

DOI: 10.15593/2224-9826/2015.1.04

УДК 624.15: 624.131.53

Ю.Л. Винников, А.В. Веденисов

Полтавский национальный технический университет
имени Юрия Кондратюка, Полтава, Украина

**МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ГРУНТОЦЕМЕНТНЫХ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭКРАНОВ
ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ ОТ ВЛИЯНИЯ
НОВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

Близкое размещение фундаментов новых зданий к уже существующим приводит к дополнительным неравномерным деформациям оснований последних, в результате чего могут возникать трещины в их стенах, особенно в местах примыкания объектов. Для снижения отрицательного влияния новой застройки на основания и фундаменты существующих зданий между ними устраивают разделительный экран в грунте, например из вертикальных грунтоцементных цилиндрических элементов, которые изготавливают буроцементным методом. Этот метод состоит в том, что специальным оборудованием грунт разрыхляют в пределах скважин без его выемки. Одновременно в него нагнетают водно-цементную суспензию, перемешивают и уплотняют грунтоцементную смесь. В результате образуются цилиндрические грунтоцементные элементы диаметром 0,3–0,8 м и длиной до 20 м. Элементы выполняют через один, чтобы через 1–3 сут изготовить пропущенные. Грунтоцементная смесь заполняет скважину и служит надежной преградой разрушения ее стенок. После твердения грунтоцемента имеем достаточно жесткий экран, который полностью или частично нейтрализует влияние нового строительства. Приведены результаты лотковых исследований эффективности разделительных экранов из грунтоцемента для защиты существующих зданий от влияния нового строительства. Рассмотрен висячий экран, воспринимающий нагрузку преимущественно боковой поверхностью, и экран-стойка, опирающийся на несжимаемое основание. Получена удовлетворительная сходимость результатов лоткового эксперимента и моделирования системы «основание – новая застройка, разделительный экран, существующее сооружение» в пространственной версии метода конечных элементов с нелинейной моделью грунта и критерием прочности Мора – Кулона. Разделительный экран наиболее эффективен при опирании на малосжимаемый грунт, а в случае его отсутствия – при глубине заложения, равной величине сжимаемой толщи фундамента новой застройки.

Ключевые слова: разделительный экран, грунтоцемент, лотковый эксперимент, основание, влияние нового строительства, осадка, метод конечных элементов, математическое моделирование.

Iu.L. Vinnikov, A.V. Vedenisov

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine

MODEL RESEARCH OF THE SOIL-CEMENT SEPARATING SHIELDS EFFICIENTLY FOR PROTECTION EXISTING CONSTRUCTIONS FROM NEW BUILDING

Close placement of the new buildings foundations to the existing leads to the additional differential settlements of the last. It may lead to occur of the cracks in their walls, especially it occur in the places of the buildings adjunction. There should be used separating shields to reduce negative impact of new construction on the bases and foundations of existing buildings. It could be vertical soil-cement elements, which are made by mixing drilling method. Special equipment loosen soil in the wells without soil recess. At the same time there injected water-cement suspension, soil-cement mixture are mixed and compacted. In result there are formed cylindrical elements with diameter 0.3–0.8 m and, length of 20 m. Elements performing through the one, to produce the missing at 1–3 days after. Soil-cement mixture filled well and it serve as a reliable barrier for destruction of its walls. After soil-cement hardness we obtain quite hard separating shield, which is fully or partially neutralize the impact of new construction. There are shown results of the laboratory researches of the separating shields to protect existing constructions from new building. Separating shields makes from the soil-cement elements. There is considering hanging shield, which is accepting load mainly by the lateral surface. There is also stand shield, which is based on the incompressible base. Satisfactory reproducibility tray test and simulation of the system "soil base – new building, separating shield, existing building" in the 3D finite element method, with nonlinear model of the soil and strength criteria Coulombs – Moors has been obtained. Separating shield is the most efficiently if it is based on the incompressible base. If incompressible base is absent, hanging shield is the most efficiently – when it is laying on the depth equal to the amount of compressible thickness of the new building soil foundation.

Keywords: separating screen, soil-cement, tray-type experiment, foundation bed, impact of the new buildings, settlement, finite elements method, mathematical simulation.

При реконструкции ранее сформированных городских районов, повышении плотности их застройки близкое размещение новых фундаментов к существующим зданиям приводит к дополнительным неравномерным деформациям оснований последних, что нередко сопровождается образованием трещин в стенах, особенно в местах примыкания к ним новых сооружений. Чтобы уменьшить или полностью исключить отрицательное влияние нового строительства на основания и фундаменты существующих зданий, на сегодняшний день геотехниками достаточно апробирован целый ряд приемов¹ [1–5]:

- новые объекты планируют с зазором от существующих $L \geq H_c/2$, где H_c – мощность сжимаемой толщи под новым фундаментом;

¹ ТЧН 50-302-14. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге / Правительство Санкт-Петербурга. СПб., 2004. 58 с.

- в случае малоэтажной застройки рядом с имеющимися строениями возводят вставку, равную по высоте существующим зданиям;
- устраивают проезд в месте примыкания;
- принимают консольное примыкание фундаментов новой застройки к уже существующим фундаментам;
- возводят самонесущие стены рядом с существующими фундаментами;
- в зонах примыкания устраивают отдельные фундаменты;
- используют буронабивные сваи, а также сборные железобетонные сваи, которые погружают в грунт вдавливанием;
- устраивают разделительный экран в грунте между старой и новой застройкой.

Практикой подтверждены как высокая надежность способов устройства защитных разделительных экранов из металлического шпунта, секущих железобетонных и бетонных набивных свай с использованием технологии «стена в грунте», так и их значительная себестоимость, а также продолжительность сроков нулевого цикла [1, 2, 5, 6].

Одним из наиболее простых, но при этом надежных и «быстрых» методов возведения разделительных экранов в настоящее время является способ устройства их из вертикальных грунтоцементных цилиндрических элементов, которые изготавливают по буромесильной технологии [6, 7]. Этот способ заключается в том, что с помощью специального оборудования грунт разрыхляют в пределах скважин без его выемки. Одновременно в этот грунт нагнетают водно-цементную сuspензию, перемешивают и уплотняют грунтоцементную смесь. В результате образуются грунтоцементные цилиндрические элементы (ГЦЭ) диаметром 0,3–0,8 м и длиной до 20 м. Элементы в составе экрана выполняют через один, чтобы через 1–3 сут изготовить пропущенные. Таким образом создают сплошной экран. Жидкая и тяжелая грунтоцементная смесь с самого начала бурения заполняет скважину и служит надежной преградой разрушению ее стенок. После твердения грунтоцемента имеем достаточно жесткий экран, который полностью или частично нейтрализует влияние нового строительства.

Геотехнические характеристики грунтоцемента уже достаточно исследованы [2–4, 7–9], однако закономерности влияния новостроек на осадки оснований ранее возведенных сооружений при разделении их грунтоцементными экранами представляют научный и практический

интерес. Поэтому совершенствование конструктивных решений и методов расчета разделительных экранов, изготавливаемых из грунтоцемента, – актуальная задача геотехники.

Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы является получение новых данных о деформированном состоянии системы «основание – новая застройка, разделительный экран, существующее сооружение» на моделях в лабораторном лотке.

При разработке физической модели этой системы использован лоток с размерами в плане 535×580 мм и высотой 555 мм (рис. 1, а). Песок кварцевый, средней крупности укладывали в лоток слоями толщиной по 15 мм и доводили его трамбовкой массой 3 кг до заданной плотности сухого грунта $\rho_d = 1,62$ г/см³ при его влажности $w = 0,10$. Качество уложенного грунта контролировали отбором его в кольца объемом 140 см³. При этом среднеквадратическое отклонение значений плотности сухого грунта составило 0,011 г/см³, а коэффициент вариации $v = 0,02$, что соответствует корректным условиям приготовления образцов грунта нарушенной структуры заданной плотности в лабораторных условиях. Отдельный фундамент имитировали металлическим штампом диаметром 50 мм, толщиною 10 мм и площадью 78,5 см². Наличие существующих сооружений моделировали поверхностными деформационными марками.

При отсутствии в основании фундаментов зданий малосжимаемых слоев грунтов для нейтрализации влияния нового строительства на существующее сооружение возможно использовать лишь висячий разделительный экран, который садится вместе с основанием. Необходимо смоделировать указанные условия в лотке. Для этого из грунтоцемента на песчаном грунте при 20%-ном содержании цемента изгото-влена модель разделительного экрана, которую выдерживали во влажном экскикаторе на протяжении 28 сут. Лоток до половины высоты заполняли грунтом по вышеописанной методике, устанавливали висячий экран и завершали заполнение лотка грунтом (рис. 1, б, в).

На глубине 5 см от поверхности грунта с одной стороны от экрана размещен штамп. Расстояние между боковой поверхностью экрана и центром штампа составило 10 см. С другой стороны экрана на расстоянии от его боковой поверхности 5, 10 и 15 см на той же глубине установлены три поверхностные деформационные марки. На станине



Рис. 1. Лотковые исследования: *а* – общий вид загруженного лотка; *б, в* – момент установки разделительного экрана в лоток

лотка смонтированы конструкция для установки индикаторов и реферная система для крепления прогибомеров. Осадки экрана определялись двумя прогибомерами. Для нагружения штампа смонтирована система из двух швеллеров и двух шпилек. Схема лотка, оборудованная для проведения статических испытаний, показана на рис. 2.

Штамп нагружали ступенями по 200 Н, которые выдерживали до условной стабилизации его осадок. Прогибомерами фиксировали осадки штампа и экрана, а индикаторами часового типа – осадки массива грунта на разных расстояниях от штампа и экрана. Результаты статических испытаний моделей с экраном представляли в виде графиков в координатах «давление под штампом – осадка штампа» (рис. 3), «давление под штампом – осадка разделительного экрана» (рис. 4), «давление под штампом – осадка поверхностных деформационных марок» (рис. 5, кривые 5–7). Из графиков видно, что осадки у поверхностных марок приблизительно в 5 раз меньше, чем у экрана.

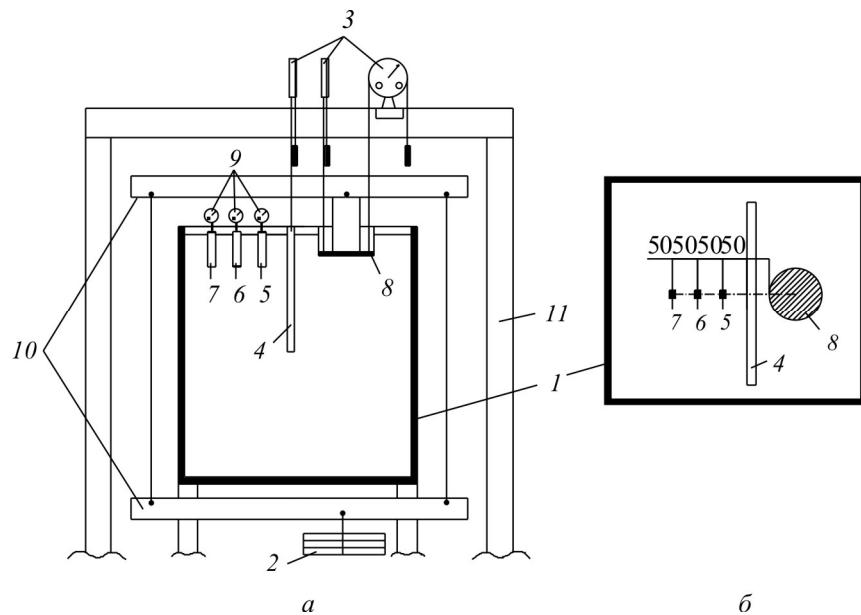


Рис. 2. Схема загруженного лотка: *а* – вид в разрезе; *б* – вид сверху;
1 – лоток; *2* – груз; *3* – прогибомер; *4* – экран; *5–7* – поверхностные деформационные марки; *8* – штамп; *9* – индикатор часового типа;
10 – система нагружения; *11* – реперная рама

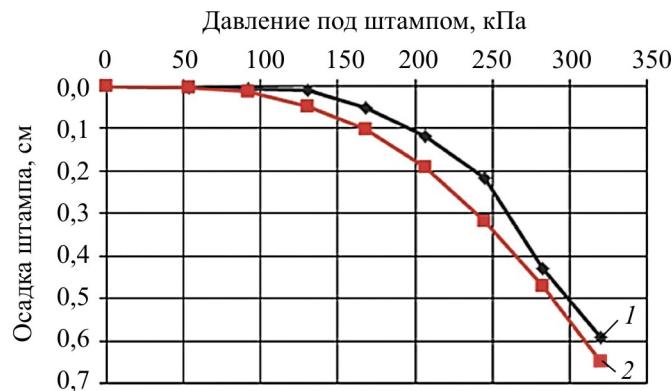


Рис. 3. Графики осадок грунтового основания от давления под штампом: *1* – эксперимент; *2* – моделирование МКЭ

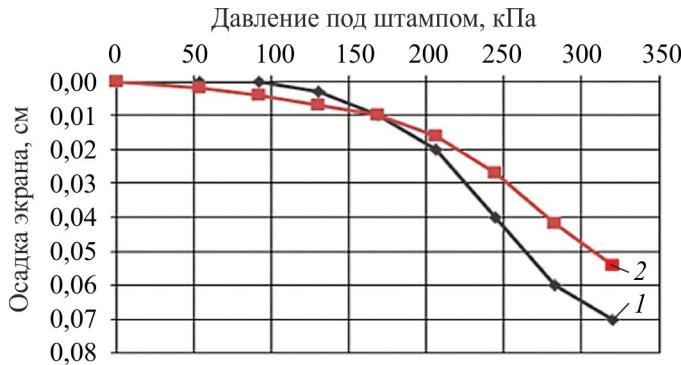


Рис. 4. Графики осадок висячего разделительного экрана:
1 – эксперимент; 2 – моделирование МКЭ

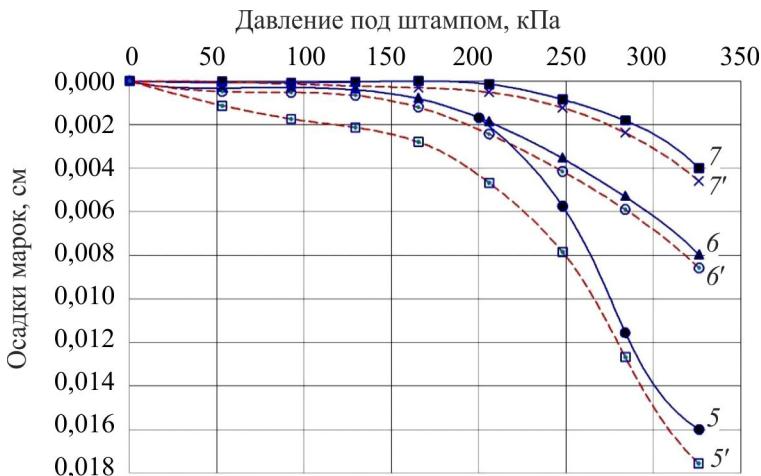


Рис. 5. Графики осадок поверхностных деформационных марок от давления под штампом: 5–7 – эксперимент;
5¹–7¹ – моделирование МКЭ

Результаты лоткового эксперимента обработаны по достаточно апробированной методике многофакторного анализа (два фактора – давление под штампом $\sigma = X_1$ и расстояние от края штампа $\ell = X_2$; отклик – осадка поверхностных марок $S = Y_1$).

Исходные данные для статистического анализа осадок марок, экрана и штампа сведены в таблицу.

В результате корреляционного анализа данных таблицы получено уравнение множественной линейной регрессии:

$$S = f(\sigma, \ell) = -1,63 \cdot 10^{-3} \cdot \ell + 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma - 4,78 \cdot 10^{-3}. \quad (1)$$

При этом величина коэффициента корреляции составила $r = 0,841$, а критерия Фишера $F_p = 23,33$. Величина критического значения этого критерия, взятая из статистических таблиц для уровня значимости $\alpha = 0,05$, составляет $F_{\text{крит}} = 3,74$. Поскольку $F_p > F_{\text{крит}}$, то полученное уравнение регрессии (1) следует считать статистически значимым (гипотеза об адекватности модели подтвердилась).

Исходные данные для статистического анализа результатов лоткового эксперимента

№ п/п	Осадка основания $S = Y_1$, см	Давление под штампом $\sigma = X_1$, кПа	Расстояние от края штампа $\ell = X_2$, м
1	0,00052	129,98	0
2	0,00118	168,17	0
3	0,00001	168,17	0,10
4	0	168,17	0,15
5	0	168,17	0,20
6	0,00217	206,37	0
7	0,00005	206,37	0,10
8	0,00003	206,37	0,15
9	0,00001	206,37	0,20
10	0,00431	244,57	0
11	0,00012	244,57	0,10
12	0,00005	244,57	0,15
13	0,00002	244,57	0,20
14	0,00591	282,77	0
15	0,00016	282,77	0,10

Таким образом, по результатам лотковых исследований можно сделать вывод, что висячий разделительный экран не менее чем вдвое снижает осадки поверхностных марок и, соответственно, радиус осадочной воронки по сравнению с осадками данных марок в случае, когда такой экран отсутствовал.

Математическое моделирование результатов лотковых исследований (по схеме, представленной на рис. 2) деформированной системы «основание – новая застройка, разделительный экран, существующее сооружение» при действии вертикальной нагрузки на штамп осуществлено в программном комплексе Plaxis 3D Foundation методом конечных элементов (МКЭ) для условий пространственной задачи [10]. Рас-

четная область задачи (ее размеры соответствуют лотковому эксперименту) автоматически поделена на конечные элементы разных размеров клиновидной формы. По центру области размещен экран размером $300 \times 250 \times 20$ мм, рядом с ним – штамп, к которому приложена нагрузка. Количество конечных элементов – 9100 (рис. 6).

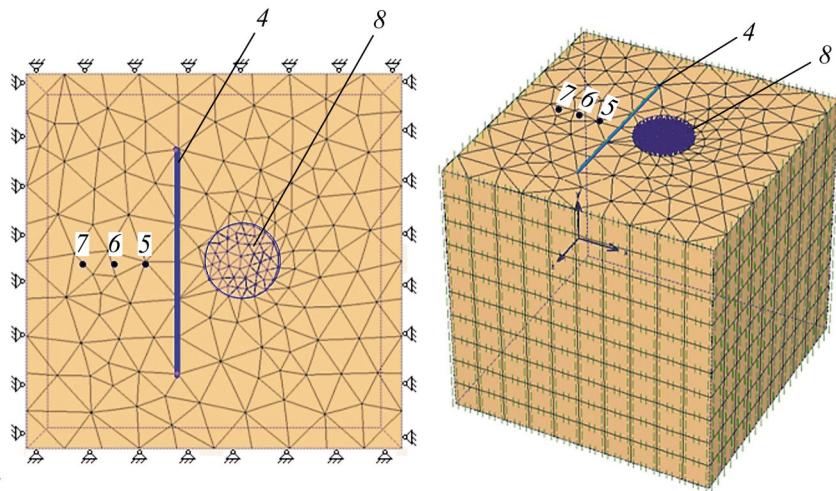


Рис. 6. Расчетная схема в пространственной версии МКЭ комплекса Plaxis 3D лотковых испытаний: 4 – разделительный экран; 5, 6, 7 – поверхностные марки; 8 – штамп

В расчетах были приняты следующие предпосылки и параметры:

– для основания – упругопластическая модель грунта с критерием прочности Мора – Кулона [2, 10], параметры которой (удельный вес грунта γ ; модуль деформации грунта E ; его коэффициент Пуассона ν ; угол внутреннего трения φ ; удельное сцепление грунта c ; угол дилатанции грунта ψ) определялись путем нормативных лабораторных испытаний;

– для материала (грунтоцемент) разделительного экрана – линейная упругая модель (Linear Elastic), которая соответствует закону Гука (изотропная линейная упругость) и включает в себя два упругих параметра жесткости: модуль Юнга и коэффициент Пуассона.

Результаты математического моделирования лотковых испытаний представлены в виде графиков в координатах «давление под штампом – осадка штампа» (см. рис. 3, график 2), «давление под штампом – осадка

разделительного экрана» (рис. 4, график 2), «давление под штампом – осадка поверхностных марок» (рис. 5, графики 5¹–7¹).

Сравнивая результаты лоткового и численного экспериментов по оцениванию параметров деформированной системы «основание – новая застройка, разделительный экран, существующее сооружение», констатируем их удовлетворительную сходимость.

Результаты изложенных исследований эффективности разделительных экранов из грунтоцемента для защиты существующих зданий и сооружений от влияния нового строительства позволили сформулировать выводы.

Наличие разделительного грунтоцементного экрана значительно снижает отрицательное влияние нового строительства на существующие здания. Эффективность экрана зависит от его приспособленности к инженерно-геологическим условиям. Наибольшая эффективность экрана достигается при его опирании на несжимаемый грунт, тогда дополнительные осадки существующих зданий практически не развиваются. При отсутствии в пределах инженерно-геологического разреза малосжимаемых грунтов существенный эффект достигается при глубине заложения экрана, равной величине сжимаемой толщи фундамента нового объекта. Для проектировщика также важно, что если для оснований существующих зданий значения дополнительных абсолютных и относительных осадок не превышают нормативные, то в экране нет необходимости.

Результаты расчета в комплексе Plaxis 3D и лоткового опыта имеют удовлетворительную сходимость, что подтверждает достаточную корректность применения упругопластической модели грунта с критерием прочности Мора – Кулона и расчетной схемы пространственной задачи МКЭ при оценивании деформированного состояния системы «основание – новая застройка, разделительный экран, существующее сооружение» условиям физического эксперимента.

Библиографический список

1. Симагин В.Г. Проектирование и устройство фундаментов вблизи существующих сооружений в условиях плотной застройки. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 128 с.
2. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под ред. В.А. Ильичева, Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во АСВ, 2014. – 728 с.

3. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах: учеб. пособие / Р.А. Мангушев, Н.С. Никифорова, В.В. Конюшков, А.И. Осокин, Д.А. Сапин. – М.; СПб.: Изд-во АСВ, 2013. – 256 с.
4. Пономарев А.Б., Винников Ю.Л. Подземное строительство: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 262 с.
5. 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, no. 5. – P. 194–199.
6. Зоценко М.Л., Борт О.В. Ефективність роз'єднувальних стінок у ґрунті при захисті існуючих будівель від впливу новобудов // Бетон и железобетон в Украине. – 2007. – № 1. – С. 24–27.
7. Зоценко М.Л., Веденісов А.В. Проект технічних умов на проектування та влаштування роз'єднувальних екранів з ґрунтоцементних елементів, виготовлених бурозмішувальним методом // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – Вип. 1 (40), т. 1. – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – С. 248–258.
8. Denies N., Lysebetten G.V. Summary of the short courses of the IS-GI 2012 latest advances in deep mixing // Proc. of the Intern. Symposium on Ground Improvement IS-GI. – Brussels, 2012. – P. 73–123.
9. Characteristics of manmade stiff grounds improved by drill-mixing method / M. Zotsenko, Yu. Vynnykov, I. Lartseva, V. Shokarev, V. Krysan // Proceeding of 15th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering "Geotechnics of Hard Soils – Weak Rocks". – Athens, 2011. – P. 1097–1102.
10. Plaxis 3D Foundation. Reference Manual. Version 1.5 / R. Brinkgreve [et al.]. – Delft: Delft University of Technology, 2006. – 152 p.

References

1. Simagin V.G. Proektirovanie i ustroistvo fundamentov vblizi su-schestvuiushchikh sooruzhenii v usloviyah plotnoi zastroiki [Design and erection of foundations near existing structures in the conditions of dense development]. Moscow: Assotsiatsia stroitel'nykh vuzov, 2010. 128 p.
2. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniia, fundamenty i podzemnye sooruzheniiia [Directory geotechnics. Bases, foundations and underground

structures]. Ed. V.A. Il'ichev, R.A. Mangushev. Moscow: Assotsiatsia stroitel'-nykh vuzov, 2014. 728 p.

3. Mangushev R.A., Nikiforova N.S., Konushkov V.V., Osokin A.I., Sapin D.A. Proektirovanie i ustroystvo podzemnyh sooruzhenij v otkrytyh kotlovanakh [The design and layout of underground structures in open pits]. Moscow; Saint-Petersburg: Izdatel'stvo assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2013. 256 p.

4. Ponomarev A.B., Vinnikov Iu.L. Podzemnoe stroitel'stvo [Underground construction]. Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2014. 262 p.

5. 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, no. 5, pp. 194-199.

6. Zotsenko M.L., Bort O.V. Efektivnist' roz'ednuval'nih stinok u grunti pri zahisti isnujuchih budivel' vid vplivu novobudov. *Beton i zhelezobeton v Ukraine*, 2007, no. 1, pp. 24-27.

7. Zotsenko M.L., Vedenisov A.V. Proekt tekhnichnikh umov na proektuvannia ta vlashtuvannia roz'ednuval'nikh ekraniv z gruntocemetnikh elementiv, vigotovlenikh burozmishuval'nim metodom [Draft technical specifications for the design and uncoupling device screens grantiella elements produced by the method bouresli]. *Zbirnik naukovikh prats'. Seriia: Galuzeve mashinobuduvannia, budivnitstvo*. Poltava: Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, 2014, iss. 1 (40), vol. 1, pp. 248-258.

8. Denies N., Lysebetten G.V. Summary of the short courses of the IS-GI 2012 latest advances in deep mixing. *Proc. of the Intern. Symposium on Ground Improvement IS-GI*. Brussels, 2012, pp. 73-123.

9. Zotsenko M., Vynnykov Yu., Lartseva I., Shokarev V., Krysan V. Characteristics of manmade stiff grounds improved by drill-mixing method. *Proc. of 15th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering "Geotechnics of Hard Soils – Weak Rocks"*. Athens, 2011, pp. 1097-1102.

10. Brinkgreve R. [et al] Plaxis 3D Foundation. Reference Manual. Version 1.5. Delft, Delft University of Technology, 2006. 152 p.

Получено 20.01.2015

Сведения об авторах

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

Веденисов Андрей Васильевич (Полтава, Украина) – ассистент кафедры добычи нефти и газа и геотехники Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка (36011, г. Полтава, Первомайский пр., 24, e-mail: Andreiv3337@hotmail.com).

About the authors

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

Andrei V. Vedenisov (Poltava, Ukraine) – Assistant, Department of Oil and Gas and Geotechnics, Poltava Yuri Kondratyuk National Technical University (24, Pervomaiskii av., Poltava, 36011, Ukraine, e-mail: Andreiv3337@hotmail.com).