УДК 681.586.629.78 DOI: 10.22227/1997-0935.2018.9.1055-1066

Результаты исследования волоконно-оптического преобразователя системы мониторинга строительных конструкций

Н.Г. Серегин, Б.И. Гиясов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ: Предмет исследования: волоконно-оптический преобразователь системы мониторинга технического состояния строительных конструкций. Дана формулировка мониторинга технического состояния строительных конструкций. Названы методы и средства измерений для проведения мониторинга. Описана работа автоматизированных стационарных систем, предназначенных для выявления в автоматизированном режиме изменений напряженно-деформационного состояния строительных конструкций. Показано широкое распространение автоматизированных станций на базе волоконно-оптических измерительных систем. Приведены преимущества волоконно-оптических измерительных систем перед аналогичными системами. Дана краткая характеристика волоконно-оптических методов и средств измерения расстояний и перемещений технических объектов в пространстве.

Материалы и методы: рассмотрены методы и средства проведения мониторинга строительных конструкций. Выбран спектральный метод низкокогерентной интерферометрии, который заключается в измерении спектра мощности излучения с последующей математической обработкой этого спектра. Приведена краткая характеристика спектрального метода волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии и проанализированы его достоинства. Его главное достоинство — высокая точность измерений физических величин. Рассмотрены и обоснованы преимущества волоконно-оптических датчиков для достижения поставленной цели перед другими устройствами.

Результаты: разработаны конструкции волоконно-оптических датчиков температуры и деформаций. Исследовано практическое применение волоконно-оптического датчика, работающего по спектральному методу низкокогерентной интерферометрии, для решения задач мониторинга технического состояния строительных конструкций на примере контроля деформации крепежного элемента строительной конструкции в процессе ее эксплуатации. Разработаны: технология изготовления волоконно-оптических датчиков; конструкции крепежных устройств, оборудованных волоконно-оптическими датчиками; методика и экспериментальная установка для испытаний крепежных устройств, оборудованных волоконно-оптическими датчиками. Представлены результаты их испытаний.

Выводы: сформулированы выводы и рекомендации для дальнейших исследований. Результаты исследований уже неоднократно были опубликованы в различных периодических научных изданиях. Работа предназначена для комплексного обобщения ранее достигнутых результатов и постановки задач дальнейших исследований. Применение спектрального метода волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии позволяет обеспечивать не только высокую точность и надежность измерения деформаций конструктивных строительных элементов, но и сложных строительных систем различного назначения в процессе их исследования, проектирования, изготовления и эксплуатации. Это позволяет рекомендовать применение волоконно-оптических преобразователей в качестве датчиков в составе измерительных систем для мониторинга строительных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мониторинг строительных конструкций, система мониторинга, автоматизированная стационарная система, световод, спектральный метод волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии, первичный волоконно-оптический преобразователь, волоконно-оптический датчик, интерферометр Фабри — Перо, преобразование Фурье, конструкция волоконно-оптического датчика, технология изготовления волоконно-оптического датчика, крепежное устройство

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Серегин Н.Г., Гиясов Б.И. Результаты исследования волоконно-оптического преобразователя системы мониторинга строительных конструкций // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 9. С. 1055–1066. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.9.1055-1066

The results of the research of fiber-optical converter of the monitoring system of building constructions

Nikolay G. Seregin, Botir I. Giyazov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

ABSTRACT: Subject: the results of research of fiber-optic Converter of monitoring system of technical condition of building structures are considered. The formulation of monitoring of technical condition of building structures is given. The methods and means of measurement for monitoring are named. The work of automated stationary systems, which are designed to

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 9, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 9, 2018

© Н.Г. Серегин, Б.И. Гиясов, 2018

detect changes in the stress-strain state of building structures in an automated mode, is described. The wide use automated stations on the basis of fiber-optic measuring systems is shown. Advantages of fiber-optic measuring systems over similar systems are given. A brief description of fiber-optic methods and means of measuring distances and displacements of technical objects in space is given.
Materials and methods: the aim of the research is formulated and the tasks for its achievement are set. The list of methods and means of monitoring of building structures is given. The spectral method of low-coherence interferometry was chosen for the study, which consists in measuring the radiation power spectrum with subsequent mathematical processing of this spectrum. A brief description of the spectral method of fiber-optic low-coherence interferometry is given and its advantages are analyzed. The main advantage of the spectral method of fiber-optic low-coherence interferometry is the high accuracy of measurements of physical quantities. The advantages of fiber-optic sensors to achieve this goal over other devices are considered and justified.
Results: the design of fiber-optic sensors of temperature and deformation has been developed. Investigated the practical application of fiber-optical sensor operating according to the method of low-coherence spectral interferometry of, for the decision of tasks of monitoring of technical condition of building structures on the example of monitoring of deformation of the fastening element of the building structure in the process of operation technology of manufacturing of fiber-optic sensors. Designs of the fixing devices equipped with fiber-optic sensors are developed. The technique and experimental setup for testing fixing devices equipped with fiber-optic sensors are developed. The results of their tests are presented.
Conclusions: based on the results of the work, conclusions and recommendations for further research are formulated. The results of the research have been repeatedly published in various scientific periodicals. The work is intended for complex generalization of earlier achieved results and setting of tasks of further researches. Application of the spectral method of fiber-optic low-coherence interferometry allows to provide not only high accuracy and reliability of measurement of deformations of structural building elements, but also complex construction systems for various purposes in the process of their research, design, manufacture and operation. This makes it possible to recommend the use of fiber-optic converters as sensors in measuring systems for monitoring of building structures.

KEY WORDS: monitoring of building structures, monitoring system, automated stationary system, light guide, spectral method of fiber-optical low-coherence interferometry, primary fiber-optical Converter, fiber-optical sensor, Fabry — Perot interferometer, Fourier transform, fiber-optical sensor design, fiber-optical sensor manufacturing technology, fixing device

FOR CITATION: Seregin N.G., Giyazov B.I. Rezul'taty issledovaniya volokonno-opticheskogo preobrazovatelya sistemy monitoringa stroitel'nykh konstruktsiy [The results of the research of fiber-optical converter of the monitoring system of building constructions]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018, vol. 13, issue 9, pp. 1055–1066. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.9.1055-1066

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг технического состояния строительных конструкций — это непрерывный процесс автоматизированного наблюдения и регистрации технических параметров конструкций [1, 2][1]. Для осуществления мониторинга строительных конструкций применяют оптические, лазерные и геофизические методы и средства измерения. Контроль и раннюю диагностику технического состояния объектов выполняют автоматизированными стационарными системами (станциями), которые в автоматизированном режиме выявляют изменения напряженно-деформационного состояния конструкций. В том числе и деформаций ответственных конструктивных элементов. Широкое распространение получили автоматизированные станции, первичными преобразователями которых (датчиками) являются волоконно-оптические датчики [3, 4]. Волоконно-оптические датчики обладают значительными преимуществами перед другими первичными преобразователями, а именно:

1) возможен дистанционный контроль за их работой на расстоянии в несколько километров;

2) световод может выполнять функции кабеля для передачи оптического излучения к чувствительному элементу, расположенному в точке измерения, а также может служить одновременно чувствительным элементом волоконно-оптического датчика;

3) световод изготавливают из кварцевого стекла, поэтому он не боится климатических воздействий и является инертным к агрессивным компонентам городской атмосферы;

4) отсутствие электрического питания в световоде и электрических цепей обеспечивает пожаробезопасность эксплуатации волоконно-оптических датчиков;

5) гарантированы измерения физических величин в условиях воздействия мощных электромагнитных полей без потери заданной точности измерений.

Значительная часть волоконно-оптических датчиков физических величин измеряют оптический путь световых лучей и оценивают его изменение под влиянием внешних воздействий в заданном пространстве [5–7]. Из чего следует, что их работа

[1] ГОСТ 32019-2012. Мониторинг технического состояния уникальных зданий и сооружений. Правила проектирования и установки стационарных систем (станций) мониторинга. М. : Стандартинформ, 2014.

основана на измерении расстояний и перемещений, в которые преобразуются различные физические величины [8–10]. Например, давление, температура, напряженность магнитного поля, деформации и т.д. [11–14].

Известны волоконно-оптические методы и средства измерения расстояний и перемещений технических объектов в пространстве. Благодаря освоению волоконно-оптических технологий получили большое развитие волоконно-оптические методы и средства измерений расстояний и перемещений. Одним из них является спектральный метод волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии [15].

Отличием низкокогерентной интерферометрии от когерентной является применение низкогерентных источников излучения, длина когерентности которых меньше длины измеряемого оптического пути, например, суперлюминесцентных светодиодов.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ

Целью исследования является разработка первичного волоконно-оптического преобразователя (датчика) системы мониторинга технического состояния строительных конструкций.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Выбор методики проведения исследования.
2. Разработка конструкции волоконно-оптического датчика.
3. Разработка технологии изготовления волоконно-оптического датчика.
4. Разработка экспериментальной установки для проведения исследований и выбор средств измерения.
5. Проведение экспериментальных исследований волоконно-оптического датчика.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Для практической реализации работы был выбран спектральный метод волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии, как наиболее простой и дешевый в реализации. Он заключается в измерении спектра мощности излучения с последующей математической обработкой этого спектра [16–18].

Главными достоинствами спектрального метода волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии является высокая точность измерений, которая не зависит от флуктуации оптической мощности, дистанционность измерений и возможность создания миниатюрных чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков [16, 17]. Этот метод основан на измерении автокорреляционной функции зондирующего излучения после его взаимодействия с чувствительным элементом, выполненным в виде интерферометра Фабри — Перо (ИФП).

Спектральный метод низкокогерентной интерферометрии позволяет выполнять измерение базы ИФП с погрешностью не более ±30 нм при постоянных или медленно меняющихся значениях перемещений [16–18].

Практическое применение волоконно-оптического датчика для решения задач мониторинга технического состояния строительных конструкций рассмотрим на примере применения спектрального метода низкокогерентной интерферометрии для контроля деформации крепежного элемента строительной конструкции в процессе ее эксплуатации, схема которого приведена на рис. 1.

Основной деталью исследуемого крепежного устройства строительной конструкции является его корпус *1*. Корпус в процессе эксплуатации подвергается деформации в продольном направлении от воздействия механических нагрузок или температурного расширения. В корпусе *1* выполнено центральное продольное отверстие *2*, в котором с левой стороны сделана цилиндрическая расточка с резьбой *3*. В резьбу ввернут винт *4* с цилиндрическим стержнем *5*, оканчивающимся полированным зеркальным торцем *6*. С правой стороны корпуса выполнена цилиндрическая гладкая расточка *7*, в которой закреплен волоконно-оптический разъем (коннектор) *9*. Коннектор *9* устанавливается в отверстии *2* с помощью втулки *8*, в которой закреплено оптическое волокно *10*, подведенное к крепежному элементу через коннектор *9*. Оптическое волокно *10*

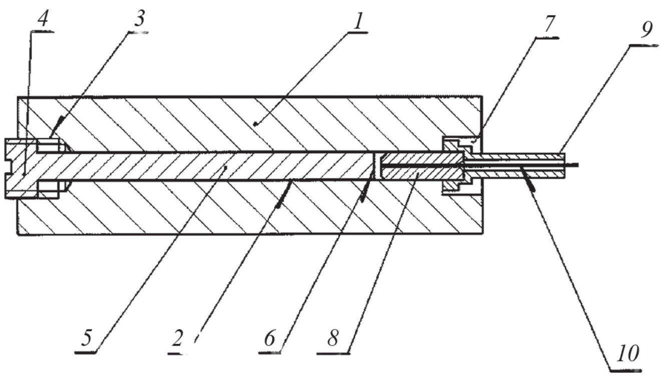


Рис. 1. Схема крепежного элемента строительной конструкции

Fig. 1. The scheme of the fastening element of the building structure

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 9, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 9, 2018

так же, как и стержень *5*, оканчивается полированным зеркальным торцем. Зеркальные торцы стержня *5* и оптического волокна *10* образуют чувствительный элемент волоконно-оптического датчика на основе ИФП. Расстояние базы ИФП в данном случае регулируется винтом *4*.

Исследуемое крепежное устройство строительной конструкции, оснащенное волоконно-оптическим датчиком на основе ИФП (рис. 1), включено в рабочую схему экспериментальной установки, реализующей спектральный метод низкокогерентной интерферометрии (рис. 2) [16, 17].

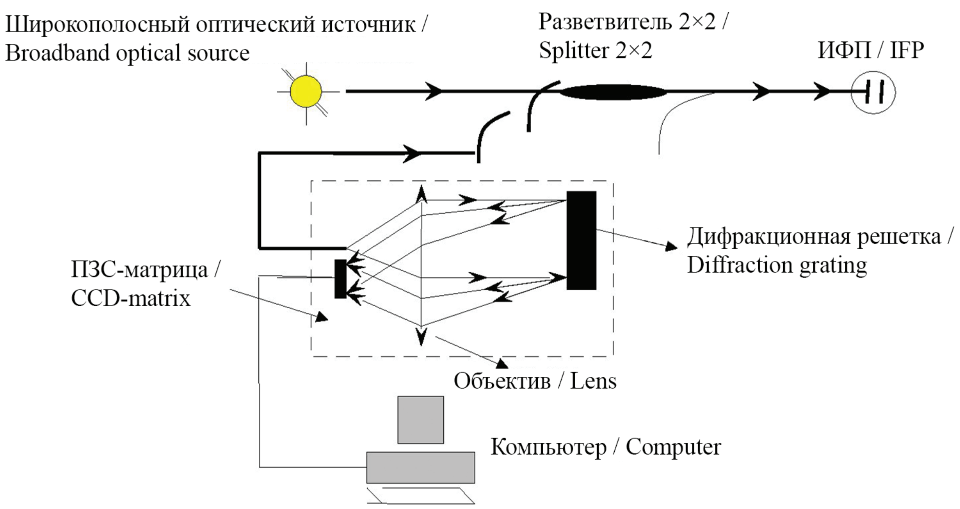


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для измерения базы ИФП и перемещений

Fig. 2. The scheme of the experimental setup for measuring the base of the Fabry-Perot interferometer (IFP) and displacements

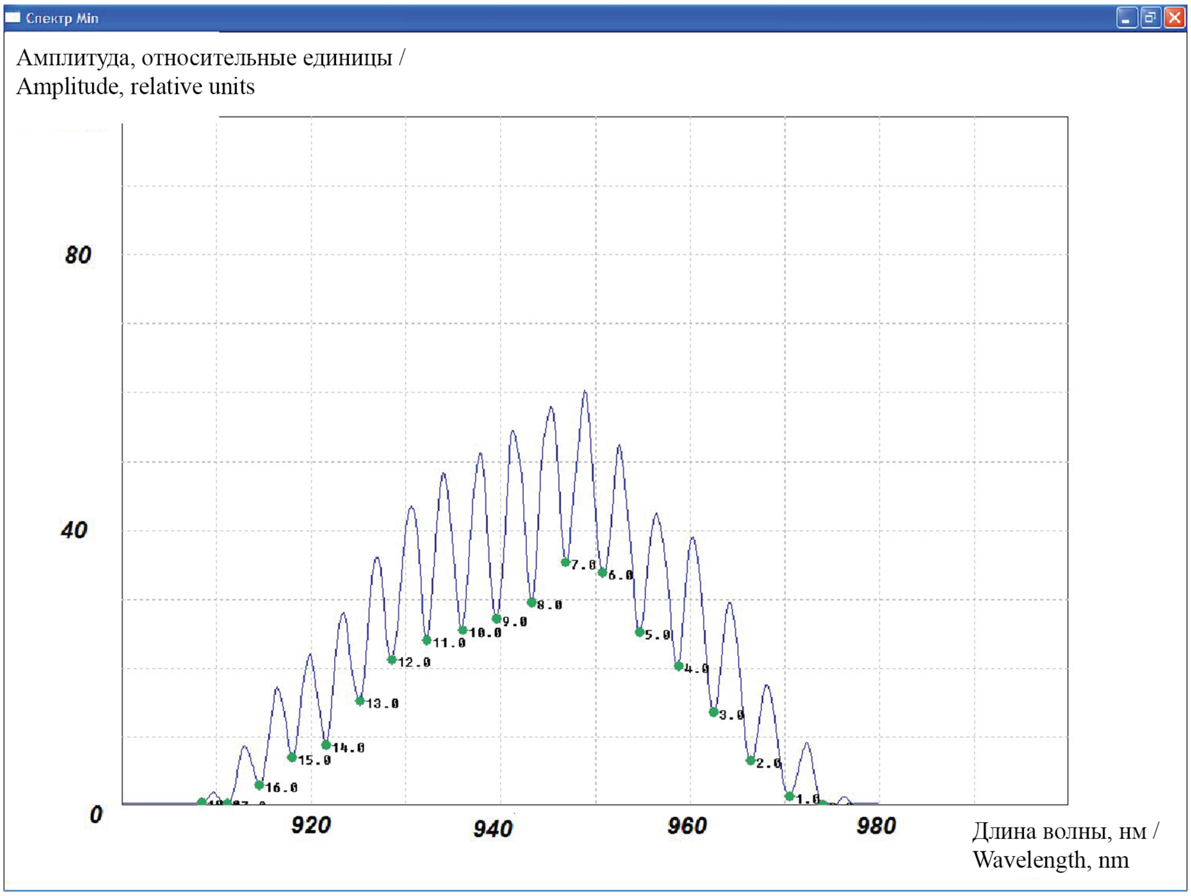


Рис. 3. Спектр ИФП

Fig. 3. The spectrum of the IFP

Вестник МГСУ Том 13 Выпуск 9, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 9, 2018
ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)

Из рис. 2 видно, что экспериментальная установка состоит из источника излучения, волоконно-оптической линии с разветвителем 2×2 и спектрометра, состоящего из дифракционной решетки, объектива и ПЗС-матрицы (сокр. от «прибор с зарядовой связью»). Излучение широкополосного оптического источника по оптическому волокну попадает на ИФП, образованный на торце оптического волокна *12* (рис. 1). Отраженный от ИФП сигнал через разветвитель 2×2 подается на вход спектрометра [17, 18].

На рис. 3 приведен спектр отраженного сигнала от ИФП, образованного торцами цилиндрического стержня *7* и оптического волокна *12* (рис. 1), расположенными на расстоянии $d \approx 100$ мкм [17, 18].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При выполнении мониторинга технического состояния строительных конструкций необходимо учитывать широкий спектр воздействий на них, а именно: температуру конструктивных элементов, их механические деформации, вибрацию и др.

Первичный волоконно-оптический преобразователь (датчик) системы мониторинга технического состояния строительных конструкций на начальном этапе исследований рассматривался как волоконно-оптический датчик температуры, а затем на его базе был разработан волоконно-оптический датчик деформаций.

Результаты исследований уже неоднократно публиковались в различных периодических научных изданиях [15–20]. Данная работа служит для комплексного обобщения ранее достигнутых результатов и предназначена для формулировки цели и постановки задач дальнейших исследований.

Для проведения исследований разработан волоконно-оптический датчик температуры (рис. 4) [16, 17], позволяющий провести экспериментальное изучение с целью определения возможности применения его в качестве первичного волоконно-оптического преобразователя (датчика) системы мониторинга технического состояния строительных конструкций.

Волоконно-оптический датчик температуры (рис. 4) [16, 17] был установлен на экспериментальной установке для измерения базы ИФП и перемещений, схема которой изображена на рис. 2, где и была выполнена серия испытаний.

В частности, на рис. 5 показана зависимость базы ИФП для чувствительного элемента волоконно-оптического датчика температуры, изготовленного из стеклянного капилляра рабочей длиной 11 мм и при фиксации оптического волокна с помощью многокомпонентного клея, полученного при нагреве чувствительного элемента от комнатной температуры 25 °C до температуры кипения воды 100 °C [16, 17].

На рис. 5 приводятся среднеквадратичные отклонения измеряемой базы интерферометра, определяющие точность измерения температуры волоконно-оптическим датчиком. Анализ кривой (рис. 5) показывает, что при изменении температуры чувствительного элемента волоконно-оптического датчика от комнатной температуры 25 °C до температуры кипения воды 100 °C изменение базы ИФП составляет ≈ 3440 нм. Анализируя кривую нагрева (рис. 5), можно прийти к выводу, что среднее квадратичное отклонение от прямой составляет ≈ 100 нм. В пересчете на погрешность измерения температуры волоконно-оптическим датчиком в данном диапазоне температур составляет ± 1 °C [16, 17]. При этом следует заметить, что точность измерения контрольного ртутного термометра также составляет ± 1 °C.

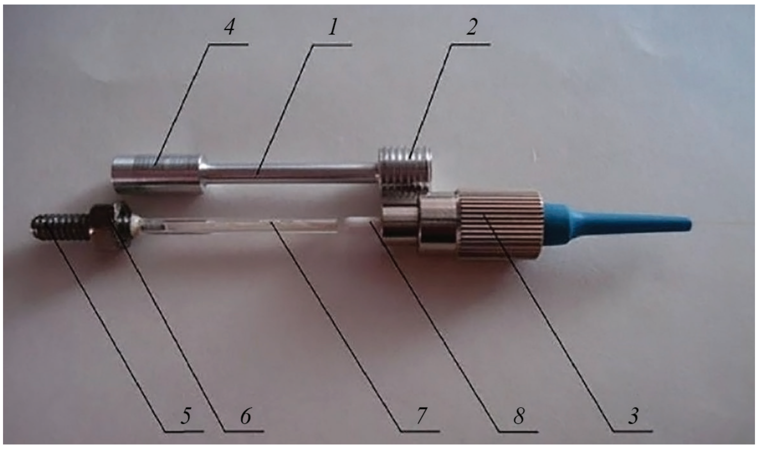


Рис. 4. Волоконно-оптический датчик температуры: *1* — корпус; *2* — наружная резьба; *3* — волоконно-оптический разъем; *4* — внутренняя резьба; *5* — регулировочный винт; *6* — контргайка; *7* — оптический капилляр; *8* — оптическое волокно

Fig. 4. Fiber optic temperature sensor: *1* — corpus; *2* — external thread; *3* — fiber optic connector; *4* — internal thread; *5* — adjusting screw; *6* — locknut; *7* — optical capillary; *8* — optical fiber

Вестник МГСУ • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Том 13 Выпуск 9, 2018 • Volume 13 Issue 9, 2018
ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)

База, мкм / Base, mkm	T, °С	Теория / Theory	Разность / Difference	Квадрат / Square	Сумма / Amount	Ср.кв. / Mean square	Ср. кв. отклонение / Standard deviation
73,05	26,5	72,98742	-0,06258	0,003917	0,274319	0,014438	0,120157628
73,035	28	73,06318	0,02818	0,000794			
73,103	30,5	73,18946	0,086455	0,007474			
73,549	38,5	73,59354	0,044535	0,001983			
73,695	40	73,6693	-0,0257	0,00066			
73,879	45	73,92185	0,04285	0,001836			
74,107	50	74,1744	0,0674	0,004543			
74,457	54	74,37644	-0,08056	0,00649			
74,528	58	74,57848	0,05048	0,002548			
74,784	62	74,78052	-0,00348	1,21E-05			
74,889	67,5	75,05833	0,169325	0,028671			
75,281	72	75,28562	0,00462	2,13E-05			
75,583	78,5	75,61394	0,030935	0,000957			
75,698	83,5	75,86649	0,168485	0,028387			
76,01	87,5	76,06853	0,058525	0,003425			
76,138	93,5	76,37159	0,233585	0,054562			
76,274	96	76,49786	0,22386	0,050113			
76,416	98	76,59888	0,18288	0,033445			
76,489	100	76,6999	0,2109	0,044479			

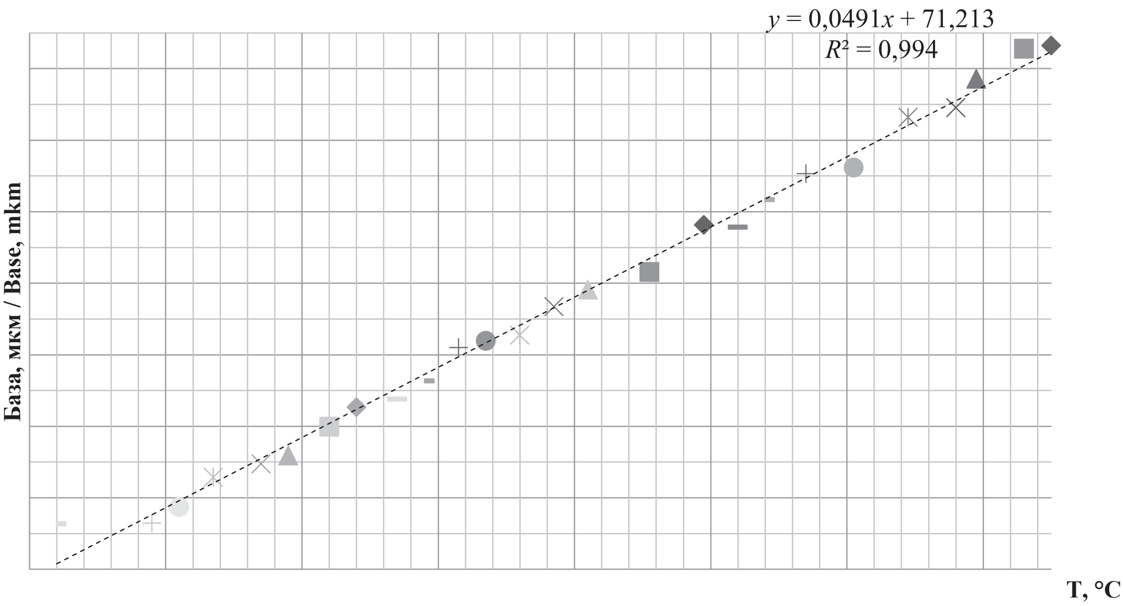


Рис. 5. Зависимость базы ИФП чувствительного элемента волоконно-оптического датчика от температуры при нагреве его от комнатной температуры 25 °С до температуры кипения воды 100 °С

Fig. 5. The dependence of the base IFP the sensing element of the fiber optic sensor from the temperature when it is heated from room temperature 25 °С to the temperature point of water 100 °С

Что касается решения задачи мониторинга технического состояния строительных конструкций путем измерения деформаций, установленных в них крепежных устройств, то на основе принципа работы вышерассмотренного волоконно-оптического датчика температуры разработан волоконно-оптический датчик деформации [18, 19]. Эскиз крепежного устройства с волоконно-оптическим датчиком деформаций изображен на рис. 6 [19, 20].

Конструкция этого устройства способна измерять деформации (растяжения — сжатия) различных крепежных изделий (болтов, винтов, шпилек). Выполнен расчет влияния воздействия температуры в диапазоне от –40 до +60 °С на точность измерения деформаций [18–20]. Расчет показал, что изменение базы ИФП между оптическим волокном и отражающей поверхностью при изменении температуры в диапазоне от –40 до +60 °С составляет 0,028 мкм. А это несоизмеримо с максимальным удлинением самого крепежного устройства, составляющего 100 мкм [19, 20]. Из чего следует, что при эксплуатации волоконно-оптического датчика деформаций (рис. 7), изготовленного по эскизу (рис. 6), изменением базы ИФП вследствие температурных расширений в заданном диапазоне температур от –40 до +60 °С можно пренебречь. Точность измерения деформаций составляет ±0,3 мкм [19, 20].

Крепежное устройство с волоконно-оптическим датчиком деформаций испытано на той же экспериментальной установке, предназначенной для измерения базы ИФП и перемещений (рис. 2) [19, 20], на которой был ранее испытан волоконно-оптический датчик температуры (рис. 4) [16, 17].

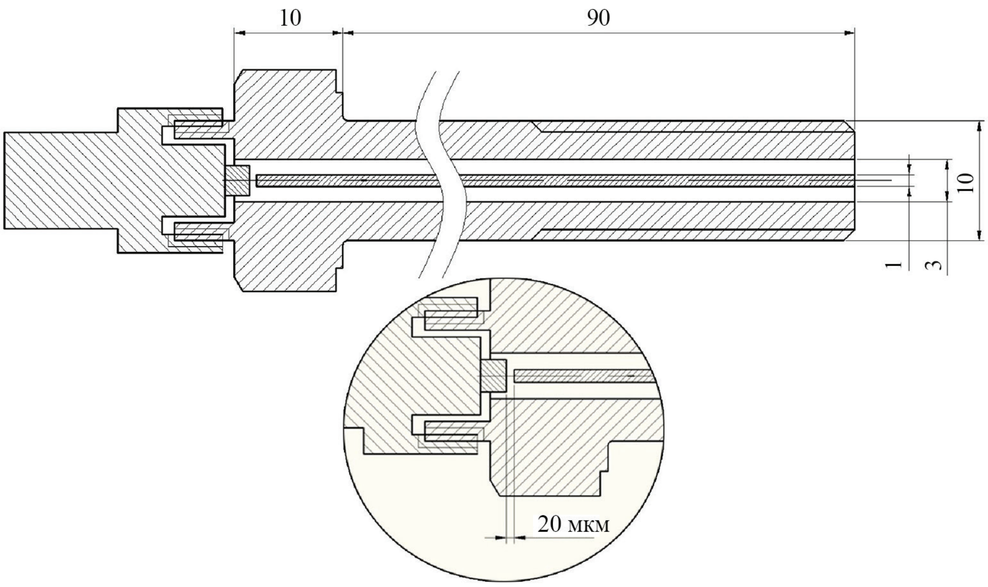


Рис. 6. Эскиз крепежного устройства с волоконно-оптическим датчиком деформаций

Fig. 6. Sketch of a fastening device with a fiber-optical sensor strain

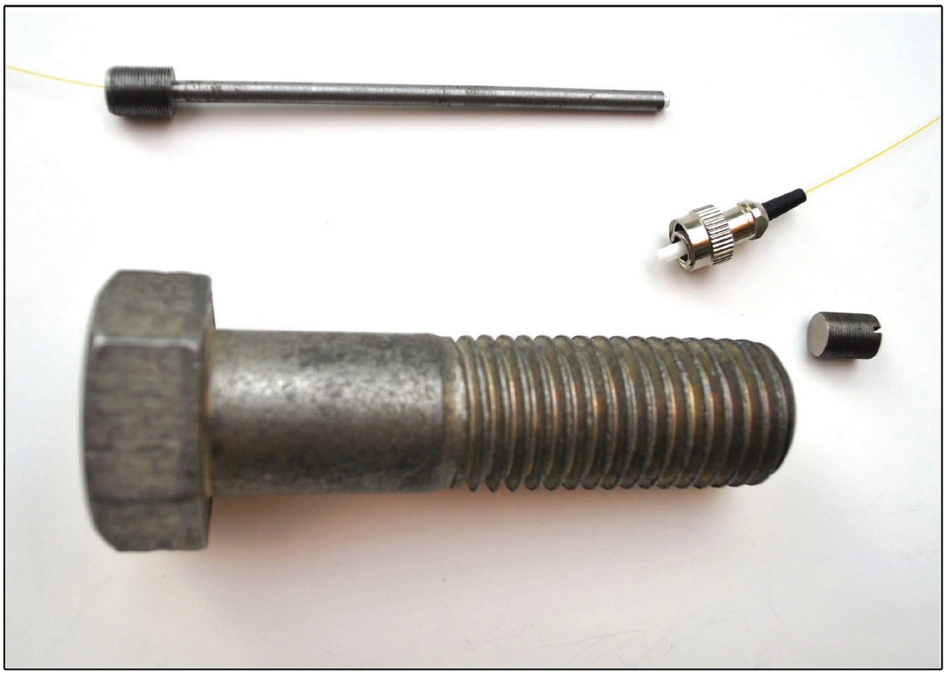
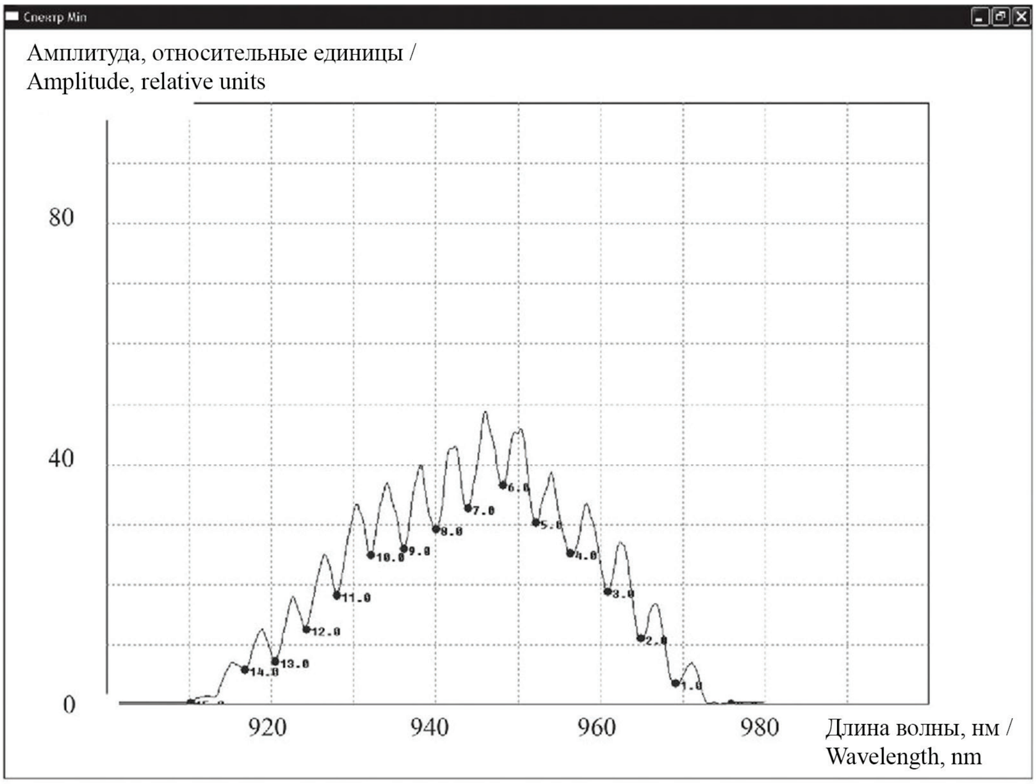
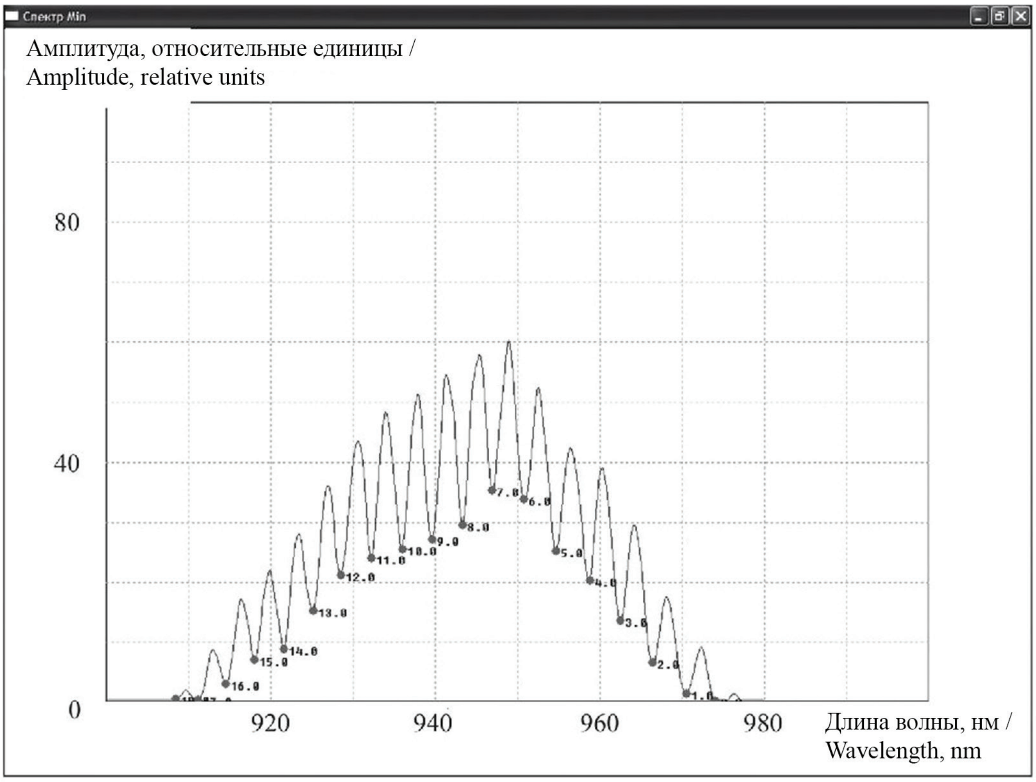


Рис. 7. Крепежное устройство с волоконно-оптическим датчиком деформаций

Fig. 7. Fastening device with a fiber-optical sensor strain



a



b

Рис. 8. Спектр отражения ИФП: *a* — при отсутствии нагрузки на крепежное устройство; *b* — при растяжении крепежного устройства

Fig. 8. The spectrum of the reflection IFP: *a* — if there is no load on the fastening device; *b* — in tension of the fastening device

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 9, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 9, 2018

В процессе испытаний крепежного устройства с волоконно-оптическим датчиком деформаций сравнивались значения спектра отражения ИФП: при отсутствии нагрузки на крепежное устройство (рис. 8, *a*) и при его растяжении (рис. 8, *b*) [19, 20].

Спектр отражения ИФП и его база зависят от напряженного состояния крепежного устройства. А именно от величины его продольной деформации. При сравнении спектров отражения ИФП, изображенных на рис. 8, *a* и 8, *b*, очевидны их существенные различия. Обработка этих сигналов путем преобразования Фурье позволяет вычислить величину базы ИФП с высокой точностью. И, как следствие, контролировать удлинение крепежного устройства при его упругой деформации в пределах от 0 до 300 мкм с точностью до ±30 нм, что обеспечивает возможность определять пороги допустимых нагрузок в процессе эксплуатации строительных конструкций.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Разработаны конструкция и технология изготовления универсального, компактного и неэнергоемкого первичного волоконно-оптического преобразователя системы мониторинга технического состояния строительных конструкций.

2. Проведены испытания экспериментальных образцов волоконно-оптических датчиков температуры на основе капиллярных сборок. Показано, что чувствительность датчиков в диапазоне температур 0…110 °С составляет не ниже ±0,5 °С. С целью расширения рабочего диапазона температур и повышения чувствительности первичного преобразователя необходимо доработать технологию фиксации оптических волокон в капиллярах с помощью высокотемпературных (до 350 °С) клеев или методами сварки.

3. Создана экспериментальная установка, позволяющая проводить измерения базы ИФП и ее изменений с погрешностью не более ±50 нм в диапазоне от 50 до 400 мкм.

4. Показана возможность применения спектрального метода волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии для измерения и контроля линейных деформаций различных строительных крепежных элементов.

5. Анализ полученных результатов позволил выяснить возможности дальнейшего повышения чувствительности волоконно-оптических датчиков перемещений, в частности, замена ПЗС-матрицы с числом пикселей 640×512 в спектрометре на ПЗС-линейку с числом элементов порядка 2000 приведет к многократному увеличению чувствительности системы и быстродействию.

6. В дальнейшем следует доработать метод и устройство измерения расстояний и перемещений с целью повышения точности измерений до значений ±20 нм и доработать технологию изготовления чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков на основе капиллярных сборок.

7. Проведенные исследования разработанного волоконно-оптического преобразователя для измерения деформаций конструктивных строительных элементов подтвердили его точность и надежность. Расчет устройства показал, что изменением зазора при температурных колебаниях от –40 до +60 °С можно пренебречь, так как изменение зазора вследствие температурных расширений между оптическим волокном и ограждающей поверхностью составляет 0,026 мкм, а максимальное удлинение крепежного устройства ≈ 100 мкм. Точность измерения деформаций составляет 0,3 мкм.

8. Применение спектрального метода волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии позволяет обеспечивать не только высокую точность и надежность измерения деформаций конструктивных строительных элементов, но и сложных строительных систем различного назначения в процессе их исследования, проектирования, изготовления и эксплуатации. А это позволяет рекомендовать применение волоконно-оптических преобразователей в качестве датчиков в составе измерительных систем для мониторинга строительных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Запруднов В.И.* Основы строительного дела. М. : Изд-во Московского государственного университета леса, 2008. 471 с.

2. *Гиясов Б.И., Серегин Н.Г.* Конструкции уникальных зданий и сооружений из древесины: уч. пос. М. : Издательство АСВ, 2014. 88 с.

3. *Шишкин В.В., Гранев И.В., Шелемба И.С.* Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 1. С. 61–75.

4. *Рубцов И.В., Неугодников А.П., Егоров Ф.А., Поспелов В.И.* Организация системы мониторинга фасадных конструкций на базе волоконно-оптических датчиков // Технологии строительства. 2004. № 5 (33). С. 12–13.

5. *Yu B., Kim D.W., Deng J., Xiao H., Wang A.* Fiber Fabry-Perot senses for detection of partial discharges in power transformers // Applied Optics. 2003. Vol. 42. Issue 16, p. 3241. DOI: 10.1364/ao.42.003241.

Вестник МГСУ • Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 13 Выпуск 9, 2018 • Volume 13 Issue 9, 2018

6. *Rao Y.J., Jackson D.A.* Recent progress in fiber optic low-coherence interferometry // Measurement Science and Technology. 1996. Vol. 7. Issue 7. Pp. 981–999. DOI: 10.1088/0957-0233/7/7/001.

7. *Nieva P.M.* New trends on MEMS sensor technology for harsh environment applications // Sensors and Transducers Journal. 2007. Special issue, October. Pp. 10–20.

8. *Oh K.D., Ranade J., Arya V., Wang A., Claus R.O.* Miniaturized fiber optic magnetic field sensors // Process Monitoring with Optical Fibers and Harsh Environment Sensors : conf. publ. 11 Jan 1999. DOI: 10.1117/12.335739.

9. *Taplin S., Podoleanu A.Gh., Webb D.J., Jackson D.A.* Displacement sensor using channelled spectrum dispersed on a linear CCD array // Electronics Letters. 1993. Vol. 29. Issue 10. Pp. 896–897. DOI: 10.1049/el:19930598.

10. *Podoleanu A.Gh., Taplin S.R., Webb D.J., Jackson D.A.* Channelled spectrum liquid refractometer // Review of Scientific Instruments. 1993. Vol. 64. Issue 10. Pp. 3028–3029. DOI: 10.1063/1.1144355.

11. *Потапов В.Т., Жамалетдинов М.Н., Жамалетдинов Н.М., Мамедов А.М., Потапов Т.В.* Волоконно-оптическое устройство для измерения абсолютных расстояний и перемещений с нанометровым разрешением // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 5. С. 103–107. DOI: 10.7868/S0032816213040277.

12. *Бурков В.Д., Леонов Л.В., Потапов В.Т., Потапов Т.В., Удалов М.Е.* Методы волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии и их применение в разработках волоконно-оптических датчиков физических величин // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2012. № 3 (86). С. 174–179.

13. *Кузнецов А.Г., Бабин С.А., Шелемба И.С.* Распределенный волоконный датчик температуры со спектральной фильтрацией направленными волоконными ответвителями // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 11. С. 1078–1081. DOI: 10.1070/QE2009v039n11ABEH014173.

14. *Hay A.D.* Bolt, stud or fastener having an embedded fiber optic Bragg grating sensor for sensing tensioning strain: US 5945665A, G01B11/18. Appl. 09 May 1997; publ. 31 August 1999.

15. *Серегин Н.Г., Сорокин С.В.* Внедрение волоконно-оптических датчиков в систему тарировки и испытаний устройств измерительной техники // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2012. № 6 (89). С. 107–109.

16. *Серегин Н.Г., Беляков В.А., Сорокин С.В., Яковлев А.В.* Применение волоконно-оптического датчика для контроля, поверки и тарировки датчиков температуры // Инженерный вестник. 2014. № 6. С. 526–533.

17. *Шашурин В.Д., Потапов В.Т., Серегин Н.Г., Сорокин С.В., Ветрова Н.А., Федоркова Н.В.* Технология изготовления и результаты испытаний чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков температуры // Машиностроитель. 2016. № 5. С. 34–41.

18. *Шашурин В.Д., Потапов В.Т., Серегин Н.Г., Сорокин С.В., Ветрова Н.А., Колесников Л.А. и др.* Применение метода волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии для контроля деформаций крепежных элементов строительных конструкций в процессе их эксплуатации // Машиностроитель. 2016. № 8. С. 13–19.

19. *Серегин Н.Г., Гиясов Б.И.* Измерительные системы диагностики и мониторинга технического состояния уникальных зданий и сооружений // Строительство: наука и образование. 2017. Т. 7. Вып. 3 (24). С. 19–35. DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.2.

20. *Исаев В.Г., Серегин Н.Г., Гречаная Н.Н.* Измерение деформаций конструктивных элементов технических систем летательных аппаратов волоконно-оптическими устройствами // Информационно-технологический вестник. 2018. № 2 (16). С. 14–24.

Поступила в редакцию 6 июля 2018 г.
Принята в доработанном виде 7 августа 2018 г.
Одобрена для публикации 29 августа 2018 г.

Об авторах: **Серегин Николай Григорьевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, seregin54@yandex.ru;

Гиясов Ботир Иминжонович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой архитектурно-строительного проектирования, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, dandyr@mail.ru.

REFERENCES

1. Zaprudnov V.I. *Osnovy stroitel'nogo dela* [The Basics of Civil Engineering]. Moscow, Izd-vo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa Publ., 2008. 471 p. (In Russian)

2. Giyasov B.I., Seregin N.G. *Konstruktsii unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy iz drevesiny* [Constructions of unique buildings and structures from the wood: textbook]. Moscow, ASV Publ., 2014. 88 p. (In Russian)

3. Shishkin V.V., Granev I.V., Shelemba I.S. Otechestvennyy opyt proizvodstva i primeneniya volokonno-opticheskikh datchikov [Domestic experience in production and application of fiber optic sensors]. *Prikladnaya fotonika* [Applied photonics]. 2016, vol. 3, no. 1, pp. 61–75. (In Russian)

4. Rubtsov I.V., Neugodnikov A.P., Egorov F.A., Pospelov V.I. Organizatsiya sistemy monitoringa fasadnykh konstruktsiy na baze volokonno-opticheskikh datchikov [Organization of a monitoring system for facade structures based on fiber-optic sensors]. *Tekhnologii stroitel'stva* [Building Technologies]. 2004, no. 5 (33), pp. 12–13. (In Russian)

5. Yu B., Kim D.W., Deng J., Xiao H., Wang A. Fiber Fabry-Perot senses for detection of partial discharges in power transformers. *Applied Optics*. 2003, vol. 42, issue 16, p. 3241. DOI: 10.1364/ao.42.003241.

6. Rao Y.J., Jackson D.A. Recent progress in fiber optic low-coherence interferometry. *Measurement Science and Technology*. 1996, vol. 7, issue 7, pp. 981–9899. DOI: 10.1088/0957-0233/7/7/001.

7. Nieva P.M. New trends on MEMS sensor technology for harsh environment applicationsnew trends on MEMS sensor technology for harsh environmental applications. *Sensors and Transducers Journal*. 2007, special issue, October 2007, pp. 10–20.

8. Oh K.D., Ranade J., Arya V., Wang A., Claus R.O. Miniaturized fiber optic magnetic field sensors. *Process Monitoring with Optical Fibers and Harsh Environment Sensors : SPIE conf. publ. 11 Jan 1999.* DOI: 10.1117/12.335739.

9. Taplin S., Podoleanu A.Gh., Webb D.J., Jackson D.A. Displacement sensor using channeled spectrum dispersed on a linear CCD array. *Electronics Letters*. 1993, vol. 29, issue 10, pp. 896–897. DOI: 10.1049/el:19930598.

10. Podoleanu A.Gh., Taplin S.R., Webb D.J., Jackson D.A. Channelled Spectrum liquid refractometer. *Review of Scientific Instruments*. 1993, vol. 64, issue 10, pp. 3028–3029. DOI: 10.1063/1.1144355.

11. Potapov V.T., Zhamaletdinov M.N., Zhamaletdinov N.M., Mamedov A.M., Potapov T.V. Volokonno-opticheskoe ustroystvo dlya izmereniya absolyutnykh rasstoyaniy i peremeshcheniy s nanometrovym razresheniem [A fiber-optic unit for measuring absolute distances and displacements with a nanometer resolution]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques]. 2013, no. 5, pp. 103–107. DOI: 10.7868/S0032816213040277. (In Russian)

12. Burkov V.D., Leonov L.V., Potapov V.T., Potapov T.V., Udalov M.E. Metody volokonno-opticheskoy nizkokogerentnoy interferometrii i ikh primenenie v razrabotkakh volokonno-opticheskikh datchikov fizicheskikh velichin [Methods of fiber-optic low-coherence interferometry and their application in the development of fiber-optical sensors of physical quantities]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa — Lesnoy vestnik* [Bulletin of Moscow State Forest University — Forestry bulletin]. 2012, no. 3 (86), pp. 174–179. (In Russian)

13. Kuznetsov A.G., Babin S.A., Shelemba I.S. Raspredelennyy volokonnyy datchik temperatury so spektral'noy fil'tratsiey napravlennymi volokonnymi otvetvitelyami [Fibreoptic distributed temperature sensor with spectral filtration by directional fibre couplers]. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics]. 2009, vol. 39, no. 11, pp. 1078–1081. DOI: 10.1070/QE2009v039n11ABEH014173. (In Russian)

14. Hay A.D. *Bolt, stud or fastener having an embedded fiber optic Bragg grating sensor for sensing tensioning strain*: US 5945665A, G01B11/18. Appl. 09 May 1997; publ. 31 August 1999.

15. Seregin N.G., Sorokin S.V. Vnedrenie volokonno-opticheskikh datchikov v sistemu tarirovki i ispytaniy ustroystv izmeritel'noy tekhniki [Introduction of fiber-optic sensors into the calibration and testing system for measuring equipment devices]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa — Lesnoy vestnik* [Lesnaya Vestnik Bulletin of Moscow State Forest University — Forestry bulletin]. 2012, no. 6 (89), pp. 107–109. (In Russian)

16. Seregin N.G., Belyakov V.A., Sorokin S.V., Yakovlev A.V. Primenenie volokonno-opticheskogo datchika dlya kontrolya, poverki i tarirovki datchikov temperatury [Application of a fiber-optic sensor for monitoring, checking and calibrating temperature sensors]. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering bulletin]. 2014, no. 6, pp. 526–533. (In Russian)

17. Shashurin V.D., Potapov V.T., Seregin N.G., Sorokin S.V., Vetrova N.A., Fedorkova N.V. Tekhnologiya izgotovleniya i rezul'taty ispytaniy chuvstvitel'nykh elementov volokonno-opticheskikh datchikov temperatury [Manufacturing technology and the results of testing of sensitive elements in the fiber-optic temperature sensors]. *Mashinostroitel'* [Mechanical engineering]. 2016, no. 5, pp. 34–41. (In Russian)

18. Shashurin V.D., Potapov V.T., Seregin N.G., Sorokin S.V., Vetrova N.A., Kolesnikov L.A. Primenenie metoda volokonno-opticheskoy nizkokogerentnoy interferometrii dlya kontrolya deformatsiy krepezhnykh elementov stroitel'nykh konstruktsiy v protsesse ikh ekspluatatsii [Application of fiber optical low-coherence interferometry to check fasteners strain construction in

Вестник МГСУ • Том 13 Выпуск 9, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 9, 2018
ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)

their use]. *Mashinostroitel'* [Mechanical engineering]. 2016, no. 8, pp. 13–19. (In Russian)

19. Seregin N.G., Giyasov B.I. Izmeritel'nye sistemy diagnostiki i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy [Measuring system for diagnostic operation and monitoring of technical condition of unique buildings and structures]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2017, vol. 7, issue 3 (24), pp. 19–35. DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.2.

20. Isaev V.G., Seregin N.G., Grechanaya N.N. Izmerenie deformatsiy konstruktivnykh elementov tekhnicheskikh sistem letatel'nykh apparatov volokonno-opticheskimi ustroystvami [Measurement of deformations of structural elements technical systems of aircraft by fiber optic devices]. *Informatsionno-tekhnologicheskiy vestnik* [Information technology Bulletin]. 2018, no. 2 (16), pp. 14–24. (In Russian)

Received July 6, 2018.
Adopted in revised form on August 7, 2018.
Approved for publication on August 29, 2018.

ABOUT THE AUTHORS: **Nikolay G. Seregin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Architectural and Construction Design, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, seregin54@yandex.ru;

Botir I. Giyasov— Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Architectural and Construction Design, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, dandyr@mail.ru.

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) **Том 13 Выпуск 9, 2018**
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • **Volume 13 Issue 9, 2018**