

DOI: 10.15593/24111678/ 2019.02.07

УДК 624.138.3

Е.Н. Назукина^{1,2}, В.И. Клевеко¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Администрация Ленинского района города Перми, Пермь, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Одной из актуальных проблем, которые возникают при расчете армогрунтовых конструкций, является измерение напряжений в армирующих геосинтетических прослойках. Для исследования напряжений, возникающих внутри армогрунтовых конструкций, необходимо измерить напряжения непосредственно в геосинтетических материалах. Полевые и лабораторные испытания геосинтетических материалов основаны на оценке деформаций, возникающих в материале. Измерение деформаций, как правило, осуществляется путем подключения электронных датчиков непосредственно к геосинтетическому образцу. Особое внимание необходимо уделить соответствию значений измеренной и истинной деформации, которую испытывает образец геосинтетика. Точность значения измеренной деформации зависит от конструкции геосинтетика, размера датчика, метода крепления и типа нагрузки. В данной работе рассмотрены различные типы тензометрических датчиков, такие как струнный тензодатчик, струнный тензометр, индуктивный измеритель перемещений и фольговый тензорезистор. Также проанализированы способы их крепления к геосинтетическим материалам.

Геосинтетические материалы имеют относительно низкие значения модуля упругости и при действии нагрузок удлиняются до 10–20 %. Фольговые тензорезисторы сохраняют свою работоспособность при максимальном относительном удлинении 1,5 % и не могут быть установлены непосредственно на геосинтетический материал. Ввиду вышеизложенного и для произведения измерений деформаций в образце геотекстиля была использована конструкция П-образного тензодатчика. На ригеле конструкции датчика расположены два фольговых тензорезистора – схема подключения резисторов полумост Уитстона. В статье представлены результаты испытаний с использованием различных датчиков, измерения проводились на разрывной машине с приложением нагрузки в продольном направлении. На основании проведенных испытаний сделаны выводы относительно характеристик датчиков и выведены значения и формула коэффициента умножения для получения истинного значения деформации.

Ключевые слова: деформация геосинтетического материала, тензометрический датчик, тензодатчик, тензорезистор, геосинтетические материалы, армогрунтовые конструкции, измерение напряжений.

E.N. Nazukina^{1,2}, V.I. Kleveko¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Administration of the Leninsky District of the City of Perm, Perm, Russian Federation

USING STRAIN GAUGES OF VARIOUS TYPES FOR MEASURING STRESSES IN GEOSYNTHETIC MATERIALS

One of the topical problems that arise when calculating reinforced ground structures is the measurement of stresses in the reinforcing geosynthetic layers. To study the stresses arising inside the reinforced ground structures, it is necessary to measure the stresses directly in geosynthetic materials. Field and laboratory tests of geosynthetic materials are based on the evaluation of the deformations occurring in the material. Measurement of deformations, as a rule, is carried out by connecting electronic sensors directly to a geosynthetic sample. Particular attention should be paid to matching the values of the measured and true deformation experienced by the geosynthetic sample. The accuracy of the measured strain value depends on the geosynthetics design, sensor size, method of attachment and type of load. In this paper, various types of strain gauges are examined, such as a string strain gauge, a string strain meter, an inductive displacement gauge, and a foil resistance strain gauge. The methods of the attachment of gauges to geosynthetic materials are also analyzed.

Geosynthetic materials have relatively low values of elasticity modulus and under the load are extended by 10–20 %. Foil resistance strain gauges retain their performance at a maximum specific elongation of 1.5% and cannot be installed directly on the geosynthetic material. In view of the foregoing, and in order to make measurements of the deformations in a geotextile sample, a U-shaped strain gauge was used. On the crossbar of the sensor there are two foil resistance strain gauges – the Wheatstone half-bridge connection circuit of resistors. In the article the results of tests using various sensors, with measurements made on a tensile machine with a load applied in the longitudinal direction are presented. Based on the tests conducted, conclusions were made regarding the characteristics of the sensors and the values and formula of the multiplication factor were derived to obtain the true strain value.

Keywords: deformation of geosynthetic material, strain gauge sensor, strain gauge, resistance strain gauge, geosynthetic materials, reinforced soil, stress measurement.

В последнее время объемы использования геосинтетических материалов непрерывно растут, особенно в дорожной отрасли [1]. Разработаны различные методики их расчета, однако определение реальных напряжений в геосинтетических прослойках остается актуальной проблемой [2, 3]. Изучая поведение геосинтетических материалов в армогрунтовых конструкциях, необходимо определить значение растягивающих напряжений, возникающих в геосинтетике под действием нагрузки [2]. Механические напряжения измеряются различными методами, но чаще всего для получения значений механических напряжений используют зависимость деформации и напряжения, которая определяется законом Гука. Популярным методом измерения деформаций является использование тензодатчиков [4, 5]. Однако при использовании данного метода возникает ряд вопросов: Соответствует ли полученное значение деформации истинному удлинению? Влияет ли сам датчик на поведение геосинтетического материала?

Для того чтобы найти ответы на эти вопросы, необходимо рассмотреть различные типы датчиков и изучить особенности их работы. Рассмотрим пять типов датчиков для измерения деформаций в различных геосинтетических материалах [6–10].

Струнный тензодатчик (VWS) модели Geokon VSM-4000, представленный на рис. 1, имеет диапазон деформации 0,3 % с чувствительностью деформации 0,0001 % и номинальной длиной датчика 150 мм. Датчик VWS измеряет напряжение, определяя изменение длины стальной проволоки (струны), проходящей через центральный стержень прибора. Стальная проволока изначально натягивается при изготовлении датчика.

Для полевых применений преимущество прибора VWS над более традиционными типами измерительных приборов с использованием изменения электрического сопротивления заключается в использовании частоты, а не напряжения, в качестве выходного сигнала от прибора. Частоты передаются по длинным кабелям без заметного ухудшения, вызванного изменениями сопротивления кабеля, контактного сопротивления или утечки на землю. Струнные датчики также имеют гораздо лучшую долговременную стабильность нуля и поэтому могут использоваться для проведения долговременных испытаний.

Основным недостатком струнных измерительных проводов является относительно длительный процесс считывания информации. Как правило, для измерения частоты прибора затрачивается несколько секунд времени, что делает нецелесообразным использование этих датчиков для динамических измерений. Кроме того, недостатком данного типа датчика является узкий диапазон измеряемой деформации, максимальная величина деформаций составляет всего 0,45 мм [6].

Следующим типом измерителя является струнный датчик перемещения (VWD) производителя Geokon, модель 4420 (рис. 2), разработанный для измерения больших напряжений. Этот

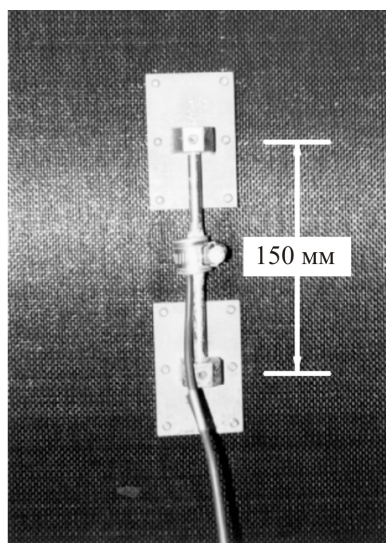


Рис. 1. Струнный тензодатчик (VWS), прикрепленный к образцу геотекстиля [6]

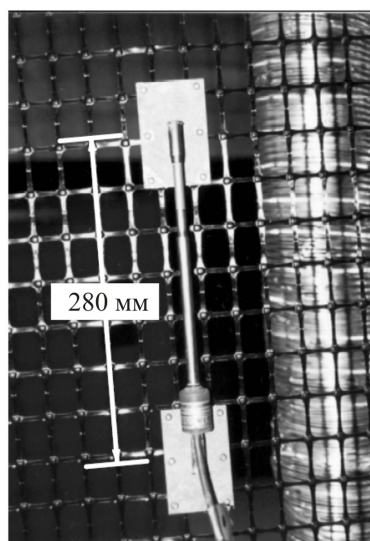


Рис. 2. Струнный тензометр (VWD), прикрепленный к образцу геосетки [6]

датчик имеет диапазон измеряемой деформации 25,4 мм с чувствительностью 0,025 мм. Учитывая номинальную длину инструмента 280 мм, отметим, что это соответствует диапазону относительной деформации 9 % и чувствительности 0,009 %. Принцип действия данной модели датчика аналогичен датчику VWS, за исключением того, что струна соединена последовательно с пружиной, что позволяет измерять большие деформации без повреждения струны. Недостатком датчика такого типа является его большие размеры [6].

Рассмотрим другой тип измерителя – индуктивный датчик перемещения типа LVDT модели D5/200 ВТ переменного тока, с диапазоном измеряемой деформации $\pm 5,1$ мм и чувствительностью около 0,015 мм (рис. 3). Датчик типа LVDT состоит из подвижного магнитопровода, проходящего через одну первичную и две вторичные катушки. Напряжение переменного тока прикладывается к первичной катушке, тем самым индуцирует напряжение переменного тока в каждой вторичной катушке с величиной, которая зависит от близости между магнитным сердечником и каждой вторичной катушкой [6].

Четвертым рассмотренным типом тензодатчиков является специальный тензорезистор, который имеет высокое значение измеряемого относительного удлинения марки KFE-5-120-C1 фирмы Куова. Он может прикрепляться только к образцам геосетки. На рис. 4 показана фотография данного фольгового тензорезистора, прикрепленного к образцу геосетки. Эти датчики имеют диапазон измеряемой относительной деформации около 10 %. Достоинства таких тензодатчиков – точность и маленькие размеры. В свою очередь недостатками данной модели являются невозможность использования на геотекстиле (могут приклеиваться только на георешетки и геосетки) и отсутствие защиты от воздействия окружающей среды [6].

Пятым типом тензодатчика была предложена разработанная авторами конструкция тензометра в виде П-образной рамы (рис. 5).

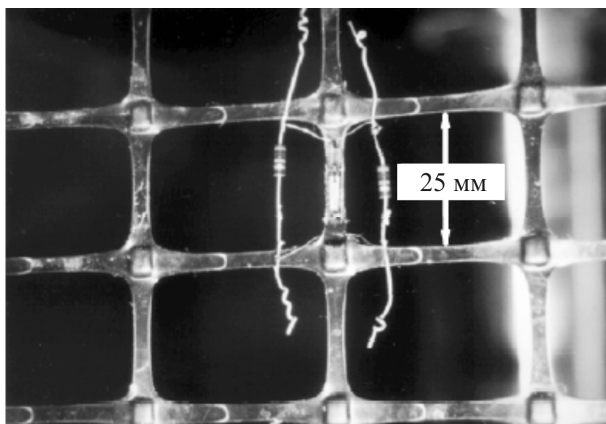


Рис. 4. Фольговый тензорезистор, прикрепленный к образцу геосетки [6]

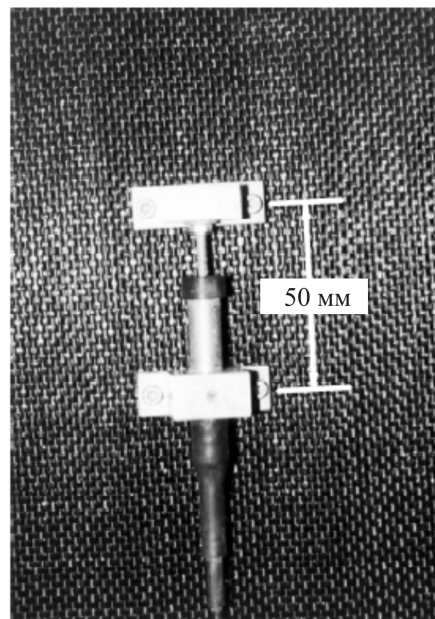


Рис. 3. Индуктивный измеритель перемещений типа LVDT, прикрепленный к образцу геотекстиля [6]

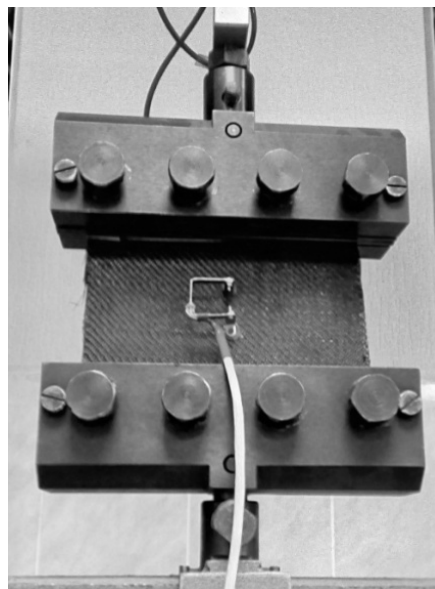


Рис. 5. П-образный тензодатчик, закрепленный на образце геотекстиля

На ригеле рамы расположены два фольговых тензорезистора – схема подключения резисторов полумост Уитстона. Образец геотекстиля подвергается растяжению, вследствие чего в тензодатчике возникает некоторая деформация, изменяющая сопротивление тензорезисторов, которое фиксируется регистрирующей аппаратурой. Предполагается, что относительное удлинение, происходящее в середине ригеля, будет равно относительному удлинению, протекающему в испытываемом образце. Достоинствами данного тензодатчика является высокая точность измерений и маленькие размеры [11–13].

Для оценки погрешности измерения различных датчиков они были закреплены на геосинтетическом материале, а затем были проведены испытания этих образцов на разрывной машине. Значения перемещения зажимов разрывной машины были приняты в качестве образцовых перемещений. Таким образом, эксперименты проводились с датчиками перемещения типа VWS, VWD, LVDT и П-образным датчиком, прикрепленными к образцам геотекстиля. Для образцов геосетки применялись датчики типа VWS, VWD, LVDT и специальный тензорезистор. Испытания геотекстиля были проведены по методике, изложенной в работе [14]. Характеристики геосетки были приняты по данным, представленным производителем (табл. 1).

Таблица 1

Свойства геосинтетиков

Показатели геосинтетического материала	Геосетка	Геотекстиль
	полипропилен	полипропилен
Масса единицы площади, г/м ²	215	250
Размер ячейки, мм, в продольном направлении	25	–
Прочность на растяжение в продольном направлении при относительной деформации 5 %, кН/м	9	10
Предел прочности при растяжении в продольном направлении, кН/м	13	34

Образцы геосинтетиков были прикреплены в разрывной машине таким образом, чтобы растягивающая нагрузка прикладывалась в продольном направлении. Большая часть тестов проводилась с применением двух циклов нагрузки-разгрузки во время испытания. Для оценки погрешности показаний тензометров был введен коэффициент погрешности K , равный отношению деформации, измеренной разрывной машиной, к величине деформации, измеренной датчиками. Значения для датчиков типа VWS, VWD, LVDT и тензорезистора KFE-5-120-C1 приняты по данным, приведенным в [6]. Результаты испытания приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты погрешности, применяемые к датчикам, установленным на геосинтетических образцах

Тип геосинтетического материала	Тип датчика				
	VWS	VWD	LVDT	Тензорезистор KFE-5-120-C1	П-образный датчик
Геосетка	2,8	1,1	1,15	1,0	–
Геотекстиль	5,0	1,08	1,1	–	$0,004x^4 - 0,2176x^3 + 4,124x^2 - 32,06x + 91,359$

В связи с тем, что при испытаниях П-образного датчика была получена нелинейная зависимость измеренного перемещения x от погрешности измерения, для получения коэффициента K был построен график, приведенный на рис. 6, и получено уравнение регрессии:

$$K = -0,0007\varepsilon^5 + 0,0465\varepsilon^4 - 1,065\varepsilon^3 + 10,883\varepsilon^2 - 51,028\varepsilon + 99,276,$$

где K – коэффициент умножения, применяемый к реакции деформации П-образного датчика на значение величины деформации x , выраженной в миллиметрах.

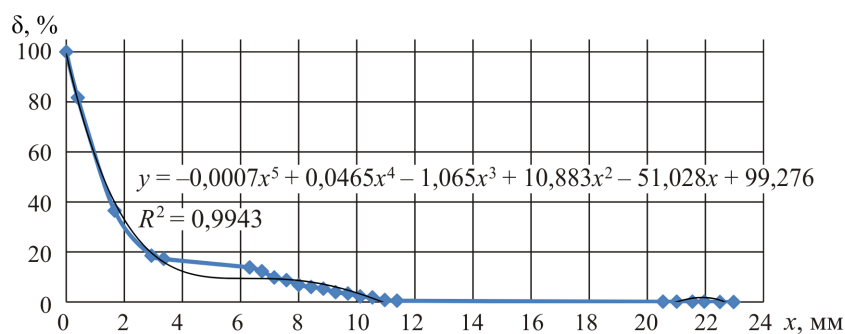


Рис. 6. Значения погрешности измерения δ в зависимости от величины деформации x , измеренной П-образным датчиком

Анализируя полученные данные о возможности применения различных датчиков для определения напряжений, возникающих в геосинтетических прослойках при проведении испытаний армогрунтовых конструкций в полевых условиях, можно сделать следующие выводы:

1. Струнный тензодатчик типа VWS непригоден для измерения напряжений в геосинтетических материалах, так как имеет очень узкий диапазон измеряемых деформаций, большие геометрические размеры и не предназначен для измерения динамических напряжений.

2. Струнный измеритель деформаций типа VWD мало подходит для измерения напряжений в геосинтетических материалах, так как имеет большие геометрические размеры; также не предназначен для измерения динамических напряжений.

3. Индуктивный датчик перемещения типа LVDT можно использовать для измерения напряжений в геосинтетических материалах, он относительно небольшого размера, однако имеет погрешность измерения порядка 10–15 %. Может использоваться для измерения динамических напряжений.

4. Специальный тензорезистор, имеющий высокое значение измеряемого относительного удлинения типа KFE, хорошо подходит для измерения напряжений в геосетках и георешетках, т.е. для геосинтетиков, имеющих гладкую поверхность, на которую можно надежно приклеить тензорезисторы. Но поверхность самих тензорезисторов и коммутирующие провода важно защищать от воздействия окружающей среды. Кроме того, для таких тензорезисторов необходимо применять различные мероприятия, компенсирующие их температурную нестабильность [15]. Может использоваться для измерения динамических напряжений.

5. П-образный датчик перемещения также хорошо подходит для измерения напряжений, однако имеет нелинейную зависимость погрешности измерения, которая может быть скорректирована поправочным коэффициентом до погрешности измерения порядка 1 %. Как и все датчики, основанные на применении тензорезисторов, может замерять динамические напряжения. В отличие от одиночных тензорезисторов типа KFE, не требует применения мероприятий по термокомпенсации. Имеет геометрические размеры менее 30 мм, т.е. вносит минимальные искажения в напряженно-деформированное состояние армогрунтовых конструкций.

Таким образом, наиболее подходящим датчиком для измерения напряжений в геосинтетических материалах является П-образный датчик перемещения.

Список литературы

1. Пономарев А.Б., Офрихтер В.Г. Анализ и проблемы исследований геосинтетических материалов в России // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 2. – С. 68–73.
2. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В.А. Ильичева, Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 1040 с.
3. Некоторые результаты исследований армогрунтовых оснований / Д.Г. Золотозубов, В.И. Клевеко, А.Б. Пономарев, Р.С. Нестеров // Актуальные проблемы геотехники: сб. ст., посвященный 60-летию профессора А.Н. Богомоллова / ВолгГАСУ. – Волгоград, 2014. – С. 165–171.

4. Клокова Н.П. Тензорезисторы. Теория, методики расчета, разработки. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
5. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
6. Perkins S.W., Lapeyre, J.A. In-Isolation Strain Measurement of Geosynthetics in Wide-Width Strip Tension Test // *Geosynthetics International*. – 1997. – Vol. 4, no. 1. – P. 11–32.
7. Strain Behaviour of Polymeric Geogrids Subjected to Sustained and Repeated Loading In Air and In Soil / A. McGown, I. Yogarajah, K.Z. Andrawes, M.A. Saad // *Geosynthetics International*. – 1995. – Vol. 2, no. 1. – P. 341–355.
8. Effects of Sustained and Repeated Tensile Loads on Geogrid Embedded in Sand / Y. Min, D. Leshchinsky, H.I. Ling, V.N. Kaliakin // *Geotechnical Testing Journal*. – 1995. – Vol. 18, no. 2. – P. 204–225.
9. Sluimer G., Risseuw P. A Strain-Gauge Technique for Measuring Deformations in Geotextiles // *Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles*. IFAI. – Vol. 3. – Las Vegas, Nevada, USA, August 1982. – P. 835–838.
10. Yogendrakumar M., Bathurst R.J. Numerical Simulation of Reinforced Soil Structures During Blast Loadings // *Transportation Research Record* 1336. – 1992. – P. 1–8.
11. Лашова С.С., Клевко В.И. Применение тензометрического датчика при измерении напряжений в геосинтетических материалах // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. – 2018. – Т. 1. – С. 134–140.
12. Lashova S.S., Kleveko V.I. Measurement of stresses and strains in soils at field conditions // *SWorld Journal*. – 2016. – Т. 11, № 11. – P. 15–18.
13. Назукина Е.Н., Клевко В.И. Разработка тензометрического датчика для исследования напряженно-деформированного состояния геосинтетических армирующих материалов // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. – 2019. – № 1. – С. 37–45.
14. Татьянников Д.А. Изучение механических характеристик геосинтетических материалов для определения реальной несущей способности армированных фундаментных подушек // *Вестник гражданских инженеров*. – 2015. – № 6. – С. 121–127.
15. Meehan C.L., Talebi M. A method for correcting field strain measurements to account for temperature effects // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2017. – Vol. 45. – P. 250–260.

References

1. Ponomarev A.B., Ofrikhter V.G. Analiz i problemy issledovaniy geosinteticheskikh materialov v Rossii [Analysis and problems of research of geosynthetic materials in Russia]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, no. 2, pp. 68–73.
2. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemny'e sooruzheniya [Reference geotechnical. Bases, foundations and underground structures]. Moscow: ASV, 2016, 1040 p.
3. Zolotozubov D.G., Kleveko V.I., Ponomarev A.B., Nesterov R.S. Nekotory'e rezul'taty issledovaniy armogruntovy'x osnovaniy [Some results of studies of ground reinforced grounds]. *Aktual'ny'e problemy geotekhniki: sb. st., posvyashchenny'j 60-letiyu professora A.N. Bogomolova. VolgASU. Volgograd*, 2014, pp. 165–171.
4. Klokova N.P. Tenzorezistory. Teoriya, metodiki rascheta, razrabotki [Strain gages. Theory, methods of calculation, development.]. Moscow. Mashinostroenie, 1990. 224 p.
5. Meheda V.A. Tenzometricheskij metod izmerenija deformacij [Strain gauge measurement method]. Samara: Izd-vo Samar. gos. azerokosm. un-ta, 2011. 56 p.
6. Perkins, S.W and Lapeyre, J.A. In-Isolation Strain Measurement of Geosynthetics in Wide-Width Strip Tension Test. *Geosynthetics International*, 1997, vol. 4, no. 1, pp. 11–32.
7. McGown A., Yogarajah I., Andrawes K.Z., Saad M.A. Strain Behaviour of Polymeric Geogrids Subjected to Sustained and Repeated Loading In Air and In Soil. *Geosynthetics International*, 1995, vol. 2, no. 1, pp. 341–355.
8. Min Y., Leshchinsky D., Ling H.I., Kaliakin V.N. Effects of Sustained and Repeated Tensile Loads on Geogrid Embedded in Sand. *Geotechnical Testing Journal*, 1995, vol. 18, no. 2, pp. 204–225.
9. Sluimer G., Risseuw P. A Strain-Gauge Technique for Measuring Deformations in Geotextiles. *Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles*, IFAI, vol. 3, Las Vegas, Nevada, USA, August 1982, pp. 835–838.
10. Yogendrakumar M., Bathurst, R.J. Numerical Simulation of Reinforced Soil Structures During Blast Loadings. *Transportation Research Record* 1336, 1992, pp. 1–8.

11. Lashova S.S., Kleveko V.I. Primenenie tenzometricheskogo datchika pri izmerenii napryazhenij v geosinteticheskix materialax [The use of strain gauges for measuring stresses in geosynthetic materials]. *Sovremennyye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika*, 2018, Vol. 1, pp. 134-140.
12. Lashova S.S., Kleveko V.I. Measurement of stresses and strains in soils at field conditions. *SWorldJournal*, 2016, Vol. j1104, no. 11, pp. 15-18.
13. Nazukina E.N., Kleveko V.I. Razrabotka tenzometricheskogo datchika dlja issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostojaniya geosinteticheskikh armirujushhih materialov [Development of a strain gauge sensor for studying the stress-strain state of geosynthetic reinforcing materials]. *Transport. Transportnye sooruzhenija. Jekologija*, 2019, no. 1, pp. 37-45.
14. Tat'iannikov D.A. Izuchenie mekhanicheskikh kharakteristik geosinteticheskikh materialov dlja opredeleniia real'noi nesushchei sposobnosti armirovannykh fundamentnykh podushek [The study of the mechanical characteristics of geosynthetic materials to determine the actual carrying capacity of reinforced base pads]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2015, no. 6, pp. 121-127.
15. Meehan C.L., Talebi M. A method for correcting field strain measurements to account for temperature effects. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, Vol. 45, pp. 250-260.

Получено 15.04.2019

Об авторах

Назукина Екатерина Николаевна (Пермь, Россия) – магистр кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ennazukina@mail.ru); главный специалист отдела жилищно-коммунального хозяйства и жилищных отношений администрации Ленинского района города Перми (614000, г. Пермь, ул. Пермская, 57).

Клевеко Владимир Иванович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vlvkl@mail.ru).

About the authors

Ekaterina N. Nazukina (Perm, Russian Federation) – Master, Department of Construction Industry and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ennazukina@mail.ru); Chief Specialist of the Department of Housing and Public Utilities and Public Relations of the Administration of the Leninsky District of the City of Perm (57, Permskaya st., Perm, 614000, Russian Federation).

Vladimir I. Kleveko (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction Industry and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University, (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: vlvkl@mail.ru).