

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-738-744
УДК 53.087:504.064.36

Разработка волоконно-оптической системы для мониторинга геотехнических сооружений

Илларион Леонидович Никулин¹, Юлия Ильинична Рофер²✉

^{1,2} Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990, Российская Федерация

¹ nil@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8496-7942>

² julia.rofer@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0009-0002-5762-2647>

Аннотация

Введение. В работе представлена концепция точечного амплитудного датчика регистрации смещения геотекстиля — синтетической ткани, армирующей геотехнические сооружения, подобные дамбе. Применение систем непрерывного контроля состояния строительной конструкции, основанных на идее «умного» геотекстиля, может значительно повысить безопасность объекта, предупреждая о необходимости проведения внеплановых ремонтных работ, возникновении аварийной ситуации и необходимости срочного прекращения эксплуатации объекта, эвакуации персонала или населения. Оценены возможности существующих технических решений датчиков смещения. Известно, что существующие системы мониторинга, использующие датчики на волоконных брегговских решетках, не применимы в случае с геотекстилем. Это обусловлено большой податливостью грунта и практическим отсутствием в грунте упругой деформации. Кроме того, датчики на волоконных брегговских решетках значительно дороже в производстве по сравнению с телекоммуникационным оптическим волокном. **Метод.** Одномодовое волокно в чувствительном элементе образует одну или несколько петель, зажатых между подвижными упорами, прикрепленными к корпусу и к подвижному активатору. При макроизгибе армирующего оптоволокну происходит нарушении полного внутреннего отражения, что приводит к амплитудной модуляции излучения. Макроизгиб пропорционален смещению активатора, прикрепленного к геотекстилю. В работе приведены конструкция, размеры чувствительного элемента и математические соотношения размеров и характеристик элементов конструкции для обработки сигнала. Модель датчика реализована из ABS-пластика и оптоволокну Coming SMF-28. **Основные результаты.** Экспериментальная установка для проверки предложенной концепции реализует контролируемое смещение активатора, ввод и вывод излучения. Определены зависимости выходной мощности от диаметра изгиба оптоволокну в интервале от 25 до 11 мм и смещения в пределах до 14 мм при длине волны излучения 1550 нм. Показано, что полученные зависимости монотонны, на них имеются квазилинейные участки. Полученные на графиках перегибы при малом диаметре изгиба оптоволокну возникают в результате интенсивного выхода излучения из сердцевины в оболочку и рассеяния в ней, а при большом диаметре — из-за малых изгибных потерь. **Обсуждение.** Проведенные исследования показали, что предложенный датчик позволяет надежно фиксировать смещение до 0,5 мм. Результаты обладают хорошей повторяемостью. Отметим, что датчик уступает по точности регистрации смещений грунта, но по стоимости на порядок дешевле датчиков на волоконных брегговских решетках.

Ключевые слова

волоконно-оптический датчик, амплитудный датчик, датчик смещения, мониторинг строительных сооружений, умный геотекстиль, геотехника

Ссылка для цитирования: Никулин И.Л., Рофер Ю.И. Разработка волоконно-оптической системы для мониторинга геотехнических сооружений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 5. С. 738–744. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-738-744

Development of a fiber-optic system for monitoring geotechnical structures

Illarion L. Nikulin¹, Yulia I. Rofer²✉

^{1,2} Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation

¹ nil@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8496-7942>

² julia.rofer@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0009-0002-5762-2647>

Abstract

The paper presents the concept of a point amplitude sensor for the registration of displacement of geotextile, a synthetic fabric that is used to reinforce geotechnical structures such as a dam. The implementation of a system for continuous monitoring of the structural condition of a building based on the concept of a “smart” geotextile has the potential to significantly enhance the safety of the structure. Such a system could provide early warning of the necessity for unscheduled repairs, the occurrence of an emergency situation, and the need for the immediate cessation of building operations, evacuation of personnel or population. The capabilities of existing technical solutions for displacement sensors have been evaluated. It is not feasible to apply existing monitoring systems utilizing fiber Bragg Grating Sensors (FBG) in the context of geotextile. This is due to the greater pliability of the soil which exhibits minimal elastic deformation. In addition, FBG sensors are much more expensive in production compared to telecommunication optical fiber. The single-mode fiber which constitutes the sensing element, forms one or more loops that are placed between movable stops that are attached to the sensor body and to the movable activator. At the point of macro bending of the reinforcing fiber, the phenomenon of total internal reflection is disrupted, which in turn gives rise to amplitude modulation of the radiation. The macro bending is proportional to the displacement of the activator attached to the geotextile. This paper presents the design, dimensions and mathematical relationships of the sensing element as well as the dimensions and characteristics of the design elements for signal processing. The sensor model is constructed from ABS plastic and fiber Corning SMF-28. An experimental setup was constructed to test the proposed concept which involved controlling the displacement of the activator, the input and output of radiation. The dependences of the output power on the fiber bending diameter, ranging from 25 to 11 mm, and the displacement, up to 14 mm, at a radiation wavelength of 1550 nm, were determined. It was demonstrated that the obtained dependences were monotonic and exhibited quasi-linear plots. The kinks at the small diameter of the fiber bend are caused by two factors: the intensive radiation output from the core to the cladding and scattering within it; and at the large diameter, they are due to small bending losses. The conducted studies have demonstrated that the sensor is capable of reliably detecting displacements up to 0.5 mm. The results exhibited good repeatability. The proposed sensor demonstrated inferior accuracy compared to FBG sensors. Conversely, at comparable accuracy of ground displacement registration, the proposed sensor was observed to be an order of magnitude more cost-effective than FBG sensors.

Keywords

fiber optic sensor, amplitude sensor, displacement sensor, monitoring of building structures, smart geotextile, geotechnics

For citation: Nikulin I.N., Rofer Yu.I. Development of a fiber-optic system for monitoring geotechnical structures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 5, pp. 738–744 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-738-744

Введение

Согласно определению «Международного общества геосинтетики», геотекстиль или геосинтетические материалы представляют собой плоские, относительно непроницаемые, сделанные из синтетических или природных материалов полимерные полотна.

За последние несколько десятилетий значительно увеличилось применение геотекстиля в гражданском строительстве [1–3]. Армирование грунта геотекстилем позволяет за счет связи между арматурой и грунтом создать конструкции, способные принимать значительные нагрузки и увеличить несущую способность грунта без деформации [4]. К преимуществам использования геотекстиля можно отнести низкие затраты на производство и замену, простое с технической точки зрения устройство, компактность, простоту в транспортировке, быструю скорость монтажа, долгий срок службы, а также низкую чувствительность к воздействиям окружающей среде [5, 6]. Широко используемый в строительстве материал, а также тенденция создания «умных» материалов и строительных объектов вдохновили ученых на разработку «умного» геотекстиля.

Концепция «умного» геотекстиля (рис. 1) подразумевает внедрение датчиков и технологий мониторинга

в сам материал или в строительный объект. В самом простом случае можно закреплять волоконно-оптические датчики смещения на геотекстиле, который укладывается слоями вместе с грунтом, и при помощи оптоволоконна соединять датчики с центром обработки данных, тем самым вести удаленный контроль состояния грунта [7]. Такая система мониторинга аналогична тем, что используются для мониторинга железнодорожных насыпей с помощью геосинтетических материалов, оснащенных датчиками [8], и укрепления откосов с помощью георешеток со встроенным оптоволоконном [9], основанными на технологии рефлектометрии. Применение подобных систем непрерывного контроля состояния строительного объекта может значительно повысить его безопасность, предупреждая о необходимости проведения внеплановых ремонтных работ, либо о возникновении аварийной ситуации и необходимости срочного прекращения эксплуатации объекта или эвакуации персонала или населения [10–12].

В настоящее время для контроля состояния строительных конструкций применяют системы, в основе которых лежат датчики следующих типов [13]: тензометрические [14], акустические преобразователи [15], молекулярно-электронные [16] и волоконно-оптические [17]. Волоконно-оптические датчики разделяют

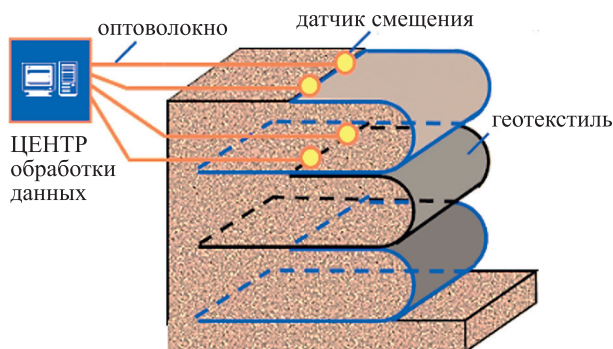


Рис. 1. Схема армирования насыпи «умным» геотекстилем
Fig. 1. Scheme of embankment reinforcement with “smart” geotextile

на точечные [18], распределенные [19] и квазираспределенные [20]. Из них наиболее доступными являются волоконно-оптические датчики, основанные на использовании волоконных брэгговских решеток (ВБР). Волоконно-оптический датчик на основе ВБР создается как основа новой системы мониторинга зданий и сооружений, что позволяет контролировать основные параметры несущих строительных конструкций: деформацию, вибрацию и температуру [13].

Существующие системы контроля, использующие датчики на основе ВБР, не применяются для контроля геотекстиля. Это обусловлено тем, что грунт более податлив, чем кварцевое волокно, а также в грунте отсутствует упругая деформация. Кроме того, ВБР может записываться только в определенных (фоточувствительных) оптических волокнах. Как правило, они дополнительно легируются, а потому значительно дороже в производстве по сравнению с телекоммуникационным оптическим волокном [21].

В настоящей работе рассматривается создание системы, которая потенциально может быть использована для мониторинга состояния геотекстиля в дисперсных грунтах, которые представляют собой совокупности твердых частиц элементов, между которыми есть структурные связи. К грунтам такого типа относят песок, глину, ил или торф¹. Таким образом, волоконно-оптический датчик будет подвергаться постоянному влиянию агрессивной и нестабильной среды, что может привести к помутнению оптоволоконно и повреждению датчика [22]. Применение столь точных дорогих датчиков и построенных на них систем мониторинга, которые по себестоимости будут сравнимы с самим геотехническим сооружением, представляется экономически невыгодным.

Целью настоящей работы является разработка волоконно-оптической системы для контроля смещения геотекстиля, которым армируется геотехническое сооружение.

Концепция и реализация волоконно-оптического датчика для мониторинга

Одним из основных способов защиты волоконно-оптических датчиков и создания необходимой связи между геотекстилем и датчиками является правильный подбор метода производства и внедрения системы [23–25], так как неправильная установка датчиков может запускать механизмы передачи напряжения от геотекстиля к сердцевине оптоволоконно [25]. Сформулируем требования к разрабатываемому чувствительному элементу и системе мониторинга в целом. Конструкция датчика должна обеспечивать надежное измерение смещений геотекстиля порядка 1 мм. Именно величина смещения свидетельствует об опасной деформации сооружения, предупреждая о необходимости проведения ремонтных работ.

Отметим особенности контролируемой системы: геотекстиль обладает значительной жесткостью при растяжении и нулевой при сжатии; в дисперсном грунте доминируют пластические деформации, упругие — практически отсутствуют. Из этого следует, что сокращение деформации геотехнического сооружения со временем и связанное с ним смещение контролируемого конца геотекстиля влево (рис. 1) представляется нереалистичным. Таким образом, разработанный датчик должен фиксировать только увеличение смещения, при этом скорость смещения невелика.

Конструкция должна обладать простотой монтажа чувствительного элемента к полотну геотекстиля и к системе измерения. Схожие по назначению и основанные на рефлектометрии системы мониторинга [8, 9] имеют недостаток, в них чувствительный элемент (оптоволоконно) встраивается в геотекстиль, что делает его производство более трудоемким. При этом геотекстиль подвержен риску повреждения, учитывая, что при механическом воздействии можно сломать оптическое волокно, и в результате геотекстиль будет непригоден для использования.

Отметим необходимость невысокой стоимости волоконно-оптических датчиков и всей системы измерения в целом, что должно обеспечить применение подобных систем мониторинга без значительного удорожания геотехнического сооружения.

К дополнительным требованиям можно отнести сохранение надежности конструкции на протяжении длительного времени (годов и десятилетий) и экологичность [26]. Эти требования обеспечиваются применением влагостойких волоконных кабелей, герметичностью волоконно-оптического датчика, гидрофобными материалами корпуса, а также применением оптоволоконно, длительно сохраняющим оптические характеристики. Необходимо учесть, что датчик будет находиться далеко от источника приема излучения, поэтому его работа должна осуществляться в окнах прозрачности оптоволоконно на длине волны $\lambda = 1550$ нм.

В основе концепции текущей разработки лежит известный факт зависимости пропускаемой мощности излучения при макроскопическом изгибе оптического волокна [27]. Амплитудная модуляция применена в датчиках вибрации [28, 29].

¹ ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация. Введен 01.01.2013. М.: Изд-во стандартов, 2013. 44 с.

Чувствительный элемент разработанного волоконно-оптического датчика представляет собой участок волоконного световода, выполненный в виде одной или нескольких петель, закрепленных на основании корпуса датчика, которое прикрепляется к контролируемому объекту. Принципиальная схема крепления показана на рис. 2. Оптическое волокно закреплено между коротких и удлиненных упоров, которые служат для обеспечения контролируемой деформации в виде прямых участков в закрепленной части и полукольца диаметром d в незакрепленной. Экспериментально установлено, что для оптического волокна SMF-28 и длине волны излучения $\lambda = 1550$ нм, при диаметре изгиба меньшем, чем $d_0 = 25$ мм, излучение начинает покидать световод и происходит падение мощности. При смещении упоров кривизна оптоволокну уменьшается до диаметра d_1 (рис. 2, b), которая приводит к нарушению полного внутреннего отражения, и, как следствие, выходу излучения из волокна и потере прошедшей мощности. По изменению мощности излучения можно судить о диаметре изгиба волокна. Полученная зависимость для оптоволокну SMF-28 при длине волны $\lambda = 1550$ нм показана на рис. 3.

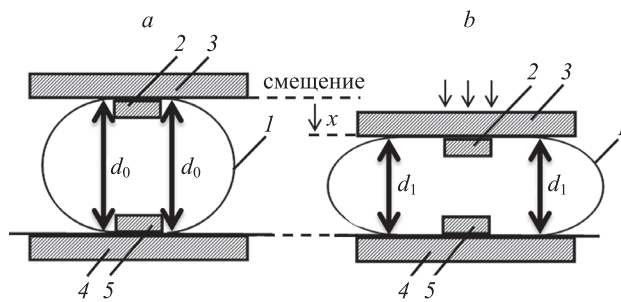


Рис. 2. Схема крепления оптоволокну (a) и его деформирования (b): 1 — оптическое волокно; 2, 3 — подвижные упоры; 4, 5 — неподвижные упоры
 Fig. 2. Scheme of fiber attachment (a) and its deformation (b): 1 — optical fiber; 2, 3 — movable stops; 4, 5 — fixed stops

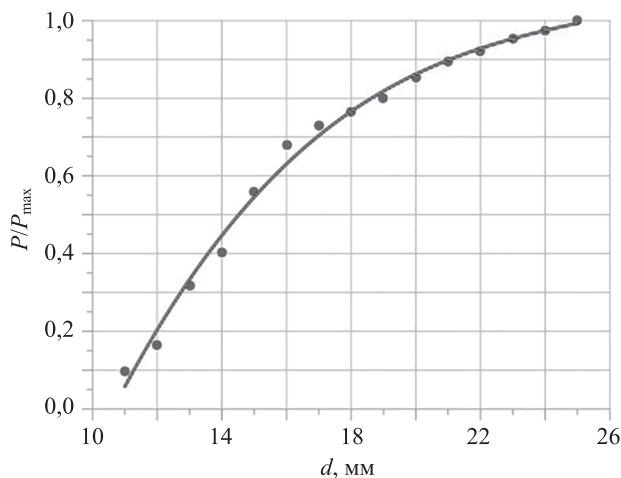


Рис. 3. Зависимость относительной средней проходящей мощности P/P_{max} от диаметра изгиба d
 Fig. 3. Dependence of the relative average passing power P/P_{max} vs. the bending diameter d

Схема разработанной волоконно-оптической системы представлена на рис. 4. Излучение от источника направляется к чувствительному элементу по оптоволокну 1, устойчивому к изгибам. Переход от оптоволокну к чувствительному элементу осуществляется благодаря оптической розетке 10, с помощью которой происходит вывод сигнала из чувствительного элемента. Чувствительный элемент находится в корпусе датчика 6. Волокно располагается на круглом столе 5, который предотвращает его попадание в зону движения каретки и пружин. Оптоволокну внутри чувствительного элемента образует две части: передающую и чувствительную. В передающей части излучение подводится к чувствительной и отводится от нее. Чувствительная часть представляет собой одну или несколько петель оптоволокну, которые размещены между упорами 5 и 4. Упор 4 жестко закреплен на круглом столе, а подвижные упоры 2 и 3 образуют крепление для волокна, присоединенное к подвижной части волоконно-оптического датчика.

В подвижной части активатор 7 одним концом соединяется с контролируемым объектом, а другим — с кареткой 9. Рама 8 обеспечивает соединение подвижной и неподвижной частей. Деформация на измеряемом объекте приводит в движение активатор 7, а с ним каретку 9 и упоры 2 и 3, тем самым уменьшая кривизну оптоволокну. Излучение, прошедшее через чувствительный элемент, распространяется далее по световоду и попадает на фотоприемник. Сигнал с фотоприемника обрабатывается с помощью разработанной программы на персональный компьютер. Модель разработанного точечного амплитудного волоконно-оптического датчика выполнена в программе АСКОН КОМПАС 3D и напечатана на 3D-принтере из ABS-пластика.

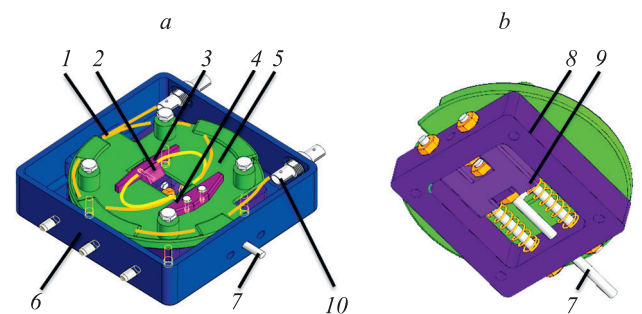


Рис. 4. Схема чувствительного элемента датчика смещения: вид в корпусе сверху (a) и без корпуса снизу (b). 1 — оптоволокну, чувствительное к изгибам; 2, 3 и 4 — подвижные и неподвижный упоры (рис. 1); 5 — неподвижный упор, круглый стол; 6 — корпус датчика; 7 — активатор; 8 — рама; 9 — подвижная каретка, передающая смещение с активатора к подвижным упорам 2 и 3; 10 — оптические розетки
 Fig. 4. Diagram of the sensitive element of the displacement sensor: view from the top (a) and from the bottom without sensor body (b). 1 — bend-sensitive fiber; 2, 3 and 4 — movable and fixed stops (equivalent to those in Fig. 1); 5 — fixed stop, round table; 6 — sensor body; 7 — activator; 8 — frame; 9 — movable carriage, transmitting displacement from the activator to movable stops 2 and 3; 10 — optical sockets

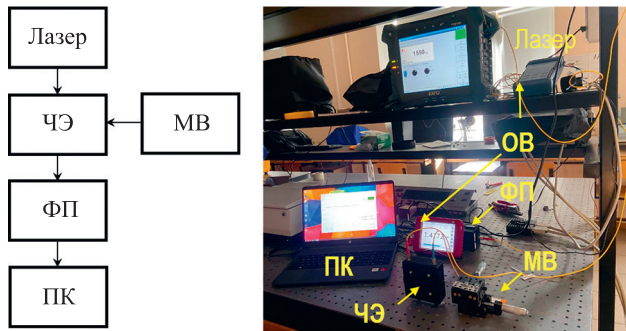


Рис. 5. Принципиальная схема экспериментальной установки (а) и ее фотография (б): ЧЭ — чувствительный элемент; ФП — фотоприемник; ПК — персональный компьютер (блок обработки информации); МВ — микрометрический винт, подающий заданное смещение на ЧЭ; ОВ — оптическое волокно

Fig. 5. Schematic diagram of the experimental setup (a) and photograph (b): ЧЭ — sensitive element; ФП — photodetector; ПК — personal computer (information processing unit); МВ — micrometric screw that supplies a given displacement to the sensitive element; ОВ — optical fiber

Экспериментальная установка (рис. 5, б) включает источник электромагнитного излучения EXFO FTB-500, разработанный волоконно-оптический датчик, фотоприемник Thorlabs PM200 и персональный компьютер для обработки данных. Схема подключения показана на рис. 5, а.

Экспериментальные результаты

Экспериментальные результаты получены для длины волны $\lambda = 1550$ нм, выходная мощность источника излучения $P_{\max} = 5$ мкВт, частота опроса фотоприемника $\nu = 95$ Гц. На рис. 6 показана зависимость относительной проходящей мощности P/P_{\max} от перемещения x микрометрического винта, связанного с диаметром изгиба волокна d (рис. 1), соотношением

$$x = d_0 - d,$$

где d_0 — минимальный диаметр изгиба оптоволокна, при котором не возникает потерь проходящего излучения. Влияние шума источника излучения и фотоприемника характеризуется величиной относительной среднеквадратичной ошибки

$$\delta P = \frac{\Delta P}{\langle P \rangle},$$

где $\langle P \rangle$ — средняя мощность, полученная по формуле

$$\langle P \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i,$$

где P_i — мощность при i -ом измерении; n — фиксированное число последовательных измерений $n = 100$; ΔP — среднеквадратичная ошибка, рассчитанная в виде:

$$\Delta P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \langle P \rangle)^2}{n(n-1)}}.$$

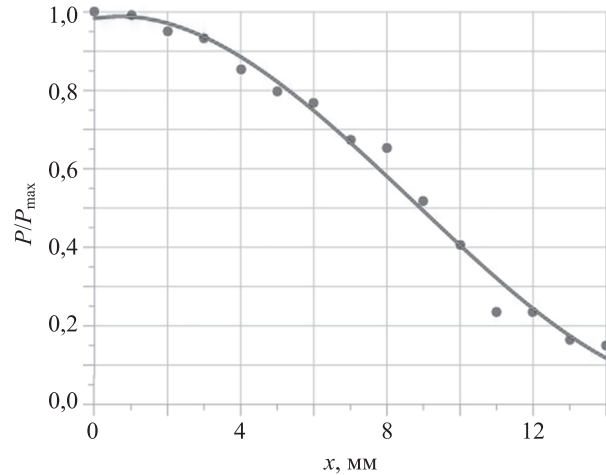


Рис. 6. Зависимость смещения x от относительной средней проходящей мощности P/P_{\max}

Fig. 6. Dependence of the displacement x vs. the relative average passing power P/P_{\max}

На рис. 6 видно, что зависимость выходной мощности от диаметра изгиба оптоволокна монотонна, но имеет перегибы при $d_{low} = 14$ мм и $d_{high} = 23$ мм. Это объясняется тем, что при малых диаметрах изгиба оптоволокна ($d < d_{low}$) происходит нарушение полного отражения, в результате весь свет, передаваемый по оптоволокну, из сердцевины уходит в оболочку, а при больших ($d > d_{high}$) — свет только начинает уходить из сердцевины в оболочку.

Величина шума составляет около 2 мкВт и при малых мощностях может влиять на результаты измерений, но она постоянна по абсолютной величине. Это указывает на то, что чувствительный элемент не является источником шума; т. е. вклад в шум дают только источник и приемник излучения. Эксперименты с другими более мощными источниками показали хорошую повторяемость результатов и значительно меньший относительный уровень шума. В работе представлены результаты эксперимента, в котором использовался менее мощный источник, который имитирует удаленность волоконно-оптического датчика и возможность измерения в неидеальных условиях. Таким образом, разработанная конструкция отвечает предполагаемым требованиям и может использоваться для определения смещения.

Заключение

Разработан и реализован вариант точечного амплитудного волоконно-оптического датчика контроля смещения, который применим для контроля состояния геотекстиля. Проведенные измерения показали, что датчик позволяет надежно фиксировать смещение до 0,5 мм. Результаты обладают хорошей повторяемостью. Разработанный датчик значительно уступает в точности подобным датчикам, основанным на брэгговских решетках и способным измерять микронные смещения. Однако этой точности достаточно для контроля смещений грунта, кроме того, разработанный датчик на

порядок дешевле датчиков на волоконных брэгговских решетках, что обеспечивает его перспективность.

Дальнейшие направления развития исследования связаны с применением излучения других длин волн, их комбинации, а также способов герметизацией дат-

чика. На следующем этапе работы планируется проверить работоспособность предложенной конструкции на экспериментальной установке, в которой он будет регистрировать смещение геотекстиля, зажатого между двумя слоями дисперсного грунта.

Литература

1. Touze-Foltz N., Bannour H., Barral C., Stoltz G. A review of the performance of geosynthetics for environmental protection // *Geotextiles and Geomembranes*. 2016. V. 44. P. 656–672. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2016.05.008>
2. Obsharova A.V., Grishina A.S. Effect of the fiber reinforcement on the mechanical properties of clay soils, including properties under conditions of seasonal freezing and thawing // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1928. P. 012067. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1928/1/012067>
3. Анферов Е.П., Гришина А.С., Смирнов Р.С. Исследование возможного применения волокнистых отходов в качестве армирующих волокон для создания эффективных геотехнических конструкций // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология*. 2018. № 1(29). С. 168–177. <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2018.01.13>
4. 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.
5. Li J., Cui X.Z., Jin Q., Su J.W., Cui S.Q., Wang Y.L. Laboratory investigation of the durability of a new smart geosynthetic material // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 169. P. 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.187>
6. Wang Z., Richwien W. A study of soil-reinforcement interface friction // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2002. V. 128. N 1. P. 92–94. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2002\)128:1\(92\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2002)128:1(92))
7. Wang B.-J., Li K., Shi B., Wei G.-Q. Test on application of distributed fiber optic sensing technique into soil slope monitoring // *Landslides*. 2009. V. 6. N 1. P. 61–68. <https://doi.org/10.1007/s10346-008-0139-y>
8. Nöther N. Distributed fiber sensors in river embankments: advancing and implementing the Brillouin optical frequency domain analysis. Berlin, Germany: BAM-Dissertationsreihe, 2010. 143 p.
9. Hong C.Y., Yin J.H., Zhang Y.F. Deformation monitoring of long GFRP bar soil nails using distributed optical fiber sensing technology // *Smart Materials and Structures*. 2016. V. 25. N 8. P. 085044. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/085044>
10. Abedi M., Kiran Sanivada U., Ali Mirian S., Hassanshahi O., Al-Jabri K., Gomes Correia A., Lourenço P.B., Figueiro R. A self-sensing and self-heating planar braided composite for smart civil infrastructures reinforcement // *Construction and Building Materials*. 2023. V. 387. P. 131617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131617>
11. Hatami K., Hassanikhah A., Yazdani H., Grady B.P. Tensoresistive PVC coating for sensor-enabled geogrids // *Journal of Nanomechanics and Micromechanics*. 2014. V. 4. N 4. P. A4013016. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)nm.2153-5477.0000070](https://doi.org/10.1061/(asce)nm.2153-5477.0000070)
12. Fathi A., Hatami K., Grady B.P. Effect of carbon black structure on low-strain conductivity of polypropylene and low-density polyethylene composites // *Polymer Engineering and Science*. 2012. V. 52. N 3. P. 549–556. <https://doi.org/10.1002/pen.22115>
13. Калижанова А.У., Кашаганова Г.Б., Козбакова А.Х., Едилхан Д., Амиргалиева Ж.Е., Оразбеков Ж. Анализ и исследование существующего опыта проектирования и использования различных современных волоконно-оптических датчиков для контроля состояния механических и строительных конструкций // *Вестник казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева*. 2021. № 3(118). С. 112–123. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2021-118-3-110-123>
14. Костилов К., Чуқан Ы. Тензометрические датчики силы // *Компоненты и Технологии*. 2010. № 1(102). С. 16–18.
15. Taranov M.A., Gorshkov B.G., Alekseev A.E., Konstantinov Yu.A., Turov A.T., Barkov F.L., Wang Z., Zhao Z., Zan M.S.D., Kolesnichenko E.V. Optical reflectometry, metrology, and sensing.

References

1. Touze-Foltz N., Bannour H., Barral C., Stoltz G. A review of the performance of geosynthetics for environmental protection. *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, vol. 44, pp. 656–672. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2016.05.008>
2. Obsharova A.V., Grishina A.S. Effect of the fiber reinforcement on the mechanical properties of clay soils, including properties under conditions of seasonal freezing and thawing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1928, pp. 012067. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1928/1/012067>
3. Anferov E., Grishina A., Smirnov R. Research of possible application of fibrous waste as reinforcing fibres for the creation of efficient geotechnical constructions. *PNRPU. Applied ecology. Urban development*, 2018, no. 1(29), pp. 168–177. (in Russian). <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2018.01.13>
4. Ponomarev A.B., Ofrikhter V.G. Analysis and problems of geosynthetic material application in Russian Federation. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*, 2013, no. 2, pp. 68–73. (in Russian)
5. Li J., Cui X.Z., Jin Q., Su J.W., Cui S.Q., Wang Y.L. Laboratory investigation of the durability of a new smart geosynthetic material. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 169, pp. 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.187>
6. Wang Z., Richwien W. A study of soil-reinforcement interface friction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, vol. 128, no. 1, pp. 92–94. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2002\)128:1\(92\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2002)128:1(92))
7. Wang B.-J., Li K., Shi B., Wei G.-Q. Test on application of distributed fiber optic sensing technique into soil slope monitoring. *Landslides*, 2009, vol. 6, no. 1, pp. 61–68. <https://doi.org/10.1007/s10346-008-0139-y>
8. Nöther N. *Distributed fiber sensors in river embankments: advancing and implementing the Brillouin optical frequency domain analysis*. Berlin, Germany, BAM-Dissertationsreihe, 2010, 143 p.
9. Hong C.Y., Yin J.H., Zhang Y.F. Deformation monitoring of long GFRP bar soil nails using distributed optical fiber sensing technology. *Smart Materials and Structures*, 2016, vol. 25, no. 8, pp. 085044. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/085044>
10. Abedi M., Kiran Sanivada U., Ali Mirian S., Hassanshahi O., Al-Jabri K., Gomes Correia A., Lourenço P.B., Figueiro R. A self-sensing and self-heating planar braided composite for smart civil infrastructures reinforcement. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 387, pp. 131617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131617>
11. Hatami K., Hassanikhah A., Yazdani H., Grady B.P. Tensoresistive PVC coating for sensor-enabled geogrids. *Journal of Nanomechanics and Micromechanics*, 2014, vol. 4, no. 4, pp. A4013016. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)nm.2153-5477.0000070](https://doi.org/10.1061/(asce)nm.2153-5477.0000070)
12. Fathi A., Hatami K., Grady B.P. Effect of carbon black structure on low-strain conductivity of polypropylene and low-density polyethylene composites. *Polymer Engineering and Science*, 2012, vol. 52, no. 3, pp. 549–556. <https://doi.org/10.1002/pen.22115>
13. Kalizhanova A., Kashaganova G., Kozbakova A., Edilkhan D., Amirgaliyeva Zh., Orazbekov Zh. Analysis and research of the existing experience in the design and use of various modern fiber-optic sensors for monitoring the condition of mechanical and building structures. *The Bulletin of Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshtayev*, 2021, no. 3(118), pp. 112–123. (in Russian). <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2021-118-3-110-123>
14. Kostikov K., Chukan I. Strain gauge force transducers. *Components & Technologies*, 2010, no. 1(102), pp. 16–18. (in Russian)
15. Taranov M.A., Gorshkov B.G., Alekseev A.E., Konstantinov Yu.A., Turov A.T., Barkov F.L., Wang Z., Zhao Z., Zan M.S.D., Kolesnichenko E.V. Optical reflectometry, metrology, and sensing. present and future (Review). *Instruments and Experimental*

- present and future (Review) // Instruments and Experimental Techniques. 2023. V. 66. N 5. P. 713–729. <https://doi.org/10.1134/s0020441223050238>
16. Шабалина А.С., Зайцев Д.Л., Егоров Е.В., Егоров И.В., Антонов А.Н., Бугаев А.С., Агафонов В.М., Криштоп В.Г. Молекулярно-электронные преобразователи в современных измерительных приборах // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 9. С. 33–45.
 17. Вялышев А.И., Добров В.М., Долгов А.А., Бутов О.В., Плешков А.Ю. Волоконно-оптические датчики для контроля параметров состояния объектов и окружающей среды в задачах мониторинга // Природообустройство. 2014. № 3. С. 32–37.
 18. Волоконно-оптические датчики: вводный курс для инженеров и научных работников / под ред. Э. Удда; пер. с англ. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
 19. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРТ, 2005. 208 с.
 20. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические датчики и измерительные сети. Владивосток: Дальнаука, 1999. 283 с.
 21. Кашаганова Г.Б., Касимов А.О. Технология изготовления волоконных брэгговских решеток // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Т. 2. 2015. С. 106–109.
 22. Губская О.А., Плут М.Н., Спиридонов О.Р., Фатьянова Е.В. Анализ внешних факторов, влияющих на работоспособность волоконно-оптических систем передач // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. № 5. С. 102–107.
 23. Guangqing W., Bin S., Xiaokui Y., Chunde P., Youqun Z., Baojun W. BOTDR based distributed strain test on bored pile buried in complicated geological ground // Journal of Engineering Geology. 2008. V. 16. N 6. P. 826–832.
 24. Piao C.D., Shi B., Gao L. Characteristics and application of BOTDR in distributed detection of pile foundation // Advanced Materials Research. 2011. V. 163–167. P. 2657–2665. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.163-167.2657>
 25. Liu W., Wang H., Zhou Z., Xing X., Cao D., Jiang Z. Optical fiber-based sensors with flexible encapsulation for pavement behavior monitoring // Structural Control and Health Monitoring. 2015. V. 22. N 2. P. 301–313. <https://doi.org/10.1002/stc.1674>
 26. Abedi M., Figueiro R., Correia A.G., Shayanfar J. Smart geosynthetics and prospects for civil infrastructure monitoring: A comprehensive and critical review // Sustainability. 2023. V. 15. N 12. P. 9258. <https://doi.org/10.3390/su15129258>
 27. Burdysheva O.V., Sushko D.N., Sholgin E.S., Vasilev A.B., Drozdov I.R., Nikulin I.L. Development of a fiber optic refractive index sensor at a macrobend. *Vestnik sovremennoj nauki*, 2015, no. 5, pp. 18–21. (in Russian)
 28. Burdysheva O.V., Nikulin I.L. Amplitude fiber-optic vibration sensor. *Photonics Russia*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 80–85. <https://doi.org/10.22184/FRos.2019.13.1.80.85>
 29. Nikulin I.L., Burdysheva O.V. Fiber optic vibration recording device. *Patent RU179547U1*. 2018. (in Russian)

Авторы

Никулин Илларион Леонидович — доктор технических наук, профессор, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-8496-7942>, nil@pstu.ru

Рофер Юлия Ильинична — студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0002-5762-2647>, julia.rofer@yandex.ru

Authors

Illarion L. Nikulin — D.Sc., Full Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8496-7942>, nil@pstu.ru

Yulia I. Rofer — Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0002-5762-2647>, julia.rofer@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 24.06.2024
Одобрена после рецензирования 02.08.2024
Принята к печати 26.09.2024

Received 24.06.2024
Approved after reviewing 02.08.2024
Accepted 26.09.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»