

РАСЧЁТНЫЙ ПРОГНОЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ АНКЕРНЫХ СВАЙ С ПЫЛЕВАТО-ГЛИНИСТЫМ ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ

М.А. Самохвалов, О.В. Ашихмин, А.А. Паронко
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

Предлагается эффективное решение проблемы закрепления подпорной стенки подземного трехуровневого паркинга путём дополнительного устройства в верхней части буроинъекционных анкерных свай. Приведен анализ результатов статических испытаний буроинъекционных анкерных свай с построением графиков зависимости осадки свай от нагрузки. Выполнены расчеты по определению основных параметров анкерных свай по результатам численного моделирования: длина, шаг и несущая способность. Для численного моделирования совместной работы подпорной стенки и буроинъекционных анкерных свай допустимо использовать программный комплекс Plaxis 2D. Результаты аналитических решений, приводимых в статье, позволяют с точностью до 22 % определить перемещение буроинъекционной анкерной сваи от действующей выдергивающей нагрузки в сравнении с контрольными полевыми статическими испытаниями в глинистых грунтах.

Ключевые слова: буроинъекционные анкерные сваи, пылевато-глинистые грунты, напряженно-деформированное состояние, статические испытания, численное моделирование.

1. Актуальность

Строительство высотных общественных и жилых зданий, связанное с повсеместным развитием инфраструктуры городов приводит к обязательному освоению их подземного пространства, используемого для различных целей. Глубина котлованов высотных зданий может составлять более 10–15 м, при этом отметка дна котлована почти во всех случаях находится ниже уровня подземных вод [1, 2].

К расчетам ограждений котлованов высотных зданий предъявляются особые требования. В частности, при расчетах глубоких котлованов необходимо детально подходить к проектированию удерживающих и анкерных конструкций для обеспечения требований по нормальной эксплуатации зданий и сооружений, расположенных в зоне влияния высотного строительства. В расчетах следует также учитывать возможность передачи на ограждения

котлована существенных вертикальных нагрузок, а также моментных и дополнительных горизонтальных нагрузок от ветровых воздействий на высотное здание [3–6]. Исходя из этого, выполнение расчётного прогноза взаимодействия различных анкерных систем с глинистым грунтовым основанием является актуальной задачей.

2. Решение проблемы

При строительстве многоэтажного жилого дома с подземным трёхуровневым паркингом произошло сверхнормативное отклонение от вертикального положения подпорной стенки. Подпорная стенка была выполнена по технологии «стена в грунте» и закреплена в грунтовой массе при помощи буроинъекционных анкерных свай, расположенных в два ряда (рис. 1, а). Характеристики грунтов площадки строительства представлены в таблице.

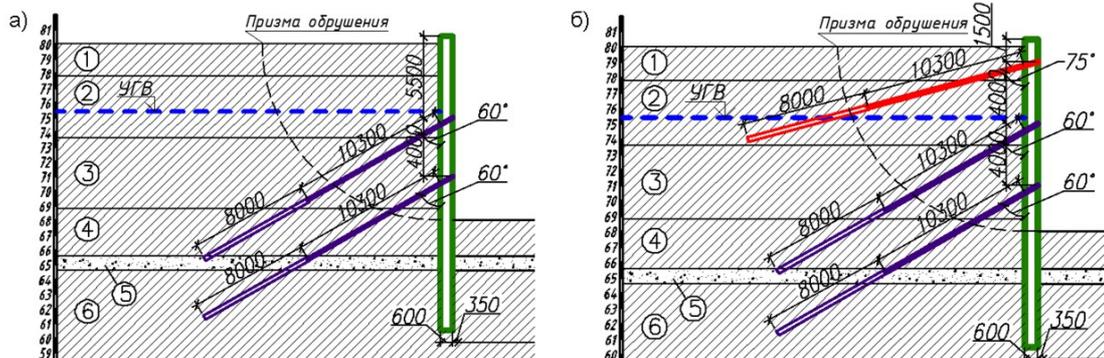


Рис. 1. Закрепление стены буроинъекционными анкерными сваями:
а – положение свай до выполнения работ, б – проектное положение анкерных свай

Характеристики грунтов строительной площадки

ИГЭ	z, м	γ , кН/м ³	e, д. ед.	W, %	W _s , %	I _L	E, МПа	ϕ , град	c, кПа
1	1,1	19,8	0,84	8	8	0,03	15	16	27
2	2,1	19,7	0,86	26	26	0,42	12	18	14
3	2,4	18,2	0,82	78	78	0,90	4,5	21	13
4	1,6	18,1	0,87	56	56	0,55	5	29	16
5	0,5	19,7	0,75	36	36	–	27	22	–
6	3,6	19,9	0,9	28	28	0,51	16	17	27

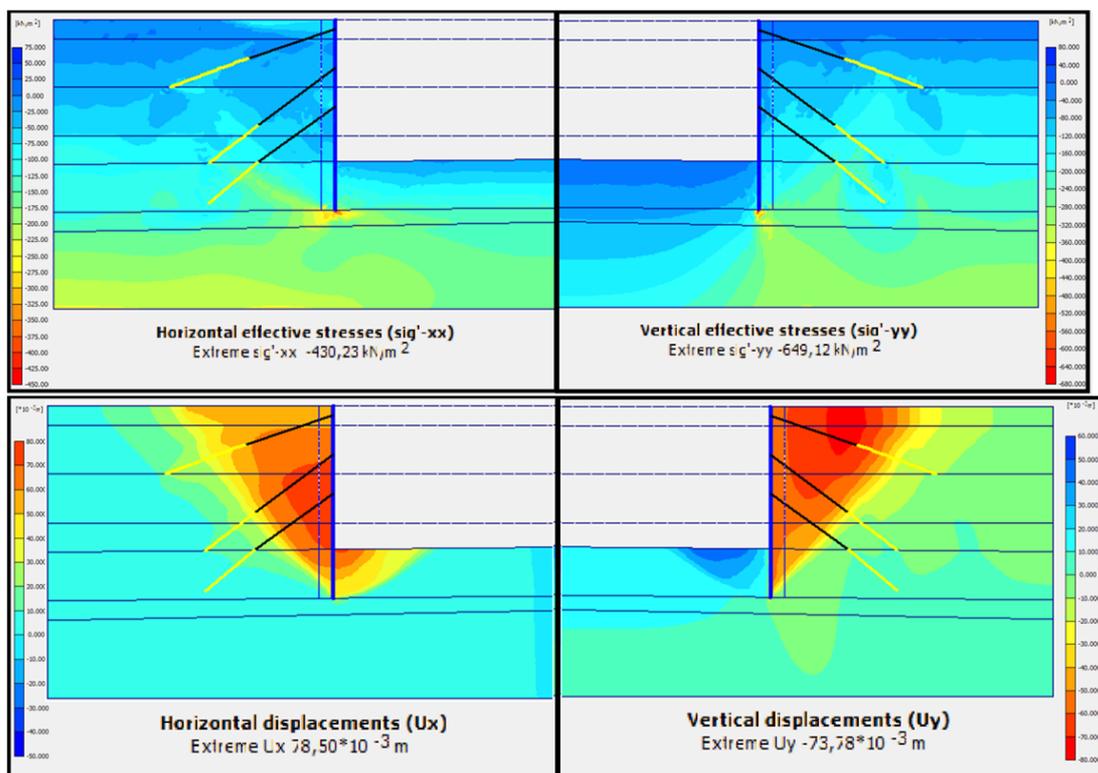


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние в грунтовом массиве после устройства анкерных свай

По результатам обследования подпорной стены подземного паркинга было принято решение об устройстве в верхней части подпорной стены буроинъекционных анкерных свай.

3. Численное моделирование

Для определения шага расстановки буроинъекционных анкерных свай, их длины и расчётного усилия, исходя из допустимого значения перемещения – не более 120 мм СП [7], было выполнено численное моделирование с использованием метода конечных элементов, реализованного в Plaxis 2D. На основании результатов инженерно-геологических изысканий в качестве грунтовой модели была выбрана упругопластическая модель с критерием прочности Кулона–Мора (рис. 2, 3) [2, 8, 9]. Угол расположения анкерных свай составил 15° по горизонтали, нижний конец упирался в слой малосжимаемого грунта (ИГЭ № 2) с E = 12 МПа.

По результатам численного моделирования максимальное возникающие усилие в анкерной свае составило 240 кН, при её длине 18 м, шаге расположения 1 м и максимальном перемещении стены – 79 мм.

4. Контрольные статические испытания свай

На площадке строительства были выполнены контрольные статические испытания для определения несущей способности свай (рис. 3) [10–12].

Нагружение буроинъекционной анкерной сваи осуществлялось ступенями по 50 кН и выдерживалось до условной стабилизации деформаций грунтового массива. Всего было испытано 3 буроинъекционных анкерных сваи через 21–23 суток после их устройства. Во время проведения испытаний нагрузка была доведена до значения в 300 кН, исходя из значения расчётной несущей способности $F_d = 0,8 \cdot 300 = 240$ кН. Максимальное перемещение



Рис. 3. Выполнение контрольных статических испытаний

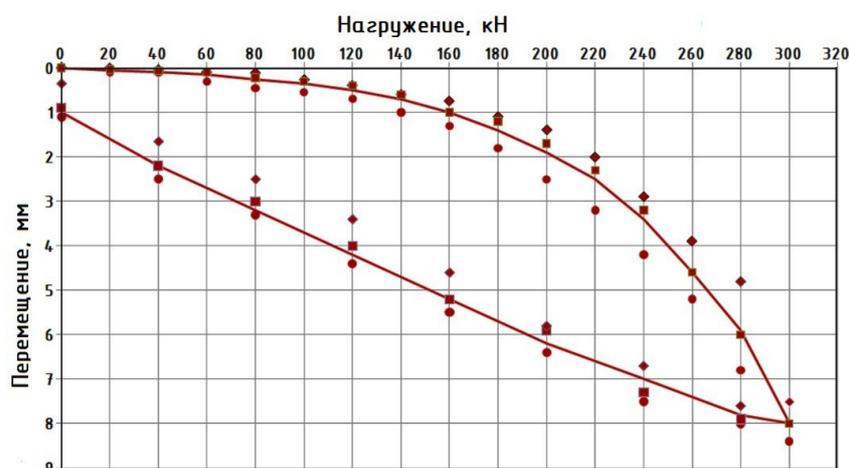


Рис. 4. График зависимости перемещения анкерной сваи от нагрузки

анкерной сваи по результатам контрольных статических испытаний составило 8 мм (рис. 4).

Несущая способность свай по результатам статических испытаний определяется по формуле п. 7.3.3 СП [10], кН:

$$F_d = \frac{\gamma_c F_{u,n}}{\gamma_g}, \quad (1)$$

где γ_c и γ_g – коэффициенты работы сваи и надёжности по грунту соответственно. По результатам статических испытаний для всех трёх свай несущая способность составила: $F_d = 0,8 \cdot 300 = 240$ кН.

5. Расчётный способ определения перемещения свай

Эффективность взаимодействия буроналивной анкерной сваи с пылевато-глинистым грунтовым массивом оценивается главным образом по значению её перемещения, которое происходит только за счёт развития сдвиговых деформаций в пределах уплотнённой зоны от границы уплотнённого ядра при превышении расчётного сопротивления грунта в данном слое [14–15]:

$$\begin{cases} \gamma(r) = \frac{\tau(r)}{G} \cdot \frac{\tau^*}{\tau^* - \tau(r)} \\ \gamma(r) = -\frac{ds(r)}{dr}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\gamma(r)$ – угловая деформация, м; G – модуль сдвига грунтового массива, кПа, п. 7.4.2 СП [10]:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

где E и ν – соответственно коэффициент Пуассона и модуль деформации; $\tau(r)$ – касательные напряжения, затухающие с увеличением расстояния от оси сваи r , кПа.

$$\tau(r) = \tau_u \cdot \frac{(r_c + u_1)}{r}, \quad (4)$$

r_c – начальный радиус скважины, который допускается принимать равным радиусу шнека, $r_c = 0,075$ м; τ^* – предельное значение касательных напряжений; u_1 – радиальное перемещение стенки скважины во время инъекции раствора, м, τ_u – касательные напряжения от действующей статической нагрузки

$$\tau_u = \frac{N}{2\pi(r_c + u_2)l}, \quad (5)$$

l – длина буроинъекционной анкерной сваи, м;
 N – действующая на анкер выдергивающая нагрузка, кН; $s(r)$ – перемещение анкерной сваи от действующей нагрузки;

Решение системы уравнений (2) приводит к следующему выражению:

$$s(r) = -\frac{\tau_u \tau^*}{G} \int \frac{dr}{\left(\tau^* \frac{r}{(r_c + u_1)} - \tau_u \right)} =$$

$$= -\frac{\tau_u (r_c + u_1)}{G} \ln \left(\frac{\tau^*}{(r_c + u_1)} r - \tau_u \right) + D, \quad (6)$$

где D – константа, определяемая из следующего граничного условия:

$$s(r = R_{\text{упл}}) = 0 \Rightarrow D = \frac{\tau_u (r_c + u_1)}{G} \times$$

$$\times \ln \left(\frac{\tau^*}{(r_c + u_1)} R_{\text{упл}} - \tau_u \right). \quad (7)$$

После проведения математических преобразований окончательно запишем выражение для определения перемещения буроинъекционной анкерной сваи:

$$s_1 = \frac{N}{\pi G (r_c + u_1)} \times$$

$$\times \ln \frac{\left(\frac{\tau^*}{(r_c + u_1)} R_{\text{упл}} - \frac{N}{\pi (r_c + u_1)^2} \right)}{\left(\tau^* - \frac{N}{\pi (r_c + u_1)^2} \right)}. \quad (8)$$

Несущая способность анкерной буроинъекционной сваи определяется по формуле [14]:

$$F_d = f_{\text{бок}} \gamma_{cf} = \gamma_{cf} \left(\sigma_{r2}^{\text{обж}} \operatorname{tg} \varphi + C_{\text{упл}} \right), \quad (9)$$

где γ_{cf} – коэффициент условий работы грунта,

$\gamma_{cf} = 0,7$ п. 7.6 СП [10]; $\sigma_{r2}^{\text{обж}}$ – радиальное обжатие грунтового массива, кПа:

$$\sigma_{r2}^{\text{обж}} = p_{\text{кр}2} + \sigma_{02}, \quad (10)$$

$p_{\text{кр}2}$ – критическое давление на стенку скважины, расширяющуюся под давлением инъекции раствора, определяется по формуле [15]:

$$p_{\text{кр}} = \frac{-2(\sigma_0 \sin \varphi_0 + c \cos \varphi_0)}{(w + 2) \sin \varphi + w}; \quad (11)$$

$$w = \frac{-A_{21} + A_{12} - 2A_{22} - \sqrt{A_{21}^2 - 2A_{21}A_{12} + A_{12}^2 + 4A_{22}A_{11}}}{2A_{22}}, \quad (12)$$

где $A_{11} = 1 - \nu^2$, $A_{12} = -\lambda \nu (1 + \nu)$, $A_{21} = -\nu (1 + \nu)$, $A_{22} = \lambda (1 - \nu^2)$;

σ_{02} – реактивное боковое давление, определяется по формуле:

$$\sigma_{02} = \gamma_{\text{гр}} z \frac{\nu}{1 - \nu}, \quad (13)$$

$C_{\text{упл}}$ – удельное сцепление, кПа, определяется по формулам [16].

Несущая способность буроинъекционной анкерной сваи составляет $F_d = 467,7$ кН.

Для определения перемещения анкерной буроинъекционной сваи воспользуемся формулой (8), подставив вместо значения τ^* значение F_d , определяемое по формуле (9):

$$s_5 = \frac{N}{2\pi l G} \ln \frac{\left(\frac{F_d}{(r_c + u_1)} R_{\text{упл}} - \frac{N}{2\pi (r_c + u_1) l} \right)}{\left(F_d - \frac{N}{2\pi (r_c + u_1) l} \right)}. \quad (14)$$

Графики сравнения зависимости перемещения буроинъекционной анкерной сваи от действующей нагрузки по результатам экспериментальных данных и решения по формуле (14) показаны на рис. 5. По графику величина перемещения при

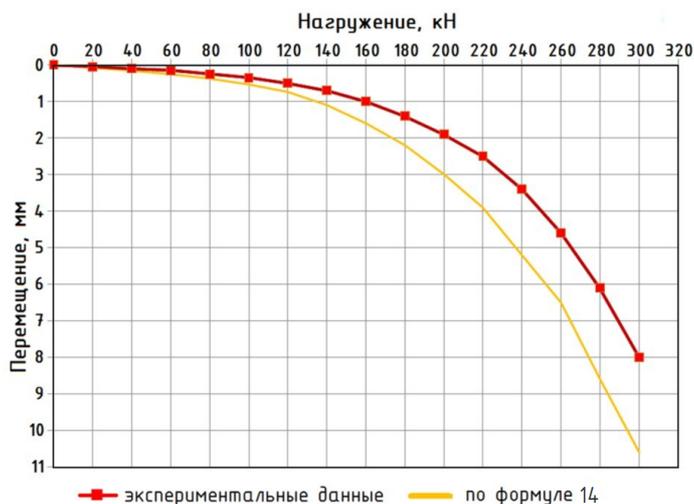


Рис. 5. Графики сравнения зависимости перемещения сваи от нагрузки

Теория расчета строительных конструкций

экспериментальной выдерживающей нагрузке 240 кН составила 5,2 мм, среднее отклонение в значениях нелинейной осадки составляет 22 %.

Выводы

1. Для надёжного усиления подпорных стен, выполненных по технологии устройства «стена в грунте», необходимо использовать анкерные буроинъекционные сваи, позволяющие выполнить работы с высокой степенью технологичности в сжатые сроки.

2. Для численного моделирования совместной работы подпорной стенки и буроинъекционных анкерных свай допустимо использовать программный комплекс Plaxis 2D с использованием модели грунтовой среды с критерием прочности Кулона-Мора, что подтверждается выполнением контрольных статических испытаний и геотехнического мониторинга.

3. Расчёты, выполненные по методике, основанной на решениях З.Г. Тер-Мартirosяна и упругопластичной модели С.П. Тимошенко [14, 15] позволяют с точностью до 22 % определить перемещение буроинъекционной анкерной сваи от действующей выдерживающей нагрузки в сравнении с контрольными полевыми статическими испытаниями в глинистых грунтах.

Литература

1. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах / Р.А. Мангушев, Н.С. Никифорова, В.В. Конюшков и др. – М., СПб.: Изд-во АСВ, 2013. – 256 с.
2. Улицкий, В.М. Геотехническое сопровождение развития городов / В.М. Улицкий, А.Г. Шапкин, К.Г. Шапкин. – СПб.: Стройиздат Северо-Запад, 2010. – 560 с.
3. Dinakar K.N., Prasad S.K. Behaviour of tie back sheet pile wall for deep excavation using Plaxis // *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2014. Vol. 3. No. 6. P. 97–103.
4. Gabrielaitis, L. Estimation of Settlements of Bored Piles Foundation / L. Gabrielaitis, V. Papinigris, G. Zarzojus // *Procedia Engineering*. – 2013. – Vol. 57. – P. 287–293.
5. Karol, R.H. *Chemical grouting and soil stabilization*. New York / R.H. Karol. Basel. Marcel Dekker, Inc. 2003. – 588 p.
6. Zheng, J.J. Prediction of the nonlinear pull-out response of FRP ground anchors using an analytical transfer matrix method / J.J. Zheng, J.G. Dai // *Engineering Structures*. – 2014. – Vol. 81. – P. 377–985.
7. СП 43.13330.2012 Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85/ Минрегион России. – М.: ОАО «ЦПП», 2012
8. Петрухин, В.П. Новые способы геотехнического строительства: науч. изд. / В.П. Петрухин, О.А. Шулятьев, О.А. Мозгачева. – М.: Изд-во АСВ., 2015. – 224 с.
9. Малинин, А.Г. Струйная цементация грунтов / А.Г. Малинин. – М.: ОАО изд-во «Стройиздат», 2010. – 226с.
10. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 / Минрегион России. – М.: ОАО «ЦПП», 2011.
11. СТО 223 НОСТРОЙ 2.3.18-2011. Освоение подземного пространства. Укрепление грунтов инъекционными методами в строительстве. – М., 2012.
12. СТО 109 НОСТРОЙ 109-2013. Освоение подземного пространства. Устройство грунтовых анкеров, нагелей и микросвай. Правила и контроль выполнения, требования к результатам работ. – М., 2013.
13. ГОСТ 5686-2012. Грунты. Методы полевых испытаний свай. – М.: Минстрой, 2012.
14. Тер-Мартirosян, З.Г. Взаимодействие анкеров с упругопластическим массивом грунта / З.Г. Тер-Мартirosян., В.С. Аванесов // *Вестник МГСУ*. – 2015. – № 7. – С. 47–56.
15. Тер-Мартirosян, З.Г. Механика грунтов: моногр. / З.Г. Тер-Мартirosян. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. – 550 с.
16. Полищук, А.И. Оценка работы разделительных ограждений в слабых глинистых грунтах, устраиваемых для защиты существующих зданий от влияния нового строительства / А.И. Полищук, А.С. Межаков // *Вестник Перм. нац. исследоват. политехн. ун-та. Строительство и архитектура*. – 2016. – № 2. – С. 124–131.

Самохвалов, Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры геотехники, Тюменский индустриальный университет (Тюмень), 89199431379@yandex.ru

Ашихмин, Олег Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры геотехники, Тюменский индустриальный университет (Тюмень), ashihminov@tyuiu.ru

Паронко, Александр Александрович, магистр кафедры геотехники, Тюменский индустриальный университет (Тюмень), alexparonko@gmail.com

Поступила в редакцию 2 октября 2017 г.

CALCULATED FORECAST ON INTERACTIONS OF AUGERCAST ANCHOR PILES WITH A SILTY-CLAYEY FOOT

M.A. Samokhvalov, O.V. Ashikhmin, A.A. Paronko

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

89199431379@yandex.ru

The paper describes a solution to the problem of strengthening the bulkhead wall of an underground three-storey parking by means of additional arrangement of augercast anchor piles in the upper part. An analysis of static tests' results for augercast anchor piles is given with drawn up graphs showing dependency of the piles' setting on the applied load. Calculations are performed to determine the main anchor pile parameters as per results of numerical simulation: length, spacing and load bearing capability. It is possible to use Plaxis 2D programming complex for numerical simulation of joint functioning of the bulkhead wall and the augercast anchor piles. The results of analytical calculations described in this paper will allow to determine displacement of an augercast anchor pile caused by pulling-out load as compared to control on-site static tests in clayey soil with an accuracy of up to 22 %.

Keywords: augercast anchor piles, silty-clayey soils, stress-strain state, static tests, numerical simulation.

References

1. Mangushev R.A., Nikiforova N.S., Konyushkov V.V., Osokin A.I., Sapin D.A. *Proektirovanie i ustroystvo podzemnykh sooruzheniy v otkrytykh kotlovanakh* [Design and Construction of Underground Structures in Open Trenches]. Moscow, St. Petersburg, ASV Publ., 2013. 256 p.
2. Ulitskiy V.M. Shashkin A.G., Shashkin K.G. *Geotekhnicheskoe soprovozhdenie razvitiya gorodov* [Geotechnical Support of Urban Development]. St. Petersburg, Stroyizdat Severo-Zapad Publ., 2010. 560 p.
3. Dinakar K.N., Prasad S.K. [Behaviour of tie back sheet pile wall for deep excavation using Plaxis]. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2014, vol. 3, no. 6, pp. 97–103.
4. Gabrielaitis L., Papinigis V., Zarzojus G., [Estimation of Settlements of Bored Piles Foundation]. *Procedia Engineering*. 2013, 57; pp. 287–293.
5. Karol, R.H. Basel. Marcel Dekker. [Chemical Grouting and Soil Stabilization]. New York, 2003. 588 p.
6. Zheng J.J., Dai J.G. [Prediction of the Nonlinear Pull-Out Response of FRP Ground Anchors Using an Analytical Transfer Matrix Method]. *Engineering Structures*, 2014, vol. 81, pp. 377–985.
7. SP 43.13330.2012 Sooruzheniya promyshlennykh predpriyatiy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.09.03-85 [Constructions of the Industrial Enterprises]. Moscow, OAO «TsPP» Publ., 2012.
8. Petrukhin V.P., Shulyat'ev O.A., Mozgacheva O.A. *Novye sposoby geotekhnicheskogo stroitel'stva* [New Ways of Geotechnical Construction], Moscow, Izdatel'sto ASV Publ., 2015. 224 p.
9. Malinin A.G. *Struy'naya tsementatsiya gruntov* [Jet Grouting]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2010. 226 p.
10. SP 24.13330.2011. *Svaynye fundamente* [Pile Foundations]. Moscow, OAO «TsPP» Publ., 2011.
11. STO 223 NOSTROY 2.3.18-2011. *Osvoenie podzemnogo prostranstva. Ukreplenie gruntov in"ektsionnymi metodami v stroitel'stve* [Development of Under-Ground Space. Ground Consolidation by Grouting Methods in Construction]. Moscow, 2012.
12. STO 109 NOSTROY 109-2013. *Osvoenie podzemnogo prostranstva. Ustroystvo gruntovykh ankerov, nageley i mikrosvay. Pravila i kontrol' vypolneniya, trebovaniya k rezul'tatam rabot* [Development of Under-Ground Space. Construction of Soil Anchors, Nogs and Micropiles. Rules and Performance Control, Requirements to Results of Works]. Moscow, 2013.
13. GOST 5686-2012. *Grunty. Metody polevykh ispytaniy svay* [Soils. Field Test Methods by Piles]. Moscow, Minstroy Publ., 2012.
14. Ter-Martirosyan Z.G., Avanesov V.S. [Interaction of Anchors with an Elastoplastic Soil]. *Vestnik MGSU Publ.*, 2015, no. 7, pp. 47–56 (in Russ.).

15. Ter-Martirosyan Z.G. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow, Izdatelstvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2009. 550 p.

16. Polishchuk A.I. Mezhakov A.S. [Assessment of Separating Barriers in Weak Clay Soils, Arranged to Protect the Existing Buildings from Impact of the New Construction]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Ser. Construction and Architecture*, 2016, no. 2, pp. 124–131 (in Russ.).

Received 2 October 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Самохвалов, М.А. Расчётный прогноз взаимодействия бурилинъекционных анкерных свай с пылевато-глинистым грунтовым основанием / М.А. Самохвалов, О.В. Ашихмин, А.А. Паронко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 28–34. DOI: 10.14529/build170404

FOR CITATION

Samokhvalov M.A., Ashikhmin O.V., Paronko A.A. Calculated Forecast on Interactions of Augercast Anchor Piles with a Silty-Clayey Foot. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2017, vol. 17, no. 4, pp. 28–34. (in Russ.). DOI: 10.14529/build170404