



DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.11

УДК 692.115

## **НАТУРНЫЕ ШТАМПОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ АРМИРОВАННЫХ ФУНДАМЕНТНЫХ ПОДУШЕК**

**Д.А. Татьянанников, А.Б. Пономарев**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 07 июня 2017

Принята: 25 июля 2017

Опубликована: 29 сентября 2017

#### *Ключевые слова:*

армированная фундаментная подушка, грунтовая месдоза, грунтовая марка, несущая способность, георешетка

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрены штамповые испытания натуральных моделей армированных фундаментных подушек в реальных инженерно-геологических условиях города Перми. Данные испытания являются завершающим экспериментальным этапом в рамках изучения несущей способности армированных фундаментных подушек. На первом экспериментальном этапе было выполнено численное моделирование, по результатам которого были сформулированы основные параметры работы армированных фундаментных подушек. Перед проведением натуральных испытаний были выполнены модельные штамповые исследования различных типов армированных фундаментных подушек, которые были сформулированы на основании результатов численного моделирования. Результаты проведенных модельных штамповых испытаний позволили выявить качественные параметры работы, выявить рациональную конструкцию армированных фундаментных подушек. С целью проверки результатов численного моделирования и модельных штамповых испытаний, а также выяснения реальной несущей способности армированных фундаментных подушек были проведены натурные штамповые испытания специально подготовленных армированных фундаментных подушек.

Основной целью экспериментальных работ явилось получение реальных параметров работы армированных фундаментных подушек. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- выявить закономерность развития осадок армированных фундаментных подушек под нагрузкой путем построения экспериментальных графиков зависимости «осадка – давление»;
- оценить несущую способность при предельной осадке в 12 см;
- изучить напряженно-деформированное состояние основания, улучшенного армированной фундаментной подушкой, под нагрузкой путем замеров напряжений и деформаций при помощи грунтовых месдоз и марок.

Решение данных задач позволит перейти к разработке методики расчета несущей способности армированных фундаментных подушек.

© ПНИПУ

© Татьянанников Даниил Андреевич – аспирант, ассистент, e-mail: [danco777@mail.ru](mailto:danco777@mail.ru).

Пономарев Андрей Будимирович – доктор технических наук, профессор, e-mail: [andreypab@mail.ru](mailto:andreypab@mail.ru).

Daniil A. Tat'iannikov – Postgraduate Student, Assistant, e-mail: [danco777@mail.ru](mailto:danco777@mail.ru).

Andrei B. Ponomarev – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: [andreypab@mail.ru](mailto:andreypab@mail.ru).

## FULL-SCALE TESTING OF REINFORCED FOUNDATION PADS

D.A. Tat`iannikov, A.B. Ponomarev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 07 June 2017  
Accepted: 25 July 2017  
Published: 29 September 2017

#### Keywords:

reinforced foundation pad, soil pressure cell, soil mark, bearing capacity, geogrid

### ABSTRACT

This article considers stamping tests of full-scale models of reinforced foundation pads in real engineering and geological conditions of the city of Perm. These tests entail the final experimental stage in studying the bearing capacity of reinforced foundation pads. Numerical modeling was performed at the first experimental stage, the results of which were used to formulate the basic operation parameters of the reinforced foundation pads. Before the full-scale tests, model stamping tests of various types of reinforced foundation pads had been made and formulated on the basis of the numerical modeling results. The results of the model stamping tests made it possible to clarify the qualitative parameters of the work, to reveal the rational design of the reinforced foundation pads. In order to check the results of numerical modeling and model stamping tests, as well as to find the real bearing capacity of the reinforced foundation pads, full-scale stamping tests of specially prepared reinforced foundation pads were carried out.

The main purpose of the experimental work is to obtain real parameters for the operation of reinforced foundation pads. To achieve this goal, certain objectives were identified, such as:

- identify the regularity of settlement for the reinforced foundation pads under load by constructing the experimental plots of the "settlement-pressure" dependence;
- estimate the bearing capacity at a maximum settlement of 12 cm;
- study the stress-strain state of the base of the improved reinforced foundation pad under load by measuring stresses and deformations using soil pressure cells and marks.

The solution of these problems will develop a technique of calculating the bearing capacity of reinforced foundation pads.

© PNRPU

Эксперименты проводились на опытной площадке, расположенной на территории базы ОАО «Пермдорстрой» в п. Осенцы Пермского района. Характеристики грунтов основания представлены в табл. 1. Схема экспериментального стенда приведена на рис. 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики грунтов основания

Table 1

Physical and mechanical properties of soils base

Наименование грунта	Характеристики грунта			
	Модуль деформации $E$ , МПа	Сцепление $c$ , кПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Удельный вес $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>
Суглинок мягкопластичный	8,7	14	16	19,1

Перед проведением испытаний на площадке был удален плодородный слой и выкопан шурф глубиной 1,2 м до суглинка мягкопластичного, который служил основанием подушки. Предварительно до начала устройства модели фундаментной подушки были отобраны образцы грунта основания с целью уточнения его физико-механических характеристик [1, 2]. По результатам компрессионных и сдвиговых испытаний были получены уточненные характеристики грунта основания, которые представлены в табл. 1.

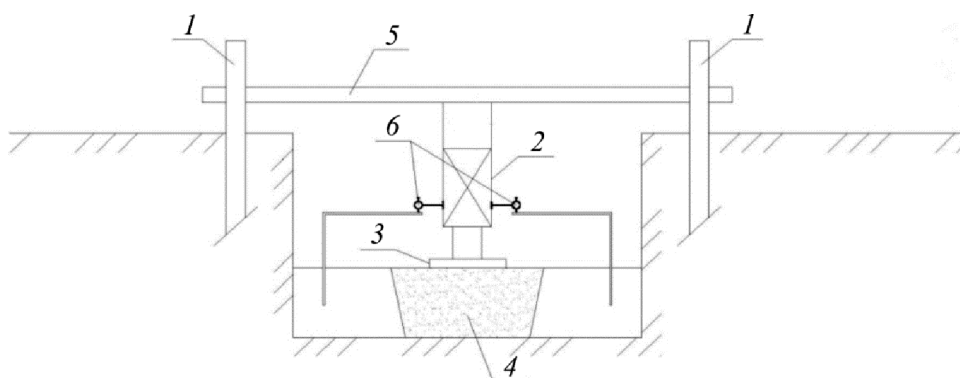


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – анкеры; 2 – гидравлический домкрат; 3 – жесткий штамп; 4 – фундаментальная подушка; 5 – упорная балка; 6 – индикаторы часового типа  
 Fig. 1. The scheme of the experimental stand: 1 are the anchors; 2 is the hydraulic jack; 3 is the hard stamp; 4 is the foundation pad; 5 is the persistent beam; 6 are the mercer clock gauges

В качестве модели фундамента использовался жесткий металлический штамп площадью  $600 \text{ см}^2$ ,  $d = 275 \text{ мм}$  для соблюдения параметров подобия, подошва штампа была обработана для придания ей шероховатости. Основные положения о проведении испытаний были приняты аналогично модельным штамповым испытаниям [3, 4]. Нагрузка на штамп передавалась при помощи гидравлического домкрата, который опирался в специально изготовленную металлическую упорную балку, через ручную насосную станцию (см. рис. 1).

Для устройства фундаментальных подушек использовался песок средней крупности с подсчитанными [4] физико-механическими характеристиками, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические характеристики песка

Table 2

Physical and mechanical properties of sand

Характеристика грунта	Обозначение, единица измерения	Значения характеристик
Удельный вес	$\gamma$ , $\text{кН/м}^3$	16
Коэффициент пористости	$e$	0,6
Удельное сцепление	$c$ , $\text{кПа}$	1,4
Угол внутреннего трения	$\varphi$ , град	30
Модуль общей деформации	$E_0$ , $\text{МПа}$	29

Для исследования напряженно-деформированного состояния грунтового основания были изготовлены грунтовые месдозы [5], а также грунтовые марки, разработанные В.А. Лаврентьевым [2]. Грунтовая марка представляет собой металлическую пластину, установленную в грунт. Регистрация измерений производится путем жестко закрепленной к пластине металлической шпильки, выпуск которой выходит на поверхность земли с упором в индикатор часового типа. Для исключения трения по контакту «грунт – шпилька» она пропусклась через тонкостенную металлическую трубку. Перед установкой в грунтовой массив грунтовых марок и месдоз ручным ямобуром были подготовлены скважины, которые после установки датчиков засыпались грунтом. Для стабилизации показаний месдоз интервал после их установки в грунтовой массив и начала испытаний составил 15–20 сут [6–8]. После установки грунтовых месдоз формировалась фундаментальная подушка путем отсыпки песка с послойным уплотнением, коэффициент уплотнения был принят  $k_{уп} = 0,95$ . Для контроля уплотнения использовался статический плотномер СПГ-1 [4].

Схемы расстановки месдоз и грунтовых марок были приняты индивидуально для каждой схемы испытаний, которые представлены на рис. 2, 3.

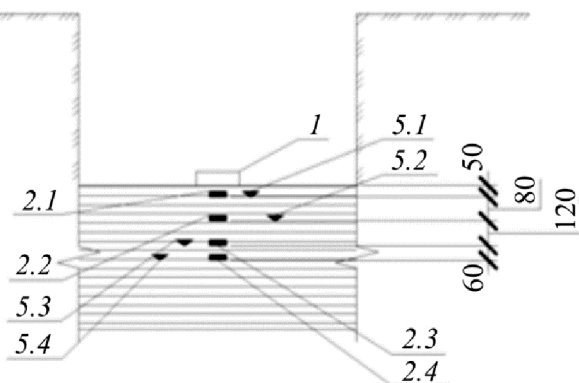


Рис. 2. Схема испытаний № 1. Неулучшенный грунт основания: 1 – жесткий штамп; 2 – грунтовые месдозы (2.1–2.4 – номера месдоз); 5 – грунтовые марки (5.1–5.4 – номера марок)  
 Fig. 2. Test scheme number 1. Unimproved base soil: 1 is the hard stamp; 2 are the soil pressure cells (2.1–2.4 is the number of soil pressure cells); 5 are the soil marks (5.1–5.4 is the number of soil marks)

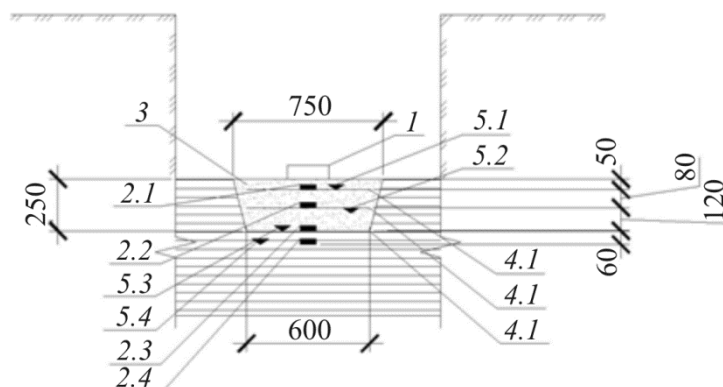


Рис. 3. Схема испытаний № 2. Подушка, армированная георешеткой: 1 – жесткий штамп; 2 – грунтовые месдозы (2.1–2.4 – номера месдоз); 3 – фундаментная подушка; 4 – георешетка; 5 – грунтовые марки (5.1–5.4 – номера марок)  
 Fig. 3. Test scheme number 2. The pad is reinforced with a geogrid: 1 is the hard stamp; 2 are the soil pressure cells (2.1–2.4 is the number of soil pressure cells); 3 is the foundation pad; 4 is the geogrid; 5 are the soil marks (5.1–5.4 is the number of soil marks)

Схемы испытаний были приняты на основании результатов модельных штамповых испытаний [3]. В качестве армирующего материала была выбрана георешетка Secugrid [9–11] с шагом армирования  $\Delta h = (n - 1) \cdot 100 + 200$ , где  $n$  – номер армирующего слоя [12].

Нагрузка на штамп передавалась при помощи гидравлического домкрата через ручную насосную станцию ступенями по 10 кПа до достижения предельной нагрузки. От одной ступени нагружения к другой переход совершался после условной стабилизации осадки, равной 0,1 мм, за 1 ч [3]. Измерение осадки штампа осуществлялось при помощи двух индикаторов часового типа ИЧ-50 как среднее арифметическое двух измерений. Параллельно с замером осадки штампа проводился замер перемещений грунтовых марок, а также непрерывно в течение испытания велась регистрация напряжений в грунтовых месдозах.

Первой задачей экспериментальных исследований явилась установка закономерности развития осадки штампа от приложенной нагрузки. Для решения данной задачи по результатам проведенных испытаний были построены графики зависимости «осадка – давление» для всех схем испытаний (рис. 4).

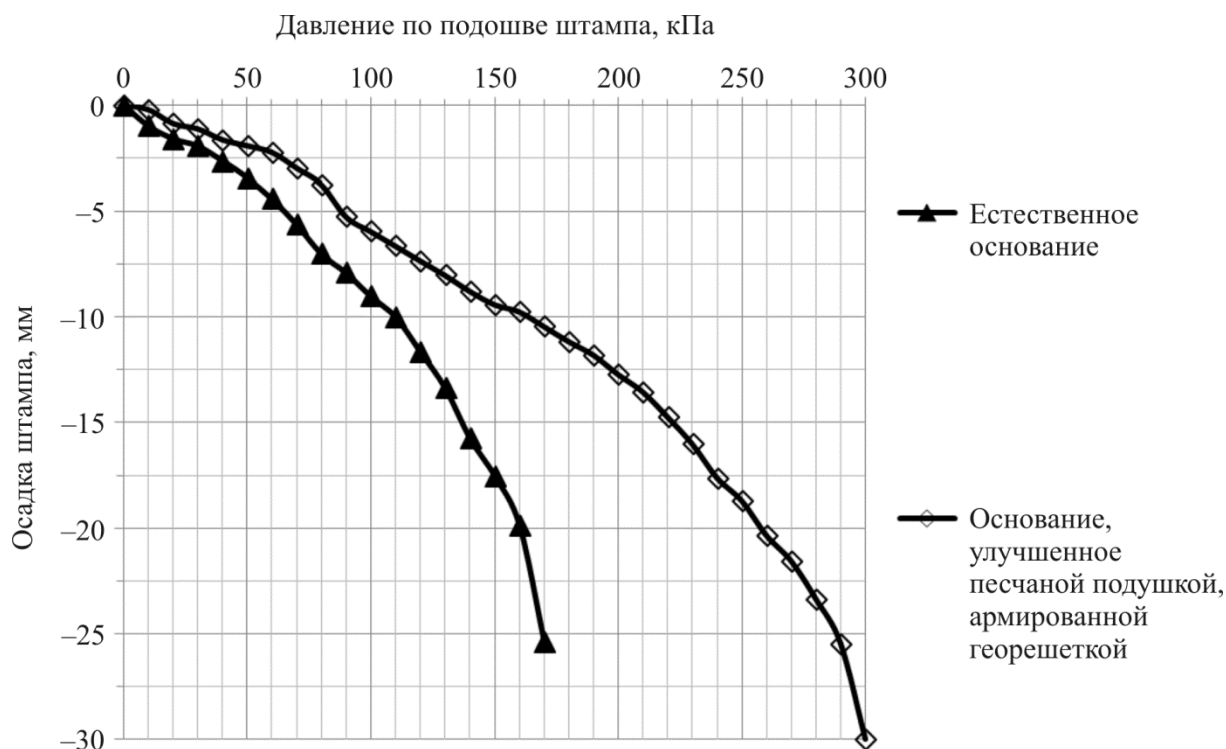


Рис. 4. Графики зависимости «осадка – давление» для различных схем проведения испытаний  
Fig. 4. The graphs of the settlement-pressure relation for different test schemes

После установления данных зависимостей была определена величина несущей способности при предельной осадке 12 см: она составила для естественного основания 120 кПа, для основания, улучшенного фундаментной подушкой, – 200 кПа. Полученные зависимости в целом подтверждают ранее полученные качественные параметры работы армированных фундаментных подушек. Можно также сделать вывод о том, что опытная фундаментная подушка позволяет существенно снизить осадки штампа при аналогичных ступенях давления по сравнению с естественным основанием. В целом применение в качестве метода улучшения грунтового основания песчаных фундаментных подушек, армированных георешеткой, позволяет снизить осадку, по сравнению с естественным основанием, до 35 %. Фундаментная подушка способна воспринимать больший диапазон приложенной нагрузки по сравнению с естественным основанием. Георешетка как армирующий материал вступает в работу после достижения песком фазы уплотнения при давлении приблизительно 80–90 кПа.

По аналогии с модельными штамповыми испытаниями в процессе проведения испытаний проводился замер напряжений при помощи грунтовых мессдоз. Его результаты представлены в виде графика зависимости «вертикальные напряжения – глубина мессдозы» (рис. 5).

Исходя из анализа полученных зависимостей, можно сделать следующие выводы. Распределение напряжений в грунтовой массе происходит по классическим представлениям механики грунтов. При невысоком диапазоне давлений (до 80 кПа) распределение напряжений в случае естественного основания и основания, улучшенного армированной фундаментной подушкой, качественно имеет схожие зависимости. При увеличении давления на штамп (см. график 2 на рис. 5) происходит «включение в работу» армирующего геосинтетического материала (георешетки), и, как следствие, за счет перераспределения напряжений под георешеткой мессдоза регистрирует меньшие значения напряжений. При дальнейшем увеличении давления перераспределение напряжений под георешеткой имеет более явный характер (см. график 3 на рис. 5) [13–15].

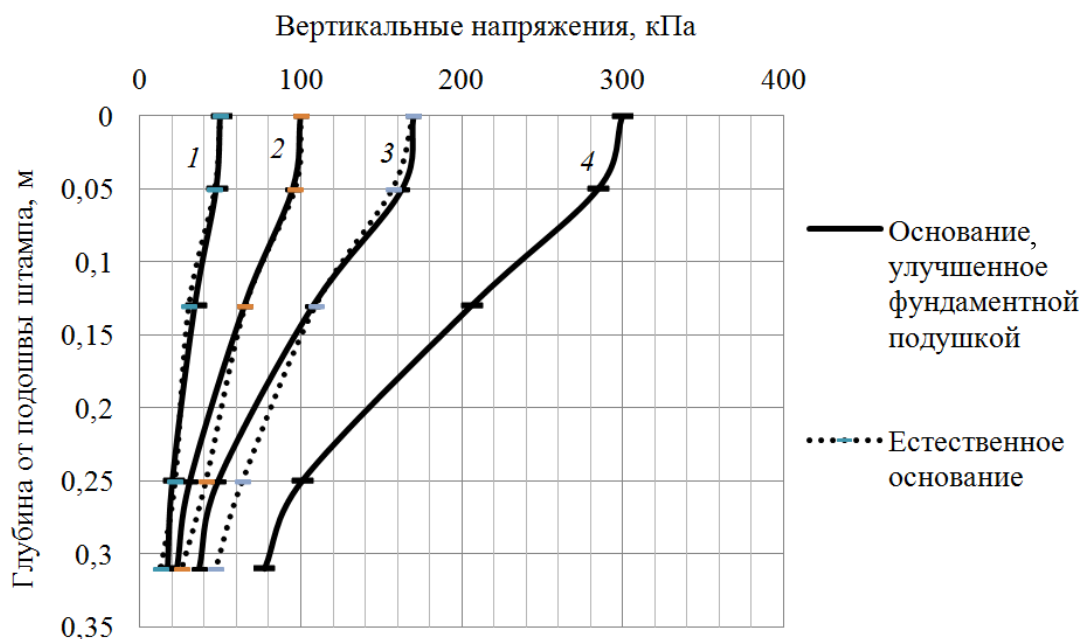


Рис. 5. Экспериментальные значения вертикальных напряжений по глубине грунтового массива: 1 – давление на штамп 50 кПа; 2 – давление на штамп 100 кПа; 3 – давление на штамп 170 кПа; 4 – давление на штамп 300 кПа

Fig. 5. Experimental values of vertical stresses over the depth of the soil massif: 1 is the pressure on the stamp of 50 kPa; 2 is the pressure on the stamp of 100 kPa; 3 is the pressure on the stamp of 170 kPa; 4 is the pressure on the stamp of 300 kPa

Совместно с изучением распределений напряжений проводился замер перемещения грунтовых марок. Полученные экспериментальные данные совпадают с классическими механизмами развития осадок в грунтовой толще. Неравномерность осадки грунтовых марок по глубине значительно меньше в случае основания, улучшенного армированной фундаментной подушкой. Также при испытаниях армированной фундаментной подушки на глубине 0,3 м от подошвы штампа наблюдается уменьшение значений осадки (угасание).

По результатам выполненных экспериментальных работ можно сделать следующие выводы:

1. Полученные зависимости в целом подтверждают ранее полученные качественные параметры работы армированных фундаментных подушек.
2. Фундаментная подушка позволяет существенно снизить осадки штампа при аналогичных ступенях давления по сравнению с естественным основанием.
3. Несущая способность при предельной осадке 12 см армированной фундаментной подушки на 40 % больше по сравнению с естественным основанием.
4. Напряженно-деформированное состояние армированной фундаментной подушки существенно отличается от естественного основания. Данное отличие обусловлено внедрением армирующих элементов, которые перераспределяют напряжения в грунтовом массиве и, как следствие, позволяют снижать осадку. Наиболее характерное перераспределение напряжений начинается с глубины 0,15 м от подошвы штампа.
5. Георешетка как армирующий материал вступает в работу после достижения песком фазы уплотнения при давлении приблизительно 80–90 кПа.

## Библиографический список

1. Шенкман Р.И., Пономарев А.Б., Усманов Р.А. Полунатурные экспериментальные исследования грунтовых свай в оболочке из геосинтетических материалов // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 1 (42). – С. 54–60.
2. Клевеко В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния армированных оснований в пылевато-глинистых грунтах: дис. ... канд. техн. наук / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2002. – 152 с.
3. Татьянников Д.А., Пономарев А.Б. Исследование напряженного состояния армированных фундаментных подушек при помощи модельных штамповых испытаний // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 1 (60). – С. 120–126.
4. Татьянников Д.А., Клевеко В.И., Пономарев А.Б. Анализ работы армированного песчаного основания на основе штамповых модельных испытаний // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2012. – № 4 (8). – С. 92–102.
5. Шенкман Р.И. Расчет осадок слабых глинистых оснований, улучшенных вертикальными грунтовыми элементами в оболочке из геосинтетического материалов: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2016.
6. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по прогнозу осадки крупномасштабной модели ленточно-оболочечного фундамента [Электронный ресурс] / З.Г. Тер-Мартirosян, Я.А. Пронозин, Л.Р. Епифанцева, О.С. Порошин // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – URL: <http://www.science-education.ru/122-20927> (дата обращения: 10.05.2017).
7. Клевеко В.И. Исследование работы армированных глинистых оснований // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 101–110.
8. Бай В.Ф., Краев А.Н. Исследование работы песчаной армированной по контуру подушки с криволинейной подошвой в условиях слабых глинистых грунтов // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 3 (44). – С. 107–110.
9. Татьянников Д.А. Изучение механических характеристик геосинтетических материалов для определения реальной несущей способности армированных фундаментных подушек // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 6. – С. 121–127.
10. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals / A.A. Bartolomey, V.I. Kleveko, V.G. Ofrikhter, A.B. Ponomaryov, A.N. Bogomolov // Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure. Proceedings of the 12th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Amsterdam, 1999. – Vol. 2. – P. 1197–1202.
11. Melo D.L.A., Santos E.C.G. Shear strength of RCDW/nonwoven geotextile interface // 10th International Conference on Geosynthetics – Berlin, 2014. – Vol. 7.
12. Татьянников Д.А., Пономарев А.Б. Численное моделирование работы конструкций армированных фундаментных подушек // Вестник Моск. гос. строит. ун-та. – 2016. – № 11. – С. 21–31. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.21-31
13. Static liquefaction behavior of saturated fiber-reinforced sand / J. Liu, T. Kamai, F. Zhang, J. Yang, B. Shi // Geotextiles and Geomembranes. – 2011. – № 29. – P. 462–471.
14. Ponomaryov A., Zolotoubov D. Several approaches for the design of reinforced bases on karst areas // Geotextiles and Geomembranes. – 2014. – № 42. – P. 48–51. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.12.002>

15. Анализ влияния различных типов армирования на деформационные характеристики глинистого грунта / А.Н. Богомолов, А.Б. Пономарев, А.В. Машенко, А.С. Кузнецова // Интернет-вестник Волгогр. гос. арх.-строит. ун-та. Сер. Политематическая. – 2014. – Вып. 4 (35). – С. 11.

## References

1. Shenkman R.I., Ponomarev A.B. Usmanov R.A. Polunaturnye eksperimental'nye issledovaniia gruntovykh svai v obolochke iz geosinteticheskikh materialov [Semi-field experimental studies of soil piles in a shell of geosynthetic materials]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2014, no. 1 (42), pp. 54-60.

2. Kleveko V.I. Otsenka napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia armirovannykh osnovanii v pylevato-glinistykh gruntakh [Estimation of the stress-strain state of reinforced bases in silty-clay soils]. Ph. D. thesis. Perm', 2002, 152 p.

3. Tatiannikov D.A., Ponomarev A.B. Issledovanie napriazhennogo sostoianiia armirovannykh fundamentnykh podushek pri pomoshchi model'nykh shtampovykh ispytaniy [Investigation of the stressed state of reinforced foundation pads by means of model die tests]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2017, no. 1 (60), pp. 120-126.

4. Tatiannikov D.A., Kleveko V.I., Ponomarev A.B. Analiz raboty armirovannogo peschanogo osnovaniia na osnove shtampovykh model'nykh ispytaniy [Analysis of the operation of a reinforced sand base on the basis of die model tests]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2012, no. 4 (8), pp. 92-102.

5. Shenkman R.I. Raschet osadok slabykh glinistykh osnovanii, uluchshennykh vertikal'nymi gruntovymi elementami v obolochke iz geosinteticheskogo materialov [Calculation of the sediment of weak clay bases, improved by vertical soil elements in a shell of geosynthetic materials]. Ph. D. thesis, Perm', 2016.

6. Ter-Martirosian Z.G., Pronozin Ia.A., Epifantseva L.R., Poroshin O.S. Sopostavlenie raschetnykh i eksperimental'nykh dannykh po prognozu osadki krupnomasshtabnoi modeli lentochno-obolochchnogo fundamenta [Comparison of calculated and expert data on the draft forecast of a large-scale band-shell foundation model]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2015, no. 2; available at: <http://www.science-education.ru/122-20927> (accessed 1 April 2017).

7. Kleveko V.I. Issledovanie raboty armirovannykh glinistykh osnovanii [Investigation of the operation of reinforced clay bases]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 4, pp.101-110.

8. Bai V.F., Kraev A.N. Issledovanie raboty peschanoi armirovannoi po konturu podushki s krivolineinoy podoshvoi v usloviakh slabykh glinistykh gruntov [Investigation of the operation of a sandy reinforced pad with a curved sole in conditions of weak clay soils]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2014, no. 3(44), pp. 107-110.

9. Tatiannikov D.A. Izuchenie mekhanicheskikh kharakteristik geosinteticheskikh materialov dlia opredeleniia real'noi nesushchei sposobnosti armirovannykh fundamentnykh podushek [The study of the mechanical characteristics of geosynthetic materials for determining the actual bearing capacity of reinforced foundation pads]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2015, no. 6, pp. 121-127.



10. Bartolomey A.A., Kleveko V.I., Ofrikhter V.G., Ponomarev A.B., Bogomolov A.N. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals. *Geotechnical engineering for transportation infrastructure. Proceedings of the 12th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, Amsterdam, June 1999, vol. 2, pp. 1197-1202.
11. Melo D.L.A., Santos E.C.G. Shear strength of RCDW/nonwoven geotextile interface. *10th International Conference on Geosynthetics*, Berlin, 2014, vol.7.
12. Tatiannikov D.A., Ponomarev A.B. Chislennoe modelirovanie raboty konstruksii armirovannykh fundamentnykh podushek [Numerical modeling of structures reinforced foundation pads]. *Vestnik MGSU*, 2016, no. 11, pp. 21-31. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.11.21-31
13. Liu J., Kamai T., Zhang F., Yang J., B. Shi. Static liquefaction behavior of saturated fiber-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, no. 29, pp. 462–471
14. Ponomaryov A., Zolotoubov D. Several approaches for the design of reinforced bases on karst areas. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, no. 42, pp. 48-51. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.12.002>.
15. Bogomolov A.N., Ponomarev A.B., Mashchenko A.V., Kuznetsova A.S. Analiz vliianiia razlichnykh tipov armirovaniia na deformatsionnye kharakteristiki glinistogo grunta [Analysis of the influence of different types of reinforcement on the deformation characteristics of clay soil]. *Internet-vestnik VolgaGASU. Politematicheskaiia*, 2014, iss. 4(35), 11 p.