

УДК 69.032.22, 69.035.4

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-54-65](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-54-65)

EDN PUGDAU

ГЕОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА УНИКАЛЬНОГО ЗДАНИЯ В АСПЕКТЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНОГО МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Ф.Ф. ЗЕХНИЕВ, канд. техн. наук

Д.А. ВНУКОВ

Д.Е. РАЗВODOВСКИЙ, канд. техн. наук

А.Н. НИКОЛАЕВ✉

Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Зачастую в геотехнической практике проектирования встречаются объекты, в которых прогноз поведения подземного сооружения, выполненный на основании расчетных или экспериментальных работ, затруднен. В таких случаях допускается применять наблюдательный метод, который предполагает возможность корректировать проект в процессе строительства на основании результатов геотехнического мониторинга. В рамках настоящей статьи описывается практический пример применения наблюдательного метода на объекте строительства уникального здания в центре Москвы.

Цель работы – в рамках наблюдательного метода проектирования на основе результатов геотехнического мониторинга оценить реальную работу конструкций подземной части и при необходимости разработать и применить корректирующие мероприятия.

Объект исследования – уникальное недостроенное здание с пятиэтажной подземной частью, в связи с длительной консервацией объекта имеющее неопределенность в механической работе фундамента на участке сопряжения с ограждающей конструкцией котлована. Поведение конструкций подземной части здания, в том числе взаимодействие ее с грунтовым основанием и стеной в грунте, контролировалось с помощью реализованной на объекте комплексной системы геотехнического мониторинга.

Результаты. Принятые проектные решения и применение корректирующих мероприятий в рамках наблюдательного метода проектирования позволили на рассматриваемом объекте снизить влияние сложившихся неблагоприятных геотехнических условий, в частности увеличить жесткость подземной части и минимизировать разницу в осадках между центральной и краевыми частями фундаментной плиты.

Выводы. Установлено, что в рамках наблюдательного метода проектирования средства геотехнического мониторинга позволяют оценивать поведение здания, имеющего неопределенности в механической работе конструкций.

Ключевые слова: геотехнический мониторинг, реконструкция, уникальное здание, наблюдательный метод, фундаментная плита, деформации основания

Для цитирования: Зехниев Ф.Ф., Внуков Д.А., Разводовский Д.Е., Николаев А.Н. Геотехническое обеспечение строительства уникального здания в аспекте наблюдательного метода проектирования. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022;34(3):54–65. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-54-65](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-54-65)

Вклад авторов

Каждый автор внес равноценный вклад в подготовку статьи.

Финансирование

Статья написана по результатам научно-технического сопровождения строительства, выполняемого в рамках действующего договора.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 25.04.2022

Поступила после рецензирования 23.05.2022

Принята к публикации 07.06.2022

GEOTECHNICAL SUPPORT FOR THE CONSTRUCTION OF A UNIQUE BUILDING THROUGH THE OBSERVATIONAL DESIGN METHOD

F.F. ZEKHNIEV, Cand. Sci. (Engineering)

D.A. VNUKOV

D.E. RAZVODOVSKY, Cand. Sci. (Engineering)

A.N. NIKOLAEV✉

*Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov,
JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation*

Abstract

Introduction. In geotechnical design practice, it is common to find objects whose underground structure behavior is difficult to predict based on calculation or experimental work. Such cases permit the use of the observational method allowing for design adjustments during construction according to the results of geotechnical monitoring. The paper describes a practical example of applying the observational method at the construction site of a unique building in the center of Moscow.

Aim: to evaluate the actual performance of underground structures and, if necessary, to develop and apply corrective measures within the observational design method using the results of geotechnical monitoring.

The *subject matter* of the study is a unique unfinished building with a five-story underground part exhibiting an uncertain mechanical performance of the foundation at the interface with the retaining wall of the foundation pit due to the long-term suspension of the construction site. The behavior of the underground structures, including their interaction with the bearing soil and the slurry wall, was controlled using a comprehensive system of geotechnical monitoring implemented at the site.

Results. The adopted design solutions and the use of corrective actions within the observational design method reduced the effect of existing adverse geotechnical conditions at the site in question, specifically increasing the stiffness of the underground part and minimizing the settlement difference between the central and edge parts of the foundation slab.

Conclusions. It is established that geotechnical monitoring provides a means to evaluate the behavior of the building exhibiting an uncertain mechanical performance of structures within the observational design method.

Keywords: geotechnical monitoring, reconstruction, unique building, observational method, foundation slab, soil-foundation deformation

For citation: Zekhniev F.F., Vnukov D.A., Razvodovsky D.E., Nikolaev A.N. Geotechnical support for the construction of a unique building through the observational design method. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022;34(3):54–65. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-54-65](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-54-65)

Author contribution statements

All authors have contributed equally to the work.

Funding

The paper was written drawing on the results achieved in the scientific and technical support of construction provided under the existing contract.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 25.04.2022

Revised 23.05.2022

Accepted 07.06.2022

Введение

С 2019 г. в Москве вблизи Кутузовского проспекта в районе Поклонной горы ведется строительство высотного здания по новому проекту с сохранением подземной части, возведенной в 1995–1999 гг.

Подземная часть здания представляет собой пятиэтажный объем размером в плане 72×63 м. Глубина подземной части от уровня земли составляет 18,5 м. Возведение подземной части выполнялось в открытом котловане с креплением ограждения котлована



Рис. 1. Высотный гостинично-деловой комплекс на Поклонной улице
(слева – перспектива, справа – настоящее время)

Fig. 1. High-rise hotel and business complex on Poklonnaya Street
(left – future, right – present time)

в виде «стены в грунте» тремя ярусами грунтовых анкеров. Фундаментом здания служит монолитная железобетонная плита толщиной 2,5 м. Подземная часть здания выполнена в монолитном железобетонном каркасе с сеткой колонн 9×9 м.

В геологическом строении площадки в пределах глубины сжимаемой толщи грунтового основания здания залегают среднечетвертичные аллювиально-флювиогляциальные отложения московского горизонта, подстилаемые коренными юрскими и верхнекаменноугольными отложениями (рис. 2). Уровень грунтовых вод на абсолютных отметках 114,2–116,3 м.



Рис. 2. Характерный разрез грунтового основания под подошвой фундаментной плиты
Fig. 2. Typical section of bearing soil under the foundation slab

Вследствие воздействия экзогенных факторов (промораживание – протаивание, замачивание и проч.) на поверхность грунтов основания в период строительства и консервации существующего сооружения на локальных участках от низа фундаментной плиты до глубины 1 м в процессе изысканий были встречены грунты с пониженными деформационными свойствами.

По новому проекту возводимое здание представляет собой 33-этажный корпус Н-образной формы, при этом первые три этажа имеют прямоугольную форму подземной части.

Начиная с 29-го этажа здание имеет переменное сечение на каждом последующем этаже. На 8-м надземном уровне здания запроектирован трансферный этаж для изменения шага колонн на вышележащих этажах. Здание выполняется в железобетонном каркасе.

Основные сложности, с которыми столкнулись проектировщики при проектировании нового здания, заключались в следующем [3]:

- фрагментарное нижнее армирование фундаментной плиты;
- неопределенность в механической работе фундамента на участке сопряжения с ограждающей конструкцией котлована;
- неоднородность в деформационных параметрах основания, наличие промороженных участков;
- наличие дефектов и протечек в конструкциях подземной части здания;
- полное отсутствие данных мониторинга;
- наличие многочисленных сведений о несоблюдении строительных норм в процессе строительства;
- наличие прогиба фундаментной плиты до 35 мм с учетом исполнительной съемки 1999 г. (после возведения подземной части).

В рамках научно-технического сопровождения проектирования рассматривались различные варианты усиления. При этом варианты усиления основания плитного фундамента микросваями или струйной технологией были признаны неэффективными, так как микросваи имеют малую величину несущей способности, и их устройство сопровождается перерезанием рабочей арматуры фундаментной плиты, а усиление грунтового основания по струйной технологии связано с неопределенностью получаемых механических характеристик и дополнительными воздействиями на существующие фундаментные конструкции [3].

В качестве основного принципа проектирования для рассматриваемого высотного здания было принято ужесточение конструкций при максимальном сокращении нагрузки,

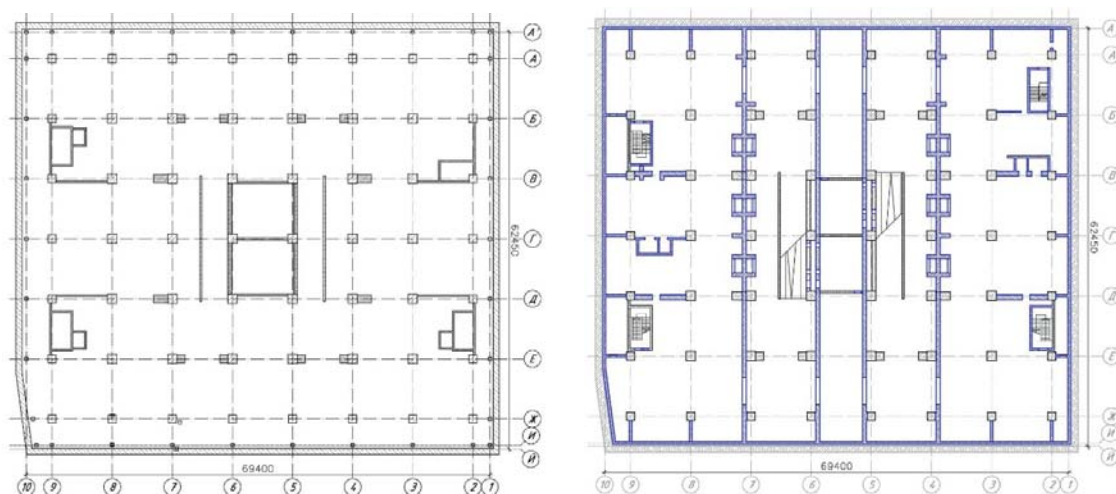


Рис. 3. Схема конструкций подземной части здания до (слева) и после (справа) усиления внутренними диафрагмами и стенами жесткости по периметру

Fig. 3. Schematic showing the underground part of the building prior to (left) and following (right) its reinforcement with internal diaphragms and shear walls along the perimeter

передаваемой на фундамент. В качестве основного варианта было принято устройство дополнительных диафрагм и стен жесткости в уровне четырех нижних этажей существующей подземной части.

Диафрагмы и стены жесткости изменяют пространственный характер работы подземной части здания и ограничивают деформации и усилия в фундаментной плите от возведения конструкций надземной части здания. Также к достоинствам рассматриваемого варианта относится сравнительно небольшая стоимость работ, которые проводятся без использования специального оборудования с возможностью визуального контроля качества.

Ввиду имеющихся неопределенностей в механическом поведении конструкций подземной части и грунтов основания в процессе строительства объекта нами предполагается применение наблюдательного метода проектирования, позволяющего при необходимости корректировать проект на основании результатов геотехнического мониторинга. Указанный метод регламентируется СП 248.1325800.2016 [1] и СП 305.1325800.2017 [2]. При этом в качестве кардинальной меры предполагается устройство нового фундамента с потерей нижнего подземного этажа [3].

Геотехнический мониторинг строящегося здания

В соответствии с разработанной специалистами НИИОСП программой геотехнического мониторинга на объекте реализована следующая система наблюдений за строящимся высотным зданием:

- инженерно-геодезические измерения вертикальных перемещений (осадок) фундаментной плиты;
- инженерно-геодезические измерения вертикальных деформаций «стены в грунте», ограждающей подземную часть здания;
- измерения послойных осадок грунтов основания фундамента в пределах глубины сжимаемой толщи с применением системы скважинных экстензометров;
- измерения напряжений под подошвой фундаментной плиты с применением струнных датчиков давления;
- инженерно-геодезические измерения кренов строящегося здания.

Подробное описание характеристик, методов обустройства и работы системы геотехнического мониторинга предполагается изложить авторами настоящей статьи в последующих публикациях.

Работы по геотехническому мониторингу были начаты в 2019 г., т. е. в момент возобновления строительства по новому проекту, и продолжаются по настоящее время. На сегодня на объекте завершено возведение основных несущих конструкций здания из монолитного железобетона, ведутся работы по монтажу фасадных систем, заливке стяжек полов, устройству перегородок и ограждающих стен из газобетонных блоков.

Максимальная измеренная величина дополнительной осадки строящегося здания на сегодня составляет 82 мм; максимальная относительная разность осадок – 0,0017. Среднее значение осадки по фундаментной плите составляет 60 мм.

Измеренные величины не превышают предельные дополнительные деформации основания фундаментов комплекса, связанные с дальнейшим строительством его надземной части, регламентируемые СТУ (средняя осадка – 20 см, относительная разность осадок – 0,003) и расчетные дополнительные значения (осадка – 14,3 см, относительная разность осадок – 0,002).

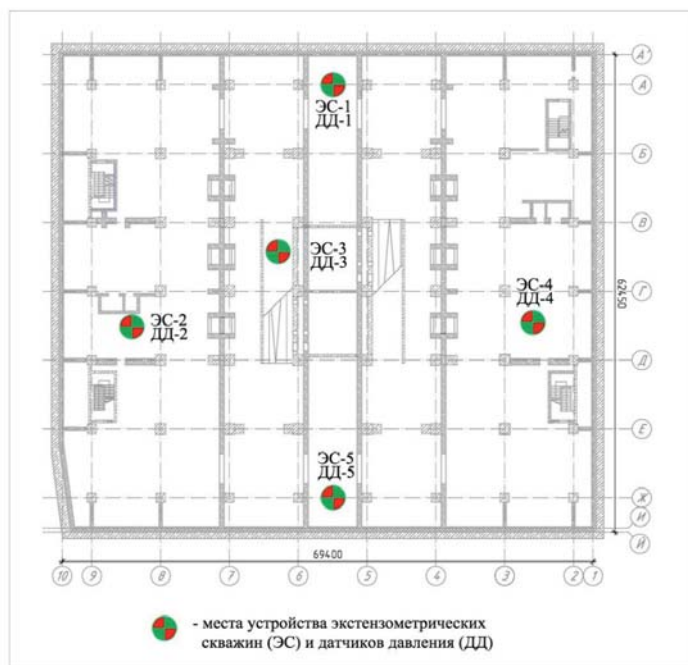


Рис. 4. Схема мест установки экстензометрических скважин и датчиков давления
Fig. 4. Schematic diagram showing the locations of extensometer wells and pressure sensors

Распределение замеренных деформаций основания по площади фундаментной плиты приведено на рис. 5, из которого видно, что центральная часть фундаментной плиты здания имеет осадку больше, чем по периметру: средняя осадка центральных колонн составляет 72 мм, а крайних колонн – 54 мм.

Осадка краевых частей фундаментной плиты происходит с некоторым отставанием от центральной части, что помимо разницы в нагрузках на внутренние и наружные элементы каркаса связано с наличием по периметру фундаментной плиты «стены в грунте», которая ограничивает боковые деформации сжимаемой толщи, а также может сдерживать деформации фундаментной плиты за счет возникающего трения на их контакте.

В рамках научно-технического сопровождения, как только была отмечена тенденция к развитию больших осадок центральной части фундаментной плиты относительно краевых зон, специалистами НИИОСП с целью минимизации разницы в осадках было рекомендовано строительно-монтажные работы по устройству каркаса надземной части здания выполнять с опережением возведения наружных частей относительно центральной части.

В настоящее время развитие осадок фундаментной плиты происходит равномерно по площади, так, разница в приросте осадок по наблюдаемым маркам за последние три месяца составила не более 2 мм.

Влияние «стены в грунте» на деформации фундамента здания подтверждается результатами геодезических наблюдений за ее осадками. Средняя осадка «стены в грунте» на сегодня составила 15 мм, при этом краевой части фундаментной плиты – 50 мм. Максимальная

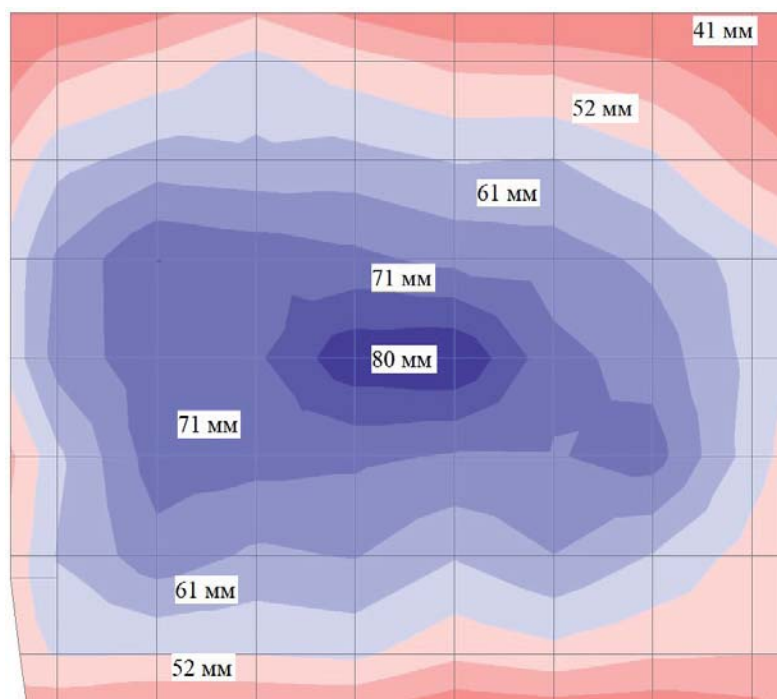


Рис. 5. Изополя вертикальных деформаций фундаментной плиты по состоянию на конец февраля 2022 г.
Fig. 5. Vertical strain isofields of the foundation slab as of late February 2022

осадка «стены в грунте» была зафиксирована по оси «А'» и составляет 20 мм, при этом средняя осадка краевой части фундаментной плиты по данной оси минимальна (в сравнении с остальными краевыми частями) и составляет 45 мм (рис. 6).

Указанные результаты измерений деформаций свидетельствуют о наибольшем влиянии «стены в грунте» на деформации подземной части на данном участке. Кроме того, следует отметить, что на данном участке было зафиксировано появление трещины в зоне сопряжения прижимной стены по оси «А'» с контурной балкой перекрытия 2-го этажа (рис. 6 и 7).

На сегодня общая ширина раскрытия трещины составила до 5 мм. Наиболее вероятной причиной образования трещины является «зацепление» контурной балки перекрытия 2-го этажа за обрез «стены в грунте», которая на данном участке в отличие от остального габарита здания устроена только до уровня 1-го этажа. Для установления точных причин образования трещины планируется произвести детальное обследование конструкций в зоне ее распространения с откопкой шурфов до верха «стены в грунте» и вскрытием для освидетельствования узла сопряжения балки перекрытия 2-го этажа со «стеной в грунте».

Развитие осадок основания фундамента здания во времени происходило неравномерно при относительно равномерно возрастающей нагрузке. В частности, в период возведения конструкций надземной части здания с 20-го по 30-й этаж по результатам геодезических наблюдений было зафиксировано заметное снижение скорости осадок (рис. 8), что также было отмечено по данным наблюдений за послойными осадками посредством экстензометрических систем (рис. 9). Данное явление снижения скорости осадок могло быть связано с частичным «зависанием» подземной части на включившейся в работу «стене в грунте».

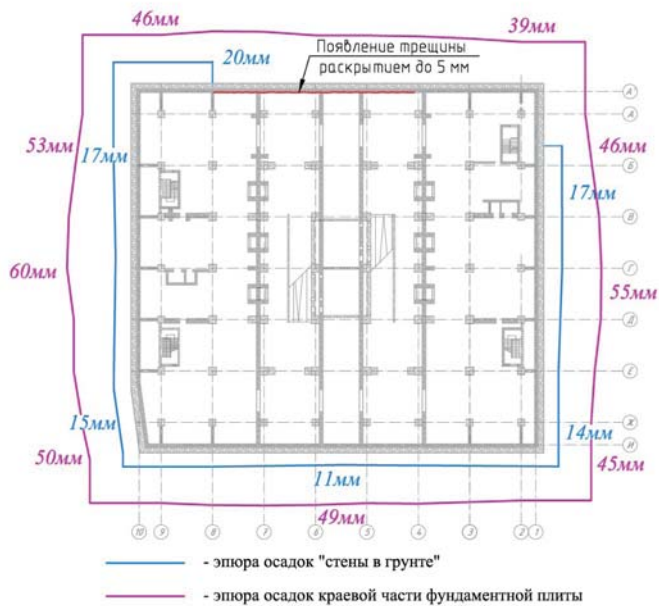


Рис. 6. Эпюры деформаций краевой части фундаментной плиты строящегося здания и примыкающей «стены в грунте»

Fig. 6. Strain diagrams for the foundation slab edge of the building under construction and the adjacent slurry wall

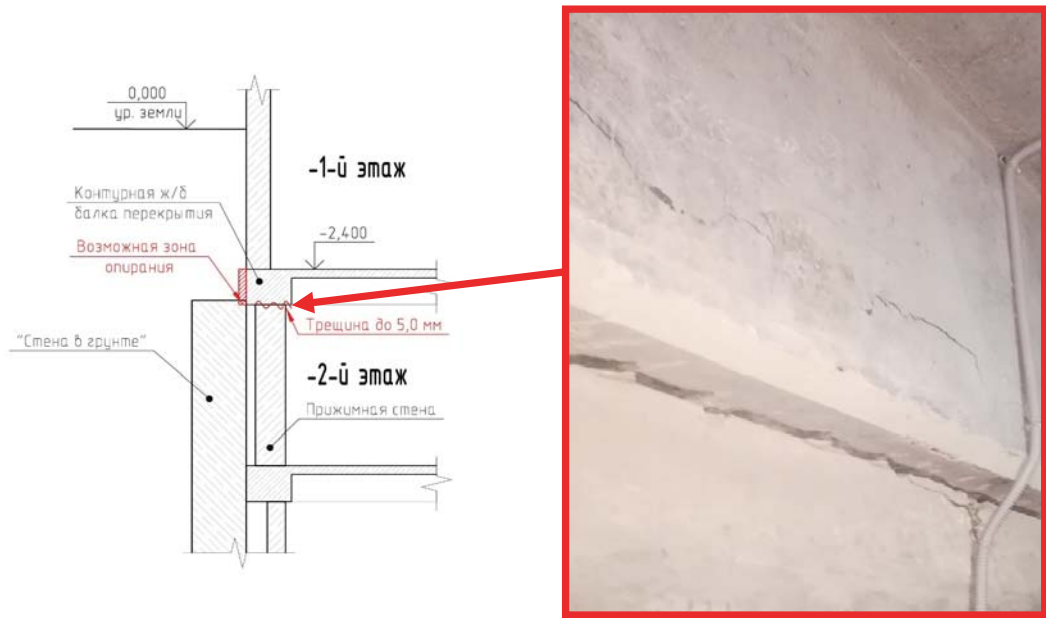


Рис. 7. Трещина, зафиксированная в зоне сопряжения прижимной стены по оси «А'» с контурной балкой перекрытия 2-го этажа

Fig. 7. Crack detected at the junction between the protecting wall along the A'-axis and the 2nd floor framing beam

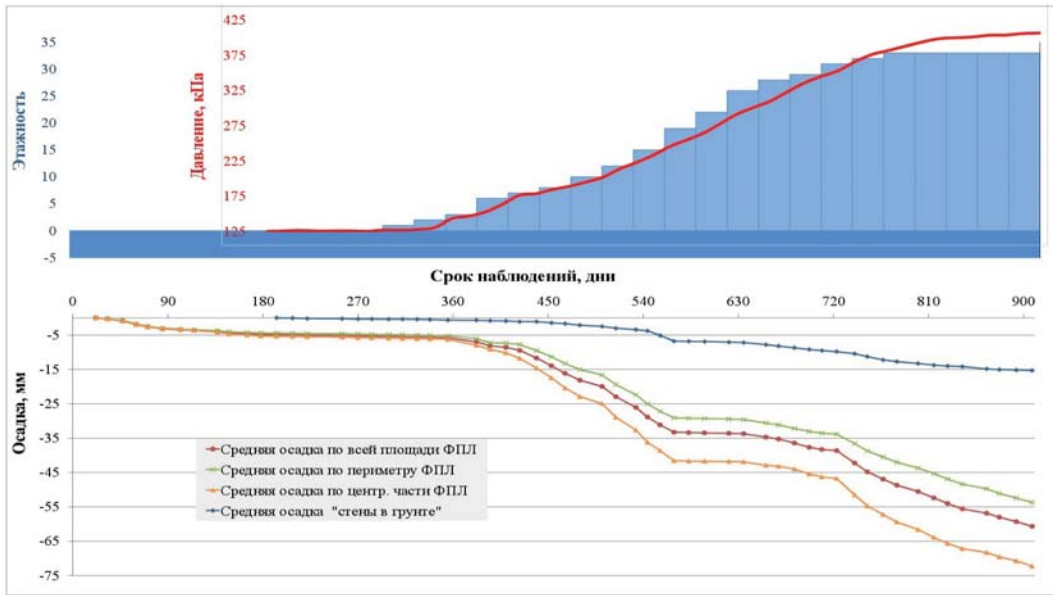


Рис. 8. График развития осадок фундамента и давления на основание строящегося здания во времени
Fig. 8. Diagram showing the development of foundation settlements and pressure on the foundation of the building under construction over time

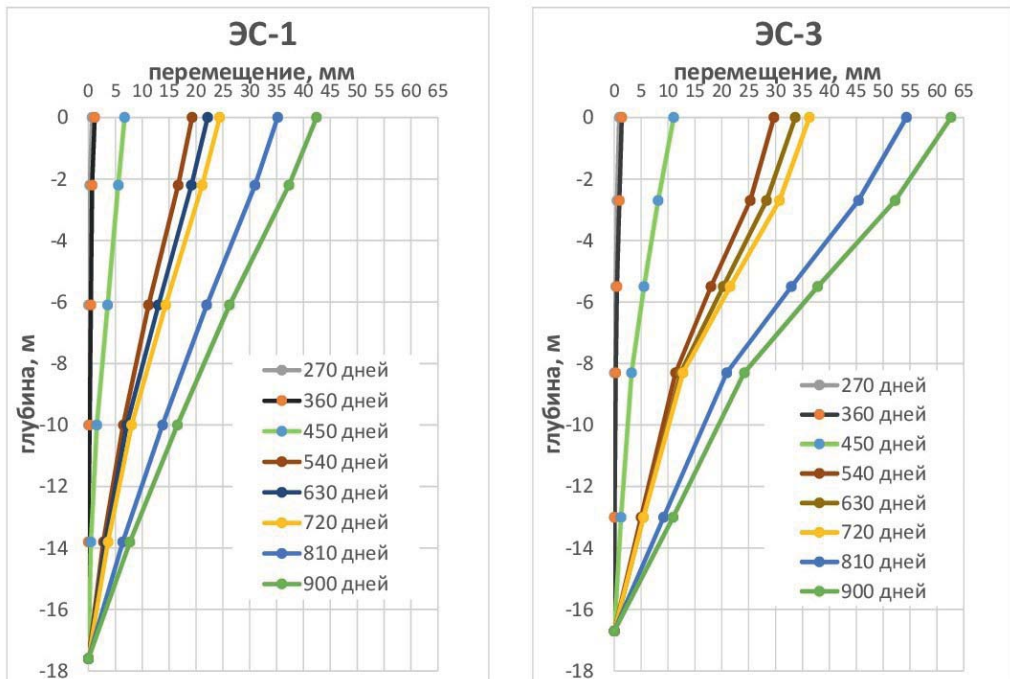


Рис. 9. Характер изменения перемещения грунта основания по глубине во времени в экстензометрических скважинах (слева – для краевой скважины, справа – для центральной)
Fig. 9. Pattern of changes in the bearing soil depthwise displacement detected in extensometer wells over time (left – edge well, right – central well)

При дальнейшем нагружении скорость роста осадок увеличилась. В настоящее время скорость осадок здания в среднем составляет 2,8 мм/мес, что меньше скорости осадок, зафиксированной в период активного возведения надземных конструкций и равной в среднем 4,2 мм/мес. При этом значительно уменьшился прирост нагрузок на основание 3 кПа/мес, который в период активного возведения надземных конструкций составлял 20 кПа/мес. Выявленный в настоящее время характер развития деформаций основания фундамента строящегося здания (относительно высокая скорость осадок при небольшом приросте нагрузок) свидетельствуют о том, что грунтовое основание перешло в работу по ветви «первичного» нагружения.

Оценка распределения послойных деформаций грунтового основания по глубине, измеренных с использованием экстензометрических систем, показывает, что в развитии деформаций принимает участие вся наблюдаемая толща, при этом наибольшей относительной сжимаемостью обладают слои ИГЭ-8 (суглинки тугопластичные) и ИГЭ-9 (суглинки и глины полутвердые и твердые), залегающие в верхней части сжимаемой толщи до глубины 7,5–8,7 м.

Выводы

В рамках наблюдательного метода проектирования средства геотехнического мониторинга позволяют оценивать поведение здания, имеющего неопределенности в механической работе конструкций.

Принятые проектные решения и применение корректирующих мероприятий в процессе строительства на рассматриваемом объекте позволило снизить влияние сложившихся неблагоприятных геотехнических условий, в частности:

- увеличение жесткости подземной части путем устройства поперечных диафрагм и контурных стен позволило компенсировать недостаточную жесткость фундамента, оставшегося от объекта незавершенного строительства;
- устройство каркаса надземной части здания с опережением возведения наружных частей относительно центральной позволило минимизировать разницу в осадках между центральной и краевыми частями фундаментной плиты.

В настоящее время измеренные деформации основания фундамента, в том числе по относительной разности осадок, находятся в пределах нормируемых значений.

Список литературы

1. СП 248.1325800.2016 Сооружения подземные. Правила проектирования. Москва: Минстрой России; 2016.
2. СП 305.1325800.2017 Здания и сооружения. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве. Москва: Стандартинформ; 2017.
3. Разводовский Д.Е., Скорилов А.В., Зехниев Ф.Ф., Внуков Д.А. Геотехнические аспекты строительства при неплановом изменении проектных решений надземных конструкций. Вестник НИЦ «Строительство». 2019;20(4):106–116.
4. Peck R.B. Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. Geotechnique. 1969;19(2):171–187. <https://doi.org/10.1680/geot.1969.19.2.171>
5. Разводовский Д.Е., Колыбин И.В., Анисимов И.Г., Фокин Н.Н. Обзор возможностей и перспективы применения наблюдательного метода. Промышленное и гражданское строительство. 2016;(10):55–63.

References

1. SP 248.1325800.2016 Underground structures. Design rules. Moscow: Minstroy Rossii; 2016 (in Russian).
2. SP 305.1325800.2017 Buildings and structures. Rules for conducting geotechnical monitoring during construction. Moscow: Standartinform; 2017 (in Russian).
3. *Razvodovsky D.E., Skorikov A.V., Zekhniev F.F., Vnukov D.A.* Geotechnical aspects of construction in case of unscheduled change of design decisions of aboveground structures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2019;20(4):106–116 (in Russian).
4. *Peck R.B.* Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Geotechnique*. 1969;19(2):171–187. <https://doi.org/10.1680/geot.1969.19.2.171>
5. *Razvodovsky D.E., Kolybin I.V., Anisimov I.G., Fokin N.N.* Overview of Possibilities and Prospects of the Use of Observational Method. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2016;10(1):55–63 (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Фаршед Фарходович Зехниев, канд. техн. наук, заведующий лабораторией оснований и фундаментов на слабых грунтах № 2 НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: farshedzehni@yandex.ru
тел.: +7 (499) 170-27-00

Farshed F. Zekhniev, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory for Bearing Soils and Foundations Underlain by Soft Soils No. 2 of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: farshedzehni@yandex.ru
tel.: +7 (499) 170-27-00

Дмитрий Алексеевич Внук, зам. заведующего лабораторией оснований и фундаментов на слабых грунтах № 2 НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: vda.05@mail.ru
тел.: +7 (499) 170-19-26

Dmitriy A. Vnukov, Deputy Head of the Laboratory for Bearing Soils and Foundations Underlain by Soft Soils No. 2 of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: vda.05@mail.ru
tel.: +7 (499) 170-19-26

Дмитрий Евгеньевич Разводовский, канд. техн. наук, заместитель директора по научной работе НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: 79165206707@yandex.ru
тел.: +7 (916) 520-67-07

Dmitry E. Razvodovsky, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Scientific Director of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: 79165206707@yandex.ru
tel.: +7 (916) 520-67-07

Алексей Николаевич Николаев✉, научный сотрудник лаборатории оснований и фундаментов на слабых грунтах № 2 НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: lab2@bk.ru
тел.: +7 (499) 170-19-23

Alexey N. Nikolaev✉, scientific researcher of the the Laboratory for Bearing Soils and Foundations Underlain by Soft Soils No. 2 of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: lab2@bk.ru
tel.: +7 (499) 170-19-23

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author