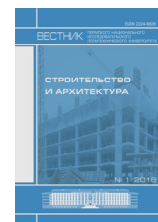




**ВЕСТНИК ПНИПУ.  
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**  
Т. 9, № 3, 2018  
**PNRPU BULLETIN.  
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**  
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.03

УДК 692.115

## **НЕКОТОРЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ПЛОТНОМЕРА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТА**

**С.А. Сазонова, А.Б. Пономарев**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### **О СТАТЬЕ**

Получена: 22 января 2018

Принята: 14 мая 2018

Опубликована: 28 сентября 2018

### **Ключевые слова:**

методы экспресс-контроля уплотнения грунта, динамический штамп, динамический модуль упругости, коэффициент уплотнения, компрессионный модуль деформации, теоретический метод.

### **АННОТАЦИЯ**

При контроле уплотнения и определении деформационных характеристик грунта в зарубежной строительной практике активно применяются экспресс-методы. Ранее авторами был выполнен обзор данных методов и выбран метод динамического штампа для дальнейших исследований. Метод динамического штампа обладает преимуществами, такими как малая трудоемкость и быстрота выполнения экспериментов, более того, существуют теоретические предпосылки использования метода динамического штампа, что может способствовать нахождению функциональной зависимости между деформационными характеристиками грунта. В статье представлен анализ существующей теоретической методики определения осадки грунта от действия ударной трамбовки. Поскольку воздействие на грунт от удара трамбовки и в результате применения метода динамического штампа схоже, становится возможным использование данной методики для анализа динамического модуля упругости, полученного при испытаниях динамическим штампом. Для определения применимости данного метода авторами были проведены экспериментальные исследования. Метод динамического штампа реализуется при помощи динамического плотномера ДПГ-1.2. Динамический плотномер представляет собой устройство, состоящее из направляющей штанги, падающего груза и штампа, а также датчиков измерения силы и ускорения. Описание программы экспериментов приведено. По результатам экспериментов после отброса промахов при помощи аппроксимации были построены следующие зависимости: зависимость динамического модуля упругости и компрессионного модуля деформации от коэффициента уплотнения грунта; зависимость компрессионного модуля деформации и модуля упругости, определенного при помощи теоретического метода, от коэффициента уплотнения. Получившиеся зависимости проанализированы и даны рекомендации по оценке деформационных характеристик грунта.

© ПНИПУ

© Сазонова Светлана Александровна – аспирант, старший преподаватель, e-mail: feliks150@yandex.ru.

Пономарев Андрей Будимирович – доктор технических наук, профессор, e-mail: spstf@pstu.ru.

Svetlana A. Sazonova – Postgraduate Student, Senior Lecturer, e-mail: feliks150@yandex.ru.

Andrey B. Ponomaryov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: spstf@pstu.ac.ru.

## SOME PREMISES OF THE APPLICATION OF DYNAMIC DENSIMETER FOR THE DETERMINATION OF SOIL DEFORMATION MODULUS

S.A. Sazonova, A.B. Ponomaryov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 22 January 2018  
Accepted: 14 May 2018  
Published: 28 September 2018

#### Keywords:

methods of express control of soil compaction, dynamic stamp, the dynamic modulus of elasticity, the compression ratio, the compression modulus of deformation, the theoretical method

### ABSTRACT

Express methods are actively used in the control of compaction and determining the deformation characteristics of the soil in foreign construction practice. Earlier, the authors have made an overview of methods and selected method of dynamic stamp for further research. The method of dynamic stamping has the following advantages: low labor intensity and speed of experiments, moreover, there are theoretical prerequisites for the use of the method of dynamic stamping, which can help to find a functional relation between the deformation characteristics of the soil. In the present work the analysis of existing theoretical methods for the calculation of the soil from the action of the shock of ramming. Since the impact on the soil from the impact of the tamper and the method of dynamic stamp is similar, it is possible to use this technique to analyze the dynamic modulus obtained during the dynamic stamp tests. To determine the applicability of this method, the authors conducted experimental studies. The method of dynamic die is implemented using dynamic density meter DPG 1.2. Dynamic density meter is a device consisting of a guide rod, a falling load and a die, as well as sensors for measuring force and acceleration. The description of the program of experiments is given. The results of the experiments after removal of gross errors using the approximation was built by the following dependencies: dependency of the compression deformation modulus and dynamic modulus of elasticity of the compression ratio; the dependence of the compression modulus of deformation and modulus of elasticity is determined using the theoretical method of compaction ratio. The resulting dependences are analyzed and recommendations are given for assessing the deformation characteristics of the soil.

© PNRPU

В настоящее время в зарубежной строительной практике активно применяются экспресс-методы для контроля уплотнения и определения деформационных характеристик грунта. Применение данных методов обусловлено их малой трудоемкостью и быстротой выполнения. Данные преимущества позволяют увеличить количество испытаний и сгустить сетку контроля. В России контроль уплотнения основан на анализе коэффициента уплотнения грунта, полученного согласно ГОСТ 22733–2016; контроль деформационных характеристик, а именно – модуля деформации, производится на основании ГОСТ 20276–2012. В настоящее время между этими характеристиками не выявлено функциональной зависимости, однако существует ряд работ по исследованию корреляции между ними [1–4]. Данные методы контроля, по сравнению с экспресс-методами, являются достаточно точными, но в то же время их трудоемкость значительно выше.

Авторами был выполнен обзор данных методов и выбран метод динамического штампа для дальнейших исследований [5]. Изучением данного метода занимались за рубежом С. Adam, D. Adam, K. Fritz, Neil K. Singh и Paul. R. Fleming [6–11], в нашей стране данный вопрос исследовали Н.П. Александрова, Т.В. Семенова, Н.А. Троценко, С.Д. Румянцев [1, 4, 5]. Метод динамического штампа обладает следующими преимуществами:

1. Малая трудоемкость и быстрота выполнения экспериментов. Благодаря скорости выполнения становится возможным увеличение количества испытаний и сгущение сетки контроля. Следствием этого является оперативный контроль качества уплотнения насыпных грунтов и возможность корректировать проектные решения на стадии производства работ.

2. Существуют теоретические предпосылки использования метода динамического штампа, что может способствовать нахождению функциональной зависимости между деформационными характеристиками грунта. В настоящей работе произведен анализ существующей методики определения осадки грунта от действия ударной трамбовки [12]. Поскольку воздействие на грунт от удара трамбовки и в результате применения метода динамического штампа схоже, становится возможным применение данной методики.

Метод динамического штампа реализуется при помощи динамического плотномера ДПГ-1.2 [13, 14], который представляет собой устройство, состоящее из направляющей штанги, падающего груза и штампа, а также датчиков измерения силы и ускорения (рис. 1).



Рис. 1. Динамический плотномер ДПГ-1.2  
Fig. 1. Dynamic densitometer DPG-1.2

Методика определения деформаций грунта от действия трамбовки основана на рассмотрении колеблющейся массы грунта в виде призмы определенной высоты с площадью поперечного сечения, соответствующей площади жесткой трамбовки, передающей динамические нагрузки. При решении рассматривается совместное динамическое взаимодействие двух тел: трамбовки и грунтовой призмы [12]. Решение задачи определения осадки от действия ударной трамбовки выглядит следующим образом:

$$s_{\text{пл}} = \frac{P}{C \cdot F} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot C \cdot F \cdot H \cdot m_{\text{т}}}{P \cdot (m_{\text{т}} + m_{\text{пр}})}}, \quad (1)$$

где  $P$  – вес трамбовки, Н;  $C$  – коэффициент постели, Н/м<sup>3</sup>;  $F$  – площадь трамбовки, м<sup>2</sup>;  $H$  – высота падения трамбовки, м;  $m_{\text{т}}$  – масса трамбовки, кг;  $m_{\text{пр}}$  – масса присоединенной части грунта, кг.

$$m_{\text{пр}} = \frac{\bar{m}_{\text{гр}}}{k^2 \cdot h} \cdot \left(1 - \frac{k \cdot h}{\text{tg}(kh)}\right), \quad (2)$$

где  $\bar{m}_{гр}$  – погонная масса грунта, кг/м;  $h$  – высота грунтового цилиндра, м,  $h = \frac{1-\mu}{1-\mu-2\cdot\mu^2} \cdot \frac{E}{C}$ ;

$k$  – коэффициент,  $\frac{1}{M}$ , определяется формулой  $k \cdot \text{tg}(kh) = \frac{\bar{m}_{гр}}{m_{т}}$ .

Таким образом, необходимыми параметрами для расчета по данной методике являются:  $E, \mu, \rho_{гр}, C, F \cdot H \cdot m_{т}, P$ .

Видоизменяя формулу (1), получим следующее соотношение:

$$m_{пр} = \sqrt{\frac{2 \cdot H \cdot P \cdot m_{т}}{C \cdot F \cdot S_{пл}} - m_{т}}. \quad (3)$$

Далее становится возможным определить  $k$  и  $h$ , решив систему уравнений:

$$\begin{cases} h = \frac{\bar{m}_{гр}}{k^2 \cdot (m_{пр} + m_{т})}, \\ k \cdot \text{tg}\left(\frac{\bar{m}_{гр}}{k^2 \cdot (m_{пр} + m_{т})}\right) = \frac{\bar{m}_{гр}}{m_{т}}. \end{cases} \quad (4)$$

На последнем этапе определяется модуль деформации [12]:

$$E_c = \frac{h \cdot C}{\frac{1-\mu}{1-\mu-2\cdot\mu^2}}. \quad (5)$$

Таким образом, при помощи динамического плотномера возможно определение модуля деформации грунта.

Для определения достоверности данного метода авторами были проведены экспериментальные исследования [15]. Порядок их выполнения представлен на рис. 2.

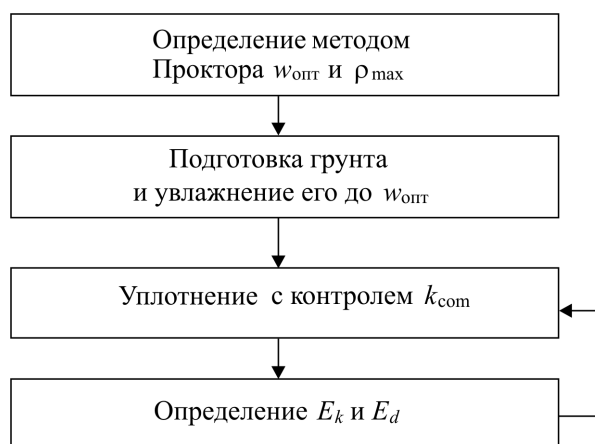


Рис. 2. Программа экспериментальных исследований

Fig. 2. Program of experimental research

На первом этапе экспериментов был определен гранулометрический состав ситовым методом в соответствии с ГОСТ 12536–2014. Согласно результатам измерений грунт является однородным крупным песком. Далее определялись максимальная плотность и оптимальная влажность с помощью прибора стандартного уплотнения согласно

ГОСТ 22733–2016. Проведенные испытания показали, что максимальная плотность –  $1,73 \text{ г/см}^3$  – достигается при оптимальной влажности 13,44 %.

Для проведения серий испытаний по выявлению деформационных характеристик использовался лоток диаметром 70 см. Динамический модуль упругости определялся при помощи динамического плотномера ДПГ-1.2, компрессионный модуль деформации – в компрессионном приборе в интервале давлений 0,1–0,2 МПа.

Всего было выполнено 15 серий испытаний. При каждой серии контролировались плотность и влажность грунта путем отборов трех проб при 1/3 высоты заполнения, 2/3 высоты заполнения и с поверхности грунта. После получения трех значений производилось осреднение значений для каждой серии.

По результатам экспериментов после отброса промахов при помощи аппроксимации были построены следующие зависимости: зависимость компрессионного модуля деформации и динамического модуля упругости от коэффициента уплотнения (рис. 3); зависимость компрессионного модуля деформации и модуля деформации, определенного при помощи теоретического метода по формуле (5), от коэффициента уплотнения (рис. 4).

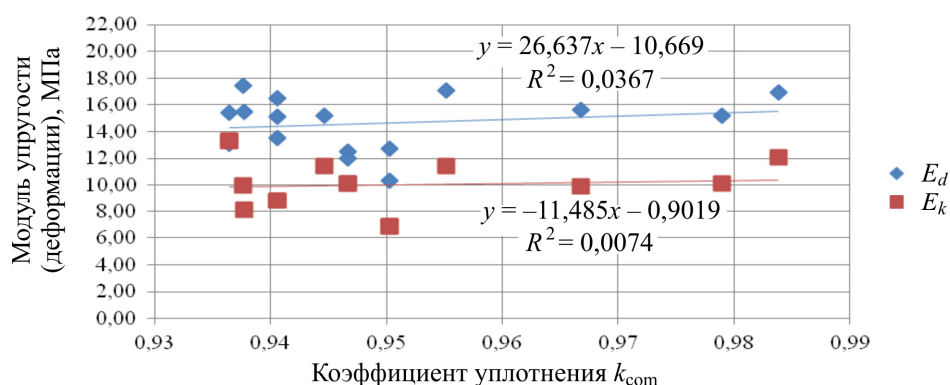


Рис. 3. Зависимость компрессионного модуля деформации и динамического модуля упругости от коэффициента уплотнения.  $E_d$  – динамический модуль деформации грунта, определяемый ДПГ-1.2;  $E_k$  – компрессионный модуль деформации

Fig. 3. Dependence of the compression modulus of deformation and dynamic modulus of elasticity on the compaction ratio.  $E_d$  – the dynamic modulus of deformation of soil is determined by DPG-1.2;  $E_k$  – compression deformation modulus

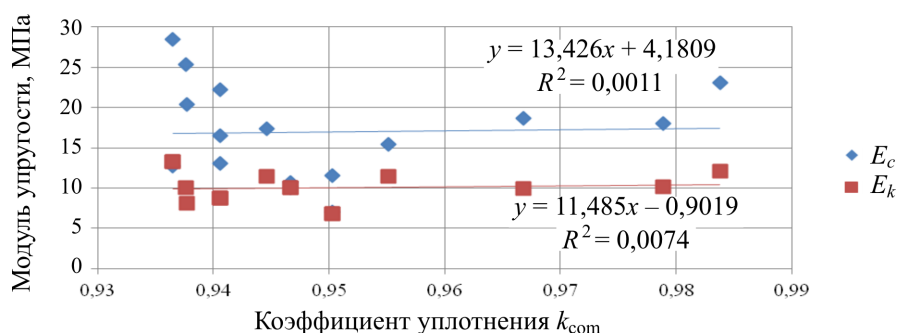


Рис. 4. Аппроксимирующая функция, полученная при помощи теоретической методики.  $E_c$  – модуль деформации грунта, полученный по формуле (5);  $E_k$  – компрессионный модуль деформации

Fig. 4. The approximation function obtained by using theoretical methods.  $E_c$  – soil deformation modulus obtained by formula (5);  $E_k$  – compression deformation modulus

Анализируя полученные графики, можно сделать следующие выводы:

1. При увеличении коэффициента уплотнения значения компрессионного модуля деформации и динамического модуля упругости не изменяются более чем на 30 % от значений, полученных путем аппроксимации, что говорит о незначительном их изменении при коэффициенте уплотнения, варьирующемся в диапазоне от 0,93 до 0,98.

2. Аппроксимирующие функции изменения компрессионного модуля деформации и динамического модуля упругости имеют хорошее соответствие в диапазоне от 0,93 до 0,98. Более высокие значения динамического модуля упругости объясняются тем, что при динамическом воздействии на грунт успевают пройти в основном только упругие деформации. При корректировке функции получим

$$E_k \approx E_d - 4,8 \text{ МПа.} \quad (6)$$

При определении модуля деформации по теоретическому методу по формуле (5) необходимо корректировать результат с помощью следующей зависимости:

$$E_k \approx E_c - 7 \text{ МПа.} \quad (7)$$

В данном случае аппроксимирующие функции практически совпадают, что является преимуществом, однако имеется достаточно большой разброс значений модуля деформации, определенного данным методом (до 12 МПа). Это обстоятельство является основным недостатком данного метода.

## Библиографический список

1. 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.
2. Пономарев А.Б., Сазонова С.А. О некоторых результатах исследований насыпных грунтов // Известия вузов. Строительство. – 2016. – № 2. – С. 109–116.
3. Сиденко В.М., Батраков О.Т., Покутнев Ю.А. Дорожные одежды с парогидроизоляционными слоями. – М.: Транспорт, 1984. – 144 с.
4. Александрова Н.П., Троценко Н.А. Применение измерителя жесткости грунта Geo-Gauge для оценки качества уплотнения при операционном контроле // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2014. – № 3. – С. 40–47.
5. Румянцев С.Д., Сазонова С.А., Пономарев А.Б. О современных методах экспресс-контроля характеристик насыпных грунтов // Геотехника. – 2017. – № 3. – С. 4–8.
6. Test Equipment for Geotechnics, Earthworks and Pavements // TIC service group. – URL: [http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2011/11/Modelling\\_of\\_Dynamic\\_Load\\_Plate\\_Test\\_with\\_ZFG\\_2000.pdf](http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2011/11/Modelling_of_Dynamic_Load_Plate_Test_with_ZFG_2000.pdf) (дата обращения: 19.04.2018).
7. Test Equipment for Geotechnics, Earthworks and Pavements // TIC service group. – URL: [http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2011/11/Investigation\\_of\\_ZFG\\_2000\\_using\\_Boundary\\_Element\\_Method.pdf](http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2011/11/Investigation_of_ZFG_2000_using_Boundary_Element_Method.pdf) (дата обращения: 19.04.2018).
8. Test Equipment for Geotechnics, Earthworks and Pavements // TIC service group. – URL: [http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/Use\\_of\\_the\\_Light\\_Weight\\_Deflectometer.pdf](http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/Use_of_the_Light_Weight_Deflectometer.pdf) (дата обращения: 19.04.2018).

9. Test Equipment for Geotechnics, Earthworks and Pavements // TIC service group. – URL: [http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2007\\_uk\\_portable\\_fwd\\_evaluation.pdf](http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2007_uk_portable_fwd_evaluation.pdf) (дата обращения: 19.04.2018).

10. Chen D.-H., Bilyeu J., He R. Comparison of resilient moduli between field and laboratory testing: A Case Study Paper number 990591 // 78th Annual Transportation Research Board Meeting. Washington D.C., January 10–14, 1999.

11. Maria J.S. The application of the modern method of embankment compaction control // Journal of Civil Engineering and Management. – 2004. – Vol. X, suppl. 1. – P. 45–50.

12. Снитко Н.К. Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стенок. – М.: Госстройиздат, 1963. – 293 с.

13. Приборы неразрушающего контроля [Электронный ресурс] / НПП Интерприбор. – URL: <https://www.interpribor.ru/assets/userfiles/11/116/Dpg-12.pdf> (дата обращения: 10.05.2018).

14. Сазонова С.А., Пономарев А.Б. О некоторых результатах исследований насыпных грунтов // Известия вузов. Строительство. – 2016. – № 2. – С. 109–116.

15. 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. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.13

## References

1. Aleksandrova N.P., Semenova T.V. Soveshenstvovanie metodov ekspress kontrolja uplotnenija gruntov v zemljanom polotne lesnyh dorog. Chast 1. Obobshhajushhaja matematicheskaja model [Improvement methods Express seal control soil subgrade of forest roads. Part 1: Generalizing mathematical model]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, 2016, no. 6–2 (48), pp. 10–14.

2. Ponomarev A.B., Sazonova S.A. O nekotoryh rezultatah issledovanij nasypnyh gruntov [Some results of bulk soil research]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitelstvo*, 2016, no. 2, pp. 109-116.

3. Sidenko V.M., Batrakov O.T., Pokutnev Yu.A. Dorozhnye odezhdyy s paro-gidroizolyacionnymi slojami [Pavement with paro-a waterproofing layers]. Moscow, Transport, 1984. 144 p.

4. Aleksandrova N.P., Trocenko N.A. Primenenie izmeritelya zhestkosti grunta GeoGauge dlya ocenki kachestva uplotneniya pri operacionnom kontrole [The application of the meter of the soil stiffness GeoGauge to evaluate the quality of the seal when operating the control]. *Vestnik sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii*, 2014, no. 3, pp. 40-47.

5. S.D. Rumyanцев, S.A. Sazonova, A.B. Ponomarev. O sovremennyh metodah ehkspress-kontrolya harakteristik nasypnyh gruntov [About modern methods of Express control of the characteristics of bulk soil]. *Geotekhnika*, 2017, no. 3, pp. 4-8.

6. Test Equipment for Geotechnics, Earthworks and Pavements. TIC service group, available at: [http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2011/11/Modelling\\_of\\_Dynamic\\_Load\\_Plate\\_Test\\_with\\_ZFG\\_2000.pdf](http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2011/11/Modelling_of_Dynamic_Load_Plate_Test_with_ZFG_2000.pdf) (accessed 19 April 2018).

7. Test Equipment for Geotechnics, Earthworks and Pavements. TIC service group, available at: [http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2011/11/Investigation\\_of\\_ZFG\\_2000\\_using\\_Boundary\\_Element\\_Method.pdf](http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2011/11/Investigation_of_ZFG_2000_using_Boundary_Element_Method.pdf) (accessed 19 April 2018).

8. Test Equipment for Geotechnics, Earthworks and Pavements. TIC service group, available at: [http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/Use\\_of\\_the\\_Light\\_Weight\\_Deflectometer.pdf](http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/Use_of_the_Light_Weight_Deflectometer.pdf) (accessed 19 April 2018).

9. Test Equipment for Geotechnics, Earthworks and Pavements. TIC service group, available at: [http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2007\\_uk\\_portable\\_fwd\\_evaluation.pdf](http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2007_uk_portable_fwd_evaluation.pdf) (accessed 19 April 2018).

10. Chen D-H, Bilyeu J., He, R. Comparison of Resilient Moduli Between Field and Laboratory Testing: A Case Study Paper number 990591. *78th Annual Transportation Research Board Meeting*. Washington D.C., January 10-14, 1999.

11. Maria J.S. The application of the modern method of embankment compaction control. *Journal of civil engineering and management*, 2004, vol. X, Suppl 1, pp. 45-50.

12. Snitko N.K. Statische i dinamicheskie davleniya gruntov i raschet podpornykh stenok [Static and dynamic pressure of soils and calculation of retaining walls]. Moscow, Gosstrojizdat, 1963, 293 p.

13. Pribory nerazrushajushhego kontrolja [Non-destructive testing device], available at: <https://www.interpribor.ru/assets/userfiles/11/116/Dpg-12.pdf> (accessed 10 May 2018).

14. Sazonova S.A., Ponomarev A.B. O nekotorykh rezul'tatah issledovanij nasypnykh gruntov [About some results of researches of bulk soils]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo*, 2016, no. 2, pp. 109-116

15. Sazonova S.A., Rumiantsev S.D. Primenenie ehkspress-metodov dlya opredeleniya harakteristik nasypnykh gruntov [Application of express methods for determination of characteristics of fill soils]. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 113-120. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.13