

Созонов Н.С., Шардаков И.Н. Экспериментально-теоретическое исследование влияния конструктивных элементов волоконно-оптического датчика деформации на его показания и методика корректировки передаточной функции // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 4. – С. 173–188. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.12

Sozonov N.S., Shardakov I.N. Theoretical and experimental research of the fiber-optic strain sensor's structural elements influence on its readings and the correction procedure for the transfer function. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2017, no.4, pp. 173-188. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.12



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2017

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI 10.15593/perm.mech/2017.4.12

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЕФОРМАЦИИ НА ЕГО ПОКАЗАНИЯ И МЕТОДИКА КОРРЕКТИРОВКИ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ

Н.С. Созонов^{1, 2}, И.Н. Шардаков³

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

²ООО «Инверсия-Сенсор», Пермь, Россия

³Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 10 сентября 2017 г.

Принята: 14 ноября 2017 г.

Опубликована: 29 декабря 2017 г.

Ключевые слова:

волоконно-оптический датчик (ВОД) деформации, волоконная брэгговская решетка (ВБР), математическое моделирование, лабораторные испытания.

АННОТАЦИЯ

Волоконно-оптические датчики (ВОД) – стремительно развивающаяся отрасль измерительной техники. Благодаря высоким эксплуатационным свойствам они постоянно расширяют сферу своего применения в различных областях техники. Во всем мире проводится большое количество исследовательских работ в данной области. Большинство опубликованных статей посвящены практическому применению ВОД и принципам их работы с точки зрения оптики и электроники. В данной статье волоконно-оптический датчик рассматривается как механическая система.

Процесс формирования показаний датчика происходит при его взаимодействии с окружающей средой, являющейся носителем измеряемой величины. В этом процессе можно выделить три различных аспекта, определяющих результат измерения: физические (оптические) законы, лежащие в основе передаточной функции датчика, характер взаимодействия датчика с окружающей средой и взаимодействие структурных элементов датчика (даже в самом простом варианте ВОД можно выделить несколько элементов с различными физико-механическими параметрами). Все это играет определяющую роль в формировании показаний и должно учитываться разработчиками датчиков.

В данной работе приведена методика корректировки передаточной функции ВОД, учитывающая все обозначенные аспекты формирования показаний. В качестве примера был рассмотрен волоконно-оптический датчик деформации на основе решетки Брэгга. С помощью математического моделирования определено влияние его конструкции на показания. Оценен вклад отдельных конструктивных элементов (таких как клей, оптическое волокно, подложка с технологическим отверстием и т.д.) в эту величину. Путем обобщения полученных результатов сформулирован общий алгоритм определения влияния конструктивных элементов датчика на его показания. Алгоритм опробован на существующей модели ВОД деформации. Эффективность рассмотренного метода доказана серией лабораторных экспериментов.

© ПНИПУ

© Созонов Николай Сергеевич – аспирант, e-mail: sozonov.nik@bk.ru

Шардаков Игорь Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: shardakov@icmm.ru

Nikolay S. Sozonov – PhD Student, e-mail: Sozonov.nik@bk.ru

Igor N. Shardakov – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, e-mail: shardakov@icmm.ru



THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF STRUCTURAL ELEMENTS' INFLUENCE OF FIBER-OPTIC STRAIN SENSOR ON ITS READINGS AND CORRECTION PROCEDURE FOR TRANSFER FUNCTION

N.S. Sozonov^{1, 2}, I.N. Shardakov³

¹Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

²«Inversion-Sensor» Ltd., Perm, Russian Federation

³Institute of Continuous Media Mechanics, UB RAS, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 10 September 2017

Accepted: 14 November 2017

Published: 29 December 2017

Keywords:

fiber optic strain sensor (FOS),
fiber Bragg grating (FBG),
mathematical modeling,
laboratory tests.

ABSTRACT

Fiber optic sensors (FOS) is a rapidly developing part of measuring equipment. They are regularly expanding their application field in various engineering branches due to high operational properties. A large number of research works are carried out in this field all over the world. Most of the published articles are devoted to the application of FOS and their operating principles in terms of optics and electronics. In the present paper a fiber optic sensor is considered as a mechanical system.

A sensor forms its readings while interacting with environment, which is the carrier of the measured parameter. In this process it is possible to distinguish three different aspects that determine the measurement result: the physical (optical) laws underlying the sensor transfer function, the nature of the sensor and environment interaction, and the interaction of sensor structural elements (even in the simplest FOS structure it is possible to distinguish several components with different physical and mechanical properties). All these aspects play a decisive role in the readings formation and must be taken into account by sensor designers.

The present study describes the methodology aimed at adjusting FOS transfer function by taking into account all the indicated aspects of the readings formation. A fiber optic strain sensor based on the Bragg grating has been considered as an example. The influence of its structure on the readings has been determined by means of mathematical modeling. The contribution of single structural elements (such as glue, optical fiber, substrate with a technological hole, etc.) to this value has been evaluated. General algorithm for determining the effect of the sensor structural elements in its readings has been formulated as the results' generalization. The algorithm has been tested using the existing model of the fiber optic strain sensor. The efficiency of the method has been proved by a series of laboratory experiments.

© PNRPU

Введение

Волоконно-оптические датчики (ВОД) – перспективная динамично развивающаяся отрасль наукоемкой промышленности [1]. С 1970-х годов разрабатываются и успешно применяются ВОД для измерения множества физических величин – от температуры и давления до уровня концентрации химических веществ и радиации. Постоянно возникающие задачи требуют от датчиков функционирования в экстремальных условиях [2], снижения весогабаритных характеристик, увеличения точности измерений и стимулируют процессы разработки и совершенствования волоконно-оптических датчиков.

Как можно заключить из названия, ключевым объектом в волоконно-оптическом датчике является оптическое волокно. Оно является носителем сигнала датчика и может выступать в роли чувствительного элемента. Например, волоконная брэгговская решетка (ВБР) представляет собой модифицированный участок оптического волокна. На сегодняшний день ВБР – один из самых используемых чувствительных элементов ВОД, встречающийся во многих типах датчиков: температуры [3–5], деформации [6–8], давления [9–11] и т.д. В российской и зарубежной литературе широко освещены вопросы исследования и практического применения ВОД в биомеханике [12–14], химии [15–17], композиционных

материалах [18–22], инженерных сооружениях [23–28], медицине [29–31] и других областях. В большинстве статей волоконно-оптический датчик рассматривается с точки зрения фотоники, математическое моделирование используется только для сравнения показаний датчика с результатами расчетов. В отдельных статьях компьютерное моделирование было применено для описания передачи деформации на оптическое волокно при его приклеивании [32, 33] или расчета чувствительных элементов (например, мембраны датчика давления [34, 35] и инерционности датчика температуры [36]). В данной статье мы рассмотрим волоконно-оптический датчик в качестве механической системы и с помощью математического моделирования оценим, какой вклад в показания датчика вносит его конструктив.

1. Физические уравнения для волоконной брэгговской решетки

Решетка Брэгга представляет собой периодическую структуру в сердцевине оптического волокна [37, 38]. Благодаря разнице показателей преломления оптоволокна и решетки часть входного оптического сигнала широкого спектра отражается назад (рис. 1). Центральная длина волны отраженного света λ_{BG} называется брэгговской длиной волны и определяется уравнением Брэгга

$$\lambda_{BG} = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1)$$

где n_{eff} – эффективный показатель преломления сердцевины волокна для центральной длины волны; Λ – период брэгговской решетки. Оба множителя правой части зависят от деформации (упругооптический эффект и линейное изменение размера) и температуры (термооптический эффект и температурное расширение). Используя выражение (1), смещение центральной длины волны отражения под действием деформации и температуры можно записать [39] в виде

$$\Delta\lambda_{BG} = 2n_{eff}\Lambda \left(\left\{ 1 - \frac{n_{eff}^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \varepsilon + \left[\alpha + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \right] \Delta T \right), \quad (2)$$

где P_{ij} – коэффициенты Поккельса упруго-оптического тензора; ν – коэффициент Пуассона; α – коэффициент теплового расширения кварцевого стекла; n_{eff} – эффективный показатель преломления; λ_{BG} – длина отраженной волны (брэгговская длина волны); Λ – период решетки; ε – механическая деформация; ΔT – изменение температуры.

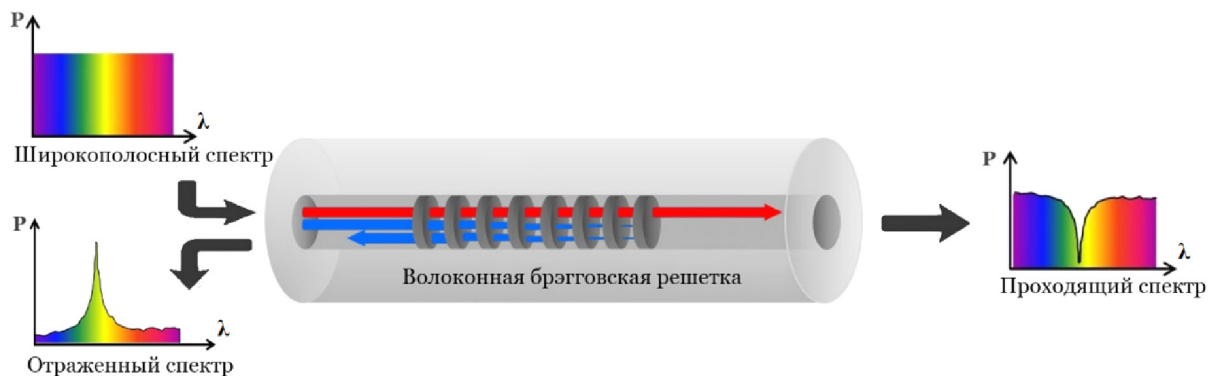


Рис. 1. Принцип действия волоконной брэгговской решетки
Fig. 1. Operating principle of the fiber Bragg grating

Соотношение (2) позволяет использовать решетки Брэгга в качестве датчиков деформации и температуры. Перекрестная чувствительность диктует определенные требования к таким сенсорам: для продолжительного измерения деформации необходима температурная компенсация, а для измерения температуры чувствительный элемент должен быть изолирован от внешних механических воздействий. Выразив из выражения (2) деформацию через сдвиг длины волны и температуру, получим передаточную функцию [40, с. 32] для ВОД деформации

$$\varepsilon = \frac{1}{k_\varepsilon} \frac{\Delta\lambda_{BG}}{\lambda_{BG0}} - k_T \Delta T, \quad (3)$$

где k_ε – коэффициент тензочувствительности ВБР ($k_\varepsilon \approx 0,78$); k_T – коэффициент температурной чувствительности; $\Delta\lambda_{BG}$ – изменение брэгговской длины волны; λ_{BG0} – начальное значение длины волны; ΔT – изменение температуры. Соотношение (3) устанавливает связь между выходным сигналом датчика и внешним воздействием. Однако сама конструкция датчика деформации вносит возмущение в измеряемую величину. Рассмотрим влияние отдельных конструктивных элементов простейшего датчика деформации.

2. Постановка задачи о влиянии элементов ВОД деформации на его показания

Рассмотрим оптоволоконный датчик деформации на основе решетки Брэгга (рис. 2). Даже в такой простой конструкции датчика можно выделить следующие элементы: металлическая подложка 1, содержащая два технологических отверстия 2 (отверстия служат для того, чтобы не допустить растекания клея по центральному участку оптоволоконна), оптическое волокно 3 и клей 4 для крепления оптоволоконна к подложке. Механическое взаимодействие всех этих элементов в процессе измерения деформации напрямую влияет на показания датчика. Помимо этого, существенную роль при передаче деформации исследуемого объекта к датчику играет приварка.

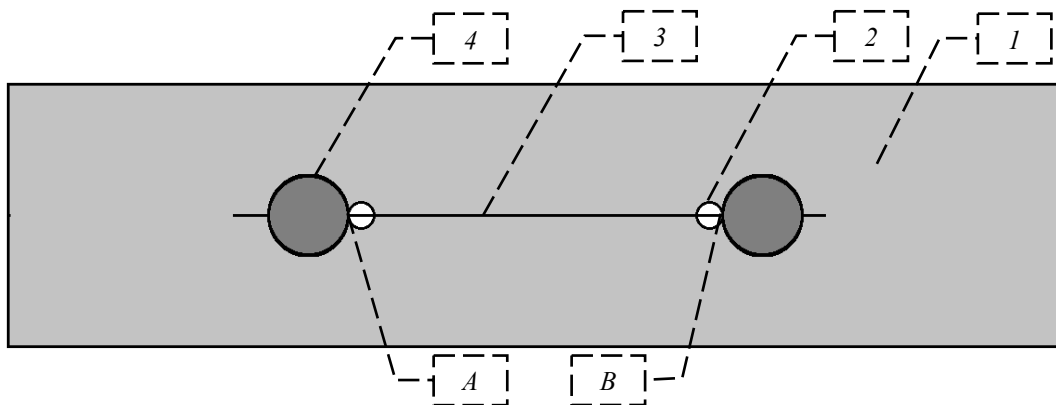


Рис. 2. Геометрическая модель датчика (вид сверху): 1 – металлическая подложка; 2 – технологическое отверстие; 3 – оптическое волокно с защитными оболочками; 4 – цилиндрический клеевой слой
 Fig. 2. Geometrical model of the sensor (top view): 1 is the metal substrate, 2 is the technological hole, 3 is the optical fiber with buffer coatings, 4 is the cylindrical adhesive layer

Отрезок оптического волокна, содержащий чувствительный элемент – ВБР, выходит из клея в точках A и B. Показания датчика определяются деформацией отрезка AB. Для того чтобы определить влияние конструктивных элементов на формирование показания

датчика, поставим следующую задачу. Рассмотрим металлическую пластину с закрепленным на ней датчиком деформации. Размеры пластины на порядок превосходят размеры датчика для минимизации влияния датчика на деформацию пластины. Крепление датчика к пластине представляет собой общую поверхность в виде полосы по периметру датчика шириной 1 мм. На пластине задается одноосное деформирование на заданную величину $\varepsilon = 0,1\%$ (1000 мкм/м). Тогда относительная величина

$$\delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{AB}}{\varepsilon} 100\% \quad (4)$$

будет характеризовать отклонение величины показаний ВОД ε_{AB} от заданной деформации на пластине ε , вызванное взаимодействием конструктивных элементов датчика.

Для того чтобы определить влияние отдельных частей датчика на показания, воспользуемся следующим приемом. Структурообразующим элементом датчика является подложка. Начнем поэтапно восстанавливать конструкцию датчика с нее. При добавлении каждого конструктивного элемента будем сравнивать расчетные показания датчика с предыдущим вариантом. То есть сначала сравниваем деформацию проекции отрезка АВ на подложку с деформацией плиты, откуда получаем вклад приварки в показания. Затем поэтапно добавляем отверстие, клей, оптическое волокно с оболочками и сравниваем с предыдущим вариантом. Таким образом определяем влияние каждого из перечисленных вариантов.

3. Математическая постановка задачи

Математическое моделирование деформации всех элементов датчика осуществляется в рамках линейной теории упругости. Постановка задачи включает в себя следующие уравнения для материала с верхним индексом k :

геометрические уравнения

$$\varepsilon_{ij}^k = \frac{1}{2}(u_{i,j}^k + u_{j,i}^k); \quad (5)$$

физические уравнения

$$\sigma_{ij}^k = 2\mu^k \varepsilon_{ij}^k + \delta_{ij} \lambda^k \varepsilon_{ll}^k, \quad (6)$$

где λ^k и μ^k – коэффициенты Ламе материала; δ_{ij} – символ Кронекера,

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$$

Уравнение равновесия

$$\sigma_{ij,j}^k + \rho^k F_i^k = 0. \quad (7)$$

В 15 уравнениях (5)–(7) неизвестными являются шесть компонент тензора напряжений σ_{ij} , шесть компонент тензора деформаций ε_{ij} и три компоненты вектора перемещений u_i .

Граничные условия. На стыке двух материалов с индексами k и l выполняются условия сопряжения: равенство векторов перемещений и нормальных напряжений:

$$\bar{u}^k = \bar{u}^l, \quad (8)$$

$$\sigma_{ij}^k n_j^k = \sigma_{ij}^l n_j^l. \quad (9)$$

Деформирование пластины с прикрепленным датчиком (рис. 3) на заданную величину $\varepsilon_0 = 0,001$ задается кинематическим фиксированием одного торца пластины (Σ_1) и перемещением другого (Σ_2):

$$u_z^k|_{\Sigma_1} = 0, \quad u_z^k|_{\Sigma_2} = \varepsilon_0 \frac{L}{2}, \quad (10)$$

где L – общая длина пластины. На свободной поверхности k -го материала выполняются естественные граничные условия

$$\sigma_{ij}^k n_j^k = 0. \quad (11)$$

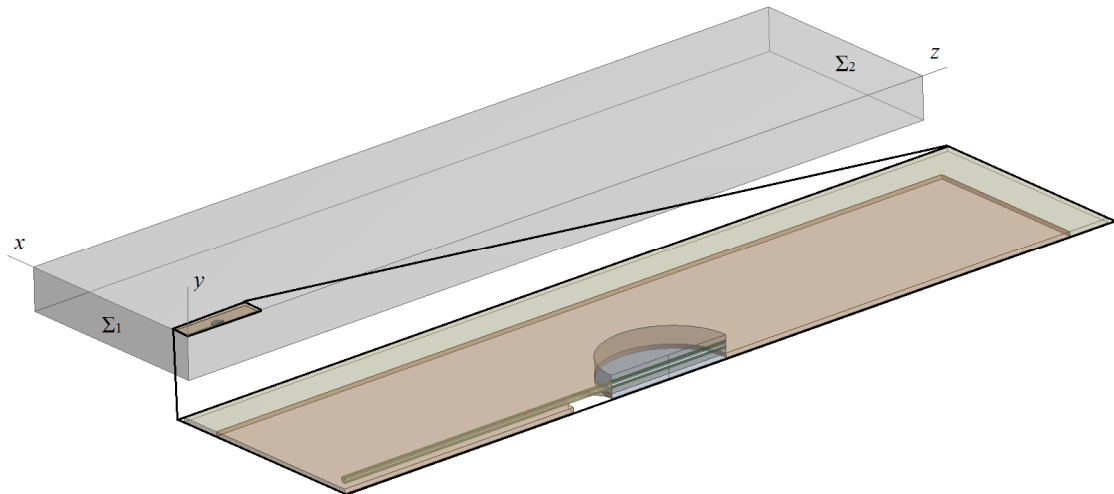


Рис. 3. Расчетная схема пластины с прикрепленным волоконно-оптическим датчиком деформации (1/4 часть)

Fig. 3. Design model of a plate with the placed fiber optic strain sensor (1/4th part)

4. Численное моделирование и анализ результатов

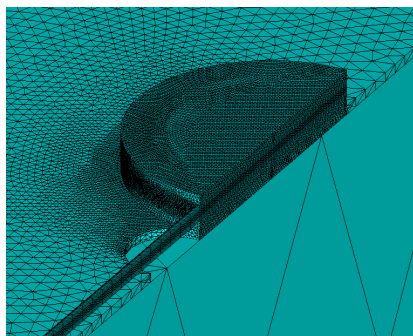


Рис. 4. Фрагмент конечно-элементной сетки в окрестности клеевого слоя

Fig. 4. Fragment of the finite element mesh in the vicinity of the adhesive layer

Численное решение поставленной задачи осуществлялось методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS. Ввиду симметричности геометрии для экономии вычислительных ресурсов была рассмотрена 1/4 часть конструкции. На рис. 4 приведена типичная конечно-элементная аппроксимация структурных элементов датчика. Используемые при расчете геометрические размеры (рис. 5) и физико-механические свойства материалов приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Алгоритм численной реализации позволил проанализировать влияние метода крепления, технологического отверстия, клея и оптического волокна на показания волоконно-оптического датчика деформации. В расчетную схему начиная с подложки поэтапно добавляются перечисленные компоненты. Результаты численных экспериментов показыва-

ют (табл. 4), что структурные элементы датчика могут как увеличивать, так и уменьшать показания по сравнению с задаваемой на пластину деформацией. К первой группе относятся отверстие и клей, ко второй – приварка и оптическое волокно с оболочками.

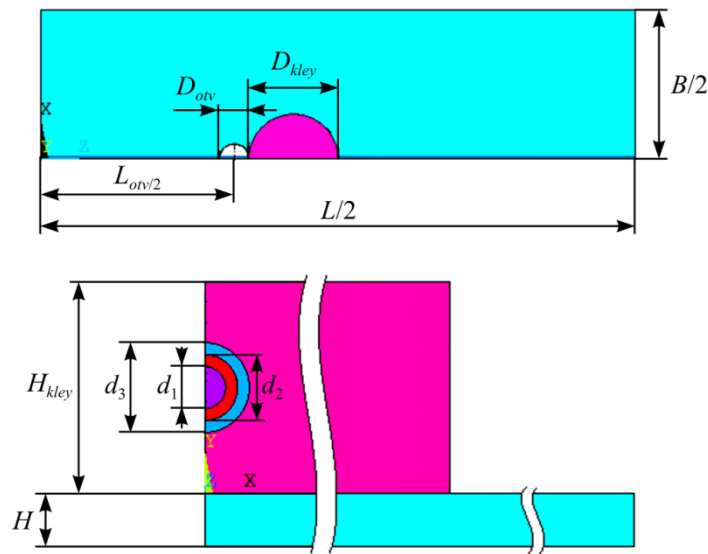


Рис. 5. Геометрические параметры датчика
Fig. 5. Geometrical parameters of the sensor

Таблица 1

Значения геометрических параметров датчика

Table 1

Values of the sensor's geometrical parameters

Параметр	Обозначение	Значение, мм
Диаметр оптического волокна	d_1	0,125
Диаметр внутренней оболочки	d_2	0,18
Диаметр внешней оболочки	d_3	0,25
Длина подложки	L	40
Ширина подложки	B	10
Толщина подложки	H	0,1
Расстояние между центрами отверстий	L_{otv}	13
Диаметр отверстия	D_{otv}	1
Диаметр клеевого пятна	D_{klev}	3
Высота клеевого пятна	H_{klev}	0,4

Таблица 2

Физико-механические параметры материалов

Table 2

Physical and mechanical properties of materials

Материал	E , Па	ν
Сталь	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,3
Оптоволокно	$72 \cdot 10^9$	0,17
Внутренняя оболочка	$0,148 \cdot 10^6$	0,13
Внешняя оболочка	$1,738 \cdot 10^6$	0,15
Эпоксидный клей	$3 \cdot 10^9$	0,32

Сходимость численного решения оценивалась по удовлетворению естественных граничных условий на свободных поверхностях в зависимости от степени дискретизации. В этой оценке определялись величины отклонения естественных краевых условий от нуля по сравнению с характерной величиной силы, обеспечивающей заданную величину деформации (табл. 3).

Таблица 3

Сходимость численного решения

Table 3

Convergence of the numerical solution

Число конечных элементов	Отношение максимального нормального напряжения на свободной поверхности к максимальному напряжению в объеме	
	Клей	Подложка
49368	0,0069	0,0021
119981	0,0059	0,0010
153074	0,0053	0,0009

Влияние отдельной составляющей определяется как изменение деформации, вносимое этим элементом по сравнению с предыдущей схемой. Примем суммарное влияние всех структурных элементов по абсолютному значению за 100 %, тогда вклад каждого элемента можно оценить по его доле от общей величины (табл. 5).

Таблица 4

Результаты численных экспериментов

Table 4

Results of numerical experiments

Номер схемы	Схема	Наличие (v) и отсутствие (x) элементов				Деформация чувствительного элемента, мкм/м
		приварка	отверстие	клей	волокно	
0	Приложенная деформация	x	x	x	x	1000
1	Подложка	v	x	x	x	992
2	Подложка и отверстие	v	v	x	x	1133
3	Подложка, отверстие и клей	v	v	v	x	1219
4	Датчик целиком	v	v	v	v	1096

Таблица 5

Расчет влияния конструктивных элементов на показания датчика

Table 5

Calculation of the structural elements' influence on the sensor readings

Структурный элемент	Привносимая элементом деформация, мкм/м	Модуль привносимой деформации, мкм/м	Доля привносимой деформации от суммы модулей деформаций, %
Приварка	-8	8	2,2
Отверстие	140	140	39,2
Клей	86	86	24,1
Волокно	-123	123	34,5
Сумма	95	357	100

Так, максимальное влияние на формирование показаний датчика (рис. 6) оказывает технологическое отверстие (39,2 %) и оптическое волокно (34,5 %), а минимальное – приварка датчика к поверхности (2,2 %). Суммарный вклад всех конструктивных элементов рассмотренного датчика деформации вычисляется по формуле (4) и приводит к увеличению его показаний на 9,5 %. Для того чтобы скомпенсировать этот эффект, необходимо результат измерения деформации, полученный с ВБР до термокомпенсации, умножить на поправочный коэффициент k_{cor} , равный 0,913, тогда формула (3) примет следующий вид:

$$\varepsilon = \frac{k_{cor}}{k_\varepsilon} \frac{\Delta\lambda_{BG}}{\lambda_{BG0}} - k_T \Delta T. \quad (12)$$

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что при численном моделировании ВОД на основе решетки Брэгга даже несложной конструкции необходимо учитывать влияние конструктивных элементов на его показания. Неоднородность деформации по объему элементов датчика и определяет искажение регистрируемой величины деформации. Характерное распределение деформации вдоль оси датчика представлено на рис. 7.

Обобщив рассмотренный пример, можно сформулировать общую методику оценки влияния конструктивных элементов и корректировки передаточной функции.

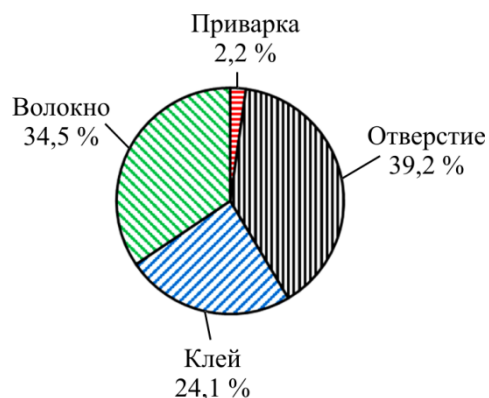


Рис. 6. Влияние элементов датчика на показания
 Fig. 6. Influence of the sensor's elements on the readings

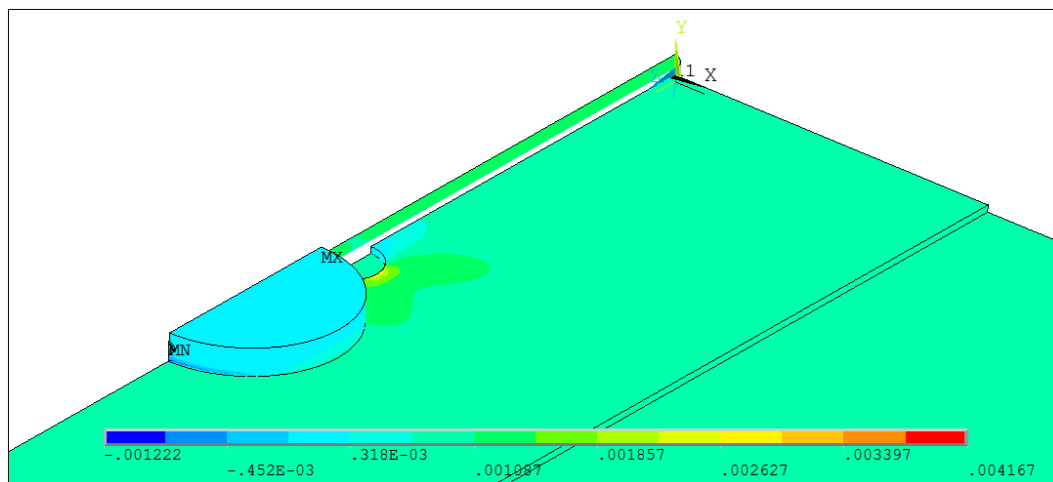


Рис. 7. Распределение осевой деформации вдоль оси измерения датчика
 Fig. 7. Distribution of axial strain along the sensor's measurement axis

5. Методика оценки влияния конструктивных элементов и корректировки передаточной функции

Предлагаемую методику оценки можно представить в виде последовательности действий, представленных ниже.

1. Выяснить принцип действия датчика и физические соотношения, лежащие в основе измерений. На основании этого записать передаточную функцию.

2. Определить физико-механические свойства материалов элементов датчика. На этапе проектирования эти данные можно брать из справочных материалов, а на завершающем этапе разработки датчика – определить из соответствующих экспериментов.

3. Построить математическую модель деформационного взаимодействия всех элементов датчика, в том числе при взаимодействии с объектом измерения.

4. Ввести меру соответствия показаний, характеризующую соответствие измеренной физической величины и действительное значение этой величины (например, мера соответствия показаний датчика деформации δ_e , определенная формулой (3)).

5. На основе анализа численных решений последовательности поставленных краевых задач установить вклад каждого элемента конструкции датчика в меру соответствия показаний.

6. Построить круговую диаграмму влияния элементов датчика на показания. Влияние каждого элемента берется по модулю. На основании диаграммы влияния элементов осуществить рациональную компоновку конструкции датчика, обеспечивающую максимальное соответствие показаний действительному значению измеряемой величины.

7. На основе меры соответствия показаний определить поправку к передаточной функции.

Предложенная методика может быть применена к любым датчикам. Это позволит аналитически сравнивать различную геометрию, материалы и выбирать наиболее рациональный вариант. Полученные результаты можно использовать при калибровке датчиков как некое идеальное состояние. Это может значительно сократить время и ресурсы для разработки новых датчиков. Однако не стоит забывать, что реальные свойства материалов могут различаться. Кроме того, если технология сборки датчика не отработана, то могут появиться дефекты (пустоты в клее, нарушение симметрии и т.д.), также влияющие на точность измерений. Далее приведена практическая проверка разработанной методики.

6. Экспериментальная проверка результатов

Разработанный алгоритм прошел экспериментальную проверку. Для этого была проведена серия экспериментов на одноосное растяжение четырех металлических образцов (рис. 8) с приваренными волоконно-оптическими датчиками деформации производства ООО «Инверсия-Сенсор» (г. Пермь). Показания размещенных рядом тензодатчиков использовались как действительные значения деформации для оценки меры соответствия показаний ВОД. Для используемых волоконно-оптических датчиков была разработана численная модель (рис. 9), оценено влияние элементов конструкции на показания и определена поправка калибровочной функции, равная 0,916.

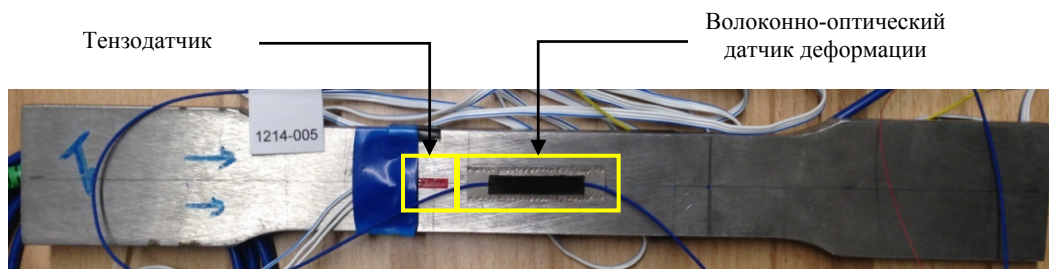


Рис. 8. Образец с приваренным волоконно-оптическим датчиком деформации

Fig. 8. The fiber optic strain sensor welded to a specimen

Результаты экспериментов на растяжение показали, что использование в датчике такого же коэффициента, как и для ВБР, приводит к завышенным показаниям (рис. 10). Средняя величина измеренной волоконно-оптическим датчиком деформации отличается от показаний тензодатчика на 7,3%. Если ввести поправку, полученную в результате математического моделирования, то величина отклонения снижается до 1,9%. Таким образом, результаты численных экспериментов позволяют уменьшить погрешность измерения деформации почти в четыре раза. Этот результат свидетельствует об эффективности использования математического моделирования для определения поправки калибровочной функции. Результаты исследования приняты во внимание и используются при производстве и определении коэффициентов ВОД деформации в ООО «Инверсия-Сенсор»

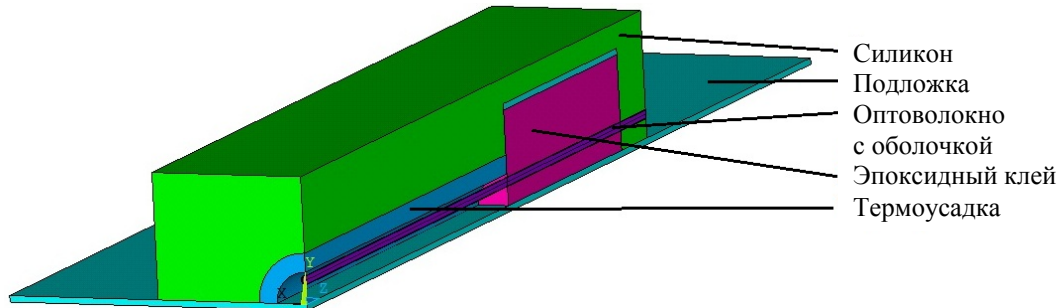


Рис. 9. Модель волоконно-оптического датчика деформации производства ООО «Инверсия-Сенсор» с указанными структурными элементами
 Fig. 9. Model of the fiber optic strain sensor manufactured by ‘Inversion Sensor’ Co. Ltd. with the indicated structural elements

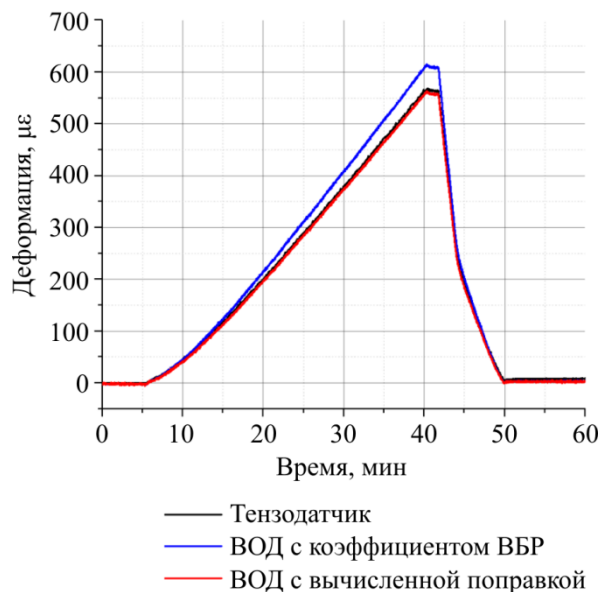


Рис. 10. Сопоставление результатов измерения осевой деформации
 Fig. 10. Comparison of the axial strain measurement results

Заключение

Любой датчик можно рассматривать как механическую систему. Взаимодействие элементов конструкции датчика формирует его показания, поэтому им нельзя пренебрегать. С помощью разработанной математической модели для простейшего конструктива

волоконно-оптического датчика деформации на основе решетки Брэгга было определено влияние конструктивных элементов на его показания. Для компенсации этого влияния в передаточную функцию необходимо ввести поправку, умножив измеренную чувствительным элементом деформацию на 0,913. Эта величина складывается из взаимодействия способа крепления (2 %), технологического отверстия на подложке (39 %), клея (24 %) и оптического волокна с оболочками (35 %) и зависит от материалов и компоновки датчика. На основе рассмотренного примера в качестве обобщения результатов сформулирован общий алгоритм определения влияния конструктивных элементов датчика на его показания. Алгоритм опробован на промышленном ВОД деформации, для которого определено влияние его конструкции на показания и коэффициент поправки передаточной функции, равный 0,916. Экспериментальная проверка результатов показала эффективность данного метода, снизив расхождение показаний ВОД по сравнению с тензодатчиком с 7,3 до 1,9 %.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00172).

Acknowledgments

The work has been carried out with the financial support from the Russian Science Foundation, RSF (project No. 14-29-00172).

Библиографический список

1. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / Гармаш В.Б. [и др.] // Фотон-экспресс. – 2005. – №. 6. – С. 128–140.
2. Буймистряк Г.Я. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий // Control engineering Россия. – 2013. – №. 3. – С. 34–40.
3. Performance assessment of FBG temperature sensors for laser ablation of tumors / W. Chen [et al.] // Medical Measurements and Applications (MeMeA), IEEE International Symposium on. – IEEE, 2015. – P. 324–328. DOI: 10.1109/MeMeA.2015.7145221
4. Fiber Bragg Grating-based high temperature sensor and its low cost interrogation system with enhanced resolution / V.R. Mamidi [et al.] // Optica Applicata. – 2014. – Vol. 44. – No. 2. – P. 299–308. DOI: 10.5277/oa140210
5. Разработка чувствительного элемента волоконно-оптического тензометрического датчика на основе решеток Брэгга / А.С. Мунько [и др.] // Изв. вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 4. – С. 340–346. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-340-346
6. Жлуктова И.В. Разработка волоконно-оптического датчика деформации для технической диагностики высоковольтного коммутационного оборудования // Научная перспектива. – 2016. – № 2. – С. 55–57.
7. Design and experimental study on FBG hoop-strain sensor in pipeline monitoring / L. Ren [et al.] // Optical fiber technology. – 2014. – Vol. 20. – No. 1. – P. 15–23. DOI: 10.1016/j.yofte.2013.11.004
8. Design of an enhanced sensitivity FBG strain sensor and application in highway bridge engineering / L. Li [et al.] // Photonic Sensors. – 2014. – Vol. 4. – No. 2. – P. 162–167. DOI: 10.1007/s13320-014-0172-5
9. Процедура решения задач калибровки совмещенных датчиков давления и температуры / А.Ж. Сахабутдинов [и др.] // Нелинейный мир. – 2015. – Т. 13, № 8. – С. 32–38.

10. A high sensitive FBG pressure sensor using thin metal diaphragm / Pachava V.R. [et al.] // *Journal of Optics*. – 2014. – Vol. 43. – No. 2. – P. 117–121. DOI: 10.1007/s12596-014-0186-9
11. A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation / J. Huang [et al.] // *Measurement*. – 2013. – Vol. 46. – No. 3. – P. 1041–1046. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.10.010
12. Caucheteur C., Guo T., Albert J. Review of plasmonic fiber optic biochemical sensors: improving the limit of detection // *Analytical and bioanalytical chemistry*. – 2015. – Vol. 407. – No. 14. – P. 3883–3897. DOI: 10.1007/s00216-014-8411-6
13. From conventional sensors to fibre optic sensors for strain and force measurements in biomechanics applications: A review / P. Roriz [et al.] // *Journal of biomechanics*. – 2014. – Vol. 47. – No. 6. – P. 1251–1261. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2014.01.054
14. Петухов С.В., Явелов И.С., Рочагов А.В. Вопросы кардиопульсографии в биомеханике сердечно-сосудистой системы // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2013. – № 6. – С. 79–84.
15. Плешков Д.И., Турбин А.И. Детектор метана как элемент системы мониторинга протяженных объектов (СМПО-М) компании «ПетроЛайт» // *Русский инженер*. – 2015. – № 1. – С. 38–44.
16. Wang X., Wolfbeis O.S. Fiber-optic chemical sensors and biosensors (2013–2015) // *Analytical chemistry*. – 2015. – Vol. 88. – No. 1. – P. 203–227. DOI: 10.1021/acs.analchem.5b04298
17. Zhao Y., Deng Z., Wang Q. Fiber optic SPR sensor for liquid concentration measurement // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2014. – Vol. 192. – P. 229–233. DOI: 10.1016/j.snb.2013.10.108
18. Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials / M. Ramakrishnan [et al.] // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16. – No. 1. – P. 99. DOI: 10.3390/s16010099
19. Измерение неоднородных полей деформаций встроенными в полимерный композиционный материал волоконно-оптическими датчиками / А.Н. Аношкин [и др.] // *Изв. РАН. Механика твердого тела*. – 2016. – № 5. – С. 42–51.
20. Исследование микроструктурных влажностных деформаций в эпоксидном стеклопластике при тепловлажностной коррозии с помощью волоконно-оптических датчиков деформаций / А.А. Далинкевич [и др.] // *Коррозия: материалы, защита*. – 2017. – № 3. – С. 42–46.
21. Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: Challenges and solutions / D. Kinet [et al.] // *Sensors*. – 2014. – Vol. 14. – No. 4. – P. 7394–7419. DOI: 10.3390/s140407394
22. Zhu Q., Xu C., Yang G. Experimental research on damage detecting in composite materials with FBG sensors under low frequency cycling // *International Journal of Fatigue*. – 2017. – Vol. 101. – P. 61–66. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.03.034
23. Woschitz H., Klug F., Lienhart W. Design and calibration of a fiber-optic monitoring system for the determination of segment joint movements inside a hydro power dam // *Journal of Lightwave Technology*. – 2015. – Vol. 33. – No. 12. – P. 2652–2657. DOI: 10.1109/JLT.2014.2370102
24. Review: optical fiber sensors for civil engineering applications / C.K.Y. Leung [et al.] // *Materials and Structures*. – 2015. – Vol. 48. – No. 4. – P. 871–906. DOI: 10.1617/s11527-013-0201-7
25. Barrias A., Casas J.R., Villalba S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16. – No. 5. – P. 748. DOI: 10.3390/s16050748
26. Определение продольных механических напряжений в трубопроводе на основании данных волоконно-оптических датчиков деформации / Р.Р. Исламов [и др.] // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. – 2016. – № 5. – С. 45–50.
27. Исследование долговременной работоспособности импульсного волоконно-оптического датчика «ДИВО/40С» на реакторе БАРС-4 / А.В. Васильев [и др.] // *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*. – 2016. – № 4. – С. 53–58.
28. Разработка волоконно-оптических систем для учета, мониторинга и прогнозирования работы высоковольтного оборудования в СУБД с web-интерфейсом / М.А. Ураксеев [и др.] // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. – 2015. – Т. 11, № 1.

29. Dziuda L. Fiber-optic sensors for monitoring patient physiological parameters: A review of applicable technologies and relevance to use during magnetic resonance imaging procedures // *Journal of biomedical optics*. – 2015. – Vol. 20. – No. 1. – P. 010901-010901. DOI: 10.1117/1.JBO.20.1.010901
30. Massaroni C., Saccomandi P., Schena E. Medical smart textiles based on fiber optic technology: an overview // *Journal of functional biomaterials*. – 2015. – Vol. 6. – No. 2. – P. 204–221. DOI: 10.3390/jfb6020204
31. Способ измерения параметров жидкостных потоков / Т.И. Мурашкина [и др.] // *Новые информационные технологии в медицине, биологии, фармакологии и экологии*, 2015. – С. 183–190.
32. Her S.C., Huang C.Y. Effect of coating on the strain transfer of optical fiber sensors // *Sensors*. – 2011. – Vol. 11. – No. 7. – P. 6926–6941. DOI: 10.3390/s110706926
33. Наймушин И.Г., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Численный анализ деформационных процессов в оптоволоконном датчике // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2012. – № 1. – С. 104–116.
34. Design of a pressure sensor based on optical fiber Bragg grating lateral deformation / F. Urban [et al.] // *Sensors*. – 2010. – Vol. 10. – No. 12. – P. 11212–11225. DOI: 10.3390/s101211212
35. Бялик А.Д., Гридчин В.А., Чебанов М.А. Особенности проектирования волоконно-оптических датчиков давления рефлектометрического типа // *Омский научный вестник*. – 2013. – № 3 (123). – С. 268–273.
36. Tonks M.J. Modeling and testing of fast response, fiber-optic temperature sensors: PhD dissertation. – Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.
37. Волоконные решетки показателя преломления и их применение / С.А. Васильев [и др.] // *Квантовая электроника*. – 2005. – № 12. – С. 1085–1103.
38. Hill K. O., Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview // *Journal of lightwave technology*. – 1997. – Vol. 15. – No. 8. – P. 1263–1276. DOI: 10.1109/50.618320
39. Варжель С.В. Волоконные брэгговские решетки / Университет ИТМО. – СПб., 2015. – 65 с.
40. Фрайден Дж. Современные датчики: справ. – М.: Техносфера, 2006 – 592 с.

References

1. Garmash V.B. et al. Vozmozhnosti, zadachi i perspektivy volokonno-opticheskikh izmeritel'nykh sistem v sovremennom priborostroenii [Fiber-optic measuring systems in modern industry possibilities, aims and perspectives]. *Foton-ekspress*, 2005, no. 6, pp. 128-140.
2. Buimistriuk G.Ia. Volokonno-opticheskie datchiki dlia ekstremal'nykh uslovii [Fiber Optic Sensors for extreme conditions]. *Control engineering Rossiia*, 2013, no. 3, pp. 34-40.
3. Chen W. et al. Performance assessment of FBG temperature sensors for laser ablation of tumors. *Medical Measurements and Applications (MeMeA), 2015 IEEE International Symposium on*, IEEE, 2015, pp. 324-328. DOI: 10.1109/MeMeA.2015.7145221.
4. Mamidi V.R. et al. Fiber Bragg Grating-based high temperature sensor and its low cost interrogation system with enhanced resolution. *Optica Applicata*, 2014, vol. 44, no. 2, pp. 299-308. DOI: 10.5277/oa140210.
5. Mun'ko A.S. et al. Razrabotka chuvstvitel'nogo elementa volokonno-opticheskogo tenzometricheskogo datchika na osnove reshetok Bregga [Development of a sensitive element for fiber-optic strain gauge based on bragg gratings]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 2017, vol. 60, no. 4, pp. 340-346. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-340-346.
6. Zhluktova I.V. Razrabotka volokonno-opticheskogo datchika deformatsii dlia tekhnicheskoi diagnostiki vysokovol'tnogo kommutatsionnogo oborudovaniia [Development of fiber optic stain sensor for technical diagnostics of high-voltage commutation equipment]. *Nauchnaia perspektiva*, 2016, no. 2, p. 55-57.
7. Ren L. et al. Design and experimental study on FBG hoop-strain sensor in pipeline monitoring. *Optical fiber technology*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 15-23. DOI: 10.1016/j.yofte.2013.11.004.
8. Li L. et al. Design of an enhanced sensitivity FBG strain sensor and application in highway bridge engineering. *Photonic Sensors*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 162-167. DOI: 10.1007/s13320-014-0172-5.

9. Sakhabutdinov A.Zh. et al. Protседura resheniia zadach kalibrovki sovmeshchennykh datchikov davleniia i temperatury [Procedure of solving problems for calibration of combined pressure and temperature sensors]. *Nelineynyi mir*, 2015, vol. 13, no. 8, pp. 32-38.
10. Pachava V.R. et al. A high sensitive FBG pressure sensor using thin metal diaphragm // *Journal of Optics*, 2014, vol. 43, no. 2, pp. 117-121. DOI: 10.1007/s12596-014-0186-9
11. Huang J. et al. A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation. *Measurement*, 2013, vol. 46, no. 3, pp. 1041-1046. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.10.010.
12. Caucheteur C., Guo T., Albert J. Review of plasmonic fiber optic biochemical sensors: improving the limit of detection. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 2015, vol. 407, no. 14, pp. 3883-3897. DOI:10.1007/s00216-014-8411-6.
13. Roriz P. et al. From conventional sensors to fibre optic sensors for strain and force measurements in biomechanics applications: A review. *Journal of biomechanics*, 2014, vol. 47, no. 6, pp. 1251-1261. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2014.01.054.
14. Petukhov S.V., Iavelov I.S., Rochagov A.V. Voprosy kardiopul'sografii v biomekhanike serdechno-sosudistoi sistemy [Questions of cardiopulography in biomechanics of cardiovascular system]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin*, 2013, no. 6, pp. 79-84.
15. Pleshkov D.I., Turbin A.I. Detektor metana kak element sistemy monitoringa protiazhennykh ob"ektov (SMPO-M) kompanii «PetroLait» [Methane detector as element of the System of Monitoring of Extended Objects (SMEO) by the PetroLight Company]. *Russkii inzhener*, 2015, no. 1, pp. 38-44.
16. Wang X., Wolfbeis O.S. Fiber-optic chemical sensors and biosensors (2013–2015). *Analytical chemistry*, 2015, vol. 88, no. 1, pp. 203-227. DOI: 10.1021/acs.analchem.5b04298.
17. Zhao Y., Deng Z., Wang Q. Fiber optic SPR sensor for liquid concentration measurement. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, vol. 192, pp. 229-233. DOI: 10.1016/j.snb.2013.10.108.
18. Ramakrishnan M. et al. Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 1, p. 99. DOI:10.3390/s16010099.
19. Anoshkin A.N. et al. Measurement of inhomogeneous strain fields by fiber optic sensors embedded in a polymer composite material. *Mechanics of solids*, 2016, vol. 51, no. 5, pp. 542-549. DOI: 10.3103/S0025654416050058.
20. Dalinkevich A.A. et al. Issledovanie mikrostrukturnykh vlazhnostnykh deformatsii v epoksidnom stekloplastike pri teplovlazhnostnoi korrozii s pomoshch'iu volokonno-opticheskikh datchikov deformatsii [Investigation of microstructure humidity deformations in fiberglass plastic under corrosion conditions in climatic chamber with usage of Bregg's fiber-optic sensors of deformation]. *Korroziia: materialy, zashchita*, 2017, no. 3, pp. 42-46.
21. Kinet D. et al. Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: Challenges and solutions. *Sensors*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 7394-7419. DOI: 10.3390/s140407394.
22. Zhu Q., Xu C., Yang G. Experimental research on damage detecting in composite materials with FBG sensors under low frequency cycling. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 101, pp. 61-66. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.03.034.
23. Woschitz H., Klug F., Lienhart W. Design and calibration of a fiber-optic monitoring system for the determination of segment joint movements inside a hydro power dam. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, vol. 33, no. 12, pp. 2652-2657. DOI: 10.1109/JLT.2014.2370102.
24. Leung C. K. Y. et al. Review: optical fiber sensors for civil engineering applications. *Materials and Structures*, 2015, vol. 48, no. 4, pp. 871-906. DOI: 10.1617/s11527-013-0201-7.
25. Barrias A., Casas J. R., Villalba S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 5, p. 748. DOI:10.3390/s16050748.
26. Islamov R.R. et al. Opredelenie prodol'nykh mekhanicheskikh napriazhenii v truboprovode na osnovanii dannykh volokonno-opticheskikh datchikov deformatsii [Determination of longitudinal mechanical stresses in pipeline based on data fiber optic sensors for measuring strain]. *Oborudovanie i tekhnologii dlia neftegazovogo kompleksa*, 2016, no. 5, pp. 45-50.
27. Vasil'ev A.V. et al. Issledovanie dolgovremennoi rabotosposobnosti impul'snogo volokonno-opticheskogo datchika «DIVO/40S» na reaktore BARS-4 [Research of Long-Term Operability of Pulse Fiber-Optic Sensor DIVO/40S on the Reactor BARS-4]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: fizika radiatsionnogo vozdeistviia na radioelektronnuu apparaturu*, 2016, no. 4, pp. 53-58.
28. Urakseev M. A. et al. Razrabotka volokonno-opticheskikh sistem dlia ucheta, monitoringa i prognozirovaniia raboty vysokovol'nogo oborudovaniia v SUBD s web-interfeisom [Development of fiber-optic systems for

recording, monitoring and forecast of high-voltage equipment operation in DBMS with web-interface]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekxy i sistemy*, 2015, vol. 11, no. 1.

29. Dziuda L. Fiber-optic sensors for monitoring patient physiological parameters: A review of applicable technologies and relevance to use during magnetic resonance imaging procedures. *Journal of biomedical optics*, 2015, vol. 20, no. 1, pp. 010901-010901. DOI: 10.1117/1.JBO.20.1.010901.

30. Massaroni C., Saccomandi P., Schena E. Medical smart textiles based on fiber optic technology: an overview. *Journal of functional biomaterials*, 2015, vol. 6, no. 2, pp. 204-221. DOI: 10.3390/jfb6020204.

31. Murashkina T.I. et al. Sposob izmereniia parametrov zhidkostnykh potokov [Way of measurement of parameters of liquid streams]. *Novye informatsionnye tekhnologii v meditsine, biologii, farmakologii i ekologii*, 2015, pp. 183-190.

32. Her S. C., Huang C. Y. Effect of coating on the strain transfer of optical fiber sensors. *Sensors*, 2011, vol. 11, no. 7, pp. 6926-6941. DOI: 10.3390/s110706926.

33. Naymushin I.G., Trufanov N.A., Shardakov I.N. Numerical analysis of deformation processes in the optical fiber sensors. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2012, no. 1, pp. 104-116.

34. Urban F. et al. Design of a pressure sensor based on optical fiber Bragg grating lateral deformation. *Sensors*, 2010, vol. 10, no. 12, pp. 11212-11225. DOI: 10.3390/s101211212

35. Bialik A.D., Gridchin V.A., Chebanov M.A. Osobennosti proektirovaniia volokonno-opticheskikh datchikov davleniia reflektometricheskogo tipa [Features of the fiber optic pressure sensors designing]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2013, no. 3 (123), pp. 268-273.

36. Tonks M.J. Modeling and testing of fast response, fiber-optic temperature sensors: PhD dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2006.

37. Vasil'ev S.A. et al. Fibre gratings and their applications. *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, no. 12, pp. 1085-1103. DOI: 10.1070/QE2005v035n12ABEH013041.

38. Hill K.O., Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. *Journal of lightwave technology*, 1997, vol. 15, no. 8, pp. 1263-1276. DOI: 10.1109/50.618320.

39. Varzhel' S.V. Volokonnye breggovskie reshetki [Fiber Bragg Gratings]. *Saint Petersburg, ITMO University*, 2015, 65 p.

40. Fraden J. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. *Springer Science & Business Media*, 2004, 589 p.