

DOI: 10.15593/24111678/2018.03.05

УДК 624.131.37

И.А. Исупов, С.А. Сазонова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ НАСЫПНЫХ ГРУНТОВ

Представлены результаты исследования возможности применения экспресс-методов при контроле качества уплотнения насыпных грунтов. На данный момент для определения качества уплотнения создаваемых оснований из насыпных грунтов используется трудоемкое и продолжительное лабораторное определение максимальной плотности и оптимальной влажности с последующим нахождением коэффициента уплотнения. При этом не уделяется достаточное внимание таким современным зарубежным методам, как экспресс-методы определения деформационных характеристик. Объектом исследования являются насыпные песчаные грунты. Песчаные грунты были выбраны по причине того, что данный вид грунта обладает однородной структурой и имеет хорошие деформационные характеристики при качественном уплотнении. Данное исследование проводилось в рамках планирования эксперимента. Его целью является сопоставление характеристик, получаемых экспресс-методами в лабораторных и полевых условиях с характеристиками, получаемыми при полевых испытаниях по методике, приведенной в нормативной литературе. Для достижения данной цели авторами было выполнено численное моделирование в программном комплексе Plaxis 2D, где рассмотрены основные методы проведения испытаний в полевых условиях по ГОСТ 20276–2012 и DIN 18134-201. Проанализированы возможные модели грунта, используемые при расчете, и выбрана упругопластическая грунтовая модель Мора – Кулона. Численное моделирование производилось с тремя типами песчаных грунтов; в ходе численного моделирования были рассмотрены три ситуации: испытания насыпных песчаных грунтов в полевых условиях эталонными методами, испытания в полевых условиях экспресс-методами и испытания в лабораторных условиях экспресс-методами. По результатам численного моделирования авторы определили значения осадки и поля деформаций грунта для каждого случая. Полученные результаты численного моделирования планируются в дальнейшем использовать при проведении лабораторных испытаний.

Ключевые слова: экспресс-методы, Plaxis 2D, испытания штампом, осесимметричная модель, насыпные грунты, контроль качества, численное моделирование, модель Мора – Кулона.

I.A. Isupov, S.A. Sazonova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

NUMERICAL MODELING OF FIELD AND LABORATORY TESTS OF FILL-UP SOILS

The present study is devoted to the question of the possibility of using express methods for controlling the quality of compaction of fill-up soils. At the moment, to determine the quality of compaction of the bases of fill-up soils, a laborious and prolonged laboratory determination of the maximum density and optimum humidity is used, followed by the finding of the compaction factor. At the same time, sufficient attention is not paid to such modern foreign methods as express methods for determining deformation characteristics. The object of the investigation is fill-up sandy soils. Sandy soils were chosen because this type of soil has a homogeneous structure and has good deformation characteristics at qualitative compaction. This study was conducted as part of the experiment planning. The purpose of this study is to compare the characteristics obtained by express methods in laboratory and field conditions with the characteristics obtained in field testing using the methodology given in the normative literature. To achieve this goal, the authors carried out numerical simulation in the Plaxis 2D software package, examining the main methods of field testing in accordance with GOST 20276-2012 and DIN 18134-201. The analysis of possible soil models used in the calculation was carried out, and the elastic-plastic soil model of Mora-Coulomb was chosen. Numerical modeling was carried out with three types of sandy soils. During the numerical simulation, three situations were considered: tests of fill-up sandy ground in field conditions by reference methods, field tests by express methods and testing in laboratory conditions by express methods. Based on the results of numerical simulation, the values of the sediment and the field of deformation of the soil for each case have been determined. The obtained results of numerical simulation are planned to be used later in the laboratory tests.

Keywords: express methods, Plaxis 2D, die tests, axisymmetric model, fill-up soils, quality control, numerical simulation, Mora-Coulomb model.

Экспресс-методы по сравнению с лабораторными и полевыми методами испытаний грунтов являются более предпочтительными методами контроля качества уплотнения насыпных грунтов [1]. С помощью этих методов можно определить деформационные характеристики грунтов оснований, проверить качество уплотнения насыпных грунтов. Данные методы требуют значительно меньше времени и при этом менее трудозатратны, что наиболее рационально с экономической точки зрения [2, 3]. Также экспресс-методы дают возможность доуплотнить грунт сразу после проведения испытаний. Ввиду отсутствия нормативной документации по контролю качества уплотнения насыпных грунтов и недостаточной исследовательской базы эти методы не получили широкого распространения на территории России. Для адаптации и создания нормативной базы по указанным методам их необходимо изучить и сопоставить с действующими методами контроля качества. Для достижения данной цели в будущем планируется провести серию лабораторных испытаний по определению деформационных характеристик насыпных песчаных грунтов эталонными и экспресс-методами. Однако перед проведением испытаний требуется спланировать эксперимент и спрогнозировать возможные результаты испытаний, для этого авторами было принято решение произвести численное моделирование планируемых испытаний с помощью программного комплекса Plaxis 2D.

Для изучения данных методов было выбрано численное моделирование в программном комплексе Plaxis 2D версии 8.2 [4]. Песчаные насыпи являются наиболее оптимальным вариантом в качестве оснований под фундаменты [5–7]. Благодаря однородной структуре и стойкости к деформации данный тип насыпи получил более широкое распространение по сравнению с другими типами насыпных грунтов [5], поэтому при моделировании различных ситуаций использовались три типа песчаных грунтов, характеристики которых представлены в табл. 1. Данные характеристики грунтов были приняты на основе справочного пособия для обработки материалов инженерно-геологических изысканий [8].

Таблица 1

Характеристики исследуемых песчаных грунтов

Характеристики песчаных грунтов	Крупность песка		
	мелкий	средний	крупный
Плотность ρ , г/см ³	1,93	1,96	1,97
Удельный вес γ_n , кН/м ³	18,93	19,23	19,33
Пористость e , %	0,60	0,55	0,54
Удельное сцепление c , кПа	3,0	2,0	1,0
Угол внутреннего трения ϕ , град	34	38	40
Модуль деформации E , МПа	33	40	40

Ввиду того что авторами статьи планируется проведение серий лабораторных испытаний по определению деформационных характеристик насыпных песчаных грунтов, было принято решение рассмотреть при численном моделировании три различных ситуации: испытания в полевых условиях по ГОСТ 20276–2012 (далее – эталонные испытания); испытания в полевых условиях по DIN 18134–2012 (далее – экспресс-испытания); экспресс-испытания в лабораторных условиях в лотке с размерами 1×1×1 м. В данном случае эталонные испытания по ГОСТ 20276–2012 принято считать эталонными, поскольку данные испытания отражены в нормативной литературе и успешно применяются при контроле качества уплотнения насыпных песчаных грунтов. Экспресс-испытания никак не отражены в нормативно-технической литературе РФ, поэтому их применение на территории нашей страны затруднительно, ввиду разногласий между заказчиком и исполнителем, а также отсутствия обоснований с помощью нормативных документов.

Согласно ГОСТ 20276–2012 «Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости» при испытаниях песков используют штамп площадью 2500 см². Согласно DIN 18134–2012 «Грунты строительные. Испытания и аппаратура для испытаний. Метод испытания давлением с применением грузовой плиты» используют штамп площадью 600 см². Разница в площади штампов существенна, поэтому одной из целей данного моделирования являлось сопоставление результатов испытаний двумя типами штампов.

При численном моделировании была принята осесимметричная модель грунтового массива, так как она наиболее точно отражает поведение круглого штампа [9–11]. Для моделирования полевых условий использовался грунтовый массив радиусом 1,5 м и глубиной 3,0 м. Для моделирования лабораторных условий, исходя из размеров лотка, был рассмотрен грунтовый массив радиусом 0,5 м и глубиной 1,0 м. Для проведения расчета была использована упруго-пластическая грунтовая модель Мора – Кулона, так как авторы заинтересованы в получении качественной картины деформаций, их соотношения между собой. Помимо модели Мора – Кулона зачастую применяют модель с упрочнением Hardening Soil, которая отличается тем, что поверхность текучести модели упрочняющегося грунта не зафиксирована в пространстве главных напряжений, а может расширяться вследствие пластического деформирования. В отличие от модели Мора – Кулона, данная модель учитывает в том числе зависимость модуля жесткости от напряжений. Это значит, что все параметры жесткости возрастают с увеличением давления [12–16].

Равномерно распределенная нагрузка передавалась на основание через жесткую плиту площадью 2500 см² и 600 см². Для большей точности сетка элементов была сгущена в области штампа. Нагрузка на оба типа штампов задавалась тремя ступенями согласно ГОСТ 20276–2012 – начиная с 0,1 МПа и заканчивая 0,3 МПа. При применении равномерно распределенной нагрузки удалось достичь одинакового давления под различными типами штампов, что свидетельствует об одинаковых начальных условиях задачи.

Результатами численного моделирования служат значения осадки грунта (табл. 2) под штампом в трех различных грунтовых условиях и поля деформаций для песка средней крупности (рис. 1, 2).

Таблица 2

Значения осадки штампа, мм

Тип грунта	Полевые испытания штампом 2500 см ²	Полевые испытания штампом 600 см ²	Лабораторные испытания штампом 600 см ²
Песок мелкий	9,94	6,25	4,57
Песок средний	7,08	4,49	3,32
Песок крупный	7,08	4,47	3,34

Согласно картине деформаций, полученной при моделировании испытания штампом площадью 600 см² в лабораторных условиях, можно сделать следующий вывод: применение данного типа штампа в лотке целесообразно, поскольку деформации в лотке размером 1×1×1 м затухают в пределах лотка, тем самым демонстрируя полную картину деформаций.

Сравнение полученных значений осадок при численном моделировании испытаний штампом площадью 2500 см² в полевых условиях и штампом 600 см² в лабораторных условиях представлено на рис. 3.

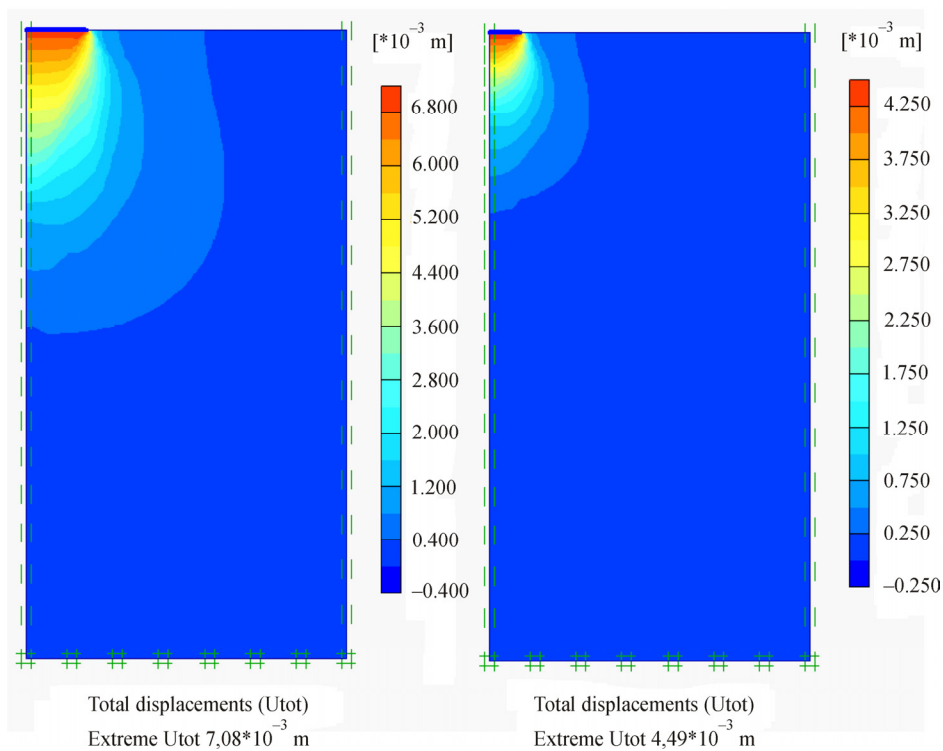


Рис. 1. Поля деформаций при испытании грунта: *a* – в полевых условиях штампом площадью 2500 см^2 ; *b* – в полевых условиях штампом площадью 600 см^2

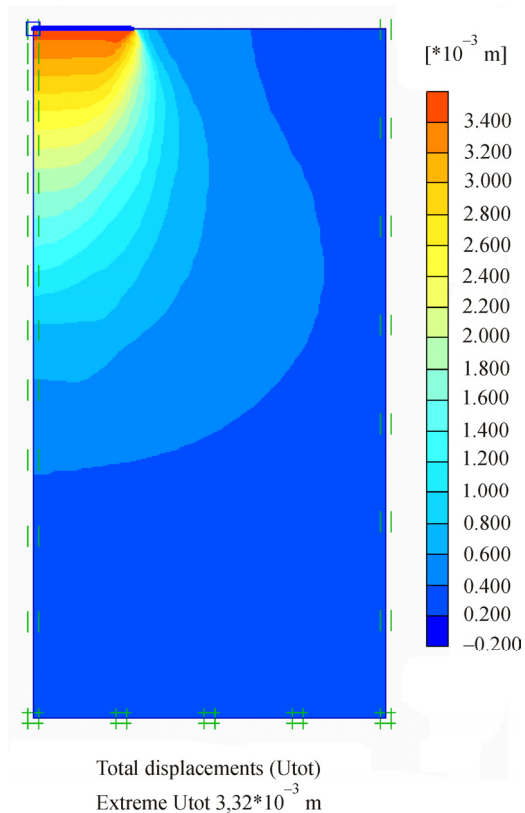


Рис. 2. Поля деформаций при испытании грунта в лабораторных условиях штампом площадью 600 см^2

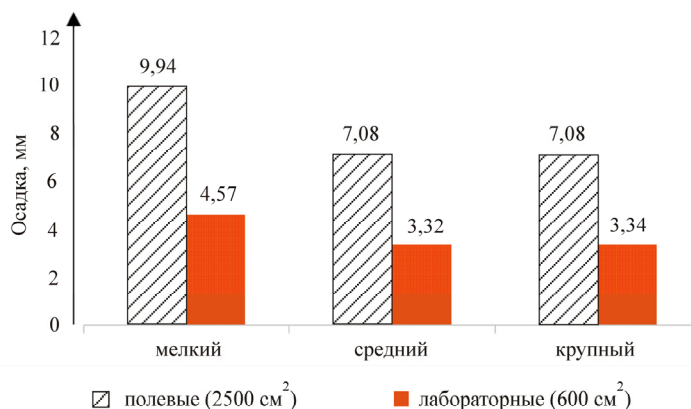


Рис. 3. Значения осадки полевых и лабораторных испытаний

По данной диаграмме видно, что значения осадки в полевых условиях превышают значения осадки в лабораторных условиях в 2,14 раза. Однако, согласно формуле, представленной в ГОСТ 0276–2012, модуль деформации грунта прямо пропорционален диаметру штампа и приращению давления и обратно пропорционален приращению осадки. Ввиду того что диаметр штампа площадью 2500 см² в два раза больше диаметра штампа площадью 600 см², можно сделать вывод, что определение модуля деформации полевыми испытаниями штампом 2500 см² соответствует лабораторным испытаниям штампом 600 см².

По результатам численного моделирования в дальнейшем планируется провести ряд лабораторных испытаний для оценки применимости экспресс-методов на практике, сравнив результаты испытаний, полученных экспресс-методами, с результатами эталонных испытаний.

Список литературы

1. Пономарев А.Б., Сазонова С.А., Румянцев С.Д. О современных методах экспресс-контроля характеристик насыпных грунтов // Геотехника. – 2017. – № 3. – С. 8–12.
2. Абелев М.Ю., Бахронов Р.Р., Джангидзе З.У. Об эффективности устройства уплотненной песчаной подушки в основаниях многоэтажных зданий и сооружений, расположенных на слабых грунтах // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 4. – С. 55–58.
3. Вашаломидзе Т.А., Филимонов Е.А. Современные технологии устройства уплотненных грунтовых оснований при строительстве зданий и сооружений в стесненных условиях // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – № 12. – С. 71–74.
4. Ивахов И.Л. Plaxis – геотехнические расчеты // CADmaster. – 2002. – № 1(11). – С. 58–60.
5. Крутов В.И., Глушко В.Т., Яланский А.А. Основания и фундаменты на насыпных грунтах. – М.: Стройиздат, 1988. – С. 4–42.
6. Костельов М.П., Никольский Ю.Е., Райский Ю.Э. Методы и средства контроля качества уплотнения дорожного земляного полотна, щебеночного основания и асфальтобетонного покрытия [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Стройка». – 2003. – URL: <http://library.stroit.ru/articles/control> (дата обращения: 05.05.2018).
7. Сазонова С.А., Румянцев С.Д. Применение экспресс-методов для определения характеристик насыпных грунтов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – № 3. – С. 113–120.
8. Симончик С.Г., Куранов Н.П. Справочное пособие для обработки материалов инженерно-геологических изысканий. – М.: ДАРВОДГЕО, 2005. – С. 10–14.
9. Александрова Н.П., Семенова Т.В. Совершенствование методов экспресс контроля уплотнения грунтов в земляном полотне лесных дорог. Ч. 1. Обобщающая математическая модель // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 6–2(48). – С. 10–14.

10. Chen D-H, Bilyeu J., He, R. Comparison of Resilient Moduli Between Field and Laboratory Testing: A Case Study Paper number 990591 // Annual Transportation Research Board Meeting. Washington D.C. – 1999. – № 78 – С. 10–14.

11. Maria J.S. The application of the modern method of embankment compaction control // Journal of Civil Engineering and Management. – 2004. – № 10. – С. 45–50.

12. Салимгариева Н.И., Калошина С.В. Выбор модели грунта для выполнения геотехнических расчетов в программном комплексе Plaxis // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии. – 2012. – № 1. – С. 1–4.

13. Салимгариева Н.И., Калошина С.В. Параметры грунтового массива, вводимые при расчете в программном комплексе Plaxis // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии. – 2012. – № 1. – С. 1–4.

14. Строкова Л.А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – № 1. – С. 69–74.

15. Gouw T.L. Common Mistakes on the Application of Plaxis 2D in Analyzing Excavation Problems // International Journal of Applied Engineering Research. – 2014. – № 21. – С. 8291–8311.

16. Сравнительный анализ численного моделирования системы «здание – фундамент – основание» в программных комплексах SCAD и PLAXIS / Р.А. Мангушев, И.И. Сахаров, В.В. Конюшков, С.В. Ланько // Вестник гражданских инженеров. – 2010. – № 3(24). – С. 96–101.

References

1. Ponomarev A.B., Sazonova S.A., Rumjancev S.D. O sovremennyh metodah jekspress-kontrolja karakteristik nasypnyh gruntov [On modern methods of express control of characteristics of bulk soils]. *Geotekhnika*, 2017, no. 3, pp. 8-12.

2. Abelev M.Ju., Bahronov R.R., Dzhangidze Z.U. Ob jeffektivnosti ustrojstva uplotnenoj peschanoj podushki v osnovanijah mnogojzaznyh zdaniy i sooruzhenij, raspolozhennyh na slabych gruntah [On the effectiveness of a compacted sand cushion in the bases of multi-storey buildings and structures located on weak soils]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2014, no. 4, pp. 55-58.

3. Vashalomidze T.A., Filimonov E.A. Sovremennye tehnologii ustrojstva uplotnennyh gruntovyh osnovanij pri stroitel'stve zdaniy i sooruzhenij v stesnennyh uslovijah [Modern technologies of the device of the condensed ground bases at building of buildings and constructions in the constrained conditions]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2011, no. 12, pp.71-74.

4. Ivakhov I.L. Plaxis – geotekhnicheskie raschety [Plaxis – geotechnical calculations]. *CADmaster*, 2002, no. 1(11), pp. 58-60.

5. Kostel'ov M.P., Nikol'skij Ju.E., Rajsckij Ju.Je. Metody i sredstva kontrolja kachestva uplotnenija dorozhnogo zemljanogo polotna, shhebenochnogo osnovanija i asfal'tobetonnoogo pokrytija [Bases and foundations on loose soils]. Moscow, Stroyizdat, 1988, pp. 4-42.

6. Kostel'ov M.P., Nikol'skiy Yu.Ye., Rayskiy Yu.E. Metody i sredstva kontrolya kachestva uplotneniya dorozhnogo zemlyanogo polotna, shchebenochnogo osnovanija i asfal'tobetonnoogo pokrytiya [Methods and means of quality control of compaction of road roadbed, crushed stone foundations and asphalt-concrete pavement]. *Stroyka*, 2003, available at: <http://library.stroit.ru/articles/control> (accessed 05 May 2018).

7. Sazonova S.A., Rumjancev S.D. Primenenie jekspress-metodov dlja opredelenija karakteristik nasypnyh gruntov [Application of express methods for determining the characteristics of loose soils]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2017, no. 3, pp. 113-120.

8. Simonchik S.G., Kuranov N.P. Spravochnoe posobie dlja obrabotki materialov inzhenerno-geologicheskikh izyskanij [Reference manual for processing materials of engineering and geological surveys]. Moscow, DAR/VODGEO, 2005, pp. 10-14.

9. Aleksandrova N.P., Semenova T.V. Sovershenstvovanie metodov jekspress kontrolja uplotnenija gruntov v zemljanom polotne lesnyh dorog. Chast' 1. Obobshhajushhaja matematicheskaja model' [Improvement of methods for express control of soil compaction in the roadbed of forest roads. Part 1. Generalizing mathematical model]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2016, no. 6-2(48), pp. 10-14.

10. Chen D-H., Bilyeu J., He R. Comparison of resilient moduli between field and laboratory testing: A case study paper number 990591. *Annual Transportation Research Board Meeting. Washington D.C.*, 1999, no.78, pp. 10-14.

11. Maria J.S. The application of the modern method of embankment compaction control. *Journal of civil engineering and management*, 2004, no. 10, pp. 45-50.

12. Salimgarjeva N.I., Kaloshina S.V. Vybora modeli grunta dlja vypolnenija geotekhnicheskikh raschetov v programmnom komplekse Plaxis [Selection of soil model for geotechnical calculations in the Plaxis software complex]. *Stroitel'stvo i arkhitektura. Opyt i sovremennyye tekhnologii*, 2012, no. 1. pp. 1-4.

13. Salimgarjeva N.I., Kaloshina S.V. Parametry gruntovogo massiva, vvodimye pri raschete v programmnom komplekse Plaxis [Parameters of the soil massif introduced during calculation in the Plaxis software complex]. *Stroitel'stvo i arkhitektura. Opyt i sovremennyye tekhnologii*, 2012, no. 1, pp. 1-4.

14. Strokova L.A. Opredelenie parametrov dlja chislennogo modelirovaniya povedeniya gruntov [Determination of parameters for numerical simulation of soil behavior]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, 2008, no. 1, pp. 69-74.

15. Gouw T.L. Common mistakes on the application of plaxis 2D in analyzing excavation problems. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2014, no. 21, pp. 8291-8311.

16. Mangushev R.A., Saharov I.I., Konjushkov V.V., Lan'ko S.V. Sravnitel'nyj analiz chislennogo modelirovaniya sistemy «zdanie–fundament–osnovanie» v programmnyh kompleksah SCAD i PLAXIS [Comparative analysis of numerical simulation of the building-foundation-foundation system in SCAD and PLAXIS software complexes]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*, 2010, no. 3(24), pp. 96-101.

Получено 07.06.2018

Об авторах

Исупов Илья Андреевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: isupivia59@gmail.com).

Сазонова Светлана Александровна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: feliks150@mail.ru).

About the authors

Ilya A. Isupov (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Construction Production and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: isupivia59@gmail.com).

Svetlana A. Sazonova (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Construction Production and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: feliks150@mail.ru).