УДК 624.1,51-17

**А.Н. Власов¹, Д.Б. Волков-Богородский²,
В.В. Знаменский³, М.Г. Мнушкин¹**

¹Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Москва, Россия

²Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

³Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗДАНИЙ С ФУНДАМЕНТАМИ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЛОТНОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Представлены приемы геотехнического моделирования сложной задачи геомеханики, возникающей при строительстве объектов с фундаментами, устраиваемыми в глубоких котлованах в условиях плотной городской застройки. В качестве примера приведен геотехнический расчет влияния на окружающую застройку и коммуникации строительства общественно-жилого комплекса с подземной трехуровневой автостоянкой. Расчёт осложнялся близостью административных зданий III (неудовлетворительной) категории технического состояния конструкций, наличием высокого уровня грунтовых вод, значительного перепада высот на строительной площадке и глубоким котлованом. По результатам численных расчётов осуществлена корректировка технологии устройства котлована и проекта его ограждения с целью усиления «стены в грунте» со стороны высокой части рельефа.

Ключевые слова: геотехническое моделирование, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, нелинейные модели грунтового массива.

**A.N. Vlasov¹, D.B. Volkov-Bogorodsky²,
V.V. Znamenskij³, M.G. Mnushkin¹**

¹Sergeev Institute of Environmental Geosciences Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

²Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

³National Research University Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russian Federation

NUMERICAL SIMULATION OF CONSTRUCTION OF BUILDINGS WITH DEEP FOUNDATIONS IN DENSE URBAN

The paper presents methods of geotechnical modeling of complex problem of geomechanics in construction of objects in dense urban. As an example geotechnical modeling of impact on the surrounding buildings and engineering communications construction of buildings complex with an underground three-tier parking was taken. Based on numerical modeling has been adjusted project of shoring of excavation.

Keywords: geotechnical modeling, finite element method, stress-strain state, non-linear soil models.

Строительство в условиях плотной городской застройки оказывает влияние на окружающие здания, сооружения и инженерные коммуникации. Это влияние существенно зависит от взаимного расположения объектов окружающей застройки и объекта строительства, гидрогеологической обстановки, а также от начального напряжённого состояния и в силу нелинейного деформационного отклика грунта при воздействии на него от последовательности производства работ. Для оценки этого влияния проводятся численные расчёты совместной работы строящегося сооружения и грунтового массива с окружающими зданиями и инженерными коммуникациями, результаты которых позволяют провести верификацию проектных решений и устранить в них неточности, если таковые имеются.

До начала проведения расчётов необходимо:

1. Проанализировать материалы инженерно-геологических изысканий на территории строительства.
2. Изучить конструктивные разработки проектируемого сооружения, технические решения и технологические схемы устройства ограждающих подземную часть конструкций и разработки котлована.
3. Учесть материалы обследования строительных конструкций зданий, расположенных вблизи предполагаемого строительства.
4. Разработать геомеханическую модель и построить адекватную конечно-элементную модель сетки разбивки расчётной области грунтового массива, включающую территорию нового строительства и расположенные вблизи строения и коммуникации и в соответствии с технологией строительства задать траекторию нагружения.

Всё это необходимо отразить в расчётной модели и конечно-элементной сетке, после чего можно приступать к численным расчётам напряжённо-деформированного состояния (НДС) грунтового массива по оценке влияния строительства на сооружения окружающей застройки на период строительства и после его завершения и передачи на основание эксплуатационных нагрузок.

Рассмотрим типичную для г. Москвы ситуацию, когда участок проектируемого строительства расположен в сложившейся плотной городской застройке. Окружающая застройка района строительства представлена пятью зданиями и оградой Донского монастыря, которая является историческим памятником. Территория строительства размером 72×87 м, имеет сложную в плане форму и представляет собой

спланированную, плотно застроенную площадку с многочисленными подземными коммуникациями.

Общий вид расчётной области и расположение существующих зданий в перспективе и плане показаны на рис. 1 и 2.

Рис. 1. Общий вид расчётной области с прилегающими зданиями

Рис. 2. Общий вид расчётной области в плане (позиции см. в табл. 2)

Инженерно-геологическая обстановка территории строительства сложная. Для примера на рис. 3 представлен один из ее геологических разрезов района строительства, содержащих 15 инженерно-геологических элементов (ИГЭ), нормативные и расчётные значения прочностных и деформационных характеристик которых представлены в табл. 1.

Рис. 3. Инженерно-геологический разрез

Таблица 1

Физико-механические характеристики грунтов

Номер ИГЭ	Плотность, г/см ³	Модуль деформации, МПа	Угол внутреннего трения, град	Сцепление, кПа	Коэффициент фильтрации, м/сут
ИГЭ 1	1,65	13	21	28	–
ИГЭ 2	1,8	22	30	2	2,4
ИГЭ 2б	1,96	34	32	4	1,6
ИГЭ 3	1,86	24	31	1	4,5
ИГЭ 3б	1,97	36	34	2	2,8
ИГЭ 4	1,97	26	31	1	6,3
ИГЭ 5	2,17	19	19	27	–
ИГЭ 6	2	17	19	23	–
ИГЭ 7	2,04	23	18	43	–
ИГЭ 8	1,99	22	30	4	0,9
ИГЭ 8б	2,08	32	32	6	0,5
ИГЭ 9	2,02	30	33	2	3,9
ИГЭ 10	2	30	34	1	7
ИГЭ 11	1,9	19	17	59	–
ИГЭ 12	1,74	21	17	65	–

Гидрогеологические условия участка строительства характеризуются распространением одного единого надъяюрского водоносного комплекса подземных вод, приуроченного к современным техногенным, верхнечетвертичным аллювиальным пескам и пескам нерасчлененного окско-днепровского водно-ледникового комплекса. Подземные воды комплекса вскрыты всеми скважинами. Воды имеют напорно-безнапорный характер, напор составляет 0,0–3,2 м. Нижним водоупором служат верхнеюрские глины. Значения коэффициентов фильтрации ИГЭ водоносного комплекса имеют следующие значения: ИГЭ-2 – 2,41 м/сут.; ИГЭ-3б – 2,80 м/сут.; ИГЭ-4 – 6,27 м/сут.; ИГЭ-8 – 0,85-0,91 м/сут.; ИГЭ-8б – 0,57 м/сут.

На участке проектируемого строительства возводится разноуровневый общественно-жилой комплекс высотой от 2 до 21 этажа с трехуровневой подземной автостоянкой, заглубленной на 13,3 м от поверхности. Основные несущие конструкции – монолитные стены, колонны, перекрытия; ограждающие конструкции – двухслойная стена. Тип фундамента – монолитная железобетонная плита.

Первоначально в проекте ограждающая конструкция толщиной 600 мм, выполняемая способом «стена в грунте», была подкрепленного

типа с двухъярусным креплением металлическими укосами и трёхъярусной системой горизонтальных распорок. Численные расчёты показали, что при таком решении невозможно обеспечить дополнительные осадки здания Российского университета дружбы народов (РУДН) в пределах допускаемых. По этой причине была изменена технология разработки котлована под защитой «стены в грунте», а ее толщина со стороны РУДН увеличена до 800 мм с трёхъярусной системой горизонтальных распорок. При глубине котлована 9,3–17,6 м защемление «стены в грунте» составило 11,9–14,7 м.

Усиление «стены в грунте» в месте, достаточно удаленном от здания РУДН, на первый взгляд может показаться неожиданным решением. Тем не менее это логично и объясняется рельефом местности – достаточно большим уклоном в направлении от здания РУДН к месту усиления.

Важнейшая составная часть траектории нагружения в численных расчётах – устройство подземной части. В рассматриваемом примере при её устройстве отрывают котлован с отметкой заложения дна на трёх уровнях, которые обусловлены передачей нагрузки от верхних конструкций. Прогноз влияния строительства на окружающую застройку и коммуникации выполнен с учётом изменения гидрогеологического режима (учитывался барражный эффект, вызванный подземной частью строящегося комплекса) на период возведения и эксплуатации объекта после передачи на основание эксплуатационных нагрузок. В качестве начального принято состояние на момент перед началом строительства, которое формировалось с учётом нагрузки от зданий и сооружений окружающей застройки.

Численное моделирование гидрологического режима проводилось с использованием программного продукта Seepage BCM [1], а НДС грунтового массива – с использованием программного комплекса UWay [2], реализующих объектно-ориентированный подход в программировании метода конечных элементов [3].

Задача расчётов по определению изменения гидрологического режима при возведении жилого комплекса с нежилыми помещениями и подземной автостоянкой решалась с использованием системы уравнений Навье–Стокса. Прогноз был выполнен на период строительства и после его завершения. Расчёты показали, что в окрестности площадки строительства произошло заметное изменение гидрологического режима, определяемое барражным эффектом. При этом максимальный

перепад в уровне грунтовых вод вырос на ~1,5 м. Результаты данных расчётов вошли составной частью в последующее численное моделирование НДС вмещающего грунтового массива со строящимся объектом и прилегающими зданиями и сооружениями.

Определение НДС грунтового массива выполнялось с использованием упругопластической модели Друккера–Прагера [4]. Расчёты велись в объёмной постановке, вибрационные и технологические нагрузки от строительных машин и механизмов не учитывались. Анализируемая область включала в себя массив грунтов основания с плановыми размерами 290×390 м и максимальной глубиной 29–36 м. Общий вид расчётной области и окружающих зданий показан на рис. 1.

При выполнении численных расчётов назначались следующие граничные условия по закреплениям: на поверхности расчётной области задавалось свободное перемещение узлов по всем направлениям; на боковых границах – свободное перемещение в вертикальном направлении и запрет на горизонтальные перемещения; на подошве расчётной области – запрет на перемещения по всем направлениям.

Было проведено три серии расчётов, которые соответствовали первоначальному (неудачному) проекту, промежуточному проекту (где были учтены основные недоработки первого проекта) и окончательному проекту. В расчётах траектория нагружения следовала принятому в проекте производству работ и вводу объекта в эксплуатацию. В табл. 2 представлены результаты расчётов на момент окончания строительства с приложением эксплуатационных нагрузок (в числителе) и значения, полученные расчётом для первоначального проектного решения ограждающих конструкции и разработки котлована (в знаменателе).

Полученные расчётом значения дополнительных осадок зданий и сооружений, расположенных вблизи нового строительства на момент отрывки котлованов, не превысили 0,68 (1,27) см, а на момент окончания строительства и передачи эксплуатационных нагрузок – 2,12 (2,65) см. Здесь и далее в скобках приведены расчётные значения для первоначального проектного решения ограждающих конструкций и разработки котлована. Максимальная относительная разность осадок окружающих зданий и сооружений на момент окончания строительства и передачи эксплуатационных нагрузок не превысила $9,84 \cdot 10^{-4}$ ($9,98 \cdot 10^{-4}$). Максимальные значения дополнительных осадок и перемещений коммуникаций на момент окончания строительства составили 2,15 (2,82) и 3,14 (3,91) см соответственно.

Таблица 2

Смещения под зданиями, сооружениями и инженерными
коммуникациями

Объект (позиция на рисунке)	Категория состояния конструкций	Дополнительные деформации		
		Осадка, см	Относительная разность осадок	Смещение, см
Здание (1-И Рошинский пр., 4, к. 1), поз. 1	III	0,65/0,70	$2,11 \cdot 10^{-4}/2,13 \cdot 10^{-4}$	
Здание (1-И Рошинский пр., 4, к. 2), поз. 2	III	0,69/0,78	$0,89 \cdot 10^{-4}/1,48 \cdot 10^{-4}$	
Здание (ул. Шаболовская, 58), поз. 3	II	0,0/0,07	$0,0/0,54 \cdot 10^{-4}$	
РУДН (ул. Орджоникидзе, 3), поз. 4	III	0,88/1,73	$2,73 \cdot 10^{-4}/6,03 \cdot 10^{-4}$	
ТП (ул. Орджоникидзе, 3а), поз. 5	II	2,12/2,65	$9,84 \cdot 10^{-4}/9,98 \cdot 10^{-4}$	
Забор Донского монастыря, поз. 6		0,15/0,29		
Коллектор, поз. 7		0,54/0,70		0,55/0,95
Канализация (1), поз. 8		2,15/2,82		3,14/3,91
Канализация (2), поз. 9		0,78/0,9		0,97/1,15
Водосток, поз. 10		0,77/0,89		0,96/1,14

В соответствии с выполненными расчетами зона влияния строительства жилого комплекса распространяется от контура котлована на расстояние до 56 м. В эту зону, в соответствии с измененным проектом ограждения, попали здания и сооружения, представленные в табл. 2, а также забор Донского монастыря и инженерные коммуникации. Исключение составило здание, расположенное по адресу: ул. Шаболовская, 58.

Из табл. 2 видно, что для первоначального проектного решения полученные расчётом дополнительные осадки здания РУДН по адресу ул. Орджоникидзе, 3 *превышают* их предельно допустимые значения. Для скорректированного по результатам расчётов проекта полученные дополнительные осадки и относительные разности осадок зданий и сооружений, попавших в зону влияния, *не превышают* предельно допустимых значений, соответствующих их категории технического состояния конструкций (СП 22.13330.2011 Основания зданий и сооружений). Полученные значения дополнительных осадок забора Донского монастыря не представляют для него опасности в связи с их малостью.

Проведение геотехнических расчетов наряду с оценкой влияния строительства на окружающие здания и сооружения позволяют скорректировать проектные решения с целью снижения дополнительных деформаций окружающей застройки до допустимых пределов, что особенно важно при строительстве объектов с фундаментами в глубоких котлованах, возводимых в условиях плотной городской застройки.

Библиографический список

1. Волков-Богородский Д.Б., Власов А.Н., Саваторова В.Л., Талонов А.В. Программный комплекс «Seepage BCM». // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612316, 21 февраля, 2013 г.
2. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Мнушкин М.Г. Программный комплекс «UWay». // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611833, 28 февраля, 2011 г. Сертификат соответствия РСТ № РОСС RU.СП15.Н00645.
3. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Знаменский В.В., Мнушкин М.Г. Конечно-элементное моделирование задач геомеханики и геофизики // Вестник Мос. гос. строит. ун-та. – 2012. – № 2. – С. 52–65.
4. Друкер Д., Прагер В. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование // Определяющие законы механики грунтов. – М.: Мир, 1975. – С. 166–177.

References

1. Volkov-Bogorodskij D.B., Vlasov A.N., Savatorova V.L., Talonov A.V. Programmnyj kompleks «Seepage BCM». *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM* № 2013612316, 21 fevralja, 2013 g.
2. Vlasov A.N., Volkov-Bogorodskij D.B., Mnushkin M.G. Programmnyj kompleks «UWay». *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM* № 2011611833, 28 fevralja, 2011 g. Sertifikat sootvetstvija RST № ROSS RU.SP15.N00645.
3. Vlasov A.N., Volkov-Bogorodskij D.B., Znamenskij V.V., Mnushkin M.G. Konechno-jelementnoe modelirovanie zadach geomekhaniki i geofiziki [Finite element simulation of Geomechanics and Geophysics]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2012, no. 2. pp. 52-65.
4. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, no. 2., pp. 157-165.

Об авторах

Власов Александр Николаевич (Москва, Россия) – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Институт прикладной механики РАН (ИПРИМ РАН); e-mail: bah1955@yandex.ru

Волков-Богородский Дмитрий Борисович (Москва, Россия) – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института прикладной механики РАН (ИПРИМ РАН); e-mail: vb1957@yandex.ru

Знаменский Владимир Валерианович (Москва, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Механика грунтов и геотехника» Московского государственного строительного университета; e-mail: GeoSTS@yandex.ru

Мнушкин Михаил Григорьевич (Москва, Россия) – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН); e-mail: MiMGeoSTS@yandex.ru

About the authors

Vlasov Aleksandr Nikolaevich (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Chief researcher, Sergeev Institute of Environmental Geosciences Russian Academy of Sciences (IEG RAS), Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Sciences (IAM RAS); e-mail: bah1955@yandex.ru

Volkov-Bogorodsky Dmitry Borisovich (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Philosophy, Senior researcher, Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Sciences (IAM RAS); e-mail: vb1957@yandex.ru

Znamenskij Vladimir Valerianovoch (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Sciences, Professor, Chair of Soil Mechanics and Geotechnics, National Research University Moscow State University of Civil Engineering (MGSU); e-mail: GeoSTS@yandex.ru

Mnushkin Michail Grigorievich (Moscow, Russian Federation) – Doctor of Philosophy, Leading researcher, Sergeev Institute of Environmental Geosciences Russian Academy of Sciences (IEG RAS); e-mail: MiMGeoSTS@yandex.ru

Получено 01.04.2014