corners of the stadium. The stands supported by reinforced concrete slabs of variable rigidity are separated from the foundation slabs of the office and administrative buildings by expansion joints.

Research objectives: evaluation of influence of the stadium constructions on mutual deformation of their foundations and soil ground.

Materials and methods: to assess the factor of mutual influence of buildings under construction, we have developed mathematical model of the system: “structures of the stadium — raft foundation — soil”. The loads transmitted from the structures erected on the foundation slabs and the stiffness of these structures were taken into account by including eight superelements into the analyzed model created in the ANSYS program for the upper structures of the stadium facilities. Soils located below the level of the designed foundations, down to dense limestone, were included into the geomechanical model. Only six geological elements are analyzed. The behavior of soils under loading is described by the elastoplastic soil model, the parameters of which are determined by the results of the triaxial tests. Since before the construction under the foundations of buildings, in a zone of distribution of soils with low values of deformation characteristics, measures were taken for improvement of their properties, in the current research two types of such activities were considered — replacement of weak soils or reinforcement by cementation.

Results: the results of numerical studies showed that the complex nature of interaction of all structures of the stadium and non-uniform load distribution results in non-uniform settlement and bending of foundation plates of the stadium structures.

Conclusions: distribution of vertical displacements of all slab foundations of office and administrative buildings is influenced by the stands erected nearby, and namely, the values of vertical displacements of the sides of the foundations adjacent to the stands are somewhat larger than those of the opposite side. At the same time, the vertical displacements of the foundations of office and administrative buildings affect, in turn, the nature of deformation of the slab foundations of less stiff structures of the stadium stands.

KEY WORDS: analysis, stress-strain state, soil base, elastoplastic model, interaction, constructions of the stadium

FOR CITATION: Orekhov V.V., Alekseev G.V. Vzaimodejstvie kompleksa sooruzhenij s gruntovym osnovaniem [Interaction of a complex of buildings with soil base]. Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: Science and Education]. 2018, vol. 8, issue 2 (28), paper 1.. Available at: <http://nso-journal.ru>. (In Russian) DOI: 10.22227/2305-5502.2018.2.1

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и устройстве оснований и фундаментов зданий и сооружений нормативные документы предполагают, что сооружение и его основание должны рассматриваться в единстве, т.е. должно учитываться взаимодействие сооружения с основанием. Кроме того, при проектировании новых сооружений, расположенных в непосредственной близости от существующих или строящихся сооружений, необходимо учитывать их взаимовлияние.

Для оценки учета фактора взаимовлияния строящихся сооружений на совместные деформации их фундаментов и грунтового основания рассмотрим результаты расчетных исследований напряженно-деформированного состояния системы «грунтовое основание — сооружения стадиона».

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

При строительстве нового объекта эффективным методом оценки безопасности проектных решений является математическое моделирование процесса возведения сооружения. При этом для получения реального прогноза необходимо учитывать все основные факторы, влияющие на результаты расчетных исследований: инженерно-геологические условия строительства, упруго-пластическое деформирование грунтов основания, пространственную работу сооружения и грунтового основания, поэтапность строительства и т.д., в том числе и влияние расположенных рядом зданий и сооружений [1–12].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В конструктивном отношении стадион включает следующие сооружения:

- трибуны с двухъярусной подземной частью и козырьками сверху. В плане представляют собой прямоугольные сооружения: западная и восточная трибуны имеют размеры в плане $125,44 \times 44,8$ м, северная и южная — $89,6 \times 44,8$ м. Конструкции каждой трибуны опираются на фундаментную плиту переменной толщины (от 0,7 до 1,5 м), отделенную от фундаментных плит офисно-административных зданий деформационным швом;

- офисно-административные здания высотой до 50 м, расположенные в трех углах стадиона. Конструкции зданий опираются на фундаментную плиту толщиной 1,5 м;

- высотное офисно-административное здание высотой 170 м, располагающееся на плитно-свайном фундаменте. Высота ростверка 4,0 м. Сваи диаметром 1,2 м и длиной 42 м опираются на прочные известняки.

Выше основание сооружений сложено рыхлыми, связными и скальными грунтами (табл.). В геомеханическую модель основания были включены грунты, расположенные ниже отметки проектируемых фундаментов. Всего выделено шесть расчетных геологических элементов (РГЭ). Для выполнения расчетных исследований изменения напряженно-деформированного состояния грунтового основания в результате строительства сооружений стадиона была разработана математическая модель системы: «грунтовый массив — разрезной плитный фундамент — сооружения стадиона».

Объемная инженерно-геологическая модель грунтового массива была построена по данным инженерно-геологических изысканий, выполненных на площадке строительства.

В инженерно-геологическую модель вошла часть грунтового массива глубиной 54 м от отметки фундаментов (рис. 1). Ниже основание при-

Физико-механические свойства грунтов основания

Номер РГЭ	Краткое описание породы	Плотность, г/см ³	Упруго-прочностные свойства		
			Удельное сцепление $C_{ocл}$, МПа	Коэффициент внутреннего трения $tg\varphi_{ocл}$	Модуль деформации $E_{0,3-0,4}$, МПа
1	Песок средне- и крупнозернистый	2,01	0,02	0,86	30
2	Супесь пластичная	2,05	0,02	0,58	34
2а	Супесь текучая	1,99	0,02	0,39	8
3	Глина полутвердая	1,88	0,05	0,33	15
4	Глина полутвердая	1,90	0,05	0,27	26
5	Известняк средней прочности с прослоями доломитов	2,40	1	1,0	450
6	Глина твердая и полутвердая с прослоями мергеля	2,15	0,07	0,65	160
7	Известняк прочный и средней прочности	—	—	—	950

Рис. 1. Центральный фрагмент расчетной области основания под фундаментами: а — по сечению 1-1; б — по сечению 2-2

нято несжимаемым. Размеры модели в плане — 390×350 м.

Геометрическая модель сооружений не создавалась, а была составлена только геометрическая модель их фундаментов. Учет жесткости и нагрузок от возводимых на фундаментных плитах сооружений осуществлялся на основе включения в расчетную модель восьми суперэлементов [13, 14], созданных ООО «ГК-Техстрой» в программе ANSYS [15, 16] для верхних строений сооружений стадиона (рис. 2).

В расчетной модели системы были предусмотрены следующие этапы расчета:

1. Моделирование природного напряженно-деформированного состояния основания (от собственного веса грунтов). Грунт, расположенный от поверхности основания до отметки фундамента, моделировался равномерно-распределенной нагрузкой $Q = 0,147$ МПа.

2. Устройство котлована (путем снятия равномерно-распределенной нагрузки от веса вышележащих грунтов по площади котлована).

Рис. 2. Конечно-элементная модель сооружений стадиона

3. Улучшение свойств грунта РГЭ 2а под фундаментами зданий и устройство свайного поля (102 сваи стойки) под высотным зданием.

4. Устройство разрезного плитного фундамента для всех сооружений.

5. Возведение сооружений стадиона.

Поскольку перед началом строительства под фундаментами зданий в зоне распространения грунтов РГЭ 2а, обладающих низкими значениями деформационных характеристик, были предусмотрены мероприятия по улучшению их свойств, в расчетной модели были рассмотрены два варианта мероприятий: замена на грунты РГЭ 2 и цементация, с достижением значений модуля общей деформации зацементированного грунта 60 МПа.

Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния системы «грунтовое основание — сооружения стадиона» выполнялись по вычислительной программе «Земля» [17], реализующей метод конечных элементов [18, 19]. Поведение грунтов основания при нагружении описывалось упругопластической моделью грунта [20, 21], параметры которой определялись по результатам трехосных испытаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как показали результаты расчетов, сложный характер взаимовлияния всех сооружений стадиона и неравномерность распределения нагрузки приводит к неравномерной осадке и изгибу их фундаментных плит (рис. 3).

Вариант расчета с заменой слабых грунтов показал, что для плитных фундаментов офисно-административных зданий, расположенных в северо-западном и юго-восточном углах стадиона, расчеты прогнозируют максимальную осадку, соответственно 5,5 и 6,1 см. Плитный фундамент северо-восточного офисно-административного здания имеет

осадку порядка 4,0 см. Максимальная осадка плитно-свайного фундамента высотного офисно-административного здания составляет 2,5 см.

Значительные вертикальные перемещения фундаментов офисно-административных зданий оказывают существенное влияние на характер деформирования плитных фундаментов менее жестких сооружений трибун стадиона. Максимальная осадка плитных фундаментов трибун стадиона составляет порядка 3,5 см и прогнозируется с расчетом по краям, примыкающим к офисно-административным зданиям. В то же время, максимальные осадки фундаментов всех сооружений не превосходят предельно допустимые значения.

Как показали результаты дополнительного расчета, при улучшении свойств слабых грунтов перед началом строительства с помощью цементации, повышение величины модуля общей деформации грунта РГЭ 2а до 60 МПа ухудшает характер деформирования фундаментных плит южной и северной трибун стадиона. Наличие «жесткой вставки» под средней частью южной трибуны увеличивает изгиб ее фундаментной плиты и приводит к ее частичному отрыву от основания. Также частичный отрыв фундаментной плиты от основания наблюдается и под краем западной трибуны, расположенным над зацементированным грунтом РГЭ 2а.

ВЫВОДЫ

На характер распределения вертикальных перемещений всех плитных фундаментов офисно-административных зданий оказывают влияние возводимые рядом трибуны стадиона, а именно значения вертикальных перемещений сторон фундаментов, примыкающих к трибунам — несколько больше чем противоположных сторон. В то же время вертикальные перемещения фундаментов офисно-административных зданий оказывают, в свою очередь,

Рис. 3. Вертикальные перемещения фундаментных плит U_z , м: а — замена слабого грунта; б — цементация слабого грунта

влияние на характер деформирования плитных фундаментов менее жестких сооружений трибун стадиона. Сложный характер взаимовлияния всех соору-

жений стадиона и неравномерность распределения нагрузки приводят к неравномерной осадке и изгибу их фундаментных плит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орехов В.В., Алексеев Г.В. Прогноз влияния строительства подземного комплекса на окружающую застройку // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 8 (107). С. 839–845. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.8.839-845
2. Ильичев В.А., Мангушев Р.А., Никифорова Н.С. Опыт освоения подземного пространства российских мегаполисов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2012. № 2. С. 17–20.
3. Зарецкий Ю.К., Орехов В.В. Математическая модель участка застройки ММДЦ «МОСКВА-СИТИ» // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2001. № 4. С. 2–4.
4. Никифорова Н.С., Зехниев Ф.Ф., Буртова О.В., Астафьев С.В. Влияние строительства уникальных объектов с подземной частью на примыкающие исторические здания // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 2 (19). С. 126–130.
5. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Знаменский В.В., Мнушкин М.Г. Численное моделирование строительства зданий с фундаментами глубокого заложения в условиях плотной городской застройки // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2014. № 2. С. 170–179.
6. Парамонов В.М., Стекланникова Н.И. Оценка взаимного влияния зданий и сооружений и подзем-

ных коммуникаций в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга // Труды Международной конференции по геотехнике «Геотехнические проблемы мегаполисов». Т. 4. М., 2010. С. 1524–1532.

7. Moormann C., Moormann H.R. A study of wall and ground movements due to deep excavation in soft soil based on worldwide experiences // Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Proceedings of the Third International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground IS-Toulouse 2002. Toulouse – France October 23–25, 2002. Toulouse, 2002. Pp. 234–238.

8. Oral S.D., Setin K.O., Erol O. et al. Performance assessment of Izmirspor metro station // Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. IOS Press, 2011. Pp. 1541–1546.

9. Bolisetti C., Whittaker A.S. Structure-soil-structure interaction // 23th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Manchester. United Kingdom. Manchester, 2015. Paper ID 565.

10. Moh Z.C., Chin C.T. Recent developments in deep excavation in soft ground // Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering and Earthquake Resistant Technic in Soft Area. China. 1993. Pp. 110–114.

11. Portugal J.C., Portugal A., Santo A. Excavation induced building damage // Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering «Geotechnology in Harmony with the Global Environment». Osaka, 2005. Pp. 1543–1546.
12. Schäfer R., Triantafyllidis T. The influence of the construction process on the deformation behavior of diaphragm walls in soft clayey ground // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2006. 30 (7), pp. 563–576. <https://doi.org/10.1002/nag.480>
13. Зарецкий Ю.К., Орехов В.В., Кельман М.И. Расчет взаимодействия плитного фундамента с грунтовым основанием с учетом жесткости верхнего строения // Вестник МГСУ. 2008. № 2. С. 15–17.
14. Орехов В.В. Учет конструкции здания при расчетах осадки и коэффициентов постели основания // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007. No. 4. Pp. 2–4.
15. Kent L.L. ANSYS tutorial release 14 // SDC Publication. 2012. 176 p.
16. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. М. : Компьютер пресс, 2002. 224 p.
17. Орехов В.В. Комплекс вычислительных программ «Земля-89» // Межвузовский сборник «Исследования и разработки по компьютерному проектированию фундаментов и оснований». Новочеркасск, 1990. С. 14–20.
18. Zienkiewicz O.C., Cheung Y.K. The finite element method in structural and continuous mechanics. McGraw-Hill, 1967. 240 p.
19. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. Vol. 2: Soil mechanics. Butterworth-Heinemann. 2000. 459 p.
20. Зарецкий Ю.К., Ломбардо В.Н. Статика и динамика грунтовых плотин. М. : Энергоатомиздат, 1983. 255 с.
21. Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. М. : Стройиздат, 1988. 349 с.

Поступила в редакцию 30 января 2018 г.

Принята в доработанном виде 30 февраля 2018 г.

Одобрена для публикации 28 мая 2018 г.

О Б АВТОРАХ: Орехов Вячеслав Валентинович — доктор технических наук, главный специалист, Научно-исследовательский институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова, 109428, г. Москва, Рязанский пр-т, д. 59, V.Orehov@rambler.ru;

Алексеев Герман Валерьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры механики грунтов и геотехники, заместитель начальника научно-технического центра «ЭксПО», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, alexeev_german@bk.ru.

INTRODUCTION

While engineering the bases and foundations of buildings and constructions, in accordance with the regulatory documents it is assumed that the construction and its base should be considered in unity, i.e. the interaction of the construction with the base should be taken into account. Moreover, in the process of designing of the new constructions, located in close vicinity to existing structures or buildings under construction, their interaction should be taken into account.

To assess the account of the mutual influence factor of structures under construction on the joint deformations of their foundations and the soil base we should consider the results of the calculated analysis of stress-strain state of the “soil base – constructions of the stadium” system.

LITERATURE REVIEW

In the process of construction of a new object the most effective method of the safety assessment of

design solutions is the mathematical modelling of the process of building erection. Simultaneously, to obtain the real-time forecast it is necessary to take into account all principal factors influencing the results of the calculated analysis: geological engineering conditions of construction, elastoplastic deformation of soil bases, three-dimensional behavior of structure and the soil base, the phasing of construction process, etc., including the influence of adjacent buildings and structures [1–12].

MATERIALS AND METHODS

In terms of construction the stadium comprises the following structures:

- stadium stands with two-level substructure and canopies above. In plan view they represent rectangular structures: western and eastern stands have in plan view the following dimensions: 125.44 × 44.8 m, northern and southern stands – 89.6 × 44.8 m. The construction of each stand rests on the foundation slab with the vari-

able thickness (from 0.7 to 1.5) separated from foundation slabs of office buildings by an isolation joint;

- office buildings with the height up to 50 m, located in three corners of the stadium. The building constructions rest on the foundation slab with the thickness of 1.5 m;

- high-rise office building with the height of 170 m, resting on the combined piled-raft foundation. The height of the raft foundation is 4.0 m. Piles with the diameter of 1.2 m and length of 42 m are based on solid limestone.

On the above level the base of constructions is formed by loose, cohesive and rocky soils (Table). The geomechanical model of the base included the soils, located below the level of the designed foundations. In total six design geological elements (DGE) were singled out. To perform the calculated analysis of the alteration of stress-strain state of the soil base as a consequence of the erection of stadium constructions, the mathematical model of the “constructions of the stadium – slab foundation – soil mass” system was developed.

Three-dimensional engineering and geological model of the soil mass was designed on the basis of data of engineering and geological surveys, conducted at the site of construction.

The engineering and geological model includes a part of the soil mass with the depth of 54 m from the foundation level (Fig. 1). The base, located below, is assumed as incompressible. The dimensions of the model in the plan view are 390×350 m.

The geometrical model of constructions wasn't developed, only a geometrical model of their foundations was designed. The account of rigidity and loads from constructions, erected on foundational slabs, was conducted on the basis of introduction into the computational model of eight superelements [13, 14], created by LLC “GK-Tekhnstroj” in ANSYS program [15, 16] for upper buildings of stadium constructions (Fig. 2).

The computational model provided for the following stages of analysis:

1. Modelling of natural stress-strain state of the base (due to the proper weight of soils). The soil, located in the area from the surface of the base to the foundation level, was modeled by uniformly distributed load of $Q = 0.147$ MPa.

2. The excavation of pit (through the removal of uniformly distributed load from the weight of overlying soils across the area of the pit).

3. Improvement of properties of the soil of DGE 2a under the foundations of buildings and the construction of a pile field (102 end-bearing piles) under the high-rise building.

4. Construction of a split slab foundation for all structures.

5. Erection of constructions of the stadium.

Given that before the construction the measures on the improvement of foundation properties were provided for under the building foundations in the area of distribution of soils of DGE 2a with low values of deformation parameters, within the computational model two options of measures were considered: replacement with soils of DGE 2 and cementation with the achievement of values of structural strain module of cemented soil amounting to 60 MPa.

Calculated analysis of the stress-strain state of the “soil base – constructions of the stadium” system was performed with the use of the “Soil” computational program [17], implementing the method of finite elements [18, 19]. The behavior of soils of the base when subjected to loading was described through the elastoplastic model of the soil [20, 21], the parameters of which were determined on the basis of results of triaxial tests.

RESULTS OF THE RESEARCH

As the results of analysis have demonstrated, the complex nature of interaction of all constructions of the stadium and the irregularity of distribution of the load leads to the differential settlement and the bending of their foundation slabs (Fig. 3).

Physical and mechanical properties of the base soils

AGE number	Brief description of the soil	Density g/cm^3	Elastic and strength characteristics		
			Specific cohesion, C_{oc12} , MPa	Coefficient of internal friction $\text{tg}\varphi_{oc1}$	Elastic modulus $E_{0.3-0.4}$, MPa
1	Sand medium-grained and coarse-grained	2,01	0,02	0,86	30
2	Sandy loam plastic	2,05	0,02	0,58	34
2a	Sandy loam viscous	1,99	0,02	0,39	8
3	Clay semi-hard	1,88	0,05	0,33	15
4	Clay semi-hard	1,90	0,05	0,27	26
5	Medium-strength limestone with streaks of dolomites	2,40	1	1,0	450
6	Clay hard and semi-hard with marl streaks	2,15	0,07	0,65	160
7	High-strength and medium-strength limestone	—	—	—	950

Figure 1. The central fragment of the calculation area of the soil base under the foundations: *a* — cross section 1-1; *b* — cross section 2-2

Figure 2. Finite element model constructions of the stadium

The option of the analysis with the replacement of soft soils showed that for slab foundations of office buildings, located in the north western and south eastern corners of the stadium, the analysis forecasts the maximum settlement of 5.5 and 6.1 cm correspondingly. The slab foundation of the north eastern office building has the settlement of 4.0 cm approximately. The maximum settlement of the combined piled-raft foundation of the high rise office building amounts to 2.5 cm.

Significant vertical movements of foundations of office buildings have a substantial impact on the character of deformation of slab foundations of less rigid constructions of the stadium stands. The maximum settlement of slab foundations of the stadium stands is about 3.5 cm and it is projected with a view to edges, adjacent to office buildings. Simultaneously, maximum settlements of foundations of all constructions do not exceed the permissible limit values.

Figure 3. Vertical displacements of foundation slabs U_z , m: a — replacement of soft soil; b — cementation of soft soil

As the results of additional analysis have demonstrated, while improving the properties of soft soils before the construction with the use of cementation, the increment of the value of structural strain module of soil of DGE 2a to 60 MPa worsens the character of deformation of foundation slabs of the southern and northern stands of the stadium. The presence of a “rigid insert” under the middle section of the southern stand increases the bending of the foundation slab and leads to its partial separation from the base. The partial separation of the foundation slab is also observed under the edge of the western stand, located above the cemented soil of DGE 2a.

CONCLUSION

The character of the distribution of vertical movements of all slab foundations of office buildings is influenced by the stadium stands, erected nearby, specifically, values of vertical movements of foundation sides adjacent to the stadium stands, are slightly higher than the values of opposite sides. Simultaneously, vertical movements of foundations of office buildings, in their turn, influence the character of deformation of slab foundations of less rigid constructions of stadium stands. The complex character of interaction of all constructions of the stadium and the irregularity of distribution of the load lead to the differential settlement and the bending of foundation slabs.

REFERENCE

1. Orekhov V.V., Alekseev G.V. Prognoz vliyaniya stroitel'stva podzemnogo kompleksa na okruzhayushchuyu zastroyku [Forecast of influencing the underground complex construction on a context area]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 8 (107), pp. 839–845. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.8.839-845
2. Il'ichev V.A., Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Opyt osvoeniya podzemnogo prostranstva rossiyskikh megapolisov [Experience of development of underground space of Russian megacities]. *Osnovaniya, fundamente i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engineering]. 2012, no. 2, pp. 17–20. (In Russian)
3. Zaretskiy Yu.K., Orekhov V.V. Matematicheskaya model' uchastka zastroyki MMDTs “MOSKVA-

SITI” [Mathematical model of the site of the “MOSCOW-CITY” MIBC]. *Osnovaniya, fundamente i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engineering]. 2001, no. 4, pp. 2–4. (In Russian)

4. Nikiforova N.S., Zekhniev F.F. Burtovaya O.V., Astaf'ev S.V. Vliyanie stroitel'stva unikal'nykh ob'ektov s podzemnoy chast'yu na primykayushchie istoricheskie zdaniya [Affect of unique objects' erection with an underground part on adjoining historical buildings]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2009, no. 2 (19), pp. 126–130. (In Russian)

5. Vlasov A.N., Volkov-Bogorodskiy D.B., Znamenskiy V.V., Mnushkin M.G. Chislennoe modelirovaniye stroitel'stva zdaniy s fundamentami glubokogo zalozeniya v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki [Numerical

simulation of construction of buildings with deep foundations in dense urban]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura* [PNRPU Construction and Architecture Bulletin]. 2014, no. 2, pp. 170–179. (In Russian)

6. Paramonov V.M., Steklyannikova N.I. Otsenka vzaimnogo vliyaniya zdaniy i sooruzheniy i podzemnykh kommunikatsiy v inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh Sankt-Peterburga [Evaluation of the mutual influence of buildings and structures and underground utilities in the engineering and geological conditions of St. Petersburg]. *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii po geotekhnike «Geotekhnicheskie problemy megapolisov»* [Proceedings of the International Geotechnical Conference “Geotechnical problems of megacities”]. Vol. 4. Moscow, 2010, pp. 1524–1532. (In Russian)

7. Moormann C., Moormann H.R. A study of wall and ground movements due to deep excavation in soft soil based on worldwide experiences. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Proceedings of the Third International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground IS-Toulouse 2002. Toulouse — France October 23–25, 2002*. Toulouse, 2002. Pp. 234–238.

8. Oral S.D., Setin K.O., Erol O. et al. Performance assessment of Izmirspor metro station. *Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. IOS Press, 2011. Pp. 1541–1546.

9. Bolisetti C., Whittaker A.S. Structure-soil-structure interaction. *23th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Manchester. United Kingdom*. Manchester, 2015. Paper ID 565.

10. Moh Z.S., Chin S.T. Recent developments in deep excavation in soft ground. *Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering and Earthquake Resistant Technic in Soft Area. China, 1993*. Pp. 110–114.

11. Portugal J.C., Portugal A., Santo A. Excavation induced building damage. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering «Geotechnology in Harmony with the Global Environment»*. Osaka, 2005. Pp. 1543–1546.

12. Schäfer R., Triantafyllidis T. The influence of the construction process on the deformation behavior of diaphragm walls in soft clayey ground. *International*

Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2006, no. 30 (7), pp. 563–576. <https://doi.org/10.1002/nag.480>

13. Zaretskiy Yu.K., Orekhov V.V., Kel'man M.I. Raschet vzaimodeystviya plitnogo fundamenta s gruntovym osnovaniem s uchedom zhestkosti verkhnego stroeniya [Calculation of the interaction of the slab foundation with the ground base, taking into account the rigidity of the upper structure]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2008, no. 2, pp. 15–17.

14. Orekhov V.V. Uchet konstruktivnykh zdaniya pri raschetakh osadki i koeffitsientov posteli osnovaniya [Consideration of building construction when calculating foundation settlements and coefficient of bed of base]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engineering]. 2007, no. 4, pp. 2–4. (In Russian)

15. Kent L.L. *ANSYS tutorial release 14*. SDC Publication, 2012. 176 p.

16. Basov K.A. *ANSYS v primerakh i zadachakh* [ANSYS in examples and tasks]. Moscow, Komp'yuter press, 2002. 224 p.

17. Orekhov V.V. Kompleks vychislitel'nykh programm «Zemlya-89» [Complex of computational programs “Earth-89”]. *Mezhvuzovskiy sbornik «Issledovaniya i razrabotki po komp'yuternomu proektirovaniyu fundamentov i osnovaniy»* [Interuniversity collection “Research and development on computer design of foundations and foundations”]. Novocherkassk, 1990. Pp. 14–20. (In Russian)

18. Zienkiewicz O.C., Cheung Y.K. *The finite element method in structural and continuous mechanics*. McGraw-Hill, 1967. 240 p.

19. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *The finite element method. Vol. 2: Soil mechanics*. Butterworth-Heinemann, 2000. 459 p.

20. Zaretskiy Yu.K., Lombardo V.N. *Statika i dinamika gruntovykh plotin* [Static and dynamics of ground dams]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 255 p. (In Russian)

21. Zaretskiy Yu.K. *Vyazkoplastichnost' gruntov i raschety sooruzheniy* [Visco-plasticity of soils and calculations of structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 349 p. (In Russian)

Received January 30, 2018.

Adopted in revised form on February 30, 2018.

Approved for publication May 28, 2018.

ABOUT THE AUTHORS: **Orekhov Vyacheslav Valentinovich** — Doctor of Technical Sciences, Chief Specialist, **Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIOSP)**, 59 Ryazanskiy prospekt, Moscow, 109428, Russian Federation, V.Orekhov@rambler.ru;

Alekseev German Valer'evich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Soil Mechanics and Geotechnics, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, alexeev_german@bk.ru.