

УДК 624.131.53→624.131.543:624.152.63

В.С. ПоспеховНИИОСП им. Н.М. Герсеванова, ОАО «НИЦ» Строительство»,
Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВОГО ЭФФЕКТА КОНСТРУКЦИИ ОГРАЖДЕНИЯ КОТЛОВАНА

Приведен краткий обзор исследований, выполненных на основании расчетов и натуральных измерений перемещений конструкций ограждения котлованов в угловых зонах. Проанализированы данные натуральных измерений перемещений конструкции ограждения котлована при строительстве офисно-административного комплекса зданий в г. Москве. Выполнено сравнение перемещений ограждения в центральных и угловых зонах. Показана важность учета напряженно-деформированного состояния ограждения котлована в угловых зонах при разработке проектной документации.

Ключевые слова: конструкция ограждения котлована, горизонтальные перемещения, угловой эффект.

V.S. Pospekhov

NIIOSP Research Center «Civil Engineering», Moscow, Russian Federation

STUDY OF THE CORNER EFFECT FOR THE PIT RETAINING STRUCTURE

A brief review of studies carried out on the basis of calculations and in-situ measurements of displacements of soil in the corner areas of retaining structures. In-situ measurements of retaining wall displacements measured during construction of office and administrative complex of buildings in Moscow are analyzed. Comparison of retaining structure movements in the central and corner areas are made. The importance of taking into account the stress-strain state of the retaining structure in the corner areas of the pit during the design works is highlighted.

Keywords: pit retaining structure, lateral movements, corner effect.

Введение

В течение последнего времени строительство зданий и сооружений в крупных городах ведется в условиях плотной застройки. Учитывая стесненность, наиболее рациональным в данных условиях является освоение подземного пространства.

Вследствие близкого расположения зданий и сооружений при устройстве глубоких котлованов для строительства подземных частей

зданий необходимо применять достаточно жесткие и надежные конструкции ограждений. Часто при строительстве глубоких котлованов в качестве ограждения наряду с другими конструкциями применяют траншейные монолитные железобетонные конструкции, выполняемые методом «стена в грунте». В качестве удерживающей конструкции применяют различные типы, например такие, как грунтовые инъекционные анкеры, системы распорок или подкосов из стальных труб или другого прокатного профиля, монолитные железобетонные диски, которые в дальнейшем интегрируются в конструкции постоянных перекрытий и т.д.

В процессе расчетов ограждающих конструкций часто определяющим фактором служит влияние устройства котлована на здания и сооружения окружающей застройки, которое выражается в основном в дополнительных осадках существующих фундаментов. Данные осадки связаны с изменением напряженно-деформированного состояния массива грунта, окружающего котлован, которое, в свою очередь, является причиной деформаций и перемещений конструкции ограждения котлована.

Современные программные вычислительные комплексы позволяют производить расчеты в трехмерной постановке, в результате которых определяется напряженно-деформированное состояние всей системы: конструкции ограждения, распорной крепи, окружающего массива грунта и т.д. Решения задач с использованием данных комплексов показывают, что перемещения и усилия в так называемых «угловых» зонах конструкций ограждения котлована меньше, чем в сечениях, расположенных на удалении от них. Такие же зависимости были установлены многими исследователями при мониторинге существующих площадок строительства.

Данный вопрос сегодня актуален и требует более тщательного изучения, так как влияет на экономическую эффективность при конструировании ограждений котлованов и удерживающих систем.

Опыт исследований углового эффекта

В 1996 г. были опубликованы результаты работы, в которой приводятся данные анализа расчетов в трехмерной постановке перемещений конструкций ограждения котлована в зависимости от размеров котлована в плане ($B \times L$), расстояния рассматриваемого сечения от уг-

ловой зоны (d) [1]. Там же коллектив авторов вводит коэффициент PSR (Plane Strain Ratio), который связывает между собой перемещения ограждения в данном сечении (δ_i) с максимально возможными перемещениями конструкции ограждения (δ_{\max}), определяемыми при расчетах в плоской постановке. В своей работе Ou [и др.] показали, что в угловых зонах прямоугольного котлована горизонтальные перемещения конструкции ограждения значительно меньше, чем перемещения, получаемые при расчетах в плоской постановке. Помимо этого, было отмечено, что влияние углового эффекта зависит от размеров котлована в плане. В дополнение к этому в указанной статье приводится сопоставление результатов расчетов в трехмерной постановке с данными натурных измерений на площадке строительства здания «Най-Ниа», которые показали хорошую сходимость. Следует отметить, что авторы в этой работе рассматривали консольную стенку без учета конструкций распорной системы и нагрузки на бровке котлована.

Также о снижении горизонтальных перемещений конструкций ограждения котлованов было отмечено в работе Der-Guey Lin [и др.] [2], в которой описывались результаты сравнения расчетов методом конечных элементов в плоской и трехмерной постановках с данными геодезических наблюдений на строительной площадке Taipei 101. Как и в предыдущей работе, было зафиксировано, что горизонтальные перемещения конструкции ограждения котлована значительно снижаются в сечениях, расположенных ближе к угловым зонам котлована. Помимо этого, было показано, что значения горизонтальных перемещений, полученные в результате расчетов в плоской постановке, превышают значения перемещений по результатам трехмерных расчетов и натурных измерений.

Аналогичные наблюдения были отражены в 2008 г. в статье В.П. Петрухина [и др.] [3], где рассматривалась площадка строительства глубокого котлована в Москве. В этой работе приводятся результаты расчетов конструкции ограждения котлована в плоской постановке с применением контактной модели и методом конечных элементов. Представлены результаты расчетов методом конечных элементов в трехмерной постановке. Проведен анализ результатов расчетов и данных натурных измерений, который показал, что влияние угловых зон на горизонтальные перемещения «стены в грунте» распространяется в плане примерно на величину, равную глубине котлована.

В 2011 г. в работе Y.M. Hou [и др.] [4] представлены данные наблюдений за горизонтальными перемещениями конструкции ограждения котлована при строительстве Zhongsheng Shopping Mall. Измерения проводились с помощью инклинометров по скважинам, расположенным равномерно по стенам ограждения. Представленные в данной работе результаты показывают, что горизонтальные перемещения конструкции ограждения котлована снижаются по мере приближения рассматриваемого сечения к угловой зоне.

В том же 2011 г. L. Zdravkovic [и др.] [5] рассматривают вопрос влияния горизонтальной и вертикальной жесткостей конструкции ограждения котлована на ее перемещения. Выполненные исследования на основании расчетов методом конечных элементов в трехмерной постановке показали, что перемещения конструкции ограждения в центральной зоне котлована больше перемещений в угловой зоне. Также произведен анализ расчетов перемещений с учетом различных жесткостей конструкции ограждения в горизонтальном и вертикальном. Данные расчеты показали, что при учете различных горизонтальных и вертикальных жесткостей ограждающей конструкции перемещения превышают значения по сравнению с расчетами, в которых жесткость ограждения принималась постоянной в обоих направлениях.

Исследование углового эффекта при строительстве котлована в Москве

В настоящее время в ЗАО г. Москвы ведется строительство офисно-административного комплекса зданий, состоящего из 4 корпусов высотой 10–14 этажей. Данные здания объединены между собой 4-уровневой подземной автостоянкой. Строительство подземной части выполняется в котловане глубиной до 18 м. Следует отметить, что в непосредственной близости от котлована расположено существующее 8-этажное офисное здание. Площадка строительства окружает его с трех сторон (рис. 1).

Инженерно-геологические условия площадки строительства характеризуются наличием в верхней части разреза современных насыпных грунтов. Ниже до глубины 16 м залегают аллювиальные пески от мелких до гравелистых, средней плотности и плотные, общей мощностью от 8 до 15,2 м. Далее по разрезу вскрыты флювиогляциальные супеси пластич-

ные, пески от мелких до крупных, средней плотности и плотные, общей мощностью от 4,6 до 19,8 м. Флювиогляциальные отложения подстилаются породами перхуровской, неверовской, ратмировской, воскресенской и суворовской толщ каменноугольных отложений.

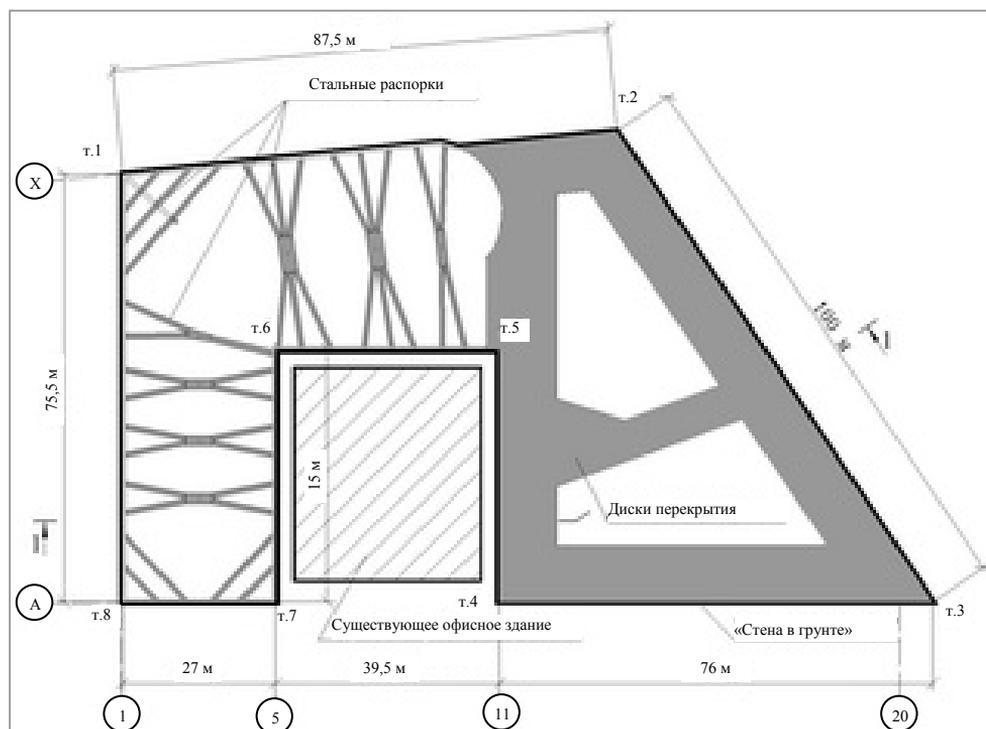


Рис. 1. Схема котлована и прилегающей существующей застройки

Данные породы представлены соответственно щебнем известняка с супесчано-суглинистым заполнителем; глинами твердой и полутвердой консистенции; известняками трещиноватыми средней прочности; глинами твердыми слоистыми; известняками средней прочности. Гидрогеологические условия характеризуются наличием 3 водоносных горизонтов: основного четвертичного, а также верхнекаменноугольного ратмировского и суворовского горизонтов. Характерный инженерно-геологический разрез представлен на рис. 2.

Устройство котлована выполнялось под защитой монолитной железобетонной «стены в грунте» толщиной 600 мм, кроме участка, примыкающего к существующему зданию, где толщина «стены в грунте» составляет 800 мм. Низ «стены в грунте» находится на глубине

36 м от поверхности земли. Это связано с относительно глубоким залеганием водоупора, так как «стена в грунте» должна была выполнять роль противофильтрационной завесы и не допускать фильтрацию подземных вод в котлован.

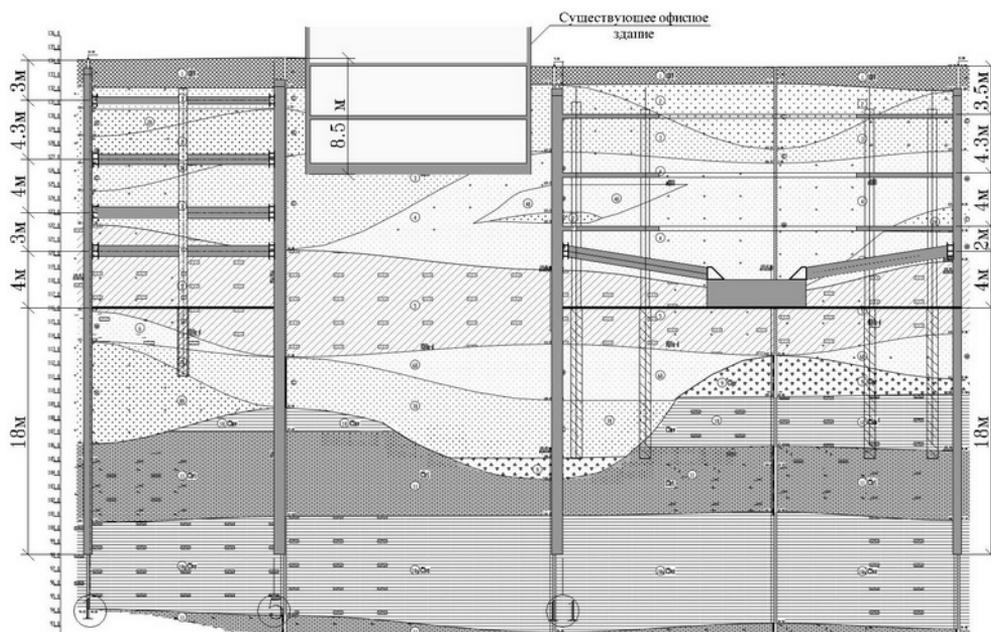


Рис. 2. Разрез по линии 1-1 с привязкой к инженерно-геологическим условиям

Устойчивость конструкции ограждения котлована на период строительства подземной части обеспечивалась системой распорок из стальных труб диаметром от 530×8 мм до 1020×16 мм, расположенных в 4-уровнях с шагом в плане 5 м (в осях «1–11» (см. рис. 1)) и тремя монолитными железобетонными дисками перекрытий на временных опорах (в осях «11–20» (см. рис. 1)). Для обеспечения несущей способности и устойчивости СВГ на участке между точками 4–5 в процессе разработки котлована до проектных отметок выполнялся дополнительный ярус подкосов из стальных труб $\varnothing 1020 \times 16$ мм с упором в выполненную фундаментную плиту в центре данного участка котлована. Равномерное распределение усилий от «стены в грунте» на стальные распорки и подкосы из труб обеспечивалось посредством обвязочных поясов из двутавров.

Для контроля планового положения ограждения котлована по верху «стены в грунт» были установлены марки. Также в теле конструкции ограждения котлована оборудовано 14 инклинометрических скважин глубиной 17–27 м для измерения планового положения СВГ по высоте. Схема расположения марок и характер максимальных перемещений представлена на рис. 3. Схема расположения инклинометрических скважин и результаты измерений по ним на период возведения конструкций нулевого цикла представлена на рис. 4.

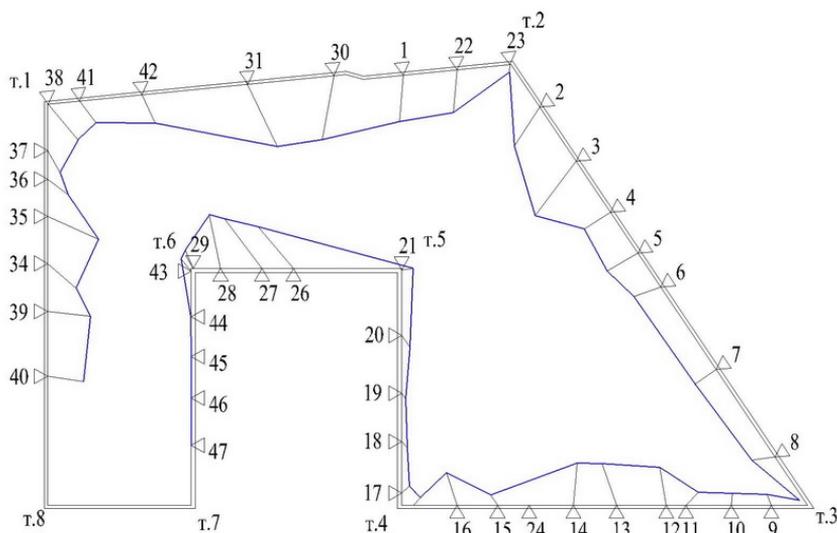


Рис. 3. Схема расположения геодезических марок по верху «стены в грунте» и характер их перемещений

Как видно из рис. 3, максимальные перемещения верха конструкции ограждения котлована зафиксированы в сечениях, достаточно удаленных от угловых зон. Данный характер хорошо прослеживается на участках между точками 1–2, 2–3, 3–4, 5–6, 1–8. Относительно большие перемещения марок № 28 и 38 можно объяснить тем, что разработка котлована в плане производилась отдельными захватками, а также тем, что установка распорок выполнялась с некоторым отставанием от выемки грунта. Относительно маленькие перемещения верха «стены в грунте» на участках 4–5 и 6–7 можно объяснить тем, что в первую очередь более высокой жесткостью конструкции ограждения, а также тем, что в процессе разработки котлована в зоне между существующим зданием и «стеной в грунте» производилось компенсационное нагнетание цементного раствора по манжетной технологии.

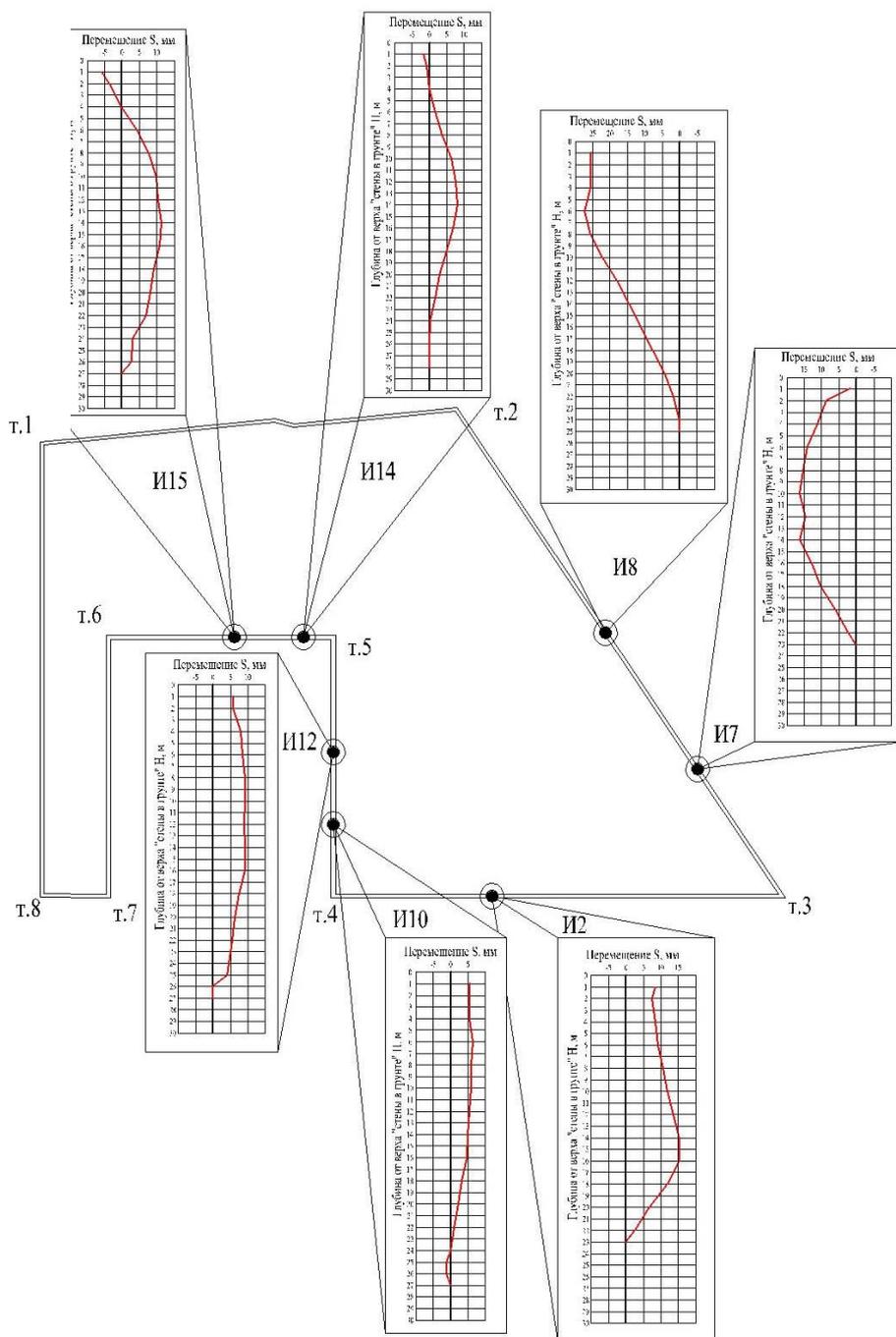


Рис. 4. Схема расположения инклинометрических скважин и измеренные в них перемещения «стены в грунте»

Характер возрастания перемещений «стены в грунте» по мере удаления от угловых зон прослеживается и по глубине конструкции ограждения, что можно увидеть из результатов измерений плановых перемещений по инклинометрическим скважинам (см. рис. 4). Так на участке 2–3 максимальные перемещения по инклинометрической скважине И8 составили 25 мм, в то время как максимальные перемещения по скважине И7 – 15 мм. Тот же эффект прослеживается и на участке 4–5. Здесь горизонтальные перемещения по скважине И12 составили 10 мм, а по скважине И10 – 5 мм. На участке 5–6 также зафиксировано, что перемещения по скважине И15 составили 12 мм, что больше перемещений, измеренных по скважине И14 – 8 мм.

Выводы

Результаты исследований, выполненных коллективами авторов из разных стран, показывают, что горизонтальные перемещения конструкции ограждения котлована снижаются по мере приближения рассматриваемого сечения к угловой зоне и зависят от размеров котлована, удаления сечения от угловой зоны, а также от учета жесткости конструкции ограждения в горизонтальной и вертикальной плоскости.

Полученные в результате геотехнического мониторинга данные перемещений конструкции ограждения котлована при строительстве офисно-административного комплекса зданий в г. Москве показали, что по своему характеру перемещения ограждающей конструкции увеличиваются по мере удаления от угловых зон.

На основании рассмотренных в данной статье материалов можно сделать вывод, что при выполнении расчетов в плоской постановке перемещения и усилия в угловых зонах принимаются завышенными и не соответствующими реальным значениям. Для экономически выгодного проектирования конструкций ограждения котлованов и оценки влияния строительства на окружающую застройку в угловых зонах необходимо производить расчет в трехмерной постановке задачи либо в плоской постановке с учетом влияния угловых зон на перемещения ограждающих конструкций.

Библиографический список

1. Chang-Yu Ou, Dar-Chang Chiou, Tzong-Shiann Wu. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavations // *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*.- 1996. – Vol. 122. – No. 5. – P. 337–345.
2. Der-Guey Lin, Siu-Mun Woo. Three-Dimensional Analysis of Deep Excavations In Taipei 101 Construction Project // *Journal of GeoEngineering*. – 2007. – Vol. 2. – No. 1. – P. 29–41.
3. Петрухин В.П., Поспехов В.С., Шулятьев О.А. Опыт проектирования и мониторинга глубокого котлована // Сб. науч. тр. НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. – 2008. – Вып. 99. – С. 139–148.
4. Hou Y.M., Wang J.H., D-S Jeng. Three-Dimensional Deformation Behavior of an Over-Sided Excavation in Shanghai Clay. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS&AGSSEA*. – 2011. – Vol. 42. – No. 3. – P. 22–29.
5. Zdravkovich L., Potts D.M., Kontoe S. Effect of wall stiffness on ground deformations around deep excavations in stiff clay // *Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2011. – P. 1599–1604.

References

1. Chang-Yu Ou, Dar-Chang Chiou, Tzong-Shiann Wu. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavations. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1996. vol. 122, no.5, pp. 337-345.
2. Der-Guey Lin, Siu-Mun Woo. Three-Dimensional Analysis of Deep Excavations In Taipei 101 Construction Project. *Journal of GeoEngineering*, 2007. vol. 2, No. 1, pp. 29-41.
3. Petrukhin V.P., Pospekhov V.S., Shulyatev O.A. Opyt proektirovaniya i monitoringa glubokogo kotlovana [Deep excavation designing and field monitoring experience]. *Collection of scientific papers Research institute Of Bases And Underground Structures Named After Gersevanov (NIIOSP)*, 2008, vol. 99, pp. 139-148.
4. Hou Y.M., Wang J.H., D-S Jeng. Three-Dimensional Deformation Behavior of an Over-Sided Excavation in Shanghai Clay. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS&AGSSEA*, 2011, vol. 42, No. 3, pp. 22-29.

5. Zdravkovich L., Potts D.M., Kontoe S. Effect of wall stiffness on ground deformations around deep excavations in stiff clay. *Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2011. pp. 1599-1604.

Об авторах

Поспехов Валентин Сергеевич (Москва, Россия) – научный сотрудник НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, ОАО «НИЦ "Строительство"»; e-mail: pvs81@mail.ru

About the authors

Pospekhov Valentin Sergeevich (Moscow, Russian Federation) – Researcher NIIOSP Research Center «Civil Engineering»; e-mail: pvs81@mail.ru

Получено 15.04.2014