УДК 693.22:624.04

© С. В. Ющубе, канд. техн. наук, доцент
© И. И. Подшивалов, канд. техн. наук, доцент
© А. А. Филиппович, канд. техн. наук
(Томский государственный архитектурно-
строительный университет)
E-mail: sv@tsuab.ru, ivanpodchivalov@list.ru,
annafilech@mail.ru
© А. Е. Тряпистин, ведущий инженер
(ООО «Газпром Трансгаз Томск»)
E-mail: A.Tryapitsin@gtt.gazprom.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-4-72-77

© S. V. Yushchube, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© I. I. Podshivalov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© A. A. Filippovich, PhD in Sci. Tech.
(Tomsk State University of Architecture and Building)
E-mail: sv@tsuab.ru, ivanpodchivalov@list.ru,
annafilech@mail.ru
© A. E. Triapitsin, Chief Engineer
(LLC «Gazprom Transgaz Tomsk»)
E-mail: A.Tryapitsin@gtt.gazprom.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КИРПИЧНОГО ЗДАНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ЭТАЖНОСТИ НА СВАЙНОМ ФУНДАМЕНТЕ

SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A HIGH-RISE BRICK BUILDING ON PILE FOUNDATION

Рассмотрено моделирование напряженно-деформированного состояния кирпичного здания повышенной этажности на свайном фундаменте с применением верифицированного программно-вычислительного комплекса MicroFe, который позволяет использовать расчетную модель в системе «основание–фундамент–здание». Расчет проводился как в линейной постановке, так и в конструктивно нелинейной постановке с применением односторонних нелинейных связей между стержневыми элементами свай и объемными элементами грунта. В нелинейной постановке решения задачи при ограничении допускаемой расчетной нагрузки на сваи происходит перераспределение усилий между сваями через ростверк.

Ключевые слова: моделирование, здание повышенной этажности, расчетная модель, линейный и нелинейный расчеты, перераспределение усилий между сваями.

The article is devoted to the numerical method simulation of the stress-strain state of a high-rise brick building on pile foundation. The calculations were performed by the finite element method applying MicroFe, a verified software computing complex, which allows using of the calculation model in the «base–foundation–building» system. The calculations were performed using two calculation schemes, namely, with linear task formulation and with constructively non-linear task formulation with the usage of unidirectional non-linear ties between node elements and soil volume elements. In the nonlinear task formulation, when limiting the allowable design load on the piles, there takes place a redistribution of forces between the piles through the grillage.

Keywords: computer simulation, high-rise building, calculation scheme, linear and non-linear task formulation, redistribution of forces between the piles.

Обоснованное использование запасов прочности надземных конструкций и фундаментов позволяет увеличить этажность зданий [1]. Стены кирпичных зданий повышенной этажности по конструктивной схеме относятся к жестким системам, в которых учет податливости свайного основания и его совместная работа с надземной частью позволяют сглаживать усилия в конструкциях [2–6]. Расчетная

модель, которая может наиболее полно отразить конструктивную схему здания, является одним из важнейших факторов при определении напряженно-деформированного состояния строительных конструкций и фундаментов [7–8]. MicroFe¹ — верифицированный программно-вычислительный комплекс (ПВК), позволяет

¹ MicroFe-СДК. Программный комплекс конечно-элементных расчетов пространственных конструкций на прочность, устойчивость и колебания. ООО «ТЕХСОФТ». 2015. URL: <http://www.tech-soft.ru>.

реализовать конечно-элементное моделирование системы «основание–фундамент–здание».

В соответствии с действующими нормативными документами предельное состояние по несущей способности свайных фундаментов наступает в случае, если усилие хотя бы в одной свае превысит расчетную нагрузку, допускаемую на сваю. При этом предельное состояние при расчете по деформациям еще, как правило, не достигнуто. В этом случае за счет пространственной работы фундаментов и надземных конструкций возможно перераспределение усилий между сваями без превышения расчетной нагрузки на них и более полное использование несущей способности всех свай в составе свайного фундамента, а также возможна оптимизация размеров и армирование ростверка [9–11].

Моделирование взаимодействия надземных конструкций и свайных фундаментов с грунтовым основанием, анализ распределения нагрузки между сваями в настоящее время являются достаточно актуальными. Оптимальное расположение свай в составе свайных фундаментов позволяет снизить затраты на возведение фундаментов при сохранении требуемой надежности здания [9, 11].

При моделировании взаимодействия надземных конструкций, свайных фундаментов и грунтового основания в качестве основного критерия рассматривается не несущая способность одиночной сваи, а деформации (осадки) здания в целом. По данным [12–14], в соответствии с результатами мониторинга высотных зданий и выполненного моделирования установлено, что угловые сваи нагружены в 2,4–4 раза больше по сравнению с центральными, а контурные — в 1,5–2 раза. Распределение усилий между сваями в свайном фундаменте рекомендуется определять на основании расчетов в объемной постановке в системе «основание–фундамент–здание».

Ниже приведен пример использования ПВК MicroFe при анализе проектных решений 16-этажного кирпичного здания, которое запроектировано из трех продольно расположенных на разных отметках блок-секций, разделенных между собой осадочными швами (рис. 1). Размеры в плане по габаритным осям каждой блок-секции составляют 25,32×16,35 м, высота этажа — 2,8 м, общая высота здания с учетом

подвала и технического этажа с лифтовой надстройкой — 56,34 м. Наружные и внутренние стены толщиной соответственно 770 и 510 мм запроектированы из керамического кирпича марки М125 на цементно-песчаном растворе марки М100. Несущими элементами перекрытий и покрытия являются сборные железобетонные многпустотные плиты толщиной 220 мм различной длины и ширины. Стены подвала запроектированы из сборных бетонных стеновых блоков толщиной 500 и 800 мм. Монолитный железобетонный ленточный ростверк толщиной 750 мм имеет ширину от 1,4 до 2 м. Сваи сечением 300×300 мм выполнены длиной 12 м в первых двух блок-секциях и длиной 16 м (составные) в третьей блок-секции. Переменная длина свай обеспечивает их опирание на слой полутвердого суглинка. Инженерно-геологический разрез площадки строительства с вертикальной привязкой свай и ростверка, а также основные физико-механические характеристики грунтов даны соответственно на рис. 1 и в таблице.

В качестве расчетной модели использовалась пространственная оболочечно-стержневая

Рис. 1. Инженерно-геологический разрез с вертикальной привязкой свай и ростверка

Основные нормативные и расчетные значения показателей свойств грунтов

№ ИГЭ слоя	Описание грунтов	Плотность грунта ρ , т/м ³	Число пластичности I_p	Расчетный угол внутреннего трения, град		Расчетное удельное сцепление, МПа		Модуль деформации E , МПа
				по деформациям, φ_I	по несущей способности, φ_{II}	по деформациям, C_{II}	по несущей способности, C_I	
306	Суглинок аллювиальный легкий текучей консистенции	1,95	10	20	17	21	14	11
406	Супесь гравелистая текучей консистенции	2,02	4	31	27	8	5	45
302	Суглинок элювиальный легкий пылеватый полутвердой консистенции	2,00	10	23	22	31	31	31

конечно-элементная модель. В расчетной модели кирпичные стены, диски железобетонных перекрытий и ростверк моделировались конечным элементом типа «плоский прямоугольный элемент оболочки», сваи — типа «стержень». Грунтовое основание под ростверком принималось в виде четырехслойного основания из объемных конечных элементов с послойным заданием модуля деформаций (см. таблицу) и коэффициента Пуассона $\nu = 0,33$. Сопряжение свай с ростверком принято жестким. По результатам статического зондирования расчетная нагрузка на сваи не должна превышать 600 кН. Кирпичная кладка стен рассматривалась как ортотропный материал, в железобетонных конструкциях материал принимался как изотропный. Сопряжение кирпичной кладки стен первого этажа с бетонными блоками подвала и последних — с монолитным ростверком, а также плит перекрытий со стенами — шарнирно-неподвижное. Между бетонными блоками подвала и ростверком учитывалась сдвиговая жесткость растворного шва.

Пульсационная составляющая ветровой нагрузки определялась в динамическом расчете при абсолютно жестком закреплении основания и затем передавалась в статический расчет в качестве дополнительного нагружения. Конструктивная и расчетная конечно-элементная модели блок-секции даны на рис. 2.

Расчет проводился в следующей последовательности:

1. На первом этапе в линейной постановке выполнялся расчет каждой блок-секции в своих

грунтовых условиях, определялись усилия в сваях, которые сравнивались с заданной расчетной нагрузкой, равной 600 кН. Из полученных результатов было установлено, что во всех трех расчетных моделях блок-секций максимальные усилия в сваях оказались разными, а в контурных сваях превысили расчетную нагрузку, причем во второй блок-секции это превышение было наибольшим и составило 251,69 кН (рис. 3). При превышении расчетного значения усилий в сваях скорость перемещения сваи увеличивается, она становится более податливой и практически не воспринимает нагрузку, превышающую расчетную величину в системе «сваи-ростверк». Таким образом, в многоэтажных зданиях, где наибольшие усилия в сваях превышают расчетную нагрузку, линейный статический расчет приводит к некорректному результату.

2. На втором этапе в расчетную схему вводилось ограничение по величине предельной нагрузки на сваи, равной расчетному значению 600 кН. В этом случае расчет проводился с учетом конструктивной нелинейности с односторонними связями с изменяющейся жесткостью между стержневыми элементами свай и объемными элементами грунта. Односторонние связи по контакту свай с грунтом допускают вертикальные перемещения свай только вниз. При превышении ограничения величины предельной нагрузки на сваи меняется жесткость этих односторонних связей, после чего расчет проводится для новой схемы. По протоколу статического анализа было выполнено пять нелинейных ите-

Рис. 2. Конструктивная (а) и расчетная (б) конечно-элементные модели

раций при точности 0,001. Данный подход позволяет получить более равномерные и правдоподобные усилия в сваях (рис. 4), а также приближенные к реальным вертикальные перемещения свай (рис. 5). При оптимизации свайного поля, увеличивая расстояние между «синими» и «голубыми» сваями, которые нагружены соответственно на $\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{3}$ от расчетной нагрузки, можно получить свайное поле из «красных» и «оранжевых» свай, в которых усилия будут равны или близки по значению заданной расчетной нагрузке.

Следует отметить, что при нелинейном расчете, вводя ограничение по предельной нагрузке на сваи и учитывая перераспределение усилий между сваями, превышения предельного состояния по первой группе в свайном фундаменте не происходит. По сравнению с линейным расче-

Рис. 3. Расчетные усилия в сваях во второй блок-секции при линейном расчете

Рис. 4. Расчетные усилия в сваях во второй блок-секции при конструктивной нелинейности связей между объемными элементами грунта и стержневыми элементами свай

Рис. 5. Вертикальные перемещения свай во второй блок-секции

том в нелинейном расчете увеличиваются вертикальные перемещения свай, которые не должны превышать нормативных значений по предельному состоянию второй группы.

Максимальные вертикальные деформации основания второй блок-секции составили 112,3 мм, что не превышает предельно допустимого значения 180 мм. Относительная разница деформаций была равна 0,00078, что меньше предельно допустимого значения 0,0024.

В качестве примера на рис. 6 приведены результаты по определению расчетного верхнего продольного армирования в продольных лентах ростверка в расчетной модели второй блок-секции при учете конструктивной нелинейности связей между стержневыми элементами свай и объемными элементами грунта. Анализируя результаты расчета ростверка, можно отметить, что необходимое армирование находится в «синей» и «голубой» зонах с наибольшим значением

Рис. 6. Расчетное верхнее продольное армирование в продольных лентах

расчетного армирования в пределах $7,75 \text{ см}^2/\text{м}$ (например, $5\phi 14 \text{ A400}/\text{м}$).

Выводы

1. Использование расчетной модели системы «основание–фундамент–здание» в ПК MicroFe позволяет достаточно адекватно отобразить конструктивную схему кирпичного здания повышенной этажности в реальных инженерно-геологических условиях.

2. Линейный расчет проводится в случае, когда наибольшие усилия в сваях не превышают заданную расчетную нагрузку. Если это условие не выполняется, то в расчетной модели вводится ограничение по величине предельной нагрузки на сваи, равной расчетному значению, и расчет выполняется с учетом конструктивной нелинейности с односторонними связями между стержневыми элементами свай и объемными элементами грунта.

3. Решение задачи в нелинейной постановке позволяет учесть перераспределение усилий между сваями через ростверк, в результате чего можно получить оптимальное конструктивное решение как свайного фундамента, так и надземной части здания.

Библиографический список

1. Ющубе С. В., Подшивалов И. И., Шалгинов Р. В., Самарин Д. Г., Филиппович А. А., Устюжанин В. Л., Тряпицын А. Е. Моделирование напряженно-деформированного состояния кирпичного здания на свайном фундаменте при его надстройке // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 2. С. 137–149.

2. Шашкин В. А. Эффекты взаимодействия оснований и сооружений // Развитие городов и геотехническое строительство. 2012. № 14. С. 141–167.

3. Шулятьев О. А. Геотехнические особенности проектирования высотных зданий в Москве // Про-

мышленное и гражданское строительство. 2016. № 10. С. 17–25.

4. Шашкин К. Г. Использование упрощенных моделей основания для решения задач совместного расчета основания и конструкций сооружений // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 1999. № 1. URL: <http://www.georec.narod.ru/mag/1999n1/9.htm>.

5. Улицкий В. М., Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. Геотехническое сопровождение развития городов (практическое пособие по проектированию зданий и подземных сооружений в условиях плотной застройки). СПб.: Стройиздат Северо-Запад, 2010. 550 с.

6. Шашкин А. Г. Взаимодействие здания и основания: методика расчета и практическое применение при проектировании / под ред. проф. В. М. Улицкого. СПб.: Стройиздат, 2002. 48 с.

7. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В. А. Ильичева и Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2014. 728 с.

8. Карпенко Н. И., Карпенко С. Н., Кузнецов Е. Н. О современных проблемах расчета высотных зданий из монолитного железобетона // II Всерос. (Международ.) конф. «Бетон и железобетон — пути развития». Научн. тр. конф. в пяти книгах. Т. 1. Пленарные доклады. М., 2005. С. 149–166.

9. Королев К. В., Полянкин А. Г., Кузнецов А. А. Несущая способность свай на горизонтальную и моментную нагрузку и оптимальное проектирование свайных фундаментов // Транспортное строительство. 2013. № 3. С. 13–15.

10. Малышкин А. П., Есипов А. В., Бараняк А. И. Современный подход к проектированию высотных зданий в условиях плотной городской застройки // Вестник Моск. гос. строит. ун-та. 2008. № 2. С. 158–162.

11. Малышкин А. П., Есипов А. В. Численные исследования взаимного влияния свай в группах // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. № 2 (33). С. 86–89.

12. Шулятьев О. А. Фундаменты высотных зданий // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2014. № 4. С. 202–244.

13. Шулятьев О. А., Исаев О. Н., Наятов Д. В., Шарафутдинов Р. Ф. Прогноз развития деформаций основания многофункционального жилого комплекса // Геотехника. 2017. № 2. С. 4–15.

14. Шулятьев О. А. Основания и фундаменты высотных зданий. М., 2016. 392 с.

References

1. Yushchube S. V., et al. *Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kirpichnogo zdaniya na*

svaynom fundamente pri ego nadstroyke [Modeling the stress-strain state of a brick building on pile foundation at its vertical extension]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Construction*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 137–149.

2. Shashkin V. A. *Effekty vzaimodeystviya osnovaniy i sooruzheniy* [Effects of foundation – structure interaction]. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo – Development of cities and geotechnical engineering*, 2012, no. 14, pp. 141–167.

3. Shulyat'ev O. A. *Geotekhnicheskie osobennosti proektirovaniya vysotnykh zdaniy v Moskve* [Geotechnical features of high-rise building design in Moscow]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil engineering*, 2016, no. 10, pp. 17–25.

4. Shashkin K. G. *Ispol'zovanie uproshchennykh modeley osnovaniya dlya resheniya zadach sovmestnogo rascheta osnovaniya i konstruksiy sooruzheniy* [Using simplified models of bases for solving problems of joint calculation of the base and structure design]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo – Reconstruction of cities and geotechnical construction*, 1999, no. 1. Available at: <http://www.georec.narod.ru/mag/1999n1/9.htm>

5. Ulitskiy V. M., Shashkin A. G., Shashkin K. G. *Geotekhnicheskoe soprovozhdenie razvitiya gorodov (prakticheskoe posobie po proektirovaniyu zdaniy i podzemnykh sooruzheniy v usloviyakh plotnoy zastroyki)* [Geotechnical support of the urban development (practical guide to the design of buildings and underground structures in densely built up areas)]. St. Petersburg, Stroyizdat Severo-Zapad Publ., 2010, 550 p.

6. Shashkin A. G. *Vzaimodeystvie zdaniya i osnovaniya: metodika rascheta i prakticheskoe primenenie pri proektirovanii* [Structure – foundation interaction: methods of calculation and practical application at design]. Ed. by Ulitskiy V. M. St. Petersburg, Stroyizdat Publ., 2002, 48 p.

7. *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya* [Reference book for geotechnical engineers. Bases, foundations and underground structures]. Ed. by Il'ichev V. A., Mangushev R. A. Moscow, ASV Publ., 2014, 728 p.

8. Karpenko N. I., Karpenko S. N., Kuznetsov E. N. *O sovremennykh problemakh rascheta vysotnyy zdaniy iz monolitnogo zhelezobetona* [On modern problems of calculation of high-rise monolithic reinforced concrete buildings]. *Trudy II Vseros. (Mezhdunar.) konf. «Beton i zhelezobeton — puti razvitiya»* [Proc. of the II All-Russia (Int.) conf. “Concrete and reinforced concrete — ways of development”]. Vol. 1. *Plenarnye doklady* [Plenary reports]. Moscow, 2005, pp. 149–166.

9. Korolev K. V., Polyankin A. G., Kuznetsov A. A. *Nesushchaya sposobnost' svay na gorizontalnuyu i momentnuyu nagruzku i optimal'noe proektirovanie svaynykh fundamentov* [Bearing capacity of piles for horizontal and moment load and optimal design of pile foundations]. *Transportnoe stroitel'stvo – Transport construction*, 2013, no. 3, pp. 13–15.

10. Malyshev A. P., Esipov A. V., Baranyak A. I. *Sovremennyy podkhod k proektirovaniyu vysotnykh zdaniy v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki* [Modern approach to the design of high-rise buildings in densely built up urban areas]. *Vestnik Mosk. gos. stroit. un-ta – Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering*, 2008, no. 2, pp. 158–162.

11. Malyshev A. P., Esipov A. V. *Chislennyye issledovaniya vzaimnogo vliyaniya svay v gruppakh* [Numerical study of interaction of piles laid out in groups]. *Akademicheskii vestnik UralNIIproekt RAASN – Academic Bulletin of the Ural NII project RAASN*, 2017, no. 2 (33), pp. 86–89.

12. Shulyat'ev O. A. *Fundamenty vysotnykh zdaniy* [Foundations of high-rise buildings]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura – PNRPU Bulletin. Construction and Architecture*, 2014, no. 4, pp. 202–244.

13. Shulyat'ev O. A., Isaev O. N., Nayatov D. V., Sharafutdinov R. F. *Prognoz razvitiya deformatsiy osnovaniya mnogofunktsional'nogo zhilogo kompleksa* [Forecast of development of deformations of the multifunctional residential complex base]. *Geotekhnika – Geotechnical Engineering*, 2017, no. 2, pp. 4–15.

14. Shulyat'ev O. A. *Osnovaniya i fundamenty vysotnykh zdaniy* [Bases and foundations of high-rise buildings]. Moscow, 2016, 392 p.