

Паньков А.А. Резонансная диагностика распределения температуры пьезоэлектролюминесцентным оптоволоконным датчиком по решению интегрального уравнения Фредгольма // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 2. – С. 72–82. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.2.07

Pan'kov A.A. Resonant diagnostics of temperature distribution by the piezo-electro-luminescent fiber-optical sensor according to the solution of the Fredholm integral equation. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no. 2, pp. 72-82. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.2.07



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2018

PNRPU MECHANICS BULLETIN

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



DOI: 10.15593/perm.mech/2018.2.07

УДК 531.787.5

## РЕЗОНАНСНАЯ ДИАГНОСТИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМ ОПТОВОЛОКОННЫМ ДАТЧИКОМ ПО РЕШЕНИЮ ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ФРЕДГОЛЬМА

А.А. Паньков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 22 февраля 2018 г.

Принята: 22 мая 2018 г.

Опубликована: 29 июня 2018 г.

#### Ключевые слова:

пьезоэлектростроупругость, механолюминесцентный эффект, оптоволокно, распределенный датчик температуры, интегральное уравнение Фредгольма, численное моделирование.

### АННОТАЦИЯ

Разработана математическая модель резонансного диагностирования неоднородного поля температур пьезоэлектролюминесцентным оптоволоконным датчиком. Датчик представляет собой оптоволокно с электролюминесцентным и пьезоэлектрическим слоями. В датчике первый тонкий цилиндрический фотопрозрачный электрод расположен между оптоволоконным и электролюминесцентным слоем, а второй электрод – на внешней цилиндрической поверхности пьезоэлектрического слоя. Механолюминесцентный эффект возникает в результате взаимодействия между собой электролюминесцентного и пьезоэлектрического слоев при осесимметричных вынужденных вибрациях датчика. При вибрациях электролюминесцентное свечение проникает через внутренний электрод в оптоволокно и далее распространяется по нему к приемнику-анализатору интенсивности света на выходе из оптоволоконка. Модель основана на заданной амплитудно-частотной характеристике вынужденных стационарных электроупругих осесимметричных колебаний локального участка датчика, которые вызваны гармонической составляющей управляющего электронапряжения на его электродах; постоянная составляющая управляющего электронапряжения необходима для настройки датчика на рабочий режим в рассматриваемом диапазоне температур. При нагреве локального участка датчика график его амплитудно-частотной характеристики смещается по оси частоты (на величину изменения резонансной частоты) пропорционально изменению температуры этого участка. В результате искомая функция плотности распределения температуры по длине датчика находится как решение интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода по результатам измеряемых значений производной амплитуды интенсивности свечения на выходе из оптоволоконка датчика по частоте управляющего электронапряжения; ядро Фредгольма рассчитывается через известную амплитудно-частотную характеристику датчика и зависимость резонансной частоты от температуры. Представлены результаты численного моделирования и изучены закономерности влияния на амплитуды интенсивности свечения на выходе из оптоволоконка датчика различных модельных и реальных законов распределения диагностируемых температур по длине датчика.

© ПНИПУ

© Паньков Андрей Анатольевич – доктор физико-математических наук, доцент, e-mail: a\_a\_pankov@mail.ru

Andrey A. Pan'kov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: a\_a\_pankov@mail.ru



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

# RESONANT DIAGNOSTICS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION BY THE PIEZO-ELECTRO-LUMINESCENT FIBER-OPTICAL SENSOR ACCORDING TO THE SOLUTION OF THE FREDHOLM INTEGRAL EQUATION

A.A. Pan'kov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## ARTICLE INFO

Received: 22 February 2018  
Accepted: 22 May 2018  
Published: 29 June 2018

### Keywords:

piezo-electro-elasticity, mechanical-luminescent effect, optical fiber, distributed sensor of temperature, Fredholm integral equation, numerical modeling.

## ABSTRACT

The mathematical model of the resonant diagnostics of the non-uniform temperature field using the piezo-electro-luminescent fiber-optical sensor is developed. The sensor is an optical fiber with electroluminescent and piezoelectric layers. The sensor's first thin cylindrical photo passing electrode is located between the optical fiber and the electroluminescent layer, and the second electrode is located on an external cylindrical surface of the piezoelectric layer. The mechanoluminescent effect is a result of the interaction between the electroluminescent and piezoelectric layers in case of axisymmetric forced vibrations of the sensor. In case of vibrations, the electroluminescent glow penetrates through an inner electrode into the optical fiber and reaches the receiver-analyzer of light intensity on the output of the optical fiber. The model is based on the amplitude-frequency characteristic for the stationary electroelastic axisymmetric forced vibrations of a local section of the sensor. The forced oscillations are caused by the harmonious part of the control voltage on the electrodes of the sensor; the constant part of the control voltage is necessary for the setup of the sensor for an operating mode in the considered range of temperatures. When heating a local section of the sensor, the diagram of its amplitude-frequency characteristic displaces along the frequency axis (at a value of resonance frequency's change), proportionally to the temperature change of this section. As a result, the problem of finding the required function of temperature distribution density along the sensor is reduced to the solution of the Fredholm integral equation of the 1-st kind, based on the results of the measured values of a derivative of amplitude of the luminescence intensity at the output of the optical fiber. Fredholm's kernel is calculated using the known amplitude-frequency characteristic of the sensor and the dependence of the resonant frequency on temperature. The numerical modeling results are presented and the influence on amplitude of the luminescence intensity at output of the sensor's optical fiber are studied for various models and real laws of distribution of the diagnosed temperatures on a sensor's length.

© PNRPU

## Введение

Температура – очень важная физическая характеристика состояния вещества, и определение ее числового значения представляет собой фундаментальную проблему [1–10]. Измерение температуры тел можно производить только косвенным путем, основываясь на зависимости от температуры их различных физических характеристик, которые поддаются непосредственному измерению; при этом изменение используемой характеристики должно быть связано с температурой, близкой к линейной функциональной зависимости, которая лишь незначительно искажается из-за воздействия других параметров, точно и просто воспроизводится при градуировке измерительного прибора [11]. Датчики температуры подразделяют по принципу действия, характеризующего заложенную в работу датчика некоторую известную фундаментальную зависимость информативных физико-механических характеристик чувствительного элемента датчика от изменения его температуры. В частности, термоэлектрические датчики основаны на изменении при нагреве силы тока в замкнутом двухфазном контуре, терморезистивные – на изменении сопротивления проводника, полупроводниковые – на изменении электрического напряжения на

*p-n*-переходе, акустические – на изменении скорости звука в среде, инфракрасные пирометрические – на изменении характеристик излучения от нагретых тел, волоконно-оптические – на изменении оптических свойств световода, пьезоэлектрические – на изменении резонансной частоты пьезоэлемента от температуры. Бесконтактное измерение температуры по спектральной плотности излучения объекта в инфракрасном диапазоне с учетом статистических характеристик внешних факторов рассмотрено в [12], конструкция микроэлектронного двухпараметрического датчика для одновременного измерения давления и температуры с выделением информационных сигналов для каждого параметра из суммарного сигнала предложена в [13], резонансные пьезоэлектрические датчики обладают высокой точностью измерений в широком диапазоне температур, надежностью и долговечностью [8].

В оптоволоконных датчиках [1–7, 14–18] световод может использоваться в качестве линии передачи информативного сигнала от чувствительного элемента, который преобразует измеряемую величину в информативный параметр оптического сигнала, к устройству преобразования и обработки оптических сигналов с последующей выработкой результирующих визуальных или цифровых сигналов измерительной информации [19–23], и/или в качестве

ве волоконно-оптического чувствительного элемента, способного изменять свои характеристики, в частности: фазу распространяющейся по оптическому волокну волны, поляризацию, угол вращения плоскости поляризации, коэффициенты потерь, отражения или рассеяния света под воздействием внешних диагностируемых факторов [1]. Брэгговские волоконные решетки являются одним из важнейших типов волоконно-оптических чувствительных элементов в различных современных устройствах волоконной оптики и находят применение в качестве компенсаторов дисперсии в волоконно-оптических линиях связи, зеркал волоконных и полупроводниковых лазеров, чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков физических величин, в частности для измерения температуры, давления, опосредованно, через осевые деформации брэгговской решетки. Актуальность развития волоконно-оптических систем распределенного измерения физических величин на основе длинных брэгговских решеток [24–27] обуславливается необходимостью проведения мониторинга физических полей для протяженных объектов с высоким пространственным разрешением. Принцип действия и результаты численного моделирования двухпараметрического датчика на основе брэгговских решеток для одновременного измерения деформации и температуры даны в [28] на основе калибровки сигналов по шкале длин волн. Волоконно-оптическая сенсорная система с записанным массивом из 12 сенсоров из брэгговских решеток в одном волоконном световоде дана в [29], где оптическое излучение с широкополосного источника поступает на массив сенсоров и отраженный сигнал обрабатывается анализатором спектра и по положениям максимумов отражения вычисляется температура каждого сенсора; характеристики лазера позволяют опрашивать до 45 датчиков температуры в диапазоне 100 °C с погрешностью не более 1 °C. На примере волоконно-оптической измерительной сети томографического типа в [30] выполнено исследование алгебраических и нейросетевых методов реконструкции распределенных физических полей; представлены методы и результаты реконструкции функций как точечных, так и непрерывных пространственных распределений температурного поля [9, 31, 32]. В [33] рассмотрены принципы и физические пределы мультиплексирования внутрисветоводных массивов из дифракционных и интерференционных волоконно-оптических датчиков. К недостаткам волоконно-оптических датчиков температур с решетками Брэгга можно отнести их сильную зависимость от внешних воздействий. В частности, механическое воздействие на чувствительный элемент может привести к существенному искажению решетки и как следствие росту погрешности измеряемых информативных параметров и диагностируемой температуры.

Для мониторинга распределения температуры на протяженных объектах, в частности трубопроводах, широкое распространение получил распределенный оптоволоконный датчик температуры на основе комбинационного рамановского рассеяния, интенсивность стоксовой компоненты которого практически не зависит от температуры,

а интенсивность антистоксовой компоненты сильно связана с температурой. В результате значение температуры определяется через отношение интенсивностей антистоксовой и стоксовой компонент; такие датчики могут работать на значительных расстояниях и с высоким пространственным разрешением, подход позволяет исключить погрешности, связанные с возможными флуктуациями мощности зондирующего лазерного импульса [15].

Известны оптоволоконные датчики с генерацией информативных световых сигналов на основе эффектов электролюминесценции или флюоресценции [34–37]. В частности, волоконно-оптический кислородный сенсор предназначен для определения содержания кислорода в жидких и газообразных средах и состоит из оптического волокна, на торец которого нанесено специальное тонкопленочное покрытие. Оптическое волокно сенсора передает излучение от светодиода к покрытию на торце оптоволоконной с возбуждением в покрытии флюоресценции, которая улавливается детектором – спектрометром сенсора; интенсивность флюоресценции коррелирует с измеряемой концентрацией кислорода, проникающего из газовой или жидкой среды в пленочное покрытие. Возможность для измерения температуры предоставляет эффект зависимости параметров люминесценции или флюоресценции активной светоотдающей среды от температуры. В зависимости от типа активной среды сброс ее возбуждения может идти по различным механизмам, существенным образом зависящим от температуры. При изменении температуры могут изменяться относительные интенсивности линий флюоресценции, времена затухания люминесценции среды на разных переходах. Регистрация этих изменений позволяют судить о температуре люминесцирующей среды; изменяя состав флюоресцентного материала и длину волны излучения накачки, возбуждающего флюоресценцию, можно получать различные спектральные компоненты с различным характером температурного поведения, перекрывая тем самым различные температурные диапазоны. Измерение интенсивности люминесценции происходит одновременно на нескольких различных длинах волн, и после приёма сигналы в этих спектральных диапазонах сравниваются. Такая обработка позволяет исключить влияние паразитных нетемпературных воздействий. Другой путь ослабления влияния паразитных нетемпературных воздействий – переход от измерения интенсивности излучения люминесценции к измерению времени затухания люминесценции. Выбором типа иона активатора (обычно это ионы редкоземельных элементов или ионы металлов переходных групп) и типа матрицы можно обеспечить измерение в различных температурных диапазонах. Результирующее определение датчиком температуры осуществляется с использованием известной калибровочной кривой для зависимости времени затухания люминесценции от температуры. Отметим, что механолюминесцентный эффект использован в оптоволоконном датчике давления [38] с преобразованием механической энергии воздействия в оптическое излучение; явление деформационной люминесценции [39–42] наблю-

дается у различных кристаллофосфоров, при пластической деформации которых происходит движение электрически заряженных дислокаций [43, 44].

К недостаткам датчиков температуры на основе эффектов флюоресценции и люминесценции относятся малая допустимая рабочая длина световода и сложность фоторегистрирующей аппаратуры вследствие относительно малой мощности флюоресцирующего излучения. Наиболее распространенными волоконно-оптическими датчиками температуры являются датчики амплитудного типа, в которых модуляция проходящего или отраженного света при изменении температуры осуществляется за счет зависимости поглощения или отражения чувствительного элемента (кристаллы, специальные волокна и т.д.) от температуры. При создании таких волоконно-оптических датчиков чаще всего используется эффект сдвига края зоны собственного поглощения в полупроводниках от температуры. Чувствительный элемент датчика представляет собой пластину полупроводника, зажатую между двумя световодами: входным, по которому поступает свет от источника излучения, и выходным, соединенным другим концом с фотоприемным устройством [45].

Резонансные пьезоэлектрические датчики температуры характеризуются сравнительно большой мощностью и простотой обработки информативных выходных сигналов и основаны на зависимости резонансной частоты вибраций «резонатора» – пьезоэлектрического чувствительного элемента датчика от температуры; в настоящее время используют специально разработанные резонаторы с сильной и линейной зависимостью резонансной частоты от температуры в широком рабочем температурном диапазоне  $-80\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +230\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Резонансные датчики температуры, в частности, в цифровых термометрах работают с высокой чувствительностью, разрешением и стабильностью, что делает их перспективными в использовании; дополнительное применение в конструкции датчика микропроцессоров позволяет использовать резонаторы с нелинейной зависимостью резонансной частоты от температуры, которую аппроксимируют полиномиальной зависимостью, и главным фактором при выборе резонатора становится его чувствительность [46].

Цель – разработка математической модели функционирования резонансного пьезоэлектrolюминесцентного оптоволоконного датчика для диагностирования неоднородного по его длине поля температур; резонансный подход позволяет использовать для решения этой задачи конструкцию ранее предложенного датчика [20].

### 1. Резонансный датчик температуры

Датчик (рис. 1) [20] представляет собой слоистое волокно, состоящее из оптоволоконна 1, электролюминесцентного 2 и с радиальной поляризацией пьезоэлектрического 3, цилиндрических концентрических слоев с внутренним фотопрозрачным, в частности перфорированным или сеточным 4, и внешним 5 непрерывными

управляющими электродами. Для улучшения пространственной разрешимости датчика посредством уменьшения усредняющего эффекта, вносимого датчиком в реальное диагностируемое неоднородное поле температур, целесообразно минимизировать теплопроводность всех элементов, в частности электродов 4, 5 датчика в осевом направлении. Считаем, что при нагреве график амплитудно-частотной характеристики датчика смещается по оси частоты на величину изменения резонансной частоты пропорционально изменению температуры; гармоническая составляющая электрического напряжения  $U_{\text{упр}}$  на управляющих электродах 4, 5 датчика необходима для возбуждения вынужденных стационарных электроупругих осесимметричных колебаний датчика, постоянная составляющая – для настройки датчика на рабочий режим в рассматриваемом диапазоне диагностируемых температур.

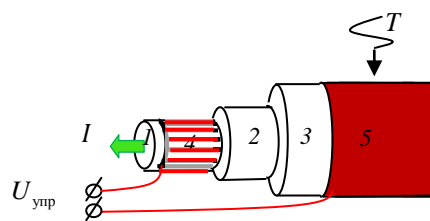


Рис. 1. Датчик температуры  $T$  с управляющим напряжением  $U_{\text{упр}}$  и интенсивностью света  $I$  на выходе из световода

Fig. 1. Temperature sensor  $T$  with the control voltage  $U_{\text{упр}}$  and intensity of light  $I$  at the output of the optical fiber

### 2. Математическая модель диагностирования

Пусть известна амплитудно-частотная характеристика  $\tilde{U}_0(\nu)$  для электрического напряжения  $\bar{U}$  на электролюминесцентном элементе фрагмента (длиной  $\bar{l}_0$ ) датчика в зависимости от частоты  $\nu$  гармонической составляющей  $U'_{\text{упр}}(\nu, t)$  электрического напряжения,

$$U_{\text{упр}}(\nu, t) = U_0 + U'_{\text{упр}}(\nu, t), \tag{1}$$

на управляющих электродах датчика при некоторой однородной номинальной температуре  $T_0$ , с резонансной частотой  $\nu_0$ , и дополнительно известна зависимость резонансной частоты  $\nu_T = \nu_T(\Delta T)$  от приращения  $\Delta T \equiv T - T_0$  температуры  $T$ , где  $\nu_0 \equiv \nu_T(0)$ ; считаем, что при изменении температуры на  $\Delta T$  график амплитудно-частотной характеристики

$$\tilde{U}(\nu) \approx \tilde{U}_0(\nu - \Delta_T) \tag{2}$$

может быть получен смещением графика  $\tilde{U}_0(\nu)$  по оси абсцисс (частоты) на величину изменения резонансной частоты

$$\Delta_T \equiv \nu_T - \nu_0 \approx k_\nu \Delta T, \tag{3}$$

где  $k_v$  – коэффициент пропорциональности для рассматриваемого рабочего температурного диапазона датчика [46].

Амплитуда интенсивности свечения для базового случая  $\tilde{I}_0 = \tilde{I}_0(v, \bar{l}_0)$  на выходе из световода рассматриваемого фрагмента длиной  $\bar{l}_0$  и с однородной температурой  $T_0$  датчика с учетом прямой пропорциональности  $\bar{I}_0 = k\bar{l}_0$  длине фрагмента  $\bar{l}_0$ , где некоторый известный коэффициент  $k$  линейной плотности светоотдачи электролюминесцентного элемента, и заданной (при однородной светоотдаче по всей длине  $l$  датчика) линейной зависимости для «функции свечения» – зависимости интенсивности  $\bar{I}$  свечения,

$$\bar{I} \equiv \bar{I}_0 + k_l(\bar{U} - \bar{U}_0), \quad (4)$$

от электрического напряжения  $\bar{U}$  на электролюминесцентном элементе датчика в рассматриваемом диапазоне значений  $(a_1 U_0 - \bar{U}; a_1 U_0 + \bar{U})$ , где  $\bar{I}_0$  – интенсивность свечения при значении  $\bar{U}_0 = a_1 U_0$ ;  $U_0$  (1) – постоянная составляющая управляющего напряжения;  $a_1$  – управляющий передаточный коэффициент датчика [21, 22]. Таким образом, для базового случая с температурой  $T_0$  амплитуда свечения

$$\tilde{I}_0(v, \bar{l}) = \frac{\bar{l}}{l} k_l \tilde{U}_0(v). \quad (5)$$

При изменении  $\Delta T$  температуры рассматриваемого фрагмента датчика длиной  $\bar{l}_T \approx \bar{l}_0$  с первоначальной резонансной частотой  $\nu_0$  имеем амплитуду интенсивности свечения

$$\tilde{I}_T = \tilde{I}_0(\Delta_\nu, \bar{l}_T), \quad (6)$$

где  $\tilde{I}_0 = \tilde{I}_0(v, \bar{l}_0)$  – базовая функция (5); аргумент  $\Delta_\nu \equiv \nu - \Delta_T$  или

$$\Delta_\nu = \nu - k_\nu \Delta T \quad (7)$$

с учетом смещения  $\Delta_T \approx k_\nu \Delta T$  (2), (3) по оси частоты.

Рассмотрим нахождение функции плотности распределения  $f_T(\tau)$  приращений температуры  $\Delta T$  по всей длине  $l$  датчика. Интенсивность света на выходе из световода датчика

$$I(v, t) = I_0 + I'(v, t). \quad (8)$$

состоит из постоянной  $I_0 = \bar{I}_0$  (4) и гармонической

$$I'(v, t) = \tilde{I}(v) \sin(\omega t + \phi_0) \quad (9)$$

составляющих, обусловленных действием соответствующих составляющих  $U_0$ ,  $U'_{\text{упр}}(v, t) = \tilde{U}_{\text{упр}} \sin \omega t$  с ам-

плитудой  $\tilde{U}_{\text{упр}}$  управляющего напряжения  $U_{\text{упр}}(v, t)$  (1) с заданной частотой  $\nu$  на электродах датчика, где  $\tilde{I}(v)$  – амплитуда гармонической составляющей интенсивности свечения  $I'(v, t)$ ;  $\phi_0$  – начальная фаза;  $\omega = 2\pi\nu$  – круговая частота. Малому приращению частоты  $d\nu$  соответствует приращение  $d\tilde{I}(v)$  амплитуды интенсивности свечения  $\tilde{I}(v)$  на выходе из световода

$$d\tilde{I}(v) = \int_{\Delta T} d\tilde{I}_T, \quad (10)$$

которое получим в результате интегрирования по множеству  $\Delta T$  значений приращений температур по всей длине  $l$  световода «локальных приращений» (6):

$$d\tilde{I}_T = \left( \frac{\partial \tilde{I}_T}{\partial \nu} \right) d\nu = \left( \frac{\partial \tilde{I}_0(\Delta_\nu, d\bar{l}_T)}{\partial \Delta_\nu} \right) d\nu$$

на элементарных участках  $d\bar{l}_T$  световода или

$$d\tilde{I}_T \approx \left( \frac{\partial^2 \tilde{I}_0(\Delta_\nu, \bar{l}_T)}{\partial \Delta_\nu \partial \bar{l}_T} \right)_{\bar{l}_T=0} d\bar{l}_T d\nu \quad (11)$$

с учетом разложения функции

$$\tilde{I}_0(\Delta_\nu, d\bar{l}_T) \approx \tilde{I}_0(\Delta_\nu, 0) + \left( \frac{\partial \tilde{I}_0(\Delta_\nu, \bar{l}_T)}{\partial \bar{l}_T} \right)_{\bar{l}_T=0} d\bar{l}_T$$

в окрестности точки  $\bar{l}_T = 0$  в ряд Тейлора, где  $\tilde{I}_T = \tilde{I}_0(\Delta_\nu, \bar{l}_T)$  (4),  $\tilde{I}_0(\Delta_\nu, 0) = 0$  (5),  $d\bar{l}_T = d\bar{l}_T(\Delta T)$  – это некоторая малая длина участка (или суммарная длина участков) световода с приращениями температур  $\Delta T \in (\tau, \tau + d\tau)$ , величина  $\Delta_\nu \equiv \nu - \Delta_T$  (7). Таким образом, имеем

$$d\tilde{I}(v) = \left( \int_{\Delta T} \left( \frac{\partial^2 \tilde{I}_0(\Delta_\nu, \bar{l}_T)}{\partial \Delta_\nu \partial \bar{l}_T} \right)_{\bar{l}_T=0} d\bar{l}_T \right) d\nu \quad (12)$$

с учетом (10), (11); производная амплитуды интенсивности результирующего свечения  $\tilde{I}(v)$  (8), (9) на выходе из световода датчика примет вид

$$\frac{d\tilde{I}(v)}{d\nu} = \int_0^l \left( \frac{\partial^2 \tilde{I}_0(\Delta_\nu, \bar{l}_T)}{\partial \Delta_\nu \partial \bar{l}_T} \right)_{\bar{l}_T=0} d\bar{l}_T \quad (13)$$

с учетом замены

$$d\bar{l}_T \equiv d\tilde{l}_T, \quad (14)$$

где  $\tilde{l}_T = \tilde{l}_T(\tau)$  – суммарная длина участков датчика с приращениями температур  $\Delta T < \tau$ , в (12)–(14) приращение  $d\tilde{l}_T$  обусловлено приращением  $d\tau$ , область значений  $0 < \tilde{l}_T \leq l$ , длина световода  $l$ . Приращение  $d\tilde{l}_T$  является малой длиной участка (или суммарной длиной

участков) датчика с приращениями температур  $\Delta T \in (\tau, \tau + d\tau)$ , которое представим в виде

$$d\tilde{l}_T = l f_T(\tau) d\tau \quad (15)$$

на основе двойного равенства

$$dP = d\tilde{l}_T / l = f_T(\tau) d\tau \quad (16)$$

для геометрической вероятности  $dP$ , где искомая функция плотности распределения  $f_T(\tau)$  приращений температур  $\Delta T$  по всей длине  $l$  датчика имеет вид

$$\tilde{l}_T(\tau) = l \int_{-\infty}^{\tau} f_T(\tau') d\tau'. \quad (17)$$

Вид функции следует из (15), (16); нижний предел интегрирования в (17) может быть заменен на  $\tau_{\min}$  для случая, когда диагностируемые приращения температур  $\Delta T \in (\tau_{\min}; \tau_{\max})$ ; в предельных случаях имеем  $\tilde{l}_T(\tau_{\min}) = 0$ ,  $\tilde{l}_T(\tau_{\max}) = l$ .

В результате подстановки (15) в (13) получим уравнение Фредгольма 1-го рода

$$\frac{d\tilde{I}(v)}{dv} = l \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\partial^2 \tilde{I}_0(\Delta v, \bar{l}_T)}{\partial \Delta v \partial \bar{l}_T} \right)_{\bar{l}_T=0} f_T(\tau) d\tau \quad (18)$$

или

$$\frac{d\tilde{I}(v)}{dv} = l \int_{-\infty}^{\infty} \Omega(v - k_v \tau) f_T(\tau) d\tau, \quad (19)$$

где

$$\Omega(v) \equiv \left( \frac{\partial^2 \tilde{I}_0(v, \bar{l})}{\partial v \partial \bar{l}} \right)_{\bar{l}=0} \quad (20)$$

с учетом  $\Delta v \equiv v - k_v \Delta T$  (7) или в канонической форме

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} K(t-s) f(s) ds, \quad (21)$$

где

$$t \equiv v, \quad s \equiv k_v \tau, \quad f(s) \equiv f_T(\tau)_{\tau=s/k_v},$$

$$K(t-s) \equiv \frac{l}{k_v} \Omega(t-s), \quad g(t) \equiv \frac{d\tilde{I}(t)}{dt} \quad (22)$$

для нахождения искомой функции плотности распределения  $f_T(\tau)$  приращений температур  $\Delta T$  по длине световода через измеряемые значения производной  $d\tilde{I}/dv$  (19), (22) амплитуды интенсивности результирующего свечения  $\tilde{I}(v)$  (8), (9) на выходе из световода датчика с учетом  $\Delta v = t - s$  (7),  $d\tau = ds/k_v$ . Ядро Фредгольма (21) может быть выражено как

$$K(v) \equiv \frac{l}{k_v} \Omega(v) = \frac{k_l}{k_v} \frac{d\tilde{U}_0}{dv}, \quad (23)$$

с учетом (19), (20)

$$\Omega(v) \equiv \left( \frac{\partial^2 \tilde{I}_0(v, \bar{l})}{\partial v \partial \bar{l}} \right)_{\bar{l}=0} = \frac{1}{l} \frac{d\bar{I}}{d\bar{U}} \frac{d\tilde{U}_0}{dv} = \frac{k_l}{l} \frac{d\tilde{U}_0}{dv} \quad (24)$$

через известные (заданные) амплитудно-частотные характеристики для электрического напряжения  $\tilde{U} = \tilde{U}_0(v)$  на электролюминесцентном слое датчика и коэффициенты пропорциональности  $k_v$ ,  $k_l$  для вариаций резонансной частоты  $\Delta_T = k_v \Delta T$  и температуры  $\Delta T$  (3), интенсивности светоотдачи  $\bar{\Delta I} = k_l \Delta \bar{U}$  и электрического напряжения  $\Delta \bar{U}$  на электролюминесцентном слое (4) датчика в рассматриваемом рабочем температурном диапазоне.

### 3. Численный расчет

Пусть до возбуждения колебаний в датчике действует постоянное значение электрического напряжения на электродах  $U_0 = \bar{U}_0 / a_1$ , где  $\bar{U}_0 = 4,5$  В и управляющий передаточный коэффициент  $a_1 = 0,972$  [21, 22], что обуславливает интенсивность света на выходе из световода  $I_0 = \bar{I}_0 = 2,25$  Вт/м<sup>2</sup>, численное значение коэффициента  $k_l = 1,5$  А/м<sup>2</sup> в (1), (4); значения величин  $\bar{U}_0$ ,  $\bar{I}_0$  и  $k_l$  соответствуют координатам серединной точки и линейной аппроксимации восходящего участка S-образной функции свечения  $\bar{I} = \bar{I}(\bar{U})$  в [21, 22]. Пусть для рассматриваемой модели амплитудно-частотная характеристика электрического напряжения

$$\tilde{U}_0(v) = U_a \left( 1 + \cos \left( \frac{\pi}{\Delta} (v - v_0) \right) \right) \quad (25)$$

на электролюминесцентном элементе датчика для частотного диапазона  $v \in (v_1; v_2)$  гармонической составляющей  $U'_{\text{упр}}(v, t)$  управляющего электрического напряжения на электродах датчика (1), ядро Фредгольма (21) (рис. 2)

$$K(v) = \frac{k_l}{k_v} \frac{d\tilde{U}_0}{dv} = -A \frac{\pi}{\Delta} \sin \left( \frac{\pi}{\Delta} (v - v_0) \right) \quad (26)$$

с учетом (23), (25), где граничные частоты  $v_{1,2} = v_0 \mp \Delta$ , параметр  $\Delta = 0,1v_0$ , базовая резонансная частота  $v_0 = 200$  кГц, численные значения:  $A \equiv U_a \frac{k_l}{k_v} = 0,1875 \cdot 10^{-3}$  Вт·с·К/м<sup>2</sup>,  $U_a = 0,25$  В,  $k_v = 0,01v_0 = 2 \cdot 10^3$  (с·К)<sup>-1</sup>.

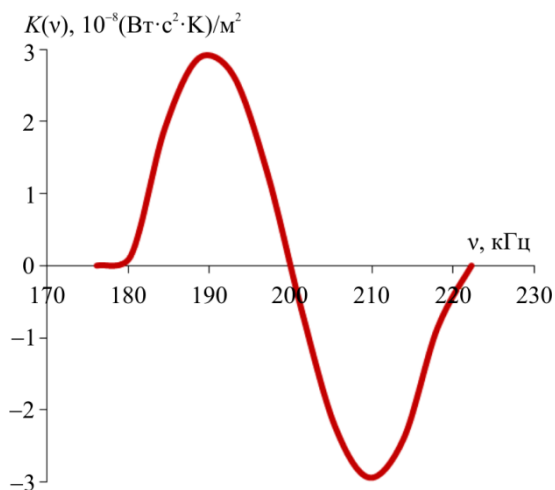


Рис. 2. Ядро Фредгольма  $K(v)$  в зависимости от аргумента  $v$   
 Fig. 2. Fredholm's kernel  $K(v)$  depending on the argument  $v$

На рис. 3 представлены результаты численного расчета зависимости амплитуды интенсивности результирующего свечения  $\tilde{I}(v)$  на выходе из световода датчика (рис. 3, а) и ее производной  $d\tilde{I}/dv$  (рис. 3, б) от частоты  $v$  управляющего напряжения в отсутствие приращений температур  $\Delta T = 0$  и для равномерного закона распределения  $\Delta T$  по длине датчика. Видно (см. рис. 3, а), что центральная резонансная частота для амплитуды интен-

сивности  $\tilde{I}(v)$  исходящего из световода света для случая симметричного относительно нуля равномерного закона ( $\circ$ ) распределения приращений температур  $\Delta T$  по длине датчика совпадает с резонансной частотой  $\nu_0$  для случая ( $\Delta T = 0$ ) начальной однородной температуры датчика  $T_0$  ( $\Leftarrow$ ); отрицательные приращения температур ( $\Delta T < 0$ ) смещают значение резонансной частоты влево ( $\square$ ), а положительные ( $\Delta T > 0$ ) – вправо относительно первоначального значения  $\nu_0$  по оси абсцисс.

Пусть «искомая» функция распределения приращений температур по длине датчика задана в виде (рис. 4, а)

$$\Delta T(z) = \kappa e^{-\alpha z/l} \sin kz, \quad k = \pi\beta / l, \quad (27)$$

где координата  $z \in (0; l)$ , для случая  $\beta = 1$  заданы значения  $\alpha = 3$  ( $\circ$ ),  $\alpha = 5$  ( $\Delta$ ),  $\alpha = 10$  ( $\square$ ), для случая  $\beta = 2$  – значение  $\alpha = 3$  ( $\Leftarrow$ ) при  $\kappa = 38$  К; графики функций плотностей  $f_T(\tau)$  для различных распределений (рис. 4, а) изображены на рис. 4, б. Обозначения графиков на рис. 4, б и, далее, на рис. 5 совпадают с соответствующими обозначениями графиков на рис. 4, а. На рис. 5 представлены результаты расчета зависимостей амплитуды  $\tilde{I}(v)$  (рис. 5, а) и производной  $d\tilde{I}/dv$  (рис. 5, б) от частоты  $v$  управляющего напряжения для заданных реальных распределений приращений температур  $\Delta T$  по длине датчика (см. рис. 4).

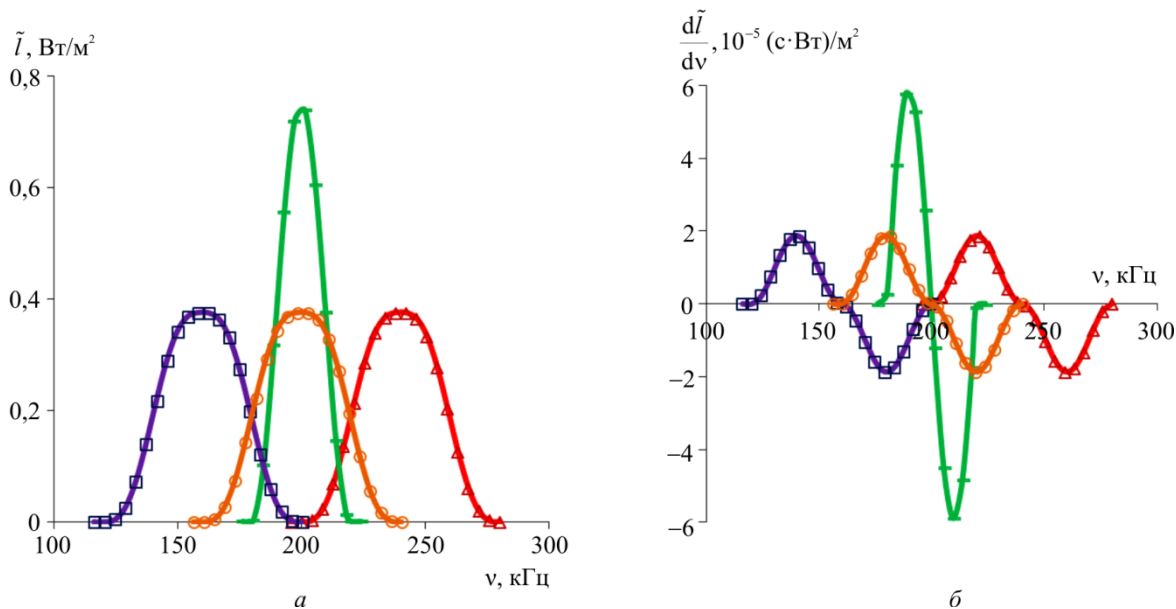


Рис. 3. Зависимости амплитуды интенсивности результирующего свечения  $\tilde{I}(v)$  на выходе из световода (а) и ее производной  $d\tilde{I}/dv$  (б) от частоты  $v$  управляющего напряжения для случая  $\Delta T = 0$  ( $\Leftarrow$ ) и для равномерного закона распределения  $\Delta T$  на интервале  $(-10;10)$  ( $\circ$ ),  $(10;30)$  ( $\Delta$ ),  $(-30;-10)$  ( $\square$ ) по длине датчика  
 Fig. 3. Dependences of the amplitude of resulting luminescence intensity  $\tilde{I}(v)$  at the output of the optical fiber (а) and its derivative  $d\tilde{I}/dv$  (б) on the frequency  $v$  of control voltage for case  $\Delta T = 0$  ( $\Leftarrow$ ) and for the uniform law of distribution  $\Delta T$  on the interval  $(-10;10)$  ( $\circ$ ),  $(10;30)$  ( $\Delta$ ),  $(-30;-10)$  ( $\square$ ) on sensor's length



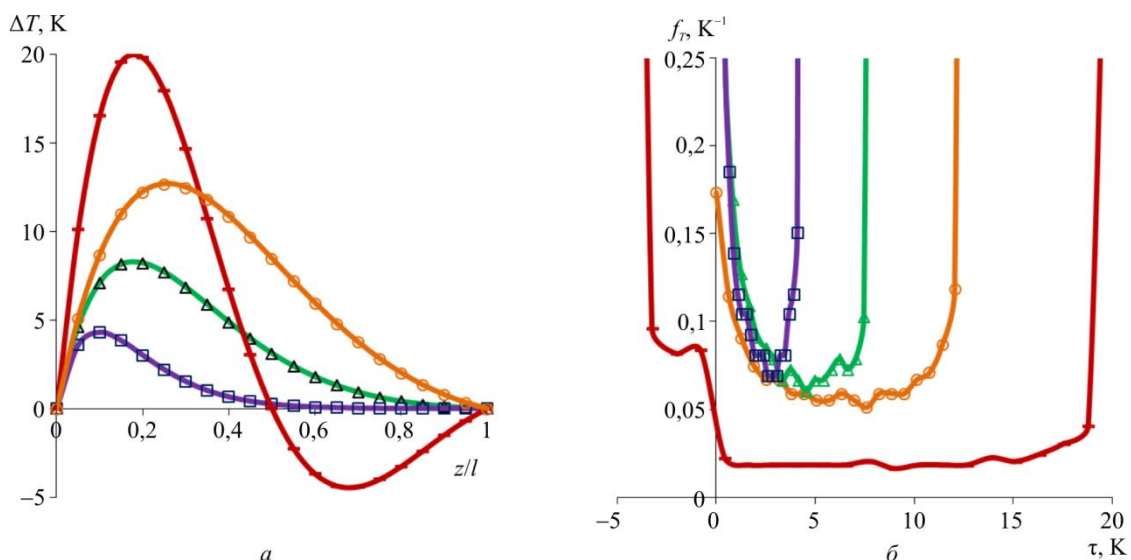


Рис. 4. Заданные распределения приращений температур  $\Delta T$  по длине датчика (а) с функциями плотности  $f_T(\tau)$  (б)  
 Fig. 4. Set distributions of increments of temperatures  $\Delta T$  along the sensor (a) with functions of density  $f_T(\tau)$  (b)

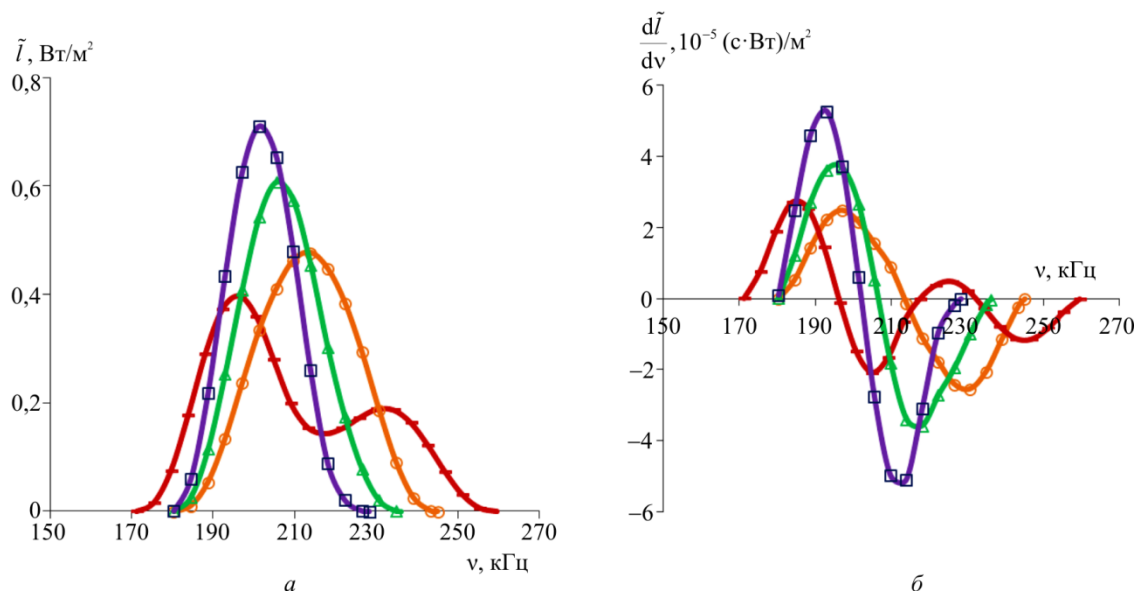


Рис. 5. Зависимости амплитуды  $\tilde{I}(\nu)$  (а) и ее производной  $d\tilde{I}/d\nu$  (б) от частоты  $\nu$  управляющего напряжения для заданных реальных распределений приращений температур  $\Delta T$  по длине датчика  
 Fig. 5. Dependences of amplitude  $\tilde{I}(\nu)$  (a) and its derivative  $d\tilde{I}/d\nu$  (b) on the frequency  $\nu$  of control voltage for the set real distributions of increments of temperatures  $\Delta T$  on sensor's length

### Заключение

Разработана математическая модель резонансного диагностирования неоднородного поля температур пьезоэлектродлюминесцентным оптоволоконным датчиком [20] с использованием считающейся известной амплитудно-частотной характеристики датчика и зависимости резонансной частоты от температуры. Считаем, что при изменении температуры график амплитудно-частотной характеристики датчика смещается по оси частоты на величину изменения резонансной частоты пропорционально изменению температуры; постоянная составляющая электрического напря-

жения на управляющих электродах датчика необходима для настройки датчика на рабочий режим в рассматриваемом диапазоне диагностируемых температур, гармоническая составляющая – для возбуждения вынужденных стационарных электроупругих осесимметричных колебаний датчика. В результате искомая функция плотности распределения температуры  $f_T(\tau)$  по длине датчика находится как решение интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода (18)–(22) по результатам измеряемых значений производной  $d\tilde{I}/d\nu$  амплитуды интенсивности свечения  $\tilde{I}$  на выходе из световода по частоте  $\nu$  электрического напряжения



на управляющих электродах датчика; ядро Фредгольма  $K(t-s)$  (21) рассчитывается (22) через известную амплитудно-частотную характеристику датчика и зависимость резонансной частоты от температуры (23), (24). Представлены результаты численного моделирования и изучены закономерности влияния на амплитуды интенсивности свечения  $\tilde{I}$  на выходе из световода различных модельных (см. рис. 3) и реальных (см. рис. 4, 5) законов распределения диагностируемых температур по длине датчика (25)–(27). Область применения датчика и рабочий диапазон диагностируемых температур, распределение которых может быть найдено из решения интегрального уравнения Фредгольма (18)–(22), определяются шириной реализуемого температурного диапазона с линейной зависимостью (3) резонансной частоты от температуры встроенного в датчик пьезо-

электрического слоя, в частности,  $-80^\circ\text{C} \dots +230^\circ\text{C}$  для случая использования в датчике пьезоэлектрика с сильной и линейной зависимостью резонансной частоты от температуры в этом диапазоне [46].

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-41-590726.

## Acknowledgments

The work has been carried out with the financial support of the Russian Foundational for Basic Research, Grant No. 16-41-590726.

## Библиографический список

1. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Guemes A., Fernandez-Lopez A., Soller B. Optical fiber distributed sensing – physical principles and applications // Structural Health Monitoring. – 2010. – Vol. 9. – No. 3. – P. 233–245.
3. Suresh R., Tjin S.C., Hao J. Fiber Bragg Grating / Smart Materials in Structural Health Monitoring, Control and Biomechanics. – Springer Berlin Heidelberg, 2012. – P. 413–439.
4. Prabhugoud M., Peters K. Efficient simulation of Bragg grating sensors for implementation to damage identification in composites // Smart Materials & Structures. – 2003. – Vol. 12. – No. 6. – P. 914–924.
5. Варжель С.В. Волоконные брэгговские решетки. – СПб.: Изд-во ун-та ИТМО, 2015. – 65 с.
6. Kashyap R. Fiber Bragg gratings. – San Diego: Academic Press, 1999. – 458 p.
7. Yu F.T.S.Y., Yin S. Fiber optic sensors. – New York: Marcel Dekker, Inc, 2002. – 495 p.
8. Козлов В. Л. Оптоэлектронные датчики. – Минск: Изд-во Белорус. гос. ун-та, 2005. – 116 с.
9. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. – М.: Физматлит, 2001. – 272 с.
10. Ларионов В. А. Резистивный датчик температуры с метрологическим самоконтролем // Датчики и системы. – 2015. – № 9-10. – С. 76–78.
11. Линеверг Ф. Измерение температур в технике: справ. пер. с нем. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
12. Ионов Б.П., Ионов А.Б. Спектрально-статистический подход к бесконтактному измерению температуры // Датчики и системы. – 2009. – № 2. – С. 9–11.
13. Казарян А. А. Тонкопленочный датчик давления и температуры // Датчики и системы. – 2016. – № 3. – С. 50–56.
14. Дмитриев С.А., Слепов Н.Н. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы: сб. статей. – 3-е изд. – М.: Техносфера, 2010. – 608 с.
15. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / под ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
16. Макарецкий Е.А. Оптико-электронные измерительные системы. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – 100 с.
17. Кульчин Ю.Н., Каменев О.Т., Петров Ю.С. Физические принципы создания распределенных измерительных сетей на основе одноволоконного двухмодового интерферометра // Вестн. ДВО РАН. – 2004. – № 5. – С. 39–45.
18. Закасовская Е.В., Кульчин Ю.Н. Неравномерные схемы укладки измерительных линий в распределенных волоконно-оптических системах // Измерительная техника. – 2009. – № 3(21). – С. 61–71.
19. Цуканов В.Н., Яковлев М.Я. Волоконно-оптическая техника: практ. рук. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 304 с.
20. Пат. RU № 2630537. Волоконно-оптический датчик давления / Паньков А.А., опубл. 11.09.2017 г.; заявка № 2016136058 от 06.09.2016 г.
21. Паньков А.А. Математическое моделирование пьезоэлектрорлюминесцентного эффекта и диагностика распределения давления по длине оптоволоконного датчика // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 4. – С. 259–272.
22. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent optical fiber sensor for diagnostics of the stress state and defectoscopy of composites // Mechanics of Composite Materials. – 2017. – Vol. 53. – No. 2. – P. 229–242.
23. Пат. RU № 2643692. Волоконно-оптический датчик объемного напряженного состояния / Паньков А.А., опубл. 05.02.2018 г.; заявка № 2017111405 от 04.04.2017 г.
24. Попов С.М., Фотиади А.А., Чаморовский Ю.К. Волоконные лазеры с резонатором из оптического волокна с непрерывной брэгговской решеткой // Спецвыпуск “Фотон-экспресс”-аука: тез. докл. всерос. конф. по волоконной оптике. – г. Пермь, 7–9 окт. 2015 г. – Пермь, 2015. – № 6(126). – С. 57–58.
25. OFTD-рефлектометрия оптических волокон с распределенным отражателем брэгговского типа / С.М. Попов, О.В. Бутов, В.В. Волошин, И.Л. Воробьев, М.Ю. Вяткин, А.О. Колосовский, Ю.К. Чаморовский // Оптическая рефлектометрия – 2016: материалы I Всерос. науч.-практ. конф. 26–27 мая 2016 г. – Пермь, 2016. – С. 36–38.
26. Распределенный сенсор на многомодовых оптических волокнах, дополненных волоконной решеткой Брэгга, функционирующих в маломодовом режиме передачи сигнала / А.В. Бурдин, А.А. Василец, В.А. Бурдин, О.Г. Морозов // Оптическая рефлектометрия – 2016: материалы I Всерос. науч.-практ. конф. 26–27 мая 2016 г. – Пермь, 2016. – С. 25–26.
27. Измерение величины и положения точечных температурных воздействий на длинные ВБР / С.С. Якушин, А.В. Достовалов, А.А. Вольф, А.В. Парыгин, С.А. Бабин // Оптическая рефлектометрия – 2016: материалы I Всерос. науч.-практ. конф. 26–27 мая 2016 г. – Пермь, 2016. – С. 39–40.

28. Измерение деформации и температуры датчиками на основе брегговских решеток / В.В. Григорьев, В.А. Лазарев, А.К. Митпорев [и др.] // Датчики и системы. – 2009. – № 1. – С. 15–18.

29. Сенсорная система на основе волоконно-оптических брегговских решеток / С.А. Бабин, А.А. Власов, С.И. Каблук, И.С. Шелемба // Вестн. НГУ. Сер.: Физика. – 2007. – Т. 2. – № 3. – С. 54–57.

30. Кульчин Ю.Н., Ноткин Б.С., Седов В.А. Нейроитерационный алгоритм томографической реконструкции распределенных физических полей в волоконно-оптических измерительных системах // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 4. – С. 446–455.

31. Терещенко С.А. Методы вычислительной томографии. – М.: Физматлит, 2004. – 320 с.

32. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии: пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 280 с.

33. Буймистряк Г.Я. О современных физических пределах мультиплексирования внутрисветоводных массивов волоконно-оптических датчиков // Датчики и системы. – 2015. – № 4. – С. 36–39.

34. Карякин А.В., Боровиков А.С. Люминесцентная и цветная дефектоскопия. – М.: Машиностроение, 1972. – 240 с.

35. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Люминесценция и ее измерения. Молекулярная люминесценция. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 272 с.

36. Гришаева Т.И. Методы люминесцентного анализа; АНО НПО «Профессионал». – СПб., 2003. – 226 с.

37. Каризкая С.Г. Диагностика полей температур и скоростей люминесцентными методами: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 103 с.

38. Макарова Н.Ю. Моделирование выходного сигнала механолюминесцентного датчика динамического давления // Наука и образование: науч. изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 6. – С. 187–200.

## References

1. Okosi T. Volokonno-opticheskie datchiki [Fiber-optical sensors]. *Leningrad, Energoatomizdat*, 1990, 256 p.

2. Guemes A., Fernandez-Lopez A., Soller B. Optical fiber distributed sensing – physical principles and applications. *Structural Health Monitoring*, 2010, vol. 9, no. 3, pp. 233-245.

3. Suresh R., Tjin S.C., Hao J. Fiber Bragg Grating. In Book «Smart Materials in Structural Health Monitoring, Control and Biomechanics». *Springer Berlin Heidelberg*, 2012, pp. 413-439.

4. Prabhugoud M., Peters K. Efficient simulation of Bragg grating sensors for implementation to damage identification in composites. *Smart Materials & Structures*, 2003, vol. 12, no. 6, pp. 914-924.

5. Varzhel' S.V. Volokonnye br'eggovskie reshetki [Fiber Bragg grating]. *Saint Petersburg, Universitet ITMO*, 2015, 65 p.

6. Kashyap R. Fiber Bragg gratings. *San Diego, Academic Press*, 1999, 458 p.

7. Yu F.T.S.Y., Yin S. Fiber optic sensors, *New York: Marcel Dekker, Inc*, 2002, 495 p.

8. Kozlov V. L. Opto`elektronnye datchiki [Optoelectronic sensors]. *Belgosuniversitet*, 2005, 116 p.

9. Kul'chin Ju.N. Raspredeleнные volokonno-opticheskie izmeritel'nye sistemy [Distributed fiber-optical measuring systems]. *Moscow, Fizmatlit*, 2001, 272 p.

10. Larionov V. A. Rezistivnyj datchik temperatury s metrologicheskim samokontrolem [Resistive sensor of temperature with metrological self-checking]. *Datchiki i sistemy*, 2015, no. 9-10, pp. 76-78.

39. Татмышевский К.В. Научные основы расчета и проектирования механолюминесцентных чувствительных элементов датчиков импульсного давления: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2010. – 33 с.

40. Real-time mechanoluminescence sensing of the amplitude and duration of impact stress / B.P. Chandra, V.K. Chandra, S.K. Mahobia, P. Jha, R. Tiwari, B. Halder // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2012. – Vol. 173. – P. 9–16.

41. Detecting mechanoluminescence from ZnS:Mn powder using a high speed camera / L. Kobakhidze, C.J. Guidry, W.A. Hollerman, R.S. Fontenot // *IEEE Sensor Journal*. – 2013. – Vol. 13. – No. 8. – P. 3053–3059.

42. Chandra B.P., Chandra V.K. Dynamics of the mechanoluminescence induced by elastic deformation of persistent luminescent crystals // *Journal of Luminescent*. – 2012. – Vol. 132. – No. 3. – P. 858–869.

43. Банишев А.Ф., Банишев А.А., Лотин А.А. Исследование люминесценции и механолюминесценции мелкодисперсного порошка SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:(Eu<sup>2+</sup>, Dy<sup>3+</sup>) в матрице полимера // Физика и химия обработки материалов. – 2012. – № 5. – С. 89–92.

44. Писаревский А.И., Татмышевский К.В., Голубев А.М. Сравнение особенностей механолюминесценции в кристаллах ZnS и (BaSr)Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub> [Электронный ресурс] // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана: электрон. журн. – 2012. – № 1. – URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/297102.html>.

45. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В.Б. Гармаш, Ф.А. Егоров, Л.Н. Коломиец, А.П. Неугодинов, В.И. Поспелов // Спецвыпуск «ФОТОН-ЭКСПРЕСС» – НАУКА. – 2005. – № 6. – С. 128–140.

46. Справочник по кварцевым резонаторам / В.Г. Андросова, В.Н. Банков, А.Н. Дикиджи и др. / под ред. П.Г. Позднякова. – М.: Связь, 1978. – 288 с.

11. Lineveg F. Izmerenie temperatur v tehnike: Spravochnik [Measurement of temperatures in the equipment: Reference book]. *Moscow, Izdatel'stvo «Metallurgija»*, 1980, 320 p.

12. Ionov B. P., Ionov A. B. Spektral'no-statisticheskij podhod k beskontaktnomu izmereniju temperatury [Spectral statistical approach to contactless measurement of temperature]. *Datchiki i sistemy*, 2009, no. 2, pp. 9-11.

13. Kazarjan A. A. Tonkopenochnyj datchik davlenija i temperatury [Thin-film sensor of pressure and temperature]. *Datchiki i sistemy*, 2016, no. 3, pp. 50-56.

14. Volokonno-opticheskaja tehnika: sovremennoe sostojanie i novye perspektivy [Fiber-optical equipment: current state and new prospects]. *Moscow Tehnosfera*, 2010, 608 p.

15. Volokonno-opticheskie datchiki. Vvodnyj kurs dlja inzhenerov i nauchnyh rabotnikov [Fiber-optical sensors. An introduction course for engineers and scientists]. *Moscow, Tehnosfera*, 2008, 520 p.

16. Makaretskij E.A. Optiko`elektronnye izmeritel'nye sistemy [Optical-electronic measuring systems]. *Tula: Izd-vo TulGU*, 2010, 100 p.

17. Kul'chin Ju.N., Kamenev O.T., Petrov Ju.S. Fizicheskie printsipy sozdaniya raspredeleennyh izmeritel'nyh setej na osnove odnovolokonnogo dvuhmodovogo interferometra [Physical principles of creation of the distributed measuring networks on a basis of one-fiber two-modes interferometer] // *Vestnik DVO RAN*, 2004, no. 5, pp. 39-45.

18. Zakasovskaja E.V., Kul'chin Ju.N. Neravnomernye shemy ukladki izmeritel'nyh linij v raspredeleennyh volokonno-opticheskikh sistemah [Nonuniform schemes of laying of measuring

lines in the distributed fiber-optical systems]. *Izmeritel'naja tehnika*, 2009, no. 3(21), pp. 61-71.

19. Tsukanov V.N., Jakovlev M.Ja. Volokonno-opticheskaja tehnika. Prakticheskoe rukovodstvo [Fiber-optical equipment. Practical instruction]. *Moscow, Infra-Inzhenerija*, 2014, 304 p.

20. Patent RU № 2630537. Volokonno-opticheskij datchik davlenija [Fiber-optical sensor of pressure] / Pan'kov A.A., opubl. 11.09.2017 g.; zajavka № 2016136058 ot 06.09.2016 g.

21. Pan'kov A.A. Mathematical modeling of piezo-electroluminescent effect and diagnostics of distribution of pressure longwise fiber optic sensor. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No. 4. Pp. 289-302. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.4.17

22. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent optical fiber sensor for diagnostics of the stress state and defectoscopy of composites. *Mechanics of Composite Materials*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 229-242.

23. Patent RU № 2643692. Volokonno-opticheskij datchik ob'emnogo naprjazhennogo sostojanija [Fiber-optical sensor of volume stress state] / Pan'kov A.A., opubl. 05.02.2018 g.; zajavka № 2017111405 ot 04.04.2017 g.

24. Popov S.M., Fotiadi A.A., Chamorovskij Ju.K. Volokonnye lazery s rezonatorom iz opticheskogo volokna s nepreryvnoj br'eggovskoj reshetkoj [Fiber lasers with the resonator from optical fiber with a continuous Bragg grating]. *Perm', Spetsvypusk "Foton-ekspress" nauka: Tezisy dokladov Vserossijskoj konferentsii po volokonnoj optike*, 2015, no. 6(126), pp. 57-58.

25. Popov S.M., Butov O.V., Voloshin V.V., Vorob'ev I.L., Vjatkin M.Ju., Kolosovskij A.O., Chamorovskij Ju.K. OFTD reflektometrija opticheskikh volokon s raspredelennym otrazhatelem br'eggovskogo tipa [OTFD a scatterometry of optical fibers with the distributed reflector of Bragg's type]. *Perm', I Vserossijskaja nauchno-prakticheskaja konferentsija «Opticheskaja reflektometrija – 2016» 26-27 maja 2016 g, Sbornik tezisev dokladov*, 2016, pp. 36-38.

26. Burdin A.V., Vasilets A.A., Burdin V.A., Morozov O.G. Raspredelennyj sensor na mnogomodovykh opticheskikh voloknah, dopolnennykh volokonnoj reshetkoj Br'egga, funkcionirujuschih v malomodovom rezhime peredachi signala [The distributed sensor on the multimode optical fibers complemented with a fiber Bragg grating, which are functioning in the low mode of signal transmission]. *Perm', I Vserossijskaja nauchno-prakticheskaja konferentsija «Opticheskaja reflektometrija – 2016» 26-27 maja 2016 g, Sbornik tezisev dokladov*, 2016, pp. 25-26.

27. Jakushin S.S., Dostovalov A.V., Vol'f A.A., Parygin A.V., Babin S.A. Izmerenie velichiny i polozhenija tochechnykh temperaturnykh vozdeystvij na dlinnye VBR [Measurement of size and provision of pointed temperature impacts on long Bragg grating]. *Perm', I Vserossijskaja nauchno-prakticheskaja konferentsija «Opticheskaja reflektometrija – 2016» 26-27 maja 2016 g, Sbornik tezisev dokladov*, 2016, pp. 39-40.

28. Grigor'ev V. V., Lazarev V. A., Mitjurev A. K. i dr. Izmerenie deformatsii i temperatury datchikami na osnove breggovskih reshetok [Measurement of deformation and temperature sensors on a basis the Bragg grating]. *Datchiki i sistemy*, 2009, no. 1, pp.15-18.

29. Babin C. A., Vlasov A. A., Kablukov S. I., Shelemba I.S. Sensornaja sistema na osnove volokonno-opticheskikh br'eggovskih reshetok [Sensitive system on the basis of fiber-optical the Bragg grating]. *Vestnik NGU. Serija: Fizika*, 2007, vol. 2, no. 3, pp.54-57.

30. Kul'chin Ju.N., Notkin B.S., Sedov V.A. Nejro-iteratsionnyj algoritm tomograficheskoy rekonstruktsii raspredelennykh fizicheskikh polej v volokonno-opticheskikh izmeritel'nykh sistemah [Neuro and iterative algorithm of tomographic reconstruction of the distributed physical fields in fiber-optical measuring systems]. *Komp'yuternaja optika*, 2009, vol. 33, no. 4, pp. 446-455.

31. Tereschenko S.A. Metody vychislitel'noj tomografii [Methods of a computing tomography]. *Moscow, Fizmatlit*, 2004, 320 p.

32. Natterer F. Matematicheskie aspekty komp'yuternoj tomografii [Mathematical aspects of a computer tomography] *Moscow, Mir*, 1990, 280 p.

33. Bujmistrjuk G.Ja. O sovremennykh fizicheskikh predelah mul'tipleksirovanija vnutrisvetovodnykh massivov volokonno-opticheskikh datchikov [About modern physical limits of multiplexing of intra light-guide massifs of fiber-optical sensors]. *Datchiki i sistemy*, 2015, no. 4, pp. 36-39.

34. Karjakin A.V., Borovikov A.S. Ljuminestsentnaja i tsvetnaja defektoskopija [Luminescent and color defectoscopy]. *Moscow, Mashinostroenie*, 1972, 240 p.

35. Levshin L.V., Saletskij A.M. Ljuminestsentsija i ee izmerenija. Molekuljarnaja ljuminestsentsija [Luminescence and its measurements. Molecular luminescence]. *Moscow Izd. MGU*, 1989, 272 p.

36. Grishaeva T.I. Metody ljuminestsentnogo analiza [Methods of the luminescent analysis]. *Saint Petersburg, ANO NPO «Professional»*, 2003, 226 p.

37. Karitskaja S.G. Diagnostika polej temperatur i skorostej ljuminestsentnymi metodami [Diagnostics of fields of temperatures and speeds by luminescent methods]: Diss. na soiskanie uchenoj stepeni k.f.m.n. / S.G. Karitskaja. *Izd. MGU*, 1997, 103 p.

38. Makarova N.Ju. Modelirovanie vyhodnogo signala mehanoljuminestsentnogo datchika dinamicheskogo davlenija [Modeling of an output signal of the mechanoluminescent sensor of dynamic pressure]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. E. Baumana*, 2015, no. 6, pp. 187-200.

39. Tatmyshevskij K.V. Nauchnye osnovy rascheta i proektirovanija mehanoljuminestsentnykh chuvstvitel'nykh elementov datchikov impul'snogo davlenija [Scientific bases of calculation and design of mechanoluminescent sensitive elements of sensors of pulse pressure]: avtoref. dis. ... dok. tehn. nauk. *Moscow*, 2010, 33 p.

40. Chandra B.P., Chandra V.K., Mahobia S.K., Jha P., Tiwari R., Haldar B. Real-time mechanoluminescence sensing of the amplitude and duration of impact stress. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, vol. 173, pp. 9-16.

41. Kobakhidze L., Guidry C.J., Hollerman W.A., Fontenot R.S. Detecting mechanoluminescence from ZnS:Mn powder using a high speed camera. *IEEE Sensor Journal*, 2013, vol. 13, no. 8, pp. 3053-3059.

42. Chandra B.P., Chandra V.K. Dynamics of the mechanoluminescence induced by elastic deformation of persistent luminescent crystals. *Journal of Luminescent*, 2012, vol. 132, no. 3, pp. 858-869.

43. Banishev A.F., Banishev A.A., Lotin A.A. Issledovanie ljuminestsentsii i mehanoljuminestsentsii melkodispersnogo poroshka SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:(Eu<sub>2+</sub>, Dy<sub>3+</sub>) v matritse polimera [Research of a luminescence and mechanoluminescence of the fine powder SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:(Eu<sub>2+</sub>, Dy<sub>3+</sub>) in a polymer matrix]. *Fizika i himija obrabotki materialov*, 2012, no. 5, pp. 89-92.

44. Pisarevskij A.I., Tatmyshevskij K.V., Golubev A.M. Sravnenie osobennostej mehanoljuminestsentsii v kristallah ZnS i (BaSr)Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub> [Comparison of features of a mechanoluminescence in crystals of ZnS and (BaSr) of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N. E. Baumana. Elektron. zhurn.*, 2012, no. 1; <http://technomag.bmstu.ru/doc/297102.html>.

45. Garmash V.B., Egorov F.A., Kolomiets L.N., Neugodnikov A.P., Pospelov V.I. Vozmozhnosti, zadachi i perspektivy volokonno-opticheskikh izmeritel'nykh sistem v sovremennom priborostroenii [Opportunities, problems and prospects of fiber-optical measuring systems in modern instrument making]. *Spetsvypusk «FOTON-EKSPRESS» – NAUKA*, 2005, no. 6, pp. 128-140.

46. Spravochnik po kvartsevym rezonatoram [Reference book on quartz resonators]. *Moscow, Svjaz'*, 1978, 288 p.