

Е.Н. Назукина^{1,2}, В.И. Клевекко¹

¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

²Администрация Ленинского района города Перми, Пермь, Россия

РАЗРАБОТКА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ АРМИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

В связи с необходимостью строительства на слабых грунтах в Пермском крае возникает потребность в укреплении грунтовых оснований геосинтетическими материалами. При проектировании армогрунтовых конструкций необходимо учитывать прочностные характеристики геосинтетического материала. Наиболее эффективным и точным методом измерения напряжений в геосинтетических материалах является использование тензодатчиков или тензорезисторов, данный метод отличается низкой себестоимостью. В статье рассмотрены российские и иностранные патенты, разработанные для измерения напряжений в различных материалах. Ученые Рене Б. Теста и Вассиф М. Боктор изобрели трансформатор напряжения, который целесообразно использовать для измерения напряжения или нагрузки в тканях или других гибких листовых материалах и определения напряжения в двухосном направлении. Патент тканевого тензодатчика изобретателей Чанг Мин Ян и Чун-Мэй Чжоу представляет собой одну или несколько проводящих нитей, включенных в основу ткани, что позволяет считывать напряжения в материале в результате деформаций вдоль направления восприятия. Российскими учеными М.А. Авдушевой и А.Л. Невзоровым изобретен датчик, позволяющий измерять нормальные напряжения в грунтах. Метод крепления тензометрических датчиков к различным материалам изучен и запатентован американскими учеными Тимоти Д. Шоттом, Робертом Л. Фоксом и Джоном Д. Бакли.

Геосинтетические материалы имеют относительно низкие значения модуля упругости и при действии нагрузок удлиняются на 10–20 %. Наиболее распространены на практике тензорезисторы, чувствительный элемент которых выполнен в виде решетки из константанового сплава и размещен на подложке из фольги. Сверху решетка покрывается защитной пленкой. Данные тензорезисторы сохраняют свою работоспособность при максимальном относительном удлинении 1,5 % и не могут быть установлены непосредственно на геосинтетический материал, следовательно, необходимо конструирование тензометрического датчика.

В данной работе предложено конструктивное решение тензометрического датчика, произведен расчет, выбраны оптимальные параметры в зависимости от характеристик материала.

Ключевые слова: тензометрический датчик, тензодатчик, тензорезистор, геосинтетические материалы, слабые грунты, 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

DEVELOPMENT OF A STRAIN GAUGE SENSOR FOR STUDYING THE STRESS-STRAIN STATE OF GEOSYNTHETIC REINFORCING MATERIALS

In connection with the need to build on unstable soils in the Perm Krai, there is a need to strengthen the soil bases with geosynthetic materials. When designing reinforced ground structures, it is necessary to take into account the strength characteristics of the geosynthetic material. The most effective and accurate method of measuring stresses in geosynthetic materials is the use of strain gauges or strain gauges, and this method also has a low cost. This paper examines Russian and foreign patents designed to measure stresses in various materials. Scientists René B. Testa and Vassif M. Boktor invented a voltage transformer, which is useful for measuring voltage or stress in tissues or other flexible sheet materials and determining the voltage in a biaxial direction. Patent fabric strain gauge inventors Chang Min Yang and Chun-Mei Zhou represents one or more conductive threads included in the fabric, which allows you to read the stresses in the material as a result of deformation along the direction of perception. Russian scientists M.A. Avdusheva and A.L. Nevzorov invented the sensor,

which allows to measure the normal stress in the soil. Methods of attaching tesometric sensors to various materials have been studied and patented by American scientists Timothy D. Shott, Robert L. Fox and John D. Buckley.

Since geosynthetic materials have low values of elastic modulus and under the action of loads are extended by 10-20%, the most common in practice are strain gauges, the sensitive element of which is made in the form of a lattice of constant alloy and is placed on a foil substrate. From above the lattice becomes covered by a protective film. These strain gauges retain their performance at a maximum elongation of 1,5% and cannot be installed directly on the geosynthetics material, therefore, it is necessary to design a strain gauge.

Due to the proven relevance, in this work a constructive solution of the strain gauge sensor was proposed, the calculation was made, the optimal parameters were chosen depending on the characteristics of the material.

Keywords: strain gauge sensor, strain gauge, strain resistor, geosynthetics, weak soils, reinforced soils, stress measurement

На сегодняшний день большинство территорий России и Пермского края в частности расположено на слабых грунтах. Согласно карте¹ [1], предоставленной геологами Пермского университета, на территории Пермского края есть участки со слабыми грунтами, расположенные по берегам рек, вблизи крупных логов и оврагов, на участках пересечений тектонических нарушений, а также неблагоприятные зоны, где возможно возникновение опасных геологических явлений. Следовательно, строительство на таких территориях требует проведения дополнительных инженерных мероприятий, позволяющих возводить на них различные сооружения [1–4].

Наиболее популярным методом укрепления грунтов является использование геосинтетических материалов. Геосинтетический материал – строительный материал, чаще всего состоящий из синтетического или другого сырья, которые могут быть представлены в виде рулонов, блоков, плит и др., такие материалы могут использоваться для различных целей, в том числе армирования грунтовых оснований [2–5].

При проектировании армогрунтовых конструкций необходимо учитывать прочностные характеристики геосинтетического материала [6–8]. Но значений прочности геосинтетика на разрыв недостаточно для полноценной оценки его работы внутри конструкции грунтового основания, следовательно, необходимы исследования их напряженно-деформированного состояния (НДС). Одним из популярных методов измерения напряжений в различных материалах является использование тензодатчиков или тензорезисторов, этот метод отличается эффективностью и точностью измерений, а также низкой себестоимостью.

Для изучения методов измерения НДС в геосинтетических материалах был проведен патентный поиск.

Для измерения напряжений в тканых и нетканых материалах американские ученые Рене Б. Теста и Вассиф М. Боктор изобрели трансформатор напряжения для тканей и гибких листовых материалов – патент US4429580A [9]. Данное изобретение позволяет измерять напряжения или нагрузки в тканях или других гибких листовых материалах, определяя напряжения в двухосном направлении. Преобразователь обладает преимуществами точной прямой оценки двухосных напряжений, он прочен и его выходные данные можно обрабатывать электронным способом. Преобразователь содержит диск эпоксидной смолы, через который передаются напряжения из материала. Для этого в материале проделывается отверстие, и покрытие удаляется или оголяются нити на некотором расстоянии от края отверстия. Это образует кольцевую область ткани, с которой датчик надежно связан. В случае нетканого материала эпоксидный преобразователь образуется вокруг края материала, непосредственно прилегающего к сформированному отверстию. Электрические тензорезисторы прикреплены соответствующим образом к преобразователю, причем их оси ориентированы в направлениях нитей в материале, хотя могут использоваться другие ориентации. Настоящий узел преобразователя не ограничивается материалами, состоящими из нитей, но также может быть нанесен на гибкий листовый материал без нитей.

¹ Карта Перми [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/maps/50/perm/?ll=56.298722%2C58.064275&mode=usermaps&source=constructorLink&um=constructor%3Ae352685031df339c168d391ced51999b87bbfa714ccb558fab90cd42f8837dfc&z=10> (дата обращения: 29.12.2018).

Тканевый тензодатчик был изобретен в 2006 г. исследователями Чанг Мин Яном и Чун-Мэй Чжоу – патент US7750790B2 [10]. Изобретение представляет собой тензодатчик, который включен в основу ткани (хотя бы одна проводящая нить). Проводящая нить сплетается с множеством непроводящих нитей, составляющих основу ткани (рис. 1, 2). При воздействии внешней силы на основу ткани геометрические размеры проводящей нити изменяются таким образом, что изменяется их электрическое сопротивление, которое измеряется электронным устройством и позволяет определить удлинение упомянутого тензодатчика после приложения внешней силы вдоль направления восприятия внешней нагрузки.

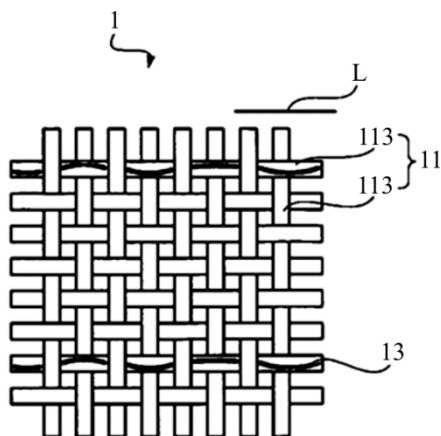


Рис. 1. Конструкция тензодатчика с проводящей нитью для тканого материала

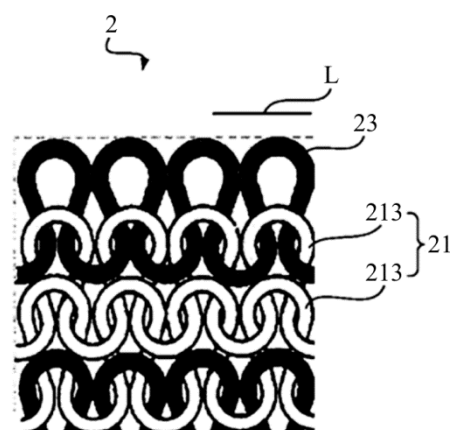


Рис. 2. Конструкция тензодатчика с проводящей нитью для вязаного материала

В России изучением напряжений в грунтах занимались М.А. Авдушева и А.Л. Невзоров. В 2018 г. был изобретен датчик для измерения нормальных напряжений в грунтах – патент RU 0002642977 [11]. Датчик включает в себя корпус из тонкого эластичного материала, во внутренней полости которого размещаются электроды и искусственный грунт, приготовленный из природного грунта путем замещения одной из фракций твердых частиц порошком электропроводного вещества тех же размеров. Искусственный грунт уплотняется до достижения коэффициента пористости, равного коэффициенту пористости грунта, в который он помещен. Напряжения, возникающие в основании сооружений, вызывают сжатие и, как следствие, увеличение электропроводности искусственного грунта в полости датчика. По результатам замеров электропроводности с помощью предварительно полученной градуировочной зависимости определяют значения напряжений. Конструкция датчика исключает искажение исследуемого напряженного состояния основания из-за концентрации напряжений во вмещающем его грунте. Предлагаемое изобретение относится к измерительной технике и предназначено для измерения нормальных напряжений в грунтах.

Разработка методов крепления тензодатчиков к материалам также является актуальной проблемой. В 1988 г. американскими учеными Тимоти Д. Шоттом, Робертом Л. Фоксом и Джоном Д. Бакли был запатентован способ крепления тензометрических датчиков к различным материалам – патент US 4767484A [12]. В своей работе авторы рассматривают методы крепления тензометрических датчиков к различным материалам. Например, лента с клейкой основой размещается на внутренней стороне каркаса, тензодатчик ровно помещен против клейкой подложки и покрыт тонким равномерным слоем клея. Лента после этого извлекается из рамки приспособления. Следующие шаги зависят от типа материала, который наклеивается. Если приклеивать железистый материал, на ленту помещается индукционный источник нагрева. Если материал имеет низкое сопротивление (например, алюминий), то плита, с железной стороной и резиновой стороной, помещена железной стороной вниз, на ленту. Источник индукционного нагрева затем помещается на резиновую сторону. Если материал представляет собой стеклоткань (материал-изолятор), то на ленту прикрепляется железная пластина, а на нее – источник индукционного нагрева. Индукционный нагреватель, указанный выше, затем помещается на

ленту и питается в течение 2 мин, чтобы генерировать частоты от 50 до 60 килоциклов, локально нагревая железный материал или пластину под тензометрическим датчиком, тем самым зашивая клей на тензометрическом датчике. Индукционный нагреватель затем удаляется, а тензометрический датчик быстро скрепляется с материалом.

Проведенный анализ патентных источников показал, что существующие методы измерения напряжений в различных тканых и нетканых геосинтетических материалах имеют существенные недостатки, такие как сложность применения в полевых условиях, значительная стоимость и трудоемкость.

В настоящее время серийно выпускается большое количество электронных датчиков перемещения и тензометров различных конструкций. Однако практически все они предназначены для измерения перемещений в стальных и железобетонных конструкциях и не пригодны для измерения напряжений и деформаций в геосинтетических материалах, находящихся в грунтовом массиве. Кроме того, они имеют довольно большие размеры, порядка 50–150 мм, а для изучения НДС армогрунтовых конструкций размеры тензодатчиков должны быть как минимум в 10 раз меньше диаметра штампа, через который передается внешняя нагрузка на конструкцию. Таким образом, для автомобильных дорог, согласно Приложению 1 ОДН 218.046–01 «Проектирование нежестких дорожных одежд», диаметр расчетного отпечатка шины D составляет от 330 до 420 мм, т.е. максимальные размеры тензодатчиков должны составлять не более 33–42 мм.

Поэтому разработка тензодатчиков для изучения НДС армогрунтовых конструкций, с учетом специфических требований, предъявляемых к ним, является актуальной задачей.

Геосинтетические материалы имеют низкие значения модуля упругости и при действии нагрузок удлиняются на 10–20 %. Наиболее распространены на практике тензорезисторы, чувствительный элемент которых выполнен в виде решетки из константанового сплава и размещен на подложке из фольги. Сверху решетка покрывается защитной пленкой. Данные тензорезисторы сохраняют свою работоспособность при максимальном относительном удлинении 1,5 % и не могут быть установлены непосредственно на геосинтетический материал, следовательно, необходимо конструирование тензометрического датчика, который позволяет преобразовать относительное удлинение. За основу конструкции был принят П-образный рамный тензодатчик, конструкция которого приведена в работах [13, 14].

Для измерения деформаций в материалах при помощи тензодатчиков обычно применяется схема подключения тензорезисторов – мост Уитстона. Он представляет собой электрическую цепь, предназначенная для выявления мельчайших изменений сопротивления. В связи с этим она используется для определения изменения сопротивления тензорезистора. Данная схема различается количеством тензорезисторов: $\frac{1}{4}$ моста – один тензорезистор, $\frac{1}{2}$ моста – два тензорезистора и полный мост – четыре тензорезистора, а также количеством проводов, которыми подключается тензорезистор – двух- и трехпроводное подключение [15, 16].

При выборе конструктивного решения тензометрического датчика было принято подключение по типу $\frac{1}{2}$ моста Уитстона. В схеме $\frac{1}{2}$ моста два тензорезистора подключены согласно схеме на рис. 3. Данная схема подключения не требует термокомпенсации, что является неоспоримым преимуществом при проведении измерений в полевых условиях [17].

Конструкция тензодатчика выбрана в форме рамы с жестко заземленным концом (рис. 4), датчики расположены в самом нагруженном сечении согласно эпюрам – в середине ригеля. Расположение тензорезисторов на тензодатчике представлено на рис. 5.

Для подбора параметров конструируемого датчика необходимо определить геометрические размеры рамы тензодатчика и материала. В качестве материала рамы тензодатчика могут применяться нержавеющая сталь и бериллиевая бронза марки БрБ2. Предварительно была назначена толщина листа s , которая может применяться в качестве рамы тензодатчика, для стали – 0,2, 0,5, 0,7 и 0,8 мм, а для бериллиевой бронзы – 0,15, 0,5, 0,7 и 0,8 мм. Длина тензодатчика L не влияет на его параметры и была принята равной 15 мм исходя из размеров наиболее распространенных фольговых металлических тензорезисторов марки 2ФКП-5.

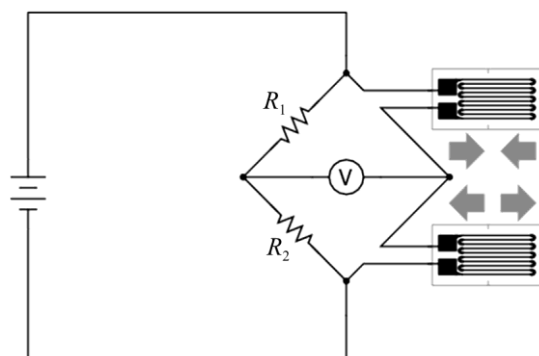


Рис. 3. Принципиальная схема подключения тензорезисторов в 1/2 моста

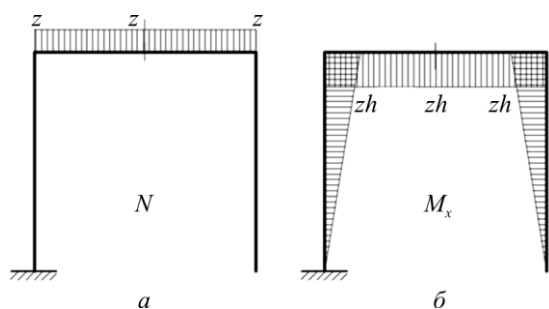


Рис. 4. Эпюры напряжений: *a* – от нормальных сил *N*; *б* – изгибающего момента *M_x*

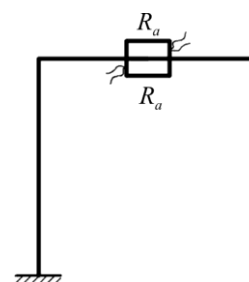


Рис. 5. Схема расположения тензорезисторов на датчике

Используя формулу полных нормальных напряжений и представленные выше эпюры, получим значение σ_{\max} (по центру ригеля рамы) [18].

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W}, \quad (1)$$

$$A = bs, \quad (2)$$

$$W = \frac{bs^2}{6}, \quad (3)$$

где *N* – продольное усилие, кН; *M* – изгибающий момент в рассматриваемом сечении, кН·м; *A* – площадь поперечного сечения элемента, м²; *W* – момент сопротивления поперечного сечения; *s* – толщина поперечного сечения, м; *b* – ширина поперечного сечения, м.

Преобразуя данные формулы, получаем:

$$\sigma = \frac{z}{b \cdot s} + \frac{z \cdot h \cdot 6}{b \cdot s^2} = \frac{z \cdot (s + 6 \cdot h)}{b \cdot s^2}, \quad (4)$$

где *z* – прикладываемая сила, Н.

Напряжения σ можно найти по закону Гука [19]:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E. \quad (5)$$

В связи с тем, что тензорезисторы сохраняют свою работоспособность при максимальном относительном удлинении $\varepsilon = 1,5 \%$, составим следующую формулу:

$$\sigma_{\max} = \frac{h \cdot z}{w} + \frac{z}{A} = 0,015 \cdot E. \quad (6)$$

Подставляя в эти формулы различные значения толщины поперечного сечения *s*, ширины поперечного сечения *b*, с использованием программного комплекса Microsoft Excel рассчитали параметры тензометрического датчика – высоту *h* и максимальную величину перемещения Δs , которые представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Параметры тензометрических датчиков в зависимости от характеристик для бериллиевой бронзы

Толщина s , мм	0,15	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
Ширина b , мм	5	5	7	10	5	7	10	5	7	10
Длина L , мм	15									
Модуль упругости E , Па	$1,31 \cdot 10^{11}$									
Высота h , мм	0,22	2,65	3,74	5,38	5,23	7,37	10,58	6,85	9,65	13,84
Максимальная величина перемещения Δs , мм	–	5,06	6,72	7,47	4,69	6,46	8,41	5,38	6,64	10,12

Таблица 2

Параметры тензометрических датчиков в зависимости от характеристик для стали

Толщина s , мм	0,2	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
Ширина b , мм	5	5	7	10	5	7	10	5	7	10
Длина L , мм	15									
Модуль упругости E , Па	$2 \cdot 10^{11}$									
Высота h , мм	0,63	4,08	5,75	8,25	8,05	11,32	16,22	10,53	14,80	21,20
Максимальная величина перемещения Δs , мм	–	6,11	8,00	9,12	6,63	9,43	13,20	7,38	10,97	16,39

Для более наглядного отображения результатов расчета были построены графики зависимости высоты тензодатчика h от максимальной величины перемещения Δs , представленные на рис. 6, 7.

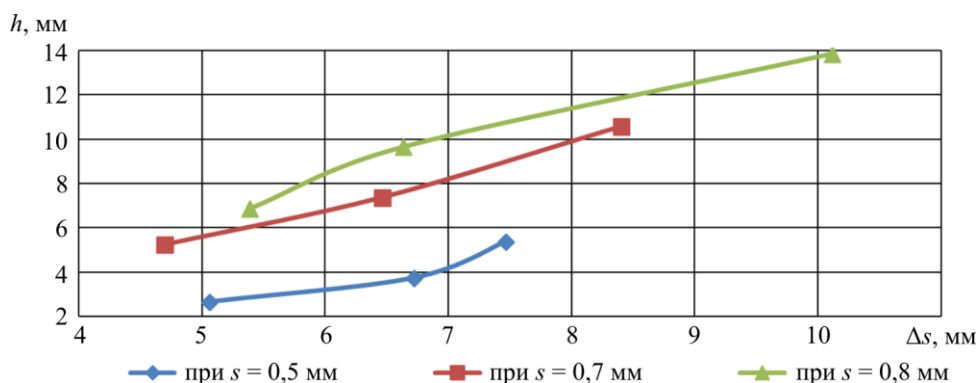


Рис. 6. Графики зависимости высоты тензодатчика h от максимальной величины перемещения Δs для бериллиевой бронзы

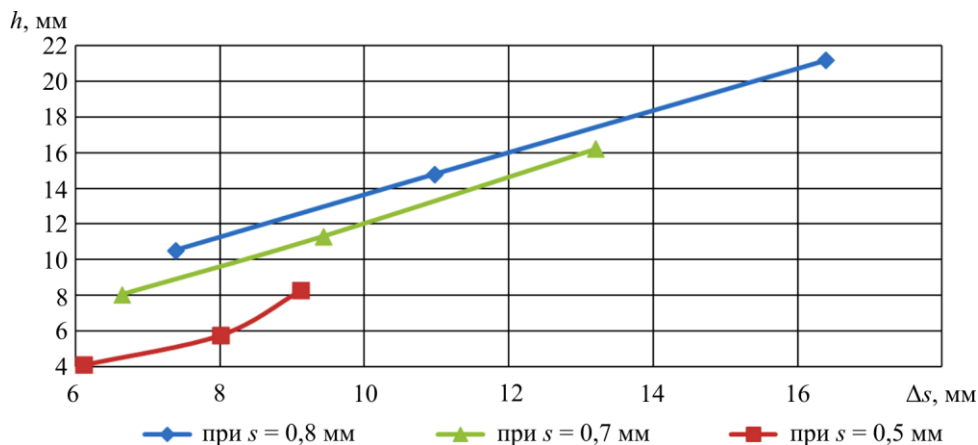


Рис. 7. Графики зависимости высоты тензодатчика h от максимальной величины перемещения Δs для стали

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Для получения требуемых размеров тензодатчиков необходимо в первую очередь учитывать максимальную величину перемещения Δs . При изучении НДС геосинтетических армирующих материалов величина перемещения Δs обычно составляет 3–5 мм.
2. Минимальные размеры тензодатчиков при ориентировочной величине $\Delta s = 3 \dots 5$ мм получаются при ширине поперечного сечения b , равной 5 мм.
3. Минимальная толщина поперечного сечения рамы тензодатчика s должна быть не менее 0,5 мм. Листы материала рамы тензодатчика толщиной $s = 0,15 \dots 0,2$ мм не подходят для изготовления тензодатчиков.
4. Оптимальные размеры высоты тензодатчика h составляют для бериллиевой бронзы 5–7 мм, при толщине $s = 0,7 \dots 0,8$ мм, а для нержавеющей стали $h = 4 \dots 10$ мм при толщине $s = 0,5 \dots 0,8$ мм.
5. Предложенная методика расчета тензодатчика позволяет подобрать его размеры в зависимости от необходимого диапазона измерения деформаций.

Список литературы

1. Опыт проектирования и строительства земляного полотна на слабых грунтах в Пермском крае / К.Ю. Ахметова, Л.В. Сиряченко, Н.В. Меньшикова, Е.С. Краснов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2017. – № 2. – С. 29–40.
2. Лаптев В.А., Сиряченко Л.В. Применение геосинтетического материала при проектировании дорожной одежды автомобильной дороги «Подъезд № 2 к г. Кунгур» // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2018. – Т. 2. – С. 54–61.
3. Лаптев В.А., Сиряченко Л.В. Экономическая эффективность применения геосинтетического материала при проектировании дорожной одежды автомобильной дороги «подъезд № 2 к г. Кунгур» // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – Т. 1. – С. 146–149.
4. Клевко В.И. Применение геосинтетических материалов в дорожном строительстве в условиях Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 114–123.
5. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В.А. Ильичева, Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 1040 с.
6. Некоторые результаты исследований армогрунтовых оснований / Д.Г. Золотозубов, В.И. Клевко, А.Б. Пономарев, Р.С. Нестеров // Актуальные проблемы геотехники: сб. ст., посвященный 60-летию профессора А.Н. Богомолва / ВолгГАСУ. – Волгоград, 2014. – С. 165–171.
7. 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.
8. Татьянников Д.А. Изучение механических характеристик геосинтетических материалов для определения реальной несущей способности армированных фундаментных подушек // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 6. – С. 121–127.
9. Трансформатор напряжения для тканей и гибких листовых материалов: пат. США / Рене Б. Теста, Вассиф М. Боктор. – № 4429580А, опубл. 09.02.1984.
10. Тензодатчик на тканевой основе: пат. США / Чанг Мин Ян, Чун-Мэй Чжоу. – № 7750790В2, опубл. 23.01.2006.
11. Датчик для измерения нормальных напряжений в грунтах: пат. Рос. Федерация / Авдушева М.А., Невзоров А.Л. – № 0002642977, заявл. 12.04.2017; опубл. 17.02.2018.
12. Способ крепления тензодатчиков к различным материалам: пат. США / Тимоти Д. Шотт, Роберт Л. Фокс, Джон Д. Бакли. – № 4767484А, опубл. 20.02.1986.
13. 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.

14. Lashova S.S., Kleveko V.I. Measurement of stresses and strains in soils at field conditions // *SWorldJournal*. – 2016. – Т. j1104, № 11. – P. 15–18.
15. Клокова Н.П. Тензорезисторы. Теория, методики расчета, разработки. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
16. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
17. 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.
18. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика: учебник. – 12-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2010. – 656 с
19. Тимошенко С.П. Соппротивление материалов. Т. 1. Элементарная теория и задачи. – 2-е изд., стер. / пер. с англ. В.Н. Федорова. – М.: Наука, 1965. – 363 с.

References

1. Akhmetova K.Iu., Siriachenko L.V., Men'shikova N.V., Krasnov E.S. Opyt proektirovaniia i stroitel'stva zemlianogo polotna na slabyykh gruntakh v Permskom krae [Experience in the design and construction of the subgrade on weak soils in the Perm region]. *Transport. Transportnye sooruzheniia. Ekologiya*. 2017, no. 2, pp. 29–40.
2. Laptev V.A., Siriachenko L.V. Primenenie geosinteticheskogo materiala pri proektirovanii dorozhnoi odezhdyy avtomobil'noi dorogi "Pod"ezd № 2 k g. Kungur" [The use of geosynthetic material in the design of road pavement of the highway "Entrance No. 2 to the city of Kungur"]. *Sovremennyye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika*, 2018, vol. 2, pp. 54–61.
3. Laptev V.A., Siriachenko L.V. Ekonomicheskaya effektivnost' primeneniya geosinteticheskogo materiala pri proektirovanii dorozhnoi odezhdyy avtomobil'noi dorogi "pod"ezd № 2 k g. Kunguru" [The economic efficiency of the use of geosynthetic material in the design of the pavement of the highway "Entrance number 2 to the city of Kungur"]. *Modernizatsiya i nauchnyye issledovaniya v transportnom komplekse* Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2018, vol.1, pp. 146–149.
4. Kleveko V.I. Primenenie geosinteticheskikh materialov v dorozhnom stroitel'stve v usloviyakh Permskogo kraia [The use of geosynthetic materials in road construction in the Perm region]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, no. 1, pp. 114–123.
5. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemny'e sooruzheniya [Reference geotechnical. Bases, foundations and underground structures]. Moscow: ASV, 2016, 1040 p.
6. Zolotozubov D.G., Kleveko V.I., Ponomarev A.B., Nesterov R.S. Nekotory'e rezul'taty issledovaniy armogruntovykh osnovaniy [Some results of studies of ground reinforced grounds]. *Aktual'ny'e problemy geotekhniki: sb. st., posvyashchennyy 60-letiyu professora A.N. Bogomolova*. VolgGASU. Volgograd, 2014, pp. 165–171.
7. 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.
8. Tat'iannikov 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 to determine the actual carrying capacity of reinforced base pads]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2015, no. 6, pp. 121–127.
9. Testa Rene B., Boktor Vassif M. Stress transducer for fabrics and flexible sheet materials. Patent US4429580A, (1984).
10. Chang Min Yan, Chun-Me`j Chzhou. Fabric-based strain gauge. Patent US7750790B2 (2006).
11. Avdusheva M.A., Nevzorov A.L. Datchik dlya izmereniya normal'nykh napryazheniy v gruntax [Sensor for measuring normal stresses in soils]. Patent Rossiiskaia Federatsiya no. RU0002642977 (2018).
12. Shott Timoti D., Foks Robert L., Bakli Dzhon D. Method of attaching strain gauges to various materials. Patent US 4767484 A (1986).
13. Lashova S.S., Kleveko V.I. Primenenie tenzometricheskogo datchika pri izmerenii napryazheniy v geosinteticheskikh materialakh [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.
14. 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.
15. Klokov N.P. Tenzorezistory. Teoriya, metodiki rascheta, razrabotki [Strain gages. Theory, methods of calculation, development]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 224 p.
16. Mekhed V.A. Tenzometricheskij metod izmereniya deformatsiy [Strain gauge measurement]. Samara, Samarskii gosudarstvennyi politekhnicheskii universitet, 2011, 56 p.

17. 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.
18. Darkov A.V., Shaposhnikov N.N. *Stroitel'naya mekhanika: Uchebnik* [Construction mechanics: Textbook.]. Saint Petersburg, Lan`, 2010, 656 p.
19. Timoshenko S.P. *Soprotivlenie materialov. Elementarnaya teoriya i zadachi* [Resistance of materials, Elementary theory and problems]. Moscow: Nauka, Vol. 1, 1965, 363 p.

Получено 08.02.2019

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: vlivkl@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 V. 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: vlivkl@mail.ru).