УДК 624.131

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-1-76-82

© Е. А. Беляева, магистрант

© E. A. Belyaeva, undergraduate

© И. П. Дьяконов, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

© I. P. Diakonov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: fmrooat.eee@gmail.ru, idjkanv@yandex.ru

E-mail: fmrooat.eee@gmail.ru, idjkanv@yandex.ru

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА НОВЫХ ЗДАНИЙ ВБЛИЗИ ОКРУЖАЮЩЕЙ ИСТОРИЧЕСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

PROBLEMS OF DESIGN AND CONSTRUCTION OF NEW BUILDINGS NEAR AN ADJACENT HISTORICAL DEVELOPMENT AREA

Дан обзор проблем, возникающих при возведении новых зданий вблизи окружающей исторической застройки. Продемонстрирована необходимость нового подхода к ограничению предельной осадки существующей застройки, регламентируемой строительными нормами. Определены новые направления развития геотехнического мониторинга.

Ключевые слова: дополнительные деформации, BIM-моделирование, геотехнический мониторинг, 3D-сканирование, Plaxis.

The article presents an overview of the problems encountered at the construction of new buildings near an adjacent historical development area. There is substantiated a need for a new approach to restricting the limiting value of additional settlement of historical development area which is regulated by building specifications. New directions for the development of geotechnical monitoring have been identified.

Keywords: additional deformations, BIM modeling, geotechnical monitoring, 3D-scanning, Plaxis computer program.

Введение

Целью данной работы является обзор вопроса расширения критериев допустимой дополнительной деформации зданий окружающей исторической застройки. Для достижения этой цели была поставлена задача по обоснованию необходимости разработки регламента совместных расчетов системы «здание–основание» в условиях слабых грунтов. Проанализированные литературные источники и представленные результаты расчетов говорят о том, что моделирование деформации здания совместно с основанием позволяют определять целый ряд параметров по деформациям и усилиям в здании. Типичным подходом при расчетах является раздельное рассмотрение наземной и подземной частей здания.

При этом элементы надземной части можно моделировать по различным принципам, и результаты полученных деформаций и усилий могут отличаться в несколько раз. Существующий порядок проектирования, а именно ограничение предельной осадки соседней застройки по таблицам норм, часто ставит крест на реализации проекта. Обобщение основных принципов BIM-проектирования, накопление данных мониторинга по результатам 3D-сканирования позволят разработать новый порядок расчетов и контроля строительства.

В настоящее время основными принципами проектирования зданий являются вариантность, комплексный подход и соблюдение требований актуальных нормативных документов. По опыту

проектирования можно заметить, что типичным порядком расчета зданий и сооружений является сбор нагрузок надземной части здания и расчет ее изолированно от основания. Далее выполняется отдельный расчет фундаментов основания с ограничением значений максимальной осадки проектируемого здания и зданий окружающей застройки, попадающей в зону влияния строительства. Данный подход имеет свои достоинства и недостатки, однако современные технические возможности могут существенным образом оптимизировать данный процесс и сделать результаты расчетов деформаций точнее. Имеется в виду, во-первых, выполнение совместного расчета системы «здание–основание» в рамках BIM-проектирования, а во-вторых, использование методов 3D-мониторинга для контроля, сопоставления и корректировки проектных решений на стадии строительства.

1. Расчеты системы «здание–основание»

Согласно СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» сооружение и его основание следует рассматривать в единстве, т. е. учитывать их взаимодействие в рамках общей деформированной схемы. Также в этой общей схеме должны быть заданы и здания окружающей застройки с сохранением принципа моделирования совместного расчета. В таком случае существует возможность поэтапного моделирования строительных работ и учета взаимовлияния факторов. Например, учет технологических воздействий при демонтаже, усилении и разработке подземных паркингов [1, 4–10, 13]. Рассчитывая конструкции отдельно, невозможно учесть эти изменения, которые могут произойти на различных стадиях строительства и эксплуатации зданий и сооружений. Такой критерий, как предельные осадки, не может учесть всего многообразия особенностей конструктивной схемы, сложного нагружения и технологических осадок [5]. Поэтому ограничения предельных допустимых значений дополнительной осадки по таблицам нормативных документов могут быть недостаточно корректны.

Предельное значение дополнительной осадки для зданий исторической застройки согласно СП 22.13330.2016 составляет 5,0 мм. Оно было установлено еще в XX веке на основании многолетних наблюдений за осадками существующих

зданий. Тем не менее, данные наблюдений исторической застройки Санкт-Петербурга говорят о системных превышениях нормативных величин допустимых осадок зданий, например у таких зданий, как д. 21–29 на Тележной ул., д. 5 на ул. Белинского, д. 39 на ул. Рылеева. Здания в центральной части Санкт-Петербурга получают прирост осадки до 3,0 мм каждый год, когда предельно допустимая суммарная величина осадки 5,0 мм.

Нужно обратить внимание, что также согласно п. 5.6.50 СП 22.13330.2016 предельные значения деформаций основания допускается принимать, «если конструкции не рассчитаны на усилия, возникающие в них при взаимодействии с основанием». По такому принципу может быть выполнено моделирование в программных комплексах Plaxis, Midas, Lira, FEM models, Ansys и их аналогах.

Рассмотрим пример влияния метода моделирования надземных конструкций на получаемые результаты. Для оценки влияния производимых работ по демонтажу окружающей застройки на сохраняемые здания было выполнено моделирование в программном комплексе Plaxis 3D (рис. 1–3).

Рис. 1. Общий вид расчетной схемы площадки строительства (сохраняемые здания выделены красным)

Рис. 2. Моделирование конструкций объемными элементами

Рис. 3. Моделирование конструкций пластинами и стержнями

По результатам расчета видно, что здания получают значительные неравномерные осадки, при этом значение предельных осадок превышено (рис. 4–6).

По полученным результатам можно сделать вывод о том, что моделирование здания поэлементно дает более точные результаты расчета, в отличие от моделирования единым объемом (см. рис. 4). Максимальная дополнительная осадка $S_{ad, max}$ здания из единого объема составила 14 мм, здания из грунтовых кластеров — 23 мм, а здания, заданного поэлементно, — всего 6 мм. Неравномерность осадок Δs_i в первом случае не превысила 0,7 мм, а в случае поэлементного расчета — 0,2 мм. Было выявлено, что схема, учитывающая конструктивные особенности здания (см. рис. 5, 6), перераспределяет напряжения между конструкциями, вследствие чего общая осадка выравнивается. Совместный расчет продемонстрировал, что превышение зданиями предельных значений дополнительных деформаций не приводит к достижению конструкциями аварийного состояния, а также указал наиболее вероятные места развития возможных трещин.

Это важно при моделировании исторических зданий, где необходимо точно определить максимально возможные предельно допустимые значения деформаций конкретного здания и места концентрации напряжений в конструкциях. Выделенные наиболее проблемные зоны требуют особого внимания как на этапах моделирования геотехнической задачи, так и в процессе производства строительных работ и мониторинга.

2. Мониторинг на основе 3D-сканирования

С точки зрения мониторинга, предельная дополнительная величина деформации для зданий на слабых грунтах, равная 5,0 мм, также требует уточнения по следующим причинам. Во-первых, для фиксации подобного критерия необходимо

выполнять геодезические наблюдения по II или даже I классу точности. Это трудно реализуемо в Санкт-Петербурге из-за отсутствия развитой геодезической нивелирной сети I и II класса.

Рис. 4. Вертикальные деформации (здание задано одним объемным элементом) $S_{ad, max} = 14$ мм

Рис. 5. Вертикальные деформации (стены и колонны заданы объемными элементами) $S_{ad, max} = 23$ мм

Рис. 6. Вертикальные деформации (стены и колонны заданы пластинами и стержнями) $S_{ad, max} = 6$ мм

Чаще всего в зоне производства работ расположены исходные пункты III класса. Во-вторых, как мы уже говорили ранее, существует большое количество исследований (например, [2, 11, 14]), которые говорят о том, что только ежегодный прирост осадок зданий достигает 3,0 мм в год.

Поэтому для проектирования и производства работ в условиях исторической застройки необходимо корректировать критерии допускаемых деформаций и усовершенствовать методику наблюдений за этими деформациями. Также для памятников архитектуры важны не только деформации конструкций, но и сохранение эстетической составляющей декора зданий [3]. А нормативный подход к мониторингу ограничивается лишь установкой марок для фиксации осадок, кренов и трещин. Шаг марок в плане по периметру здания достигает 10 м, а развитая сеть трещин на высоте просто остается без внимания в силу технической невозможности установки приборов на высоте. Поэтому можно говорить о том, что при существующем подходе к мониторингу зданий мы имеем много «слепых зон». Это главным образом обусловлено тем, что подход к наблюдению был разработан десятки лет назад согласно техническим возможностям того времени.

На сегодняшний день в распоряжении строительного контроля находится оборудование с совершенно другими способами фиксации данных. В данной статье хотелось бы остановить внимание на методе лазерного сканирования и ортофотоплана. Речь идет о съемке облака точек видимых частей здания с требуемой точностью и шагом точек. Главной особенностью этого метода съемки является анализ целого здания в твердотельной модели с учетом трещин и горизонтальных деформаций стен. На рис. 7 представлен пример выполнения съемки. Стоит отметить, что точность такой съемки сильно зависит от методики измерений, применяемых марок. Однако только путем съемки поля точек мы можем получить полную качественную картину. Повысить точность снимаемых показаний можно путем комплексного измерения деформаций как традиционным оборудованием (тахеометр, нивелир), так и 3D-сканированием (см. рис. 7). Повышение качества съемки поля точек лежит в совмещении с классической съемкой тахеометрами с общими наблюдаемыми пунктами.

По результатам анализа рис. 7 видно, что 3D-сканирование обеспечивает точность измерений II класса. Кроме того, сканирование позволяет выявить деформации стены (крен, деформация стены по высоте, образование трещин).

Применяя метод съемки поля точек совместно с тахеометром, можно добиться максимально полной и точной картины деформаций. На рис. 8 представлены результаты наблюдений за деформациями марок в течение нескольких проведенных циклов работ. Данный график отражает сложный характер деформаций зданий окружающей застройки в период строительства нового здания, включающий в себя как осадки, так и подъемы. При этом предельная величина подъема не регламентирована, но фактически подъем приводит к дополнительным усилиям в конструкциях, а значит, и исчерпанию несущей способности материала.

Зачастую несущие кирпичные стены исторических зданий за время эксплуатации и в условиях реконструкции могут непредсказуемо изменять свое напряженно-деформированное состояние и получать волнообразные деформации по вертикали или, оказавшись зажатыми между соседними зданиями, получать осадку только нижней части. Анализ напряженного состояния кирпичной кладки позволил бы определить зоны возможного образования трещин, что можно было бы подтвердить визуальным освидетельствованием [14]. В наиболее ответственных местах и местах концентрации напряжений в конструкциях предлагается устанавливать деформационные марки для нивелира или тахеометра первого класса точности, в менее ответственных частях — применять менее трудоемкое, но более информативное сканирование. Совместное использование данных приборов позволит добиться максимальной точности, приближенной к показаниям съемки II класса с погрешностью ± 2 мм.

Данные исследования могут быть продолжены в направлении развития BIM-технологий для регламентации новых предельных значений дополнительных осадок исторических зданий, учитывая совместную работу наземной и подземной частей здания, связывая максимальное значение

Рис. 7. Результаты мониторинга вертикальных деформаций за шесть дней, выполненные 3D-сканированием поля точек (значения деформаций представлены в метрах). Красная линия характеризует величину и направление деформаций. Синяя линия обозначает уровни расположения настенных геодезических марок

осадок с истощением конструкциями и узлами их максимальной несущей способности [2].

Представленный анализ демонстрирует необходимость корректировки величин предельно дополнительных осадок соседней застройки. Особенно это актуально для исторических городов на слабых грунтах. Для решения этой задачи нужно, во-первых, создать методику выполнения совместных расчетов системы «здание–основание» в логике BIM-проектирования, во-вторых, разработать методику мониторинга в режиме реального времени. Наиболее полное рассмотрение результатов расчетной BIM-модели позволит дополнить контролируемые параметры при мониторинге, например, усилия в сваях и конструкциях ограждений, напряжения и перемещения кирпичной кладки, зоны и интенсивность раскрытия трещин.

Выводы

На основании выполненного анализа опыта проектирования и реализации строительства вблизи существующих исторических зданий можно сделать следующие выводы:

1. Ограничение по деформациям в соответствии с таблицами нормативных документов, например, величиной в 5,0 мм при строительстве на слабых грунтах во многом технически не ре-

ализуемо. Исторические здания на фундаментах мелкого заложения даже без влияния соседнего строительства продолжают осадку со скоростью до 3,0 мм/год [14].

2. Существует положительный опыт расчетного обоснования дополнительных деформаций окружающей застройки [12, 14], превышающих предельные нормативные величины. Согласно выполненным расчетам, здания, получившие деформации более 50,0 мм, даже 100,0 мм, могут также эксплуатироваться без риска потери несущей способности [2]. Расчетное обоснование, согласно нормативам, позволяет назначать собственные допускаемые критерии. Однако сам порядок и методика моделирования не регламентированы нормами. В статье показано, как моделирование одного и того же конструктивного элемента разными способами приводит к различным расчетным деформациям.

3. Расширение критериев допускаемых осадок возможно лишь при увеличении объемов контролируемых параметров непрерывного (онлайн) мониторинга. В данных наблюдениях должны быть обозначены новые критерии остановки строительно-монтажных работ. Представляется необходимым контролировать не только деформации, но и усилия в конструкциях, так

Рис. 8. Деформации оснований окружающей застройки во времени

как именно усилия являются прямым критерием достижения предела прочности.

4. Риски разрушения конструкций, как и всего здания, при больших деформациях должны быть компенсированы конструктивными мероприятиями, такими как инъекционное нагнетание раствора в основание зданий, отверстия в плите подвала для устройства инъекционных свай.

5. Разработка регламента проектирования и мониторинга зданий на слабых грунтах с учетом больших деформаций позволит развивать подземное строительство городов без риска для существующих зданий и сооружений.

Библиографический список

1. Аппиа-Куби Дж. Взаимодействие грунта и сооружения: неопределенности в геотехническом проектировании // Геотехника. 2010. № 2. С. 68–72.
2. Бакрышева В. В., Сахаров И. И., Шишкин К. Г. Анализ работы крупнопанельного здания с платформенными стыками при неравномерных деформациях основания // Инженерно-геотехнические изыскания, проектирование и строительство оснований, фундаментов и подземных сооружений: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. по геотехнике. СПб.: СПбГАСУ, 2017. С. 22–27.
3. Исайкин А. С., Шаблинский Г. Э., Зубков Д. А. Совершенствование методик оценки состояния зданий и сооружений // Геотехника. 2010. № 1. С. 68–73.
4. Лакз С. У., Уэллс Р. С. Проектирование, испытания и автоматический мониторинг установки буровых инъекционных свай в элювиальных грунтах // Геотехника. 2010. № 1. С. 20–24.
5. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства. М.: АСВ, 2017. 161 с.
6. Никифорова Н. С., Зехниев Ф. Ф., Астафьев С. В., Буртовая О. В. Влияние строительства уникальных объектов с подземной частью на примыкающие исторические здания // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 2 (19). С. 126–129.
7. Нужина Д. А., Тарасевич Д. В. Развитие деформаций в кирпичных зданиях при снижении характеристик грунтового основания // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2017. № 1. С. 141–150.
8. Osokin A. I., Kalach F. N., Diakonov I. P., Remizova N. V. Value of additional vertical deformations of foundations depending on injection grouting conditions // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 775. 012144. doi:10.1088/1757-899X/775/1/012144.
9. Сапин Д. А. Дополнительные технологические осадки фундаментов зданий соседней застройки при устройстве траншейной «стены в грунте»: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2016. 177 с.
10. Тер-Мартirosян А. З. Осадки оснований сооружений при статическом, циклическом и вибрационных воздействиях // Геотехника. 2010. № 4. С. 77–81.
11. Улицкий В. М., Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. Геотехническое сопровождение реконструкции городов. СПб.: Стройиздат Северо-Запад, 2010. 551 с.
12. Улицкий В. М., Шашкин А. Г., Шашкин К. Г., Шашкин В. А. Основы совместных расчетов зданий

и оснований. СПб.: Изд-во института «Геореконструкция», 2014. 328 с.

13. Чу Туан Тхань. О взаимодействии ленточного фундамента, усиленного буроинъекционными сваями, с грунтовым массивом // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 2 (19). С. 154–156.

14. Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. Взаимодействие зданий и оснований: методы расчета и их применение при проектировании // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2003. № 7. С. 129–145.

References

1. Annu-Kubi Dzh. *Vzaimodeystvie grunta i sooruzheniya: neopredelennosti v geotekhnicheskoy proektirovani* [Interaction of soil and structures: uncertainties in geotechnical design]. *Geotekhnika – Geotechnical engineering*, 2010, no. 2, pp. 68–72.

2. Bakrysheva V. V., Sakharov I. I., Shishkin K. G. *Analiz raboty krupnopanel'nogo zdaniya s platformennymi stykami pri neravnomernykh deformatsiyakh osnovaniya* [Analysis of the operation of a large-panel building with platform joints under uneven deformations of the base]. *Trudy Vseros. nauch.-tekhn. konf. po geotekhnike «Inzhenerno-geotekhnicheskie izyskaniya, proektirovaniye i stroitel'stvo osnovaniy, fundamentov i podzemnykh sooruzheniy»* [Proceedings of the All-Russia sci. - techn. conf. on geotechnical engineering "Engineering and geotechnical surveys, design and construction of bases, foundations and underground structures"]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2017, pp. 22–27.

3. Isaykin A. S., Shablinskiy G. E., Zubkov D. A. *Sovershenstvovanie metodik otsenki sostoyaniya zdaniy i sooruzheniy* [Improvement of methods for assessing the condition of buildings and structures]. *Geotekhnika – Geotechnical engineering*, 2010, no. 1, pp. 68–73.

4. Lakz S. U., Uells R. S. *Proektirovaniye, ispytaniya i avtomaticheskoy monitoring ustanovki buroin'eksionnykh svay v elyuvial'nykh gruntakh* [Design, testing and automatic monitoring of the installation of drill-injection piles in residual soil]. *Geotekhnika – Geotechnical engineering*, 2010, no. 1, pp. 20–24.

5. Mangushev R. A., Nikiforova N. S. *Tekhnologicheskie osadki zdaniy i sooruzheniy v zone vliyaniya podzemnogo stroitel'stva* [Technological settlement of buildings and structures in the zone of influence of underground construction]. Moscow, ASV Publ., 2017, 161 p.

6. Nikiforova N. S., Zekhniev F. F., Astaf'ev S. V., Burtovaya O. 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. 126–129.

7. Nuzhina D. A., Tarasevich D. V. *Razvitie deformatsiy v kirpichnykh zdaniyakh pri snizhenii kharakteristik gruntovogo osnovaniya* [Development of deformations in brick buildings with a decrease in the characteristics of the soil base]. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika – Modern technologies in construction. Theory and practice*, 2017, no. 1, pp. 141–150.

8. Osokin A. I., Kalach F. N., Diakonov I. P., Remizova N. V. Value of additional vertical deformations of foundations depending on injection grouting conditions. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 775, 012144. doi:10.1088/1757-899X/775/1/012144.

9. Sapin D. A. *Dopolnitel'nye tekhnologicheskie osadki fundamentov zdaniy sosedney zastroyki pri ustroystve transheyroy «steny v grunte»*. Diss. kand. tekhn. nauk [Additional technological precipitation of the foundations of buildings of neighboring buildings in the construction of a "slurry-type wall". PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2016, 177 p.

10. Ter-Martirosyan A. Z. *Osadki osnovaniy sooruzheniy pri staticheskom, tsiklicheskom i vibratsionnykh vozdeystviyakh* [Settlement of the structures' foundations under static, cyclic and vibrational effect]. *Geotekhnika – Geotechnical engineering*, 2010, no. 4, pp. 77–81.

11. Ulitskiy V. M., Shashkin A. G., Shashkin K. G. *Geotekhnicheskoe soprovozhdenie rekonstruktsii gorodov* [Geotechnical support of urban reconstruction]. St. Petersburg, Stroyizdat Severo-Zapad Publ., 2010, 551 p.

12. Ulitskiy V. M., Shashkin A. G., Shashkin K. G., Shashkin V. A. *Osnovy sovmestnykh raschetov zdaniy i osnovaniy* [Fundamentals of joint calculations of buildings and foundations]. St. Petersburg, Georekonstruktsiya Publ., 2014, 328 p.

13. Chu Tuan Than. *O vzaimodeystvii lentochnogo fundamenta, usilennogo buroin'eksionnymi svayami, s gruntovym massivom* [About the interaction of the tape base reinforced with bored-injected piles with the ground massive]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2009, no. 2 (19), pp. 154–156.

14. Shashkin A. G., Shashkin K. G. *Vzaimodeystvie zdaniy i osnovaniy: metody rascheta i ikh primeneniye pri proektirovani* [Interaction of buildings and foundations: calculation methods and application in design]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo – Reconstruction of cities and geotechnical engineering*, 2003, no. 7, pp. 129–145.