



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.3.02

УДК 692.115

ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АРМОГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

В.И. Клевеко, Е.И. Тетерин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 06 мая 2023
Одобрена: 20 июня 2023
Принята к публикации:
24 июля 2023

Ключевые слова:

армированный грунт, геосинтетические материалы, датчики давления, тензоизмерительная система, датчики для измерения растягивающих напряжений.

АННОТАЦИЯ

Армогрунтовые конструкции часто используются в практике транспортного и промышленного строительства. Существующие методы расчета таких конструкций имеют ряд существенных недостатков и не всегда позволяют точно определить расчетные параметры, особенно это касается осадок и растягивающих напряжений в армирующих прослойках. Для совершенствования методов расчета армогрунтовых конструкций необходимо проведение натурных экспериментов по определению их напряженно-деформированного состояния. Натурные эксперименты по оценке напряженно-деформированного состояния армогрунтовых конструкций представляют собой сложную техническую задачу. Чаще всего в натурных экспериментах используются круглые штампы различного диаметра. В процессе проведения исследований необходимо измерять нормальные напряжения и вертикальные перемещения в активной зоне армогрунтового основания и растягивающие напряжения в армирующих прослойках. Для повышения точности измерений и уменьшения искажений, которые вносят датчики в напряженно-деформированное состояние армогрунтовых конструкций, необходим их тщательный подбор по целому ряду параметров. В работе приведены рекомендации по подбору датчиков давления для измерения вертикальных нормальных напряжений в грунтовом массиве. Диаметр датчиков давления не должен превышать величину 28–80 мм в зависимости от диаметра круглого штампа, используемого для проведения испытаний, а рекомендуемая толщина датчиков давления должна быть не более 2,8–8,0 мм. После подбора датчиков давления необходимо определиться с измерительной тензометрической системой. Основными критериями подбора измерительной тензометрической системы являются количество активных тензорезисторов в каждом датчике давления, общее число каналов измерения и электрическое сопротивление тензорезисторов. Для замера растягивающих напряжений в армирующих прослойках можно применять миниатюрные тензометрические датчики, использующие мостовую или полумостовую схемы подключения активных тензорезисторов.

© ПНИПУ

© Клевеко Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: vlivkl@mail.ru.
Тетерин Егор Ильич – аспирант, e-mail: egorkaliverpool@gmail.com.

Vladimir I. Kleveko – Ph. D. in Technical Science, Associate Professor, e-mail: vlivkl@mail.ru.
Egor I. Teterin – Postgraduate Student, e-mail: egorkaliverpool@gmail.com.

SELECTION OF EQUIPMENT FOR EXPERIMENTAL STUDIES OF THE STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED SOIL BASES AND PAVEMENT STRUCTURES

V.I. Kleveko, E.I. Teterin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 06 May 2023
Approved: 20 June 2023
Accepted for publication:
24 July 2023

Keywords:

reinforced soil, geosynthetic materials, pressure sensors, strain gauge system, sensors for measuring tensile stresses.

ABSTRACT

Reinforced soil structures are often used in the practice of transport and industrial construction. The existing methods for calculating such structures have a number of significant drawbacks and do not always allow to accurately determine the design parameters, especially for settlement and tensile stresses in the reinforcing layers. To improve the methods for calculating reinforced soil structures, it is necessary to conduct full-scale experiments to determine their stress-strain state. Field experiments to assess the stress-strain state of reinforced soil structures are a complex technical problem. Most often, in these full-scale experiments, round stamps of various diameters are used. In the course of research, it is necessary to measure normal stresses and vertical displacements in the core of the reinforced soil base and tensile stresses in the reinforcing layers. To improve the accuracy of measurements and reduce the distortions that sensors introduce into the stress-strain state of reinforced soil structures, their careful selection is necessary for a number of parameters. The paper provides recommendations on the selection of pressure sensors for measuring vertical normal stresses in the soil mass. The diameter of the pressure sensors should not exceed 28–80 mm, depending on the diameter of the round die used for testing, and the recommended thickness of the pressure sensors should not exceed 2.8–8.0 mm. After the selection of pressure sensors, it is necessary to determine the measuring strain gauge system. The main criteria for selecting a measuring strain gauge system are the number of active strain gauges in each pressure sensor, the total number of measurement channels, and the electrical resistance of strain gauges. To measure tensile stresses in the reinforcing layers, you can use miniature strain gauge sensors using bridge or half-bridge connection schemes for active strain gauges.

© PNRPU

Введение

Армированные грунты широко применяются в строительной практике для улучшения прочностных и деформационных характеристик слабых грунтов, конструкциях дорожных одежд и удерживающих сооружений. В настоящее время существует целый ряд методов расчета армогрунтовых конструкций. Все они имеют свои достоинства и недостатки. Одним из наиболее существенных недостатков является недостаточная точность определения деформаций армогрунтовых конструкций и усилий в армирующих элементах. Причинами недостаточной точности определения деформаций и усилий в армирующих элементах являются несовершенство методов расчета и недостатки определения деформационных характеристик грунтов. Для совершенствования методов расчета армогрунтовых конструкций необходимо изучение их напряженно-деформированного состояния, что требует проведения экспериментальных исследований. Основными задачами при проведении экспериментальных исследований по определению напряженно-деформированного состояния являются измерение напряжений и деформаций в активной зоне грунтового основания и измерение растягивающих напряжений в армирующих прослойках.

Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния широко используются в геотехнике. Их можно разделить на модельные и натурные эксперименты. Модельные исследования в большинстве случаев позволяют оценить только качественную

картину напряженно-деформированного состояния армогрунтовых конструкций [1–4]. Для получения количественной картины распределения напряжений и деформаций в армогрунтовом массиве необходимо проведение натурных исследований [1, 5–7].

Для оценки напряженно-деформированного состояния армогрунтовых оснований необходимо подобрать датчики давления, измеряющие напряжения в грунтовом массиве, датчики перемещения в грунтовом массиве и датчики, измеряющие растягивающие напряжения в армирующих прослойках [8].

Измерение перемещений в массиве грунта не представляет собой особой сложности. Для этого существуют грунтовые марки с проволоочной связью. Для уменьшения трения стальную проволоку пропускают через тонкие трубки. Измерение перемещений осуществляются прогибомерами, например типа 6ПАО. Подробно эта конструкция описана в работах [1, 6].

Для испытания грунтов по ГОСТ 20276.1-2020 «Грунты. Метод испытания штампом» обычно применяют круглые жесткие штампы площадью 5000, 2500 и 600 см², диаметром соответственно 80, 56 и 28 см. При изучении напряженно-деформированного состояния конструкций дорожных одежд следует ориентироваться на ОДН 218.046-01 «Проектирование нежестких дорожных одежд», где колесо расчетного автомобиля заменяется круглым штампом диаметром от 33 до 42 см.

Выбор датчиков давления

Основные требования к датчикам давления, используемым при измерении напряжений в грунтах, приведены в работе [9]. На погрешность измерения напряжений в грунтовом массиве датчиками давления (мессдозами) оказывают влияние два основных фактора:

1. Жесткость датчиков давления.
2. Соотношение внешнего диаметра датчика d и его толщины t .

Для получения минимальной погрешности жесткость мессдозы должна в 5–10 раз превышать модуль деформации грунта, в котором проводятся измерения напряжений. Для получения необходимой жесткости мессдозы должны иметь гидравлический мультипликатор. Соотношение диаметра d к толщине мессдозы t должно быть минимальным, желательно не менее 10. Для уменьшения искажений, которые вносит установка датчиков давления в напряженно-деформированное состояние грунтового массива, необходимо, чтобы они имели минимальные размеры, оптимальное значение которых составляет не более 1/10 от диаметра штампа. Таким образом, диаметр датчиков давления в зависимости от применяемого диаметра штампа должен быть от 28 до 80 мм.

Для подбора датчиков давления, используемых при испытаниях, были выполнены исследования существующих моделей мессдоз [10–15]. Датчики давления для измерения напряжений в грунтах делятся на два типа – струнные и тензометрические. Основные технические характеристики датчиков давления приведены в табл. 1.

Анализ полученных характеристик датчиков давления показал, что для целей эксперимента по размерам подходят датчики KDE-PA/KDF-PA, ПДП-70-11/ ПДМ-70-11 и JNBP-2. Все эти датчики относятся к тензометрическому типу. Струнные датчики давления имеют значительные габариты и не подходят для целей эксперимента. Тензометрические датчики давления могут иметь в своей конструкции по одному, два или четыре тензорезистора, соединенных соответственно в четверть мостовую, полумостовую и

мостовую схемы подключения к тензометрической аппаратуре. Наибольшую чувствительность имеют датчики с четырьмя активными тензорезисторами. Их чувствительность в четыре раза выше, чем у датчиков с одним активным тензорезистором, и в два раза выше, чем у датчиков с двумя активными тензорезисторами. По соотношению d/t наилучшие показатели имеют датчики давления ПДП-70-11/ПДМ-70-1. Данные датчики давления обладают высокой жесткостью за счет применения гидравлического мультипликатора, с помощью которого перемещение приемного элемента по сравнению с прогибом измерительной мембраны уменьшается в 30–100 раз.

Таблица 1

Характеристики датчиков давления для измерения напряжений в грунтах

Table 1

Characteristics of pressure sensors for measuring stresses in soils

Марка	Производитель	Диаметр d , мм	Толщина t , мм	d/t	Наличие мультипликатора	Тип датчика
BEE-A/ BEF-A	KYOWA	200	25	8	Нет данных	Струнный
SJ-8000	Sungjin Geotec	230	8,5	27	Нет данных	Струнный
KDC-PA/ KDD-PA	TML	100	20,5	4,9	Да	Тензометрический
KDE-PA/ KDF-PA	TML	50	11,3	4,4	Да	Тензометрический
ПДП-70-11/ ПДМ-70-11	ЦНИИСК	70	10	7	Да	Тензометрический
ZET 7010 SP	ZETLAB	120	17	7,1	Нет данных	Струнный
JNBP-2	Xiaolong's	42	14	3	Да	Тензометрический

Мессдозы типа ПДМ-70-11 и ПДМ-70-11 различаются между собой только схемой подключения и количеством активных тензорезисторов. Датчик давления ПДМ-70-11 имеет четыре активных тензорезистора и мостовую схему подключения к регистрирующей аппаратуре и соответственно имеет чувствительность в 2 раза выше, чем датчик давления ПДП-70-11. Поэтому для измерения напряжений в грунте предпочтительно использование мессдоз типа ПДМ-70-11, которые имеют сопротивление тензорезистора 200 Ом, погрешность измерения в грунте не более 7–10 %, максимальное допустимое напряжение 3–6 МПа и подключаются по мостовой схеме. Кроме серийно выпускаемых моделей датчиков давления, они могут быть изготовлены и самостоятельно, как, например, в работе [16].

Выбор тензоизмерительной системы

Для измерения выходных сигналов тензорезисторов датчика давления ПДМ-70-11 и представления отсчетов в цифровом виде необходимо подобрать соответствующую измерительную тензометрическую систему. В настоящее время существует большое количество тензоизмерительных станций [17–19]. Основные параметры, которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные характеристики измерительной системы

Table 2

Main characteristics of the measuring system

Характеристика	Марка			
	СИИТ-3	QMBox85	LTR 212	ZET 017
Количество активных тензорезисторов	1, 2 или 4	2 или 4	1, 2 или 4	2 или 4
Сопротивление применяемых тензорезисторов, Ом	100–400	Не менее 100	50–1000	30–1000
Максимальное число измерительных каналов в режиме с 4 и 2 активными тензорезисторами	50	От 16 до 128 в зависимости от модификации	От 4 до 128 в зависимости от модификации	32
Максимальное число измерительных каналов в режиме с одним активным тензорезистором	100	–	От 8 до 256 в зависимости от модификации	–

Метрологические характеристики всех тензоизмерительных станций удовлетворяют требованиям, предъявляемым к измерительным системам, и обращать внимание необходимо на их функциональные особенности. Анализ параметров тензоизмерительных станций показал, что для целей эксперимента подходят СИИТ-3 и LTR 212. По экономическим соображениям наиболее целесообразно применение тензометрической измерительной системы СИИТ-3.

Выбор датчиков, измеряющих растягивающие напряжения в армирующих прослойках

Подробно вопрос о выборе датчиков для измерения растягивающих напряжений в армирующих геосинтетических материалах освещён в работах [20, 21]. В настоящее время на рынке практически отсутствуют датчики, позволяющие замерить растягивающие напряжения в армирующих прослойках. Поэтому рекомендуется использовать тензометрические датчики – п-образные и s-образные датчики индивидуального изготовления по рекомендациям, приведенным в работах [20, 21]. Предпочтительно использовать датчики с четырьмя активными тензорезисторами, включенными по мостовой схеме.

Заключение

Проведение натурных исследований напряженно-деформированного состояния армогрунтовых конструкций требует серьезной подготовки. Для получения достоверной информации требуется подобрать комплект измерительной аппаратуры и соответствующих датчиков, позволяющих определить наиболее важные компоненты напряженно-деформированного состояния испытываемых конструкций. При выборе датчиков следует отдавать предпочтение тензометрическим датчикам с четырьмя активными тензорезисторами, включенным по мостовой схеме.

***Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.*

***Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

***Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.*

Библиографический список

1. Kleveko V.I. Model and Field experimental studies of reinforced clay bases // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1928. – P. 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012032
2. Кашапова К.Р. Планирование модельных экспериментов по исследованию работы подпорных стен, армированных горизонтальными геосинтетическими прослойками // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2016. – Т. 7, № 1. – С. 30–38. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.1.04
3. Ширанов А.М., Невзоров А.Л. Физическое моделирование армированной песчаной подушки в основании фундамента // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 80–92. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.4.08
4. Ponomaryev A.B., Kleveko V.I., Zolotozubov D.G. Experience of geosynthetical material application for karst danger reduction of building base // *9th International Conference on Geosynthetics – Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World, ICG 2010, 2010*. – P. 2005–2008.
5. Бургонутдинов А.М., Истомина К.Р., Клевеко В.И. Экспериментальные исследования физико-механических процессов в сезонно-мерзлых грунтах конструкций автомобильных дорог // *Construction and Geotechnics*. – 2022. – Т. 13, № 3. – С. 98–106. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.09
6. Татьянников Д.А., Пономарев А.Б. Натурные штамповые испытания армированных фундаментных подушек // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 97–105. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.11
7. Глагольева А.С., Кашарина Т.П. Экспериментальные исследования грунтонаполняемых оболочек в основаниях зданий и сооружений // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2018. – Т. 9, № 3. – С. 36–41. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.04
8. Лашова С.С. Измерение напряжений и деформаций в грунтах в полевых условиях // *Современные научные исследования и инновации*. – 2016. – № 11 (67). – С. 229–232.
9. Golli A.V., Belov D.V. Monitoring of the stress-strain state of soils in the foundation beds of structures // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 1999. – Vol. 36, № 5. – P. 195–197.
10. Датчик давления грунта ВЕЕ-А/БЕФ-А [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ndt-td.ru/katalog/tenzometriceskoe-oborudovanie/tenzometricheskie-datchiki/datchiki-davleniya/datchik-davleniya-grunta-bee-abef-a.html> (дата обращения: 02.02.2023).
11. Датчик давления грунта (месдоза) SJ-8000 [Электронный ресурс]. – URL: <https://monsol.ru/datchik-davleniya-v-grunte-sj-8000-2/> (дата обращения: 02.02.2023).
12. Датчик давления грунта KDC-PA/KDD-PA [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tmljp.ru/catalog/datchiki/datchiki-dlya-stroitel'nogo-monitoringa/kdc-pa-kdd-pa/> (дата обращения: 02.02.2023).
13. Датчик давления грунта KDE-PA/KDF-PA [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tmljp.ru/catalog/datchiki/datchiki-dlya-stroitel'nogo-monitoringa/kde-pa-kdf-pa/> (дата обращения: 02.02.2023).
14. Датчик давления грунта ZET 7010 SP [Электронный ресурс]. – URL: <https://zetlab.com/shop/tsifrovyie-datchiki/zet-7010-sp/> (дата обращения: 02.02.2023).

15. Датчик давления для грунта JNBP-2 [Электронный ресурс]. – URL: https://aliexpress.ru/item/33010460684.html?spm=a2g2w.productlist.search_results.0.5a0212a7NPu1R&sku_id=67067623697 (дата обращения: 02.02.2023).
16. Куликов А.В. Измерение напряжений в грунтах модернизированными датчиками [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2019. – № 1. – URL: <https://t-s.today/PDF/10SATS119.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/10SATS119
17. Измерительная тензометрическая система ZET 017 [Электронный ресурс]. – URL: <https://zetlab.com/shop/tenzostantsii/zet-017/> (дата обращения: 02.02.2023).
18. QMBox85-128 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.r-technology.ru/products/adc/qmbox85-128.php> (дата обращения: 02.02.2023).
19. Модульная система сбора данных LTR [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.lcard.ru/products/ltr/about> (дата обращения: 02.02.2023).
20. 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.
21. 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. DOI: 10.15593/24111678/2019.02.07

References

1. Kleveko V.I. Model and Field experimental studies of reinforced clay bases. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1928, pp. 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012032
2. Kashapova K.R. Planirovanie model'nyh jeksperimentov po issledovaniju raboty podpornyh sten, armirovannyh gorizontalmi geosinteticheskimi proslojkami [Planning of model experiments to study the operation of retaining walls reinforced with horizontal geosynthetic layers]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2016, vol. 7, no. 1, pp. 30–38. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.1.04
3. Shiranov A.M., Nevzorov A.L. Fizicheskoe modelirovanie armirovannoj peschanoj podushki v osnovanii fundamenta [Physical modeling of a reinforced sand cushion at the base of the foundation]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 80–92. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.4.08
4. Ponomaryev, A.B., Kleveko, V.I., Zolotozubov, D.G. Experience of geosynthetic material application for karst danger reduction of building base. *9th International Conference on Geosynthetics - Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World, ICG 2010*, 2010, pp. 2005–2008.
5. Burgonutdinov A.M., Istomina K.R., Kleveko V.I. Jeksperimental'nye issledovanija fiziko-mehaničeskikh processov v sezonno-merzlyh gruntah konstrukcij avtomobil'nyh dorog [Experimental studies of physical and mechanical processes in seasonally frozen soils of constructions of automobile roads. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 3, pp. 98-106. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.09
6. Tat'jannikov D.A., Ponomarev A.B. Naturnye shtampovye ispytaniya armirovannyh fundamentnyh podushek [Full-scale testing of reinforced foundation pads]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 97-105. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.11

7. Glagol'eva A.S., Kasharina T.P. Jeksperimental'nye issledovanija gruntonapolnjaemyh obolochek v osnovanijah zdaniy i sooruzhenij [Experimental studies of soil-filled shells]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 36–41. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.04
8. Lashova S.S. Izmerenie naprjazhenij i deformacij v gruntah v polevyh usloviyah [Measurement of stresses and strains in soils in the field]. *Sovremennye nauchnye issledovanija i innovacii*, 2016, no. 11 (67), pp. 229-232.
9. Golli A.V., Belov D.V. Monitoring of the stress-strain state of soils in the foundation beds of structures. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1999, vol. 36, no. 5, pp. 195-197.
10. Datchik davleniia grunta BEE-A/BEF-A [Ground pressure sensor BEE-A/BEF-A]. Available at: <http://www.ndt-td.ru/katalog/tenzometriceskoe-oborudovanie/tenzometricieskie-datchiki/datchiki-davleniya/datchik-davleniya-grunta-bee-abef-a.html>.
11. Datchik davleniia grunta (mesdoza) SJ-8000. [Ground pressure sensor (mesdoza) SJ-8000]. Available at: <https://monsol.ru/datchik-davleniya-v-grunte-sj-8000-2/>.
12. Datchik davleniia grunta KDC-PA/KDD-PA. [Ground pressure sensor KDC-PA/KDD-PA]. Available at: <https://www.tmljp.ru/catalog/datchiki/datchiki-dlya-stroitel'nogo-monitoringa/kdc-pa-kdd-pa/>
13. Datchik davleniia grunta KDE-PA/KDF-PA. [Ground pressure sensor KDE-PA/KDF-PA]. Available at: <https://www.tmljp.ru/catalog/datchiki/datchiki-dlya-stroitel'nogo-monitoringa/kde-pa-kdf-pa/>
14. Datchik davleniia grunta ZET 7010 SP. [Ground pressure sensor ZET 7010 SP]. Available at: <https://zetlab.com/shop/tsifrovyye-datchiki/zet-7010-sp/>.
15. Datchik davleniia dlia grunta JNBP-2. [Ground pressure sensor JNBP-2]. Available at: https://aliexpress.ru/item/33010460684.html?spm=a2g2w.productlist.search_results.0.5a0212a7NPuI1R&sku_id=67067623697.
16. Kulikov A.V. Izmerenie naprjazhenij v gruntah modernizirovannymi datchikami. [Measurement of stresses in soils with modernized sensors]. *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzhenija»*, 2019, no. 1, Available at: <https://t-s.today/PDF/10SATS119.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/10SATS119
17. Izmeritel'naia tenzometriceskaja sistema ZET 017. [Measuring strain gauge system ZET 017]. Available at: <https://zetlab.com/shop/tenzostantsii/zet-017/>.
18. QMBox85-128. Available at: <https://www.r-technology.ru/products/adc/qmbox85-128.php>.
19. Modul'naia sistema sbora dannykh LTR [Modular Data Collection System LTR]. Available at: <https://www.lcard.ru/products/ltr/about>.
20. Lashova S.S., Kleveko V.I. Primenenie tenzometriceskogo datchika pri izmerenii naprjazhenij v geosinteticheskikh materialah [The use of a strain gauge sensor in measuring stresses in geosynthetics]. *Sovremennye tehnologii v stroitel'stve. Teorija i praktik*, 2018, vol. 1, pp. 134-140.
21. Nazukina E.N., Kleveko V.I. Razrabotka tenzometriceskogo datchika dlja issledovanija naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija geosinteticheskikh armirujushhih materialov [Development of a strain gauge for studying the stress-strain state of geosynthetic reinforcing materials]. *Transport. Transportnye sooruzhenija. Jekologija*, 2019, no. 1, pp 37-45. DOI: 10.15593/24111678/2019.02.07