DOI: 10.15593/2224-9826/2015.2.04

УДК 624.131.54: 624.012.03

Ю.Л. Винников¹, А.В. Суходуб², О.В. Кичаева³¹Полтавский национальный технический университет
им. Юрия Кондратюка, Полтава, Украина²ООО «ЭКФА», Полтава, Украина³Харьковский национальный университет городского хозяйства
им. А.Н. Бекетова, Харьков, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «РЕКОНСТРУИРУЕМОЕ ЗДАНИЕ – ФУНДАМЕНТЫ – ОСНОВАНИЕ»

Решение проблемы корректного моделирования поведения эксплуатируемых зданий и сооружений, подвергающихся реконструкции, является достаточно востребованным в настоящее время. Для реконструируемых объектов существует много особенностей, которые следует учитывать в единой расчетной схеме, поэтому создание и совершенствование существующих методик для формирования адекватных расчетных моделей «реконструируемое здание – фундаменты – основание (грунтовой массив)» является актуальной задачей. Наиболее подходящим для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) такой системы является метод конечных элементов.

Целью данного исследования является разработка подходов к формированию адекватных расчетных моделей системы «реконструируемое здание – фундаменты – основание».

Показан опыт надстройки одноэтажного здания магазина с подвалом в г. Полтаве. На данном примере проанализирован характер деформаций основания фундаментов здания и их величин, возникающих на разных стадиях реализации проекта надстройки (пять этапов), а также сопоставлены значения расчетных деформаций, полученных посредством моделирования объекта методом конечных элементов, и результаты нивелирования осадочных марок на натурном объекте. Для оценки НДС системы «реконструируемое здание – фундаменты – основание» в процессе демонтажа существующих строительных конструкций и всех этапов реконструкции был выполнен силовой расчет здания. Расчетная схема здания выбрана в виде пространственной двухуровневой коробки с надподвальным перекрытием и покрытием, которая опирается на ленточные и отдельно стоящие фундаменты, заложенные на разной глубине. В качестве основания использована модель с двумя коэффициентами постели. При сопоставлении результатов мониторинга и моделирования НДС системы «реконструируемое здание – фундаменты – основание» установлена удовлетворительная сходимость результатов. Также в процессе расчета были определены возможные риски при надстройке здания и предложены рекомендации по их устранению.

Ключевые слова: реконструируемое здание, мониторинг, напряженно-деформированное состояние, основание фундаментов, усиление, расчетная модель.

Iu.L. Vinnikov¹, O.V. Sukhodub², O.V. Kichaeva³

¹Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine

²OJS Company "EKFA", Poltava, Ukraine

³O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,
Kharkiv, Ukraine

MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE SYSTEM "RECONSTRUCTED BUILDINGS – FOUNDATIONS – BASIS"

Solving the problem of correctly modeling the behavior of the exploited buildings undergoing renovation is quite popular at the moment. For refurbishment projects, there are many features that should be considered in a unified design scheme, so the establishment and improvement of existing methods for the formation of adequate computational models "reconstructed building – foundation – base (ground array)" is an urgent task. Most suitable for the evaluation of the stress-strain state (SSS) of such a system is the finite element method.

The purpose of this study is to develop approaches to the formation of adequate computational models of the "reconstructed building – foundation – base".

The experience of the add-story building with a basement shop in Poltava. In this example, analyze the nature of the deformation of the foundation base of the building and their values occurring at different stages of the project superstructure (5 stages), and compared the values calculated deformations obtained by modeling the object by finite element method, and the results of leveling sedimentary marks on the natural object. To assess the SSS system "reconstructed building – foundation – base" in the process of dismantling the existing building structures and all stages of reconstruction was performed power calculations of the building. Design scheme of the building is chosen as spatial two-tier boxes with overlapping and cover, which relies on the tape and detached foundation laid at different depths. The base model is used with two coefficients bed. When comparing the results of monitoring and modeling SSS "reconstructed building – foundation – base" set a satisfactory convergence of the results. Also in the process of calculating the identified possible risks of the superstructure of the building, and offers recommendations to address them.

Keywords: reconstructed building, monitoring, stress-strain state, the base of foundations, gain calculation model.

На сегодняшний день пока недостаточно решена проблема корректного моделирования поведения эксплуатируемых зданий и сооружений, подвергающихся реконструкции (пристройка, надстройка и связанное с этим усиление конструкций). Для реконструируемых объектов существует еще много особенностей, которые следует учитывать в единой расчетной схеме: существование поврежденных конструктивных элементов здания до реконструкции (трещины, уменьшение сечения элементов), деформации основания, имеющиеся на момент реконструкции, изменение условий эксплуатации здания, изменение инженерно-геологических условий и т.п. Поэтому создание методик для формирования адекватных расчетных моделей «реконструируемое зда-

ние – фундаменты – основание (грунтовой массив)» является актуальной задачей. Отметим, что универсальным для таких целей является метод конечных элементов (МКЭ), с помощью которого возможна достаточно корректная оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «реконструируемое здание – фундаменты – основание (грунтовой массив)».

Методики расчетов эксплуатируемых зданий и сооружений, находящихся в сложных инженерно-геологических условиях и на разных стадиях жизненного цикла, все время совершенствуются. Вопросами моделирования работы строительных конструкций и формирования корректных расчетных моделей занимались такие исследователи, как В.А. Банах [1], Л.Г. Батрак, А.С. Городецкий, Е.В. Горохов, А.А. Дыховичный, И.Д. Евзеров, Н.Л. Зоценко [2], С.Ф. Клованич, В. Комков, Е.З. Криксунов, В.В. Кулябко, А.В. Перельмутер [3], В.И. Сливкер, Е.Б. Стрелец-Стрелецкий, R.L. Taylor, O.C. Zienkiewicz и др.

Для обоснования увеличения нагрузок на основание при реконструкции зданий и сооружений без усиления фундаментов или упрочнения их основания целесообразно учитывать: изменение параметров конструктивной схемы здания; первичную нормативную базу проектирования²; закономерности упрочнения природного и насыпного грунтов соответственно от длительного обжатия под подошвой фундамента и в результате их самоуплотнения [4–7].

В связи с вышеизложенным целью исследования является разработка подходов к формированию адекватных расчетных моделей системы «реконструируемое здание – фундаменты – основание». Для ее достижения были поставлены следующие задачи:

- моделирование и анализ НДС системы «основание – фундаменты – надземные несущие конструкции» на всех этапах реконструкции;
- оценка адекватности принятой расчетной модели посредством геодезического мониторинга реконструируемого здания.

Результатом такого исследования являются рекомендации по оптимальному усилению конструкций реконструируемого здания.

Рассмотрим опыт надстройки одноэтажного здания магазина с подвалом в г. Полтаве (рис. 1).

² ДБН В.1.2-12-2008. Будівництво в умовах ущільненої забудови. Вимоги безпеки. К., 2008. 36 с.; ДБН В.1.2-5:2007. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів. К., 2008. 16 с.

Рис. 1. Стадии реализации процесса реконструкции одноэтажного здания, соответствующие циклам нивелирования при наблюдениях за деформациями его основания: *а* – 0-й цикл; *б* – 1-й; *в* – 2-й; *г* – 3-й; *д* – 4-й; *е* – 6-й

На данном примере анализировался характер деформаций оснований фундаментов здания и их величин, возникающих на разных стадиях реализации проекта надстройки, а также сопоставлялись значения расчетных деформаций, полученных посредством моделирования объекта МКЭ, и результаты нивелирования осадочных марок на натурном объекте.

Конструктивная схема объекта – смешанная. Несущими элементами является сетка железобетонных колонн с шагом 6×6 м, а также продольные и поперечные кирпичные стены. Фундаменты – мелкого заложения на природном основании, ленточные – под стены и отдель-

но стоящие – под колонны. Основание до глубины 8,7 м сложено лесовидными суглинком и супесью, которые находятся в «деградированном» состоянии. Эти грунты относятся к слабым (их модуль деформации $E < 5$ МПа). Уровень грунтовых вод находится на расстоянии 2,5–3 м от подошвы фундаментов здания.

При обследовании несущих конструкций дефекты и повреждения, которые могут влиять на несущую способность, зафиксированы только в стене по оси Б в местах ее уширения для опирания ригелей. Это трещины с шириной раскрытия до 3 мм. Также при освидетельствовании фундамента установлено, что уровень пола по оси Б выше уровня подошвы фундамента всего на 5–8 см, что негативно сказывается на несущей способности основания фундамента. Основание фундамента по оси 2 замачивается вследствие утечек из водонесущих коммуникаций.

Авторы организовали геодезическое сопровождение за осадками основания фундаментов здания. Нивелирование выполняется по семи осадочным маркам, которые установлены в подвале здания на стенах (М-1, М-2, М-5) и фундаментах колонн (М-3, М-4, М-6, М-7) (рис. 2).

Для оценки НДС системы «реконструируемое здание – фундаменты – основание» в процессе демонтажа существующих строительных конструкций и всех этапов реконструкции был выполнен силовой расчет здания. Расчетная схема здания выбрана в виде пространственной двухуровневой коробки (подвал + 1-й этаж) с надподвальным перекрытием и покрытием, работающей на растяжение-сжатие и изгиб в двух плоскостях, сопровождающиеся сдвигом и кручением. Коробка опирается на ленточные и отдельно стоящие фундаменты, заложенные на разной глубине.

В качестве основания использована модель с двумя коэффициентами постели (Власова – Пастернака) [3]. Для колонн, ригелей и перемычек проемов расчетная схема принята в виде пространственного стержня с соответствующим поперечным сечением.

Для выполнения расчетов в программном комплексе расчетная схема промоделирована конечными элементами (КЭ). Общий вид модели расчетной схемы и разбивка на КЭ показаны на рис. 3–7. Для модели приняты следующие КЭ:

- для стен, перекрытий, ленточных фундаментов и плитной части отдельно стоящих столбчатых фундаментов – оболочечный элемент с шестью степенями свободы в каждом узле;
- для колонн, перемычек, ригелей – стержневые элементы с шестью степенями свободы в каждом узле.

Рис. 2. Схема размещения деформационных марок на колоннах и стенах в подвале здания
(указаны только осадки после второго цикла нивелирования)

Рис. 3. Расчетная схема МКЭ здания магазина до реконструкции

а

б

Рис. 4. Расчетная схема МКЭ здания в процессе демонтажа конструкций:
а – 1-й; б – 2-й цикл нивелирования

Рис. 5. Расчетная схема МКЭ здания на момент 3-го цикла нивелирования

Рис. 6. Расчетная схема МКЭ здания на момент 4-го цикла нивелирования

Жесткостные параметры КЭ заданы в соответствии с данными натурных обследований. Для КЭ, имитирующих кирпичную кладку, определен модуль деформации в соответствии с нормами Украины для каменных и армокаменных конструкций.

Для железобетонных колонн, ригелей, перемычек, блоков ФБС подвала, плит перекрытия, покрытия, парапета модули деформации заданы в соответствии с нормами Украины по проектированию бетонных и железобетонных конструкций. Коэффициенты постели основания приняты для суглинка лессовидного с характеристиками: $\gamma_{II} = 17,90 \text{ кН/м}^3$, $\varphi_{II} = 20^\circ$, $E = 3 \text{ МПа}$, $c_{II} = 24 \text{ кПа}$.

Рис. 7. Расчетная схема МКЭ здания на момент 7-го цикла нивелирования

Нагрузки на расчетную схему принимались следующими:

- постоянные – собственный вес всех конструкций и грунта;
- временные – снеговая нагрузка для 5-го снегового района;
- ветровая нагрузка для 3-го снегового района Украины;
- полезная нагрузка на перекрытие.

Статический расчет произведен с помощью лицензионного программного комплекса SCAD для Windows (версия 11.5). При расчете были выполнены комбинации нагрузок в соответствии с нормативным документом Украины «Нагрузки и воздействия» и определены расчетные сочетания усилий для элементов. Расчет выполнялся в пять этапов:

- 1-й – здание магазина до реконструкции (см. рис. 3);
- 2-й – в здании отсутствуют конструкция кровли, парапет, откопан котлован по оси 6 и Д/4-6 (рис. 4, а);
- 3-й – демонтированы парапетные плиты, отрыт котлован в осях 1–6 и по ряду Д, на покрытии отсыпан песок для строительных нужд (рис. 4, б);
- 4-й – устроены новые фундаменты по трем сторонам здания, по ним уложены плиты перекрытия на отм. 0,000, смонтированы наружные металлические колонны (см. рис. 5);
- 5-й – смонтированы колонны 2-го этажа, балки покрытия, связи, уложен профнастил, выполнено усиление конструкций, облицовка фасадов (см. рис. 7).

Результаты расчетов представлены в таблице значениями осадок основания в процессе демонтажа и пристройки здания магазина. Эти показатели сопоставлены с данными геодезических наблюдений за указанный период. Согласно наблюдениям наибольшие деформации разуплотнения основания произошли под подошвой фундаментов стен (рис. 8, 9).

Сопоставление рассчитанных значений вертикальных деформаций здания с данными геодезических наблюдений

Значение Номер марки	Деформации – 2-й цикл, мм		Деформации – 3-й цикл, мм		Деформации – 4-й цикл, мм		Деформации – 5-й цикл, мм		Деформации – 7-й цикл, мм	
	геодезическая съемка	расчет 2-1	геодезическая съемка	расчет 3-1	геодезическая съемка	расчет 4-1	геодезическая съемка	расчет 5-1	геодезическая съемка	расчет 7-1
М-1	+3	+3,21	+2	+2,71	0	+0,08	-1	-1,99	-2	-5,35
М-2	+2	+2,67	0	+1,18	0	+0,37	-2	-3,35	-2	-3,58
М-3	0	+2,54	0	+1,9	0	+1,44	0	+0,2	-1	+0,63
М-4	-1	-0,14	-1	-2,11	-1	-1,95	0	-2,42	-1	-6,96
М-5	+1	+1,13	+1	+1,66	0	-2,98	0	-3,77	-1	-9,9
М-6	-1	-0,54	0	-2,26	0	-1,36	0	-1,83	-1	-4,59
М-7	+1	+0,7	+1	+1,0	0	-0,15	0	+0,39	0	-0,52

Рис. 8. График давлений под подошвой фундамента (марка М-1)

В результате предварительных расчетов (4-й этап) установлено, что значение неравномерной деформации следует ожидать до $\Delta S/L = 0,0018$, что достаточно близко к предельному значению, составляющему 0,002 (рис. 10). Однако в результате окончательных расчетов (5-й этап)

Рис. 9. График вертикальных деформаций марки М-1 по результатам геодезической съемки и расчета

Рис. 10. Ожидаемые осадки здания магазина после реконструкции:
а – ленточных фундаментов; б – отдельно стоящих фундаментов

установлено, что деформации несколько выровнялись ввиду перераспределения нагрузки и соотношение $\Delta S/L$ составляет 0,00154, что является вполне приемлемым значением.

При таком поэтапном моделировании четко видны изменения НДС системы, что позволяет дать детальные рекомендации по оптимальному усилению конструкций реконструируемого здания и, если это необходимо, скорректировать принятые проектные решения в процессе проведения строительно-монтажных работ.

Таким образом, нами усовершенствованы подходы к созданию методики формирования расчетной модели «реконструируемое здание – фундаменты – основание (грунтовый массив)». Выполнено численное моделирование процесса реконструкции здания магазина и произведено сопоставление с данными геодезических наблюдений за деформациями оснований и фундаментов исследуемого здания. При сопоставлении результатов натурных наблюдений и моделирования НДС «основание – фундамент – сооружение» установлена удовлетворительная сходимость результатов. Определенные расхождения в абсолютных значениях деформаций оснований связаны с их медленным развитием в замоченных глинистых грунтах.

Библиографический список

1. Банах В.А. Развитие статико-динамических расчетных моделей зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Днепропетровск, 2013. – 40 с.
2. Зоценко Н.Л., Винников Ю.Л. Современная практика моделирования взаимодействия фундаментов с уплотненными основаниями при их возведении и последующей работе // Численные методы расчетов в практической геотехнике: сб. ст. науч.-техн. конф. / СПбГАСУ. – СПб., 2012. – С. 164–171.
3. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: СКАД СОФТ, 2011. – 736 с.
4. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Геотехническое сопровождение развития городов / Группа компаний «Геореконструкция». – СПб.: Стройиздат Северо-Запад, 2010. – 551 с.
5. Vynnykov Y., Zotsenko N., Yakovlev A. The Use of Reserves of Bearing Capacity of Base and Foundations During Reconstruction of Buildings // Reconstruction of Historical Cities and Geotechnical Engineering: Proc. of Intern. Geotechnical Conf. Dedicated to Tercentenary of Saint-

Petersburg. – Saint-Petersburg; Moscow: ASV Publishers, 2003. – Vol. 1. – P. 367–370.

6. Кичаева О.В. Моделирование зданий, эксплуатируемых в сложных инженерно-геологических условиях, при статических и динамических воздействиях // Ресурсоэкономні матеріали, конструкції, будівлі і споруди: зб. наук. праць. – Рівне, 2014. – Вип. 28. – С. 376–386.

7. Коновалов П.А., Коновалов В.П. Основания и фундаменты реконструируемых зданий: моногр. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 384 с.

References

1. Banakh V. A. Razvitie statiko-dinamicheskikh raschetnykh modelei zdaniy i sooruzheniy v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviakh [The development of static-dynamic analysis models of buildings and constructions in complex engineering-geological conditions]. Abstract of the Thesis of the Ph.D. of Technical Sciences, Dnepropetrovsk, 2013. 40 p.

2. Zotsenko N.L., Vinnikov Iu.L. Sovremennaya praktika modelirovaniya vzaimodeystviya fundamentov s uplotnennymi osnovaniyami pri ikh vozvedenii i posleduiushchei rabote [The modern practice of modeling the interaction of foundations with compacted bases during their construction and following work]. *Sbornik statei nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Chislennyye metody raschetov v prakticheskoi geotekhnike"*. Saint-Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2012, pp. 164-171.

3. Perel'muter A.V., Slivker V.I. Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost' ikh analiza [Calculation models of construction and the possibility of their analysis]. Moscow: SKAD SOFT, 2011. 736 p.

4. Ulitskii V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G. Geotekhnicheskoe soprovozhdenie razvitiya gorodov [Geotechnical support for the development of cities]. Saint-Petersburg: Stroizdat Severo-Zapad, 2010. 551 p.

5. Vynnykov Y., Zotsenko N., Yakovlev A. The Use of Reserves of Bearing Capacity of Base and Foundations During. *Proc. of Intern. Geotechnical Conf. Dedicated to Tercentenary of Saint-Petersburg "Reconstruction of Buildings Reconstruction of Historical Cities and Geotechnical Engineering"*. Saint-Petersburg; Moscow: ASV Publishers, 2003, vol. 1, pp. 367-370.

6. Kichaeva O.V. Modelirovaniye zdaniy, ekspluatiruemykh v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh, pri staticheskikh i dinamicheskikh vozdeystviyakh [Modeling of buildings operated in complex engineering-geological conditions under static and dynamic loads]. *Zb. nauk. prac' "Resursoekonomni materialy, konstrukcii, budivli i sporudi"*. Rivne, 2014, vol. 28, pp. 376-386.

7. Konovalov P.A., Konovalov V.P. Osnovaniia i fundamenti rekonstruiemykh zdanii [Bases and foundations of reconstructed buildings]. Moscow: Assotsiatsiia stroitel'nykh vuzov, 2011. 384 p.

Получено 02.04.2015

Об авторах

Винников Юрий Леонидович (Полтава, Украина) – доктор технических наук, профессор кафедры добычи нефти и газа и геотехники Полтавского национального технического университета им. Юрия Кондратюка, действительный член Академии строительства Украины (36011, г. Полтава, Первомайский пр., 24, e-mail: vynnykov@yandex.ru).

Суходуб Александр Викторович (Полтава, Украина) – инженер ООО «ЭКФА», соискатель кафедры добычи нефти и газа и геотехники Полтавского национального технического университета им. Юрия Кондратюка (36011, г. Полтава, Первомайский пр., 24, e-mail: alex-sukhodub@rambler.ru).

Кичаева Оксана Владимировна (Харьков, Украина) – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой механики грунтов, фундаментов и инженерной геологии Харьковского национального университета городского хозяйства им. А.Н. Бекетова (61002, г. Харьков, ул. Маршала Бажанова, 17, e-mail: o_kichaeva@mail.ru).

About the authors

Iurii L. Vinnikov (Poltava, Ukraine) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Oil and Gas and Geotechnics, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, member of the Ukrainian Academy of Building (24, Pervomaisky av., Poltava, 36011, Ukraine, e-mail: vynnykov@yandex.ru).

Alexandr V. Sukhodub (Poltava, Ukraine) – Engineer; OJS Company “EKFA”; Applicant, Department of Oil, Gas and Geotechnology, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University (24, Pervomaisky av., Poltava, 36011, Ukraine, e-mail: alex-sukhodub@rambler.ru).

Oksana V. Kichaeva (Kharkov, Ukraine) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Soil Mechanics, Foundations and Engineering Geology, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (17, Marshal Bazhanov st., Kharkiv, 61002, Ukraine, e-mail: o_kichaeva@mail.ru).