УДК 624.131.8; 624.137

**А.Б. Пономарев, С.В. Калошина, А.В. Захаров,
М.А. Безгодов, Р.И. Шенкман, Д.Г. Золотозубов**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УСТРОЙСТВА ГЛУБОКОГО КОТЛОВАНА НА СУЩЕСТВУЮЩУЮ ЗАСТРОЙКУ

Приведены результаты геотехнического моделирования устройства котлована и строительства заглубленного 3-этажного сооружения, возводимого в исторической части г. Перми в непосредственной близости к существующей застройке. Практика показывает, что возведение нового здания в непосредственной близости к существующей застройке без принятия необходимых мер безопасности на этапе производства строительно-монтажных работ может привести к возникновению дополнительных деформаций, а иногда и разрушению существующих зданий. Поэтому требуется проведение геотехнических расчетов, моделирующих различные стадии строительства, в том числе с различными граничными условиями.

Ключевые слова: глубокий котлован, стесненные условия застройки, опасные инженерно-геологические процессы, стена в грунте, численное моделирование.

**A.B. Ponomarev, S.V. Kaloshina, A.V. Zakharov, M.A. Bezgodov,
R.I. Shenkman, D.G. Zolotozubov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

RESULTS OF GEOTECHNICAL MODELLING OF INFLUENCE OF THE DEVICE OF THE DEEP DITCH ON EXISTING BUILDING

In article results of geotechnical modelling of the device of a ditch and building a underground three-storied construction erected in a historical part of a city of Perm in immediate proximity to existing building are resulted. Practice indicate, that erection of a new building in immediate proximity to existing building without acceptance of necessary security measures at a production phase of civil and erection works, can lead to reception of additional deformations, and sometimes and to destruction of existing buildings. Carrying out of the geotechnical calculations modelling various stages of building, including with various boundary conditions therefore is required.

Keywords: deep ditch, the constrained conditions of building, dangerous engineering-geological processes, a wall in a ground, numerical modelling.

Возведение нового здания в непосредственной близости к существующей застройке без принятия необходимых мер безопасности на этапе производства строительно-монтажных работ может привести к возникновению дополнительных деформаций, а иногда и разрушению существующих зданий [1, 2].

Безопасные методы производства работ в условиях плотной городской застройки должны подтверждаться геотехническим обоснованием строительства, которое является обязательной частью проектной документации и проходит геотехническую экспертизу согласно п. 4.16 СП 22.13330¹ для следующих сооружений:

- уникальных, подземной частью глубиной заложения более 5 м;
- тех, в зоне влияния которых расположены сооружения окружающей застройки;
- размещаемых на территориях с возможным развитием опасных инженерно-геологических процессов.

Инженерно-геологические условия площадки строительства

В геологическом строении рассматриваемой площадки строительства (рис. 1), по данным бурения и статического зондирования, до глубины 50 м принимают участие пермские породы уфимского яруса (песчаники с прослоями алевролитов и аргиллитов), перекрытые четвертичными аллювиальными отложениями (гравийные грунты, супеси, суглинки, глины с примесью органических веществ). С поверхности развиты насыпные грунты мощностью 1,2–3,6 м. Кровля коренных пород вскрыта на глубине 17,0–22,0 м.

В гидрогеологическом отношении рассматриваемый участок проектируемого строительства характеризуется наличием грунтовых вод со свободной поверхностью, приуроченных к насыпным грунтам и четвертичным аллювиальным отложениям, и трещинных вод пермских отложений. Из-за отсутствия водоупора подземные воды и воды «верховодки» гидравлически взаимосвязаны и представляют собой единый водоносный горизонт.

¹ СП 22.13330.2011 «СНиП 2.02.01-83* Основания зданий и сооружений»

Рис. 1. Геолого-литологическое строение площадки строительства

Таким образом, глинистые грунты представляют собой единую толщу мощностью порядка 16 м слабых водонасыщенных грунтов с

модулем деформации 2–5 МПа. Характерными особенностями данных грунтов является:

- тиксотропность (способность грунта в результате динамических воздействий разжижаться, переходить в плавунное состояние и полностью терять свою прочность и затем, когда прекращено воздействие, возвращаться в свое первоначальное состояние);

- пучинистость (способность грунтов увеличиваться в объеме при промерзании);

- плавунность (способность водонасыщенных грунтов переходить в подвижное состояние при устройстве в них выемок).

Вышеперечисленные неблагоприятные свойства грунтов учитывались на этапе разработки проектных решений, в частности в геотехническом обосновании, при выборе технологии и методов разработки и ограждения котлована под новое строительство.

Краткая характеристика существующего здания

Здания расположены в исторической части г. Перми.

На основании выполненного обследования техническое состояние части зданий окружающей застройки оценивалось как ограниченно работоспособное, одного здания – как работоспособное. Одно из зданий является памятником архитектуры.

Краткая характеристика возводимого объекта

Проектируемое сооружение заглубленное, прямоугольной формы в плане с габаритными размерами 93,90×11,15 м. Сооружение 2–3-этажное. Глубина заложения плитного фундамента составляет –10,55 м. Конструктивная схема – бескаркасная с продольными и поперечными несущими стенами.

Наружные стены – железобетонные монолитные. Внутренние стены и перегородки – монолитные железобетонные и кирпичные. Наружная отделка – облицовочный кирпич. Кровля – плоская, эксплуатируемая.

Проектируемое сооружение расположено от существующего здания на расстоянии от 31 до 34,5 м. В зону влияния нового строительства попадают также существующие дороги и коммуникации.

Численное моделирование влияние нового строительства на существующую застройку

Численное моделирование было выполнено с использованием программного комплекса PLAXIS 2D v.9.0. Расчетный комплекс PLAXIS ориентирован на решение сложных геотехнических задач, возникающих на этапах строительства, эксплуатации и реконструкции сооружения, и представляет собой пакет прикладных вычислительных программ для конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния системы «основание – фундамент – сооружение».

Расчет был выполнен в плоской постановке задачи с использованием модели упрочняющегося грунта (Hardening Soil model). Данная модель позволяет наиболее реалистично смоделировать разработку глубокого котлована в слабых водонасыщенных грунтах [3, 4]. Расчетная схема учитывает совместную работу грунтового основания, фундаментов и надземных конструкций зданий.

Модель упрочняющегося грунта – это усовершенствованная упругопластическая модель, предназначенная для моделирования поведения различных типов грунтов, как слабых, так и прочных. В отличие от стандартной упруго-идеально-пластической модели (Мора – Кулона), поверхность текучести модели упрочняющегося грунта не зафиксирована в пространстве главных напряжений и может расширяться благодаря пластическому деформированию. Данная модель учитывает два типа упрочнения: упрочнение при сдвиге, применяемое для моделирования необратимых деформаций, появившихся в результате первичного девиаторного нагружения; упрочнение при сжатии – для моделирования необратимых пластических деформаций, обусловленных первичным сжатием при одометрическом или изотропном нагружении.

В модели упрочняющегося грунта прочностные параметры задаются так же, как и в модели Мора – Кулона (угол внутреннего трения, удельное сцепление и угол дилатансии), а деформационные – более точно с использованием трех входных параметров: секущий модуль деформации при стандартном испытании грунта на трехосное сжатие при возможности дренирования (E_{50}), касательный модуль деформации при первичном нагружении в одометре (E_{oed}), модуль деформации при разгрузке – повторном нагружении (E_{ur}). По сравнению с мо-

делью Мора – Кулона, модель упрочняющегося грунта учитывает также зависимость модуля деформации от напряжений в грунтовом массиве.

В качестве ограждения котлована вновь возводимого сооружения принята монолитная «стена в грунте» толщиной 0,8 м, с одним уровнем распорок и горизонтальным диском жесткости в уровне дна котлована.

Устройство ограждения котлована запроектировано в следующей последовательности:

1. До разработки котлована с дневной поверхности выполняется закрепление грунта по технологии *jet-grouting* мощностью 6 м с целью создания горизонтального диска жесткости и противофильтрационной завесы дна котлована. Размеры усиленного основания в плане превышают габаритные размеры «стены в грунте» котлована, заглубленного сооружения в среднем на 2 м.

Глубина завесы принята с таким расчетом, чтобы обеспечить фильтрацию грунтовых вод. Данное решение необходимо для предотвращения поднятия грунтовых вод до ограждения котлована и понижения уровня грунтовых вод после ограждения котлована, что могло бы привести к изменению физико-механических характеристик грунтов в сторону ухудшения и образованию воронки оседания вокруг устраиваемого котлована.

2. Устраивается монолитная «стена в грунте» с заглублением в усиленное по технологии *jet-grouting* основание на глубину 3 м.

3. Эскавация грунта из котлована осуществляется в 2 этапа с устройством временных горизонтальных распорок в одном уровне. В качестве распорок приняты стальные трубы по ГОСТ 10704–91 Ø530 с толщиной стенки 9 мм.

4. Возведение строительных конструкций заглубленного сооружения.

В ходе геотехнического моделирования были созданы отдельные расчетные схемы (рис. 2–4) трех сечений котлована по осям А*1 (сечение № 1), Г* (сечение № 2), 3* (сечение № 3).

На рис. 2–4 приведены расчетные конечно-элементные модели рассматриваемого грунтового массива, подземной части заглубленного сооружения и фундаментов окружающей застройки на этапе передачи полезной нагрузки на строительные конструкции заглубленного сооружения.

Нагрузки на фундаменты принимались в соответствии с результатами обследования зданий окружающей застройки согласно СП 20.13330.2011², СП 22.13330.2011³, проектной документации. Нагрузки от автотранспорта, проходящего по дороге, расположенной вдоль котлована (ось «1», ось «И*»), принимались согласно ГОСТ Р 52748–2007⁴. По бровке котлована (ось «б») приложена распределенная технологическая нагрузка, равная 10 кН/м^2 .

Рис. 2. Сечение № 1 по оси А*1. Расчетная схема влияния возведения заглубленного сооружения на существующую застройку и коммуникации.

Этап передачи полезной нагрузки на строительные конструкции заглубленного сооружения

Рис. 3. Сечение № 2 по оси 3*. Расчетная схема влияния возведения заглубленного сооружения на существующую застройку и коммуникации.

Этап передачи полезной нагрузки на строительные конструкции заглубленного сооружения

² СП 20.13330.2011. (Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия»).

³ СП 22.13330.2011 (Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83* «Основания зданий и сооружений»).

⁴ ГОСТ Р 52748–2007. Дороги автомобильные общего пользования. нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения. 2008 г.

Рис. 4. Сечение № 3 по оси Г*. Расчетная схема влияния возведения заглубленного сооружения на существующую застройку и коммуникации. Этап передачи полезной нагрузки на строительные конструкции заглубленного сооружения

Результаты расчётов представлены на рис. 5–7 и сведены в табл. 1, 2.

Дополнительные деформации зданий существующей застройки приведены в табл. 3.

Рис. 5. Сечение № 1 по оси А*1. Изолинии вертикальных перемещений после завершения строительства и передачи полезной нагрузки на строительные конструкции заглубленного сооружения

Рис. 6. Сечение № 2 по оси 3*. Изолинии вертикальных перемещений после завершения строительства и передачи полезной нагрузки на строительные конструкции заглубленного сооружения

Рис. 7. Сечение № 3 по оси Г*. Изолинии вертикальных перемещений после завершения строительства и передачи полезной нагрузки на строительные конструкции заглубленного сооружения

Таблица 1

Максимальные перемещения и деформации ограждения котлована

Расчетное сечение	Расположение	Этап строительства			
		Разработка котлована		Возведение заглубленного сооружения	
		максимальные горизонтальные перемещения, мм	$M_{\max}$, кН·м/м	максимальные горизонтальные перемещения, мм	$M_{\max}$, кН·м/м
1	Ось 1*	38	621	40	520
	Ось 6*	10	438	14	395
3	Ось 1*	8	306	8	235
	Ось 6*	6	350	9	230
2	Ось И*	1,9	222	2,1	163

Таблица 2

Максимальные продольные усилия в распорках и перекрытиях

Расчетное сечение	Распорки (этап разработки котлована)	Перекрытие на абсолютной отметке –121,25 м (после возведения заглубленного сооружения)
	$N_{\max}$, кН	$N_{\max}$, кН/м
1	–642	–321
3	–453	–236
2	–107	–77

Таблица 3

Дополнительная осадка основания фундаментов окружающей
застройки

Здание существующей застройки	Расчетное сечение	Максимальная расчетная осадка основания фундаментов здания, мм		Допустимая максимальная осадка основания фундаментов согласно прил. Л СП22.13330.2011 ⁵ , мм
		после разработки котлована	после возведения заглубленного сооружения	
Существующее здание 1	1	3	3,5	10
	3	1,8	2	
Существующее здание 2 (в осях А-Д/5-8)	1	6	8,8	10
Существующее здание 2 (в осях А-Д/15-16)	3	5	6	
Существующее здание 3	2	2	3	10

Таблица 4

Дополнительная осадка основания инженерных коммуникаций

Расчетное сечение	Максимальная расчетная осадка основания инженерных коммуникаций*, мм	
	после разработки котлована	после возведения заглубленного сооружения
1	5	11
2	8	13
3	8	9.8

*Глубина расположения инженерных коммуникаций принята равной 2 м от уровня покрытия автомобильной дороги

⁵ СП 22.13330.2011 (Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83* «Основания зданий и сооружений»).

Выводы по результатам геотехнического моделирования

Выполненные расчеты показали:

1. Предложенные проектные решения устройства ограждения котлована вновь возводимого заглубленного сооружения обеспечивают конструкционную безопасность зданий и сооружений существующей застройки.

2. Полученные в результате расчетов по геотехническому моделированию деформации фундаментов существующих зданий не превышают допустимые значения согласно приложению Л СП22.13330.2011⁶.

3. Для обеспечения беспрепятственной фильтрации грунтовых вод предусмотрена конструкция ограждения котлована без заглубления в грунты верхнепермских отложений, что не ухудшает физико-механических свойств грунтового основания окружающего грунта и предотвращает образования воронки оседания.

4. В процессе производства работ по устройству котлована и строительства заглубленного сооружения необходимо предусмотреть осуществление геотехнического мониторинга согласно п. 12 СП22.13330.2011⁷.

Библиографический список

1. Калошина С.В., Пономарев А.Б. Наиболее значимые факторы строительства при возведении зданий в стесненных условиях // Изв. Орлов. гос. техн. ун-та. Сер.: Строительство и транспорт. – 2007.

2. Ponomarev A.B., Kaloshina S.V. Influence of club foundations constructed in dense urban settings on settlement of existing buildings // Soil mechanics and foundation engineering. – 2013. – Vol. 50, № 5. – С. 194–199.

3. Безгодков М.А., Калошина С.В. Выбор модели грунта при численном моделировании влияния разработки глубоких котлованов на существующую застройку // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2012 – № 2 (6). – С. 17–27.

⁶ СП 22.13330.2011 (Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83* «Основания зданий и сооружений»).

⁷ Там же.

4. Безгоднов М.А., Калошина С.В., Пономарев А.Б. Обзор геотехнических программных комплексов PLAXIS и FLAC (ITASCA) для численного моделирования подземной части зданий в плотных городских условиях // Фундаменты глубокого заложения и проблемы освоения подземного пространства: материалы Междунар. конф. (г. Пермь, 18–19 октября 2011 г.) / Рос. акад. архитектуры и строительных наук; Рос. общ-во по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению; Науч.-исслед. проектно-конструкторский и производственный институт строительного комплекса Республики Башкортостан. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – С. 74–78.

5. Brinkgreve R.B.J., Broere W., Waterman D. Plaxis 2D-version 9. Finite Element Code for Soil and RockAnalyses. User Manual, Rotterdam: Balkema (рус. перевод: СПб.: ООО «НИИ-Информатика».)

References

1. Kaloshina S.V., Ponomarev A.B. Naibolee znachimye faktory stroitel'stva pri vozvede-nii zdaniy v stesnennykh usloviyakh [The most significant factors of construction for buildings in cramped conditions]. *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i transport*, 2007, no. 1-13, pp. 7-10.

2. Ponomarev A.B., Kaloshina S.V. Influence of club foundations constructed in dense urban settings on settlement of existing buildings. *Soil mechanics and foundation engineering*, 2013, no. 5, pp. 194-199.

3. Bezgodov M.A., Kaloshina S.V. Vybora modeli grunta pri chislen-nogo mo-delirovaniy vliyaniya razrabotki glubokih kotlovanov na sushhestvuyushchuyu zastroyku [Selecting a soil model with numerical simulation of influence on the development of deep excavations existing building]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2012. no. 2, pp. 17-27.

4. Bezgodov, M.A., Kaloshina S.V., Ponomarev A.B. Obzor geotekhnicheskikh programmnykh kompleksov PLAXIS i FLAC (ITASCA) dlya chislen-nogo modelirovaniya podzemnoy chasti zdaniy v plotnykh gorodskikh usloviyakh [Overview of geotechnical software systems PLAXIS and FLAC (ITASCA) for numerical simulation of underground parts of buildings in dense urban environments]. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii "Fundamenty glubokogo zalozeniya i problemy osvoeniya podzem-nogo prostranstva"*. Perm, 2011, pp. 74-78.

5. Brinkgreve R.B.J., Broere W., Waterman D. Plaxis 2D-version 9. Finite Element Code for Soil and RockAnalyses. User Manual, Rotterdam: Balkema.

Об авторах

Пономарев Андрей Будимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры строительного производства и геотехники Пермского национального исследовательского политехнического университета, советник РААСН, действительный член Академии естественных наук РФ (РАЕН), почетный строитель РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, (e-mail: spstf@pstu.ac.ru).

Калошина Светлана Валентиновна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (e-mail: spstf@pstu.ru).

Захаров Александр Викторович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (e-mail: spstf@pstu.ru).

Безгодов Михаил Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (e-mail: spstf@pstu.ac.ru).

Шекман Роман Игоревич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (e-mail: spstf@pstu.ac.ru).

Золотозубов Дмитрий Геннадьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (e-mail: spstf@pstu.ru).

About the authors

Ponomarev Andrey Budimirovich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Building produc-

tion and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: spstf@pstu.ac.ru).

Kaloshina Svetlana Valentinovna (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Building construction and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: spstf@pstu.ru).

Zakharov Alexandr Viktorovich (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Building construction and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: spstf@pstu.ru).

Bezgodov Mikhail Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) – Doctoral Student, Department of Building production and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: spstf@pstu.ac.ru).

Shenkman Roman Igorevich (Perm, Russian Federation) – Doctoral Student, Department of Building production and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: spstf@pstu.ac.ru).

Zolotozubov Dmitriy Gennadievich (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Building production and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: spstf@pstu.ru).

Получено 10.04.2014