

Паньков А.А. Диагностирование дефектов пропитки армирующих нитей полимерного композита встроенным оптоволоконным датчиком с распределенной брэгговской решеткой // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 3. С. 60-72. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.3.07

Pan'kov A.A. Diagnostics of impregnation defects of reinforcing filaments of polymer composite with built-in fibre-optic sensor with distributed Bragg grating. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2020, no. 3, pp. 60-72. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.3.07



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2020

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2020.3.07

УДК 539.3; 531.787.5

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРОПИТКИ АРМИРУЮЩИХ НИТЕЙ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА ВСТРОЕННЫМ ОПТОВОЛОКОННЫМ ДАТЧИКОМ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКОЙ

А.А. Паньков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 09 июня 2020 г.  
Принята: 31 августа 2020 г.  
Опубликована: 09 ноября 2020 г.

#### Ключевые слова:

оптоволокно, брэгговская решетка, распределенный датчик, диагностика деформаций, дефектоскопия, численное моделирование.

### АННОТАЦИЯ

Разработана математическая модель однонаправленного волокнистого полимерного композиционного материала со встроенным в армирующее волокно (нить из элементарных волокон) оптоволоконным датчиком с распределенной брэгговской решеткой с целью диагностирования дефектов пропитки нити – нахождения вероятности дефекта пропитки как относительной длины локальных участков нити без пропитки, т.е. без заполнения связующим пространства между ее элементарными волокнами. Использована методика цифровой обработки спектра отражения по решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода с целью нахождения искомой информативной функции плотности распределения осевых деформаций по длине чувствительного участка оптоволоконного датчика. Подход предполагает, что оптоволоконный датчик внедрен в композиционный материал на этапе его изготовления, при этом слабоотражательный характер чувствительного участка оптоволоконка позволяет осуществить линейное суммирование коэффициентов отражения от его различных локальных участков вне зависимости от их взаимных расположений. Разработан алгоритм численной обработки функции плотности распределения деформаций для нахождения искомой вероятности наличия дефектов пропитки по длине нити. Выявлено, что функция плотности распределения имеет ярко выраженные информативные импульсы, по расположению и величине которых могут быть найдены искомые значения вероятности наличия дефектов пропитки по длине нити. Представлены результаты диагностирования различных значений искомой вероятности наличия дефекта пропитки нити по результатам численного моделирования измеряемых спектров отражения и искомой функции плотности распределения деформаций по длине чувствительного участка оптоволоконного датчика при различных значениях объемной доли нитей, сочетаниях поперечной и продольной нагрузок представительной области однонаправленного волокнистого композиционного материала в сравнении с графиками для случая без нагрузки.

© ПНИПУ

© Паньков Андрей Анатольевич – д.ф.-м.н., проф., e-mail: [a\\_a\\_pankov@mail.ru](mailto:a_a_pankov@mail.ru), [iD: 0000-0001-8477-5206](https://orcid.org/0000-0001-8477-5206)

Andrey A. Pan'kov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: [a\\_a\\_pankov@mail.ru](mailto:a_a_pankov@mail.ru),

[iD: 0000-0001-8477-5206](https://orcid.org/0000-0001-8477-5206)



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)



# DIAGNOSTICS OF IMPREGNATION DEFECTS OF REINFORCING FILAMENTS OF POLYMER COMPOSITE WITH BUILT-IN FIBRE-OPTIC SENSOR WITH DISTRIBUTED BRAGG GRATING

A.A. Pan'kov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## ARTICLE INFO

Received: 09 June 2020  
Accepted: 31 August 2020  
Published: 09 November 2020

### Keywords:

optical fiber, Bragg grating, distributed sensor, strain diagnostics, flaw detection, numerical simulation.

## ABSTRACT

Mathematical model of unidirectional fibrous polymer composite material with optical fiber sensor built into reinforcing fiber (filament of elementary fibers) with distributed Bragg grating is developed in order to diagnose defects of filament impregnation – finding probability of impregnation defect as relative length of local sections of filament without impregnation, i.e. without filling binder of space between its elementary fibers. The technique of digital processing of reflection spectrum according to the solution of the integral Fredholm equation of the 1st kind is used in order to find the desired informative function of density of distribution of axial strains along the length of the sensitive section of the fibre-optic sensor. The approach assumes that the optical fiber sensor is embedded in the composite material at the stage of its manufacture, wherein the low-reflective nature of the sensitive portion of the optical fiber allows linear summation of reflection coefficients from its various local portions regardless of their mutual positions. Algorithm of numerical processing of strain distribution density function is developed for finding of sought probability of presence of impregnation defects along filament length. It has been revealed that the distribution density function has pronounced informative pulses, from the location and value of which the sought-after values of probability of presence of impregnation defects along the length of the filament can be found. The results of diagnostics of different values of the sought probability of the filament impregnation defect are presented based on the results of numerical simulation of the measured reflection spectra and the sought function of strain distribution density along the length of the sensitive section of the optical fiber sensor at different values of the volume fraction of the filaments, combinations of transverse and longitudinal loads of the representative domain of the unidirectional fibrous composite material in comparison with graphs for the case without load.

© PNRPU

## Введение

Сложность многоуровневых иерархических структур современных полимерных композиционных «материал-конструкций» и многообразие технологий их изготовления, различные виды используемых при этом препрегов и методов их формования обуславливают многообразие и сложность диагностирования возникающих внутри конструкций дефектов в виде расслоений, непроклеев, локальной пористости, трещин и зон неполного отверждения связующего, подмятий, искривлений, разрывов и дефектов пропитки армирующих волокон при формовании [1–4]. Обзор основных технологий формования изделий авиационного назначения из полимерных композиционных материалов дан в [5, 6], одна из них – «RTM-технология» [7] формования пропиткой под давлением – основана на инъекции связующего (смолы) под давлением в закрытую полость формы с заготовкой из «сухого» армирующего волокна (нитей), при этом смола растекается по всему объему полости формы, вытесняя находящийся там воздух, и пропитывает волокна, заполняя внутриволоконное пространство между элементарными волокнами. При этом существенное значение имеют величины коэффициентов вязкости связующего и проницаемости армирующего волокна, что влияет на скорость технологического про-

цесса, качество пропитки и значение давления, необходимое для получения качественных полимерных композиционных конструкций. Также необходимо учитывать, что связующее может начать отверждение, не успев равномерно распределиться по армирующим волокнам. Вязкость связующего можно варьировать в широком диапазоне через изменения количества вводимого растворителя и/или температуры. В [8] проведены исследования влияния объемной доли дисперсных микросфер на реологические свойства композитного связующего в виде сферопластика с регулируемой вязкостью для заполнения участков многослойных сотовых конструкций на основе эпоксидного олигомера.

Структура имеет определяющее значение при формировании физико-механических, термоупругих, прочностных, усталостных свойств композиционных материалов, и, как следствие, технологические и эксплуатационные дефекты структуры приводят к снижению прочности, надежности, ресурса конструкций. Выявление дефектов структуры особенно актуально для современных высоконагруженных полимерных композиционных конструкций авиационного назначения. Для достижения высоких и стабильных значений характеристик полимерных композиционных материалов и конструкций особое внимание уделяется выявлению, локации, идентификации и уточненному диагностированию раз-

нообразных технологических дефектов, в частности пор, существенным образом влияющих (даже при их малой объемной доле) на стабильность свойств материалов. По месту расположения пор внутри композиционного материала различают поры в связующем, на межфазных границах связующее/армирующие элементы и внутри армирующей нити между элементарными волокнами. Поры в связующем появляются в результате попадания пузырьков воздуха в смолу при ее перемешивании с различными ингредиентами связующего: инициаторами, замедлителями, красителями – и зависит от вязкости и скорости полимеризации связующего. Появление пор внутри армирующей нити обуславливается этими же причинами и, дополнительно, трудностью проникновения связующего в занятое воздухом пространство между элементарными волокнами, наличием или отсутствием соответствующего аппретирующего состава на поверхностях элементарных волокон, оптимального для данного связующего. Поры в композиционном материале появляются также в результате использования армирующего материала повышенной влажности, когда при отверждении в процессе термохимических реакций излишняя влага в армирующем материале испаряется и пары воды, попадая в смолу, образуют в материале пустоты [9, 10]. В обзоре [11] рассмотрены основные современные способы определения объемной доли пор в изделиях из полимерных композиционных материалов с использованием ультразвуковых методов неразрушающего контроля через измерение коэффициента затухания, скорости продольных ультразвуковых волн, по энергии шумов обратного рассеяния и по прошедшему сигналу в зеркально-теневом режиме. Применение компьютерной томографии при контроле полимерных композиционных конструкций позволяет с высокой точностью и достоверностью определить большинство внутренних дефектов, например микропористости. Совмещение компьютерной томографии и ультразвукового сканирования на некоторых образцах дает расширенную картину наличия дефектов. Методика выявления технологических дефектов и микроповреждений структуры полимерного композиционного материала с использованием рентгенографического подхода даны в [12], где также приведены результаты численного моделирования механического поведения композитной конструкции с дефектом.

Актуальность решения проблемы непрерывного мониторинга состояния ответственных высоконагруженных полимерных композиционных конструкций обусловила появление и развитие встроенных систем неразрушающего контроля. «Интеллектуальные» композиционные материалы и конструкции имеют встроенные функциональные компоненты систем управления и адаптации – сенсоры, определяющие и реагирующие на изменения состояния (характеристик) конструкции под воздействием внешних факторов, и исполнительные (актуаторные) элементы для изменения состояния системы в нужном направлении, которые образуют систе-

му управления с обратной связью и интегрируются в основную конструкцию [13], где рассмотрены концепции создания интеллектуальных полимерных композиционных материалов с оптоволоконными системами встроенного контроля напряженно-деформированного состояния конструкций. «Информкомполиты» со встроенной системой неразрушающего самоконтроля посредством функциональных сенсорных элементов для регистрации и контроля параметров своего состояния рассмотрены в [14] и являются основой перехода авиационной техники на качественно новый уровень безопасности и надежности ее эксплуатации. Перспективными объектами для использования интеллектуальных материалов являются лопасти несущего винта вертолета для контроля деформированного состояния несущих элементов и управления формой аэродинамической поверхности винта, шумопоглощающие панели для корпуса авиационного двигателя [15–17] и внутренней обшивки салона пассажирского авиалайнера со встроенными в материал исполнительными пьезоэлектрическими элементами и оптоволоконными датчиками с решеткой Брэгга [13]. Оптоволоконные датчики с брэгговскими решетками используют для контроля скорости течения фронта связующего при формировании полимерной композиционной конструкции инфузионными методами и для последующего мониторинга этими же датчиками напряженно-деформированного состояния изготовленной конструкции в процессе эксплуатации. Высокотемпературные оптоволоконные брэгговские решетки используют в оптоволоконных сенсорных системах, интегрированных в керамические композиционные материалы аэрокосмического назначения. Интеллектуальные сенсорные системы могут быть встроены в материал для управления процессом «самозалечивания» повреждений материала через контролируемое раскрытие распределенных в нем капсул с лечащими агентами [18]. В [19] исследованы направления развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем и способы обработки информации от них.

Актуальность и подходы к использованию оптоволоконных датчиков в качестве составной части систем мониторинга состояния авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов рассмотрены в [20]. Результаты локации зоны внешнего ударного воздействия и индикации возникающих повреждений (расслоений) в углепластиках посредством встроенной волоконно-оптической системы, подтверждающиеся результатами ультразвукового неразрушающего контроля, даны в [21, 22]. В [23, 24] рассмотрены классификация различных дефектов, методы их обнаружения, локации и особенности формы информативных откликов оптоволоконных датчиков, встроенных в полимерные композиционные материалы при сканировании волнами Лэмба. Распределенные оптоволоконные датчики встроенных систем контроля основаны на регистрации вынужденного комбинированного рассеяния:

на основе рассеяния Рэлея, оптоволоконная рефлектометрия на основе рассеяния Римана, оптоволоконная рефлектометрия на основе рассеяния Бриллюэна и на использовании протяженных слабоотражающих брэгговских решеток. Использование «чирпированных» брэгговских решеток с линейно изменяющимся периодом и, как следствие, трапециевидным спектром отражения для диагностики неоднородностей и повреждений материала рассмотрено в [25]. Экспериментальные исследования по мониторингу состояния конструкции через измерение информационных откликов от встроенных оптоволоконных брэгговских решеток, вызванных внешними ультразвуковыми воздействиями, даны в [26]. Отметим другие обзорные работы [27–30] по интегрированию оптоволоконных брэгговских решеток в структуру полимерного композиционного материала. Для совместного контроля температуры и напряжений в [31] использованы специально подобранные различные покрытия на чувствительных участках оптоволоконна с брэгговскими решетками для разделения упругой и температурной составляющих, измеряемых датчиком «полных» термоупругих продольных деформаций. Результаты математического моделирования и экспериментальных исследований функционирования встроенных в полимерные композиционные материалы оптоволоконных брэгговских решеток для решения различных задач, в частности, диагностирования градиентного поля деформаций в пластине из стеклопластика даны в [32], влияния размеров и упругих свойств оптоволоконна и клеевой прослойки на передаточную функцию (показания) закрепленного на поверхности пластины датчика – в [33], обнаружения и идентификации различных типов повреждений в сегменте композитного шпангоута авиационного двигателя – в [34]. Современные технологии производства оптоволокон позволяют варьировать их свойства в широких пределах, удовлетворяя требованиям в зависимости от области применения [35].

Научным заделом решения многих «обратных задач» обработки изображений [36, 37] и косвенных измерений распределенных параметров для случаев, когда непосредственное измерение значений этих параметров затруднительно или невозможно, является теория интегральных уравнений 1-го рода – хорошо развитый раздел функционального анализа [38]. К обратным задачам, в частности, относятся задачи удаленного измерения параметров астрофизических объектов по результатам измерений на поверхности Земли или на искусственных спутниках, геофизические задачи исследования глубоко залегающих объектов по измерениям на земной поверхности; задачи компьютерной томографии внутренних органов по измерениям информативных интегральных ослаблений внешнего рентгеновского излучения при последовательном прохождении луча по различным по плотности тканям сводятся к решению интегральных уравнений. Например, к решению интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода сводится

задача удаленного измерения намагниченности объекта по измерениям внешнего магнитного поля [39]. Методы неразрушающего контроля элементов конструкций, во многих случаях, также используют цифровую обработку измеряемых интегральных акустических, электрических или оптических информативных сигналов, что, как следствие, приводит к необходимости решения соответствующих интегральных уравнений. Так, к решению интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода приводят задачи нахождения спектров распределений диагностируемых величин, например, давления или температуры по длине оптоволоконных датчиков [40–43] по результатам измерений интегральных спектров для интенсивностей «механолюминесцентного» светового потока [40] или для коэффициентов отражения от «длинной» протяженной брэгговской решетки [41–43] на выходе из оптического волокна. Актуальной остается задача разработки методик цифровой обработки спектров отражения встроенного в полимерный композиционный материал оптического волокна с длинной брэгговской решеткой для мониторинга и диагностирования технологических, эксплуатационных дефектов на структурном уровне протяженного участка материала.

Цель – разработка математической модели диагностирования технологических дефектов пропитки полимерным связующим пространства между элементарными волокнами внутри армирующих нитей в представительном объеме однонаправленного волокнистого композиционного материала посредством встроенного в нить оптоволоконного датчика с распределенной брэгговской решеткой с использованием методик [41–43] цифровой обработки спектра отражения по решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода.

## 1. Модель случайной структуры композита с дефектами пропитки нитей

Рассмотрим математическую модель трехфазного волокнистого композиционного материала  $V$  (рис. 1), в котором однонаправленные армирующие волокна в виде цилиндрических нитей из большого числа элементарных однонаправленных волокон (1-я фаза) с круговым поперечным сечением расположены в непрерывном связующем (2-я фаза), при этом связующее пропитывает нить и заполняет пространство между ее элементарными волокнами (с дефектами пропитки в виде пустот – 3-я фаза, т.е. с отсутствием связующего и, как следствие, поперечных связей между элементарными волокнами на локальных цилиндрических дефектных участках  $V_0$  нитей). В результате армирующие волокна представляют собой последовательно соединенные в случайном порядке локальные участки нитей с пропиткой и без пропитки элементарных волокон связующим. Рассматриваем случай осесимметричного нагружения напряжениями  $\sigma$ ,  $\sigma_{zz}$  представительной области композиционного материала  $V$ .

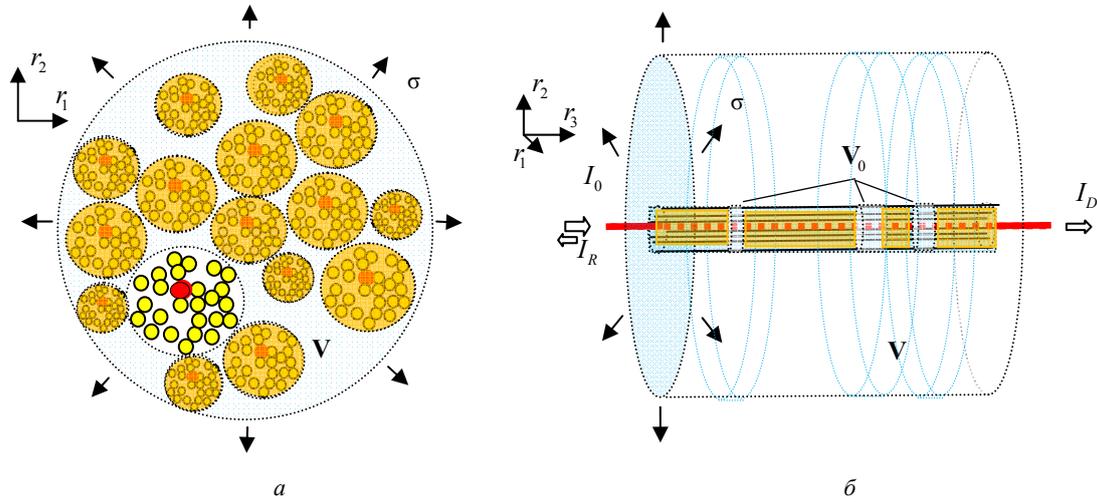


Рис. 1. Трехуровневая полидисперсная структура (а) и распределение области дефектов пропитки  $V_0$  вдоль нити (б) с оптоволоконным датчиком (красная пунктирная линия) в области  $V$  под нагрузкой  $\sigma, \sigma_{zz}$

Fig. 1. Three-level polydisperse structure (a) and distribution of impregnation defect area  $V_0$  along thread (b) with fiber optic sensor (red dashed line) in area  $V$  under load  $\sigma, \sigma_{zz}$

Для вычисления эффективных transversально-изотропных упругих свойств нити с пропиткой и композита в целом используем известные решения осесимметричной задачи теории упругости для элементарной двухфазной цилиндрической ячейки полидисперсной структуры [44, 45], при этом для участков нити без пропитки упругие свойства связующего в нити приравниваем нулю. Считаем, что оптоволоконный датчик с распределенной брэгговской решеткой длиной  $l$  внедрен в армирующую нить конструкции из полимерного композиционного материала на этапе ее изготовления, при этом часть чувствительного участка длиной  $l_0$  расположена внутри дефектной области нити  $V_0$  (см. рис. 1), где интенсивности отраженной  $I_R$  и проходящей  $I_D$  составляющих входящего  $I_0$  в оптоволоконно света, коэффициент отражения  $R = I_R / I_0$ . Искомая вероятность  $p_0$  наличия дефекта пропитки по длине нити обусловлена особенностями технологии отверждения полимерного связующего.

Для рассматриваемого случая осесимметричного деформирования transversально-изотропного упругого материала фаз и композита гидростатическое  $\sigma = (\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) / 2$  и осевое  $\sigma_{zz}$  напряжения

$$\sigma = k_{12}\varepsilon + C_{1133}\varepsilon_{zz}, \quad \sigma_{zz} = C_{1133}\varepsilon + C_{3333}\varepsilon_{zz}$$

выражаются через величины относительного изменения объема  $\varepsilon = \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\theta\theta}$  и осевую деформацию  $\varepsilon_{zz}$  и компоненты тензора упругих свойств  $C$ , объемный модуль при плоской деформации  $k_{12} = (C_{1111} + C_{1122}) / 2$ , ось  $z$  совпадает с координатной осью  $r_3$  (см. рис. 1). При этом для осевой деформации  $\varepsilon_{zz}$  имеем

$$\varepsilon_{zz} = \sigma_{zz} / E_3 - s\sigma, \quad (1)$$

где величина  $s = 2\nu_{31} / E_1 = C_{1133} / (k_{12}C_{3333} - C_{1133}^2)$ , коэффициент Пуассона  $\nu_{31}$ , модули Юнга  $E_{1,3}$  вдоль осей  $r_{1,3}$  с учетом

$$E_1 = E_2, \quad E_3 = C_{3333} - C_{1133}^2 / k_{12}. \quad (2)$$

Решения для константы  $k_{12}^*$  и компонент  $C_{1133}^*$ ,  $C_{3333}^*$  тензора эффективных transversально-изотропных упругих свойств однонаправленного волокнистого композита  $C^*$  для случаев (рис. 1, б), когда композит – волокна нити в связующем (с пропиткой)  $C^{**}$  и волокна нити без связующего (без пропитки)  $C^{**}$ , и случая, когда композит – нити с эффективными свойствами (с пропиткой или без пропитки) в связующем (матрице)  $C^*$ , найдены из решения осесимметричной задачи теории упругости для элементарной двухфазной цилиндрической ячейки полидисперсной структуры [44, 45] в виде

$$k_{12}^* = k_{(2)12} + \nu_1 \bar{k}_{12} a_{11}, \quad C_{1133}^* = C_{(2)1133} + \nu_1 \bar{C}_{1133} a_{11}, \\ C_{3333}^* = \langle C_{3333} \rangle + \nu_1 \bar{C}_{1133} a_{12} \quad (3)$$

с использованием общего решения для радиальных перемещений в волокне  $u_{(1)r} = Cr$  при  $r \in (0; a)$ , где константа  $C = (a_{11}\varepsilon^* + a_{12}\varepsilon_z^*) / 2$ , осевая деформация  $\varepsilon_z^* \equiv \varepsilon_{33}^*$ , коэффициенты

$$a_{11} = (k_{(2)12} + G_{(2)12}) / a_0, \quad a_{12} = -(1 - \nu_1) \bar{C}_{1133} / a_0, \\ a_0 = k_{(1)12} - \nu_1 \bar{k}_{12} + G_{(2)12}, \quad (4)$$

с учетом обозначений разностей модулей фаз:  $\bar{k}_{12} = k_{(1)12} - k_{(2)12}$ ,  $\bar{C}_{1133} = C_{(1)1133} - C_{(2)1133}$ , модуль сдвига  $G_{(2)12} = C_{(2)1212}$ .

Для случая отсутствия пропитки нити (в области  $V_0$  на рис. 1, б) единственная ненулевая компонента  $C_{3333}^{**}$  трансверсально-изотропного тензора  $C^{**}$  эффективных упругих свойств нити (как системы не взаимодействующих между собой однонаправленных по оси  $r_3$  волокон нити)  $C_{3333}^{**} = E_3^{**} = \nu_1' E_{(1)3}$  равна эффективному модулю Юнга нити  $E_3^{**}$  (2), который рассчитывается через продольный модуль Юнга  $E_{(1)3}$  и относительное объемное содержание  $\nu_1' = \nu_1 \neq 1$  волокон в нити и известен в механике композитов как «решение Фойгта».

## 2. Цифровая обработка информативного спектра коэффициента отражения

Диагностирование дефектов пропитки армирующей нити полимерного композиционного материала (см. рис. 1) посредством встроенного в нить оптоволоконного датчика с распределенной брэгговской решеткой осуществим по результатам цифровой обработки информативного спектра коэффициента отражения  $R(\lambda)$  оптоволоконна через нахождение и анализ «спектра деформаций»  $f_\varepsilon(e)$  – функции плотности вероятностей случайной величины осевой деформации  $\varepsilon_l$  на произвольном элементарном участке брэгговской решетки оптоволоконна. Считаем, что случайная структура и деформационные поля внутри полимерного композиционного материала (см. рис. 1) в целом и осевые деформации  $\varepsilon_l$  на представительном (длиной  $l$ ) чувствительном участке оптоволоконна в частности обладают свойством статистической однородности и эргодичности [46], что позволяет при осреднении, например, осевых деформаций  $\varepsilon_l$  по длине  $l$  чувствительного участка оптоволоконна применить подходы «геометрической вероятности». В общем случае, когда пространственную ориентацию чувствительного прямолинейного участка оптоволоконна задает некоторый единичный направляющий вектор  $\mathbf{d}$  с координатами  $d_i$ , значения продольных (по направлению  $\mathbf{d}$ ) деформаций  $\varepsilon_l$  на элементарном чувствительном участке

$$\varepsilon_l = \varepsilon_{ij} d_i d_j$$

связаны с компонентами  $\varepsilon_{ij}$  тензора деформаций  $\varepsilon$  на этом участке оптоволоконна. Для частного случая (см. рис. 1), когда ориентация чувствительного участка оптоволоконна вдоль координатной оси  $z$ , имеем равенство  $\varepsilon_l = \varepsilon_{zz}$  (1).

Искомая функция плотности распределения  $f_\varepsilon(e)$  осевых деформаций  $\varepsilon_l$  по длине чувствительного участка

длины  $l$  оптоволоконного датчика с распределенной слабоотражающей брэгговской решеткой может быть найдена [41] из решения интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} K(t-s)f(s)ds \quad (5)$$

по результатам измеряемых значений спектра коэффициентов отражения  $g(\lambda) \equiv R(\lambda)$  на «входе-выходе» оптоволоконна для входящих в оптоволоконно световых волн длиной  $\lambda$ , где искомая функция  $f(s) \equiv f_\varepsilon(e)|_{e=s/\lambda_0}$ , ядро Фредгольма

$$K(\lambda) \equiv \frac{l}{\lambda_0} \left( \frac{\partial}{\partial l'} R_0(\lambda, l') \right) \Big|_{l'=0} \quad (6)$$

рассчитывается через считающийся известным спектр коэффициентов отражения  $R_0(\lambda, l')$  для начальной однородной распределенной брэгговской решетки с некоторой малой длиной  $l'$ . Интегральное уравнение (5) получено на основе представления результирующего коэффициента отражения  $R$  для неоднородно деформированной по длине распределенной слабоотражающей брэгговской решетки в виде интеграла

$$R(\lambda) = \int_l dR = \int_l K_0(\lambda - \lambda_0 e) dl_e \quad (7)$$

элементарных коэффициентов отражения  $dR$  по всей длине чувствительного участка оптоволоконна  $l$  для некоторой световой волны с длиной  $\lambda$ , где функция коэффициентов

$$K_0(\lambda) = \left( \frac{\partial R_0(\lambda, l')}{\partial l'} \right) \Big|_{l'=0}$$

с учетом равенства нулю значения  $R_0(\lambda, 0) = 0$ , при этом считаем, что для случая малых значений  $l'$  имеем прямую пропорциональность  $R_0(\lambda, l') = K_0(\lambda)l'$  для зависимости значений  $R_0(\lambda, l')$  от длины сенсорного участка  $l'$ , и при однородной осевой деформации  $e$  сенсорного участка  $l'$  функция коэффициентов отражения – это результат «смещения» функции  $R_0(\lambda, l')$  на величину  $\lambda_0 e$  по оси абсцисс  $\lambda$ . В (7) элементарную длину  $dl_e$  чувствительного участка (или суммарную длину участков) оптоволоконна с осевой деформацией  $\varepsilon \in (e, e + de)$  представляем в виде

$$dl_e = l f_\varepsilon(e) de \quad (8)$$

на основе двойного равенства для «геометрической вероятности»  $dP = dl_e / l = f_\varepsilon(e) de$ , где искомая функция плотности распределения  $f_\varepsilon(e)$  неоднородных осевых деформаций  $\varepsilon$  по всей длине  $l$  чувствительного участка оптоволоконна, при этом выполняется равенство

$$l_\varepsilon(e) = l \int_{-\infty}^e f_\varepsilon(e') de',$$

область значений  $l_\varepsilon \in (0; l)$ . В результате подстановки (8) в (7) получим уравнение Фредгольма 1-го рода

$$R(\lambda) = l \int_{-\infty}^{\infty} K_0(\lambda - \lambda_0 e) f_\varepsilon(e) de$$

или в канонической форме (5). Ранее в [43, 44] методика цифровой обработки спектра отражения  $R(\lambda)$  по решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода (5)–(8) [41] была применена для решения задач диагностирования объемного деформированного состояния [44] и локальной микропористости [43] внутри полимерного материала в окрестности внедренного оптоволоконного датчика с распределенной брэгговской решеткой.

Функция плотности распределения  $f_\varepsilon(e)$  продольных деформаций  $\varepsilon_l$  вдоль чувствительного участка оптоволоконка может быть найдена из решения интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода (5), (6). При этом функция  $f_\varepsilon(e)$  будет иметь два характерных максимума в виде локальных «левого» и «правого» импульсов при значениях аргумента  $e_{1,0}$  соответственно. В предположении об однородности осевых деформаций  $e_{1,0}$  по длине каждого из двух типов участков нити: без дефекта  $e_1$  и с дефектом  $e_0$  пропитки (рис. 1, б) – решение для функции  $f_\varepsilon(e)$  имеет вид

$$f_\varepsilon(e) = \sum_{f=0}^1 p_f \delta(e_f - e), \quad (9)$$

где дельта-функция Дирака  $\delta(e)$ .

Искомое численное значение вероятности наличия дефекта пропитки нити  $p_0$  как величины относительно объема области нити без пропитки  $V_0$  в объеме нити (см. рис. 1, б) находим интегрированием

$$p_0 = \int_{e_0} f_\varepsilon(e) de \quad (10)$$

по значениям осевых деформаций пор  $e_0$ , т.е. по абсциссам ширины локального правого импульса функции  $f_\varepsilon(e)$ . Выполняются равенства для нахождения вероятности пропитки нити

$$p_1 = 1 - p_0 = \int_{e_1} f_\varepsilon(e) de \quad (11)$$

через значение  $p_0$  (10) и/или через интеграл по абсциссам  $e_1$  ширины локального левого импульса функции  $f_\varepsilon(e)$  с учетом  $\int_{-\infty}^{\infty} f_\varepsilon(e) de = 1$ .

### 3. Результаты численного моделирования

Численное моделирование процесса диагностирования дефектов пропитки армирующих нитей осуществим

для математической модели представительного объема трехфазного однонаправленного волокнистого композиционного материала (рис. 1, а) с полной корреляцией случайных событий появлений дефектов пропитки в сечениях всех нитей в каждом поперечном сечении композита с целью более «яркого» проявления анализируемых информативных эффектов. При этом возможная корреляция взаимного расположения и размеров дефектов пропитки по длине нитей в этой модели не учитывалась. В разложении (9) осевые деформации  $e_{1,0}$  на цилиндрических участках нити с полной пропиткой (без дефекта)  $e_1$  и с полным отсутствием пропитки (с дефектом)  $e_0$  рассчитываем по формуле  $e_0 = \varepsilon_{zz}$  (1) через значения величин  $k_{12}^*$ ,  $C_{1133}^*$ ,  $C_{3333}^*$  (3), (4), где численные значения относительной объемной доли нитей  $v_1 = 0,9; 0,95; 0,98; 0,99$ . Индекс «2» у величин  $k_{(1,2)12}$ ,  $C_{(1,2)1133}$ ,  $C_{(1,2)3333}$ ,  $G_{(2)}$  в (3), (4) указывает на принадлежность к эпоксидному связующему, при этом индекс «1» для случая нахождения деформации  $e_1$  – принадлежность к материалу с тензором упругих свойств  $C^{**}$ , а для случая нахождения деформации  $e_0$  – принадлежность к материалу с тензором упругих свойств  $C^{***}$ , относительное объемное содержание элементарных волокон в нити  $v_1' = v_1'' = 0,6$ . Упругие свойства изотропных фаз: полиэфирных волокон  $E_1 = 20$  МПа,  $\nu_1 = 0,31$  и эпоксидного связующего  $E_2 = 3$  ГПа,  $\nu_2 = 0,4$  заданы через модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ . Значения независимых компонентов тензора эффективных трансверсально-изотропных упругих свойств нити с пропиткой – полиэфирные волокна/эпоксидное связующее:  $C_{1111}^{**} = 0,806$  ГПа,  $C_{1122}^{**} = 0,323$  ГПа,  $C_{1133}^{**} = 0,448$  ГПа,  $C_{3333}^{**} = 1,568$  ГПа,  $C_{2323}^{**} = 0,275$  ГПа – были рассчитаны по решению (3); параметры используемой брэгговской решетки описаны в [47].

Результаты численного моделирования даны на рис. 2, 3 в виде графиков спектров коэффициента отражения  $R$  и функций плотности распределения деформаций  $f_\varepsilon(e)$  при различных значениях искомой вероятности наличия дефекта пропитки нитей  $p_0$  в однонаправленном волокнистом композиционном материале под равномерной поперечной нагрузкой  $\sigma$  с комбинацией различных значений осевой нагрузки  $\sigma_{zz}$  при объемной доле нитей  $v_1 = 0,99$  (см. рис. 2) и при различных значениях объемной доли нитей  $v_1 = 0,9, 0,95, 0,98, 0,99$  под фиксированной нагрузкой  $\sigma$ ,  $\sigma_{zz}$  и искомым значением вероятности наличия дефекта пропитки  $p_0$  (см. рис. 3) в сравнении с графиками для случая без нагрузки.

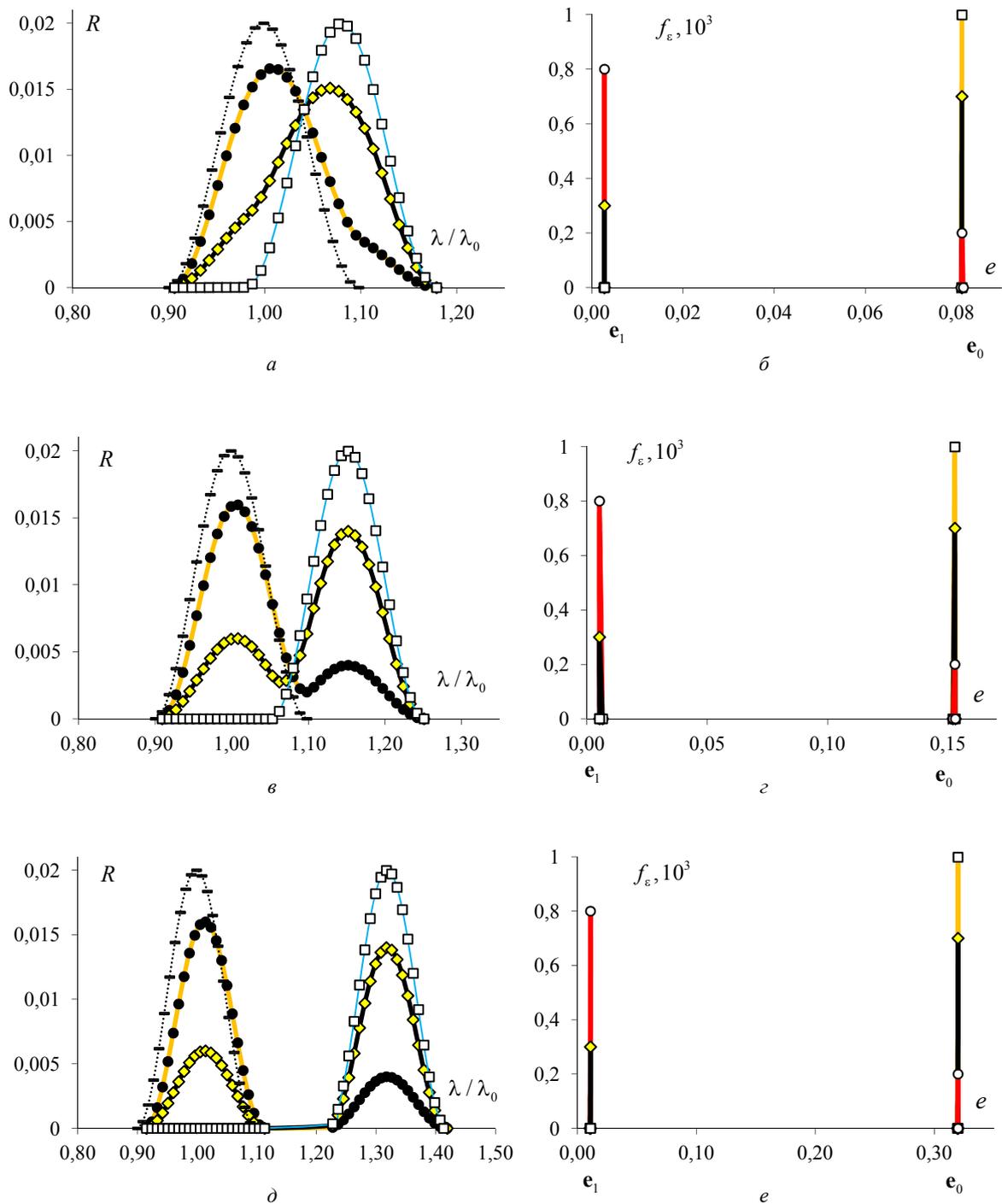


Рис. 2. Спектры коэффициента отражения  $R$  и плотности распределения деформаций  $f_\varepsilon(e)$  при вероятности наличия дефекта пропитки  $p_0 = 0,2$  ( $\circ$ ),  $0,7$  ( $\diamond$ ),  $0,99$  ( $\square$ ) под нагрузкой  $\sigma = 2$  МПа,  $\sigma_{zz} = 5$  МПа (а), (б),  $8$  МПа (в), (д),  $15$  МПа (е), (е), объемная доля нитей  $v_1 = 0,99$ , без нагрузки  $\sigma = \sigma_{zz} = 0$  ( $\equiv$ )

Fig. 2. Spectra of coefficient of reflection  $R$  and distribution density of strains  $f_\varepsilon(e)$  at the probability of existence of defect of impregnation  $p_0 = 0.2$  ( $\circ$ ),  $0.7$  ( $\diamond$ ),  $0.99$  ( $\square$ ) under loading  $\sigma = 2$  МПа,  $\sigma_{zz} = 5$  МПа (a), (b),  $8$  МПа (c), (d),  $15$  МПа (e), (f), a volume fraction of threads  $v_1 = 0.99$ , without loading  $\sigma = \sigma_{zz} = 0$  ( $\equiv$ )

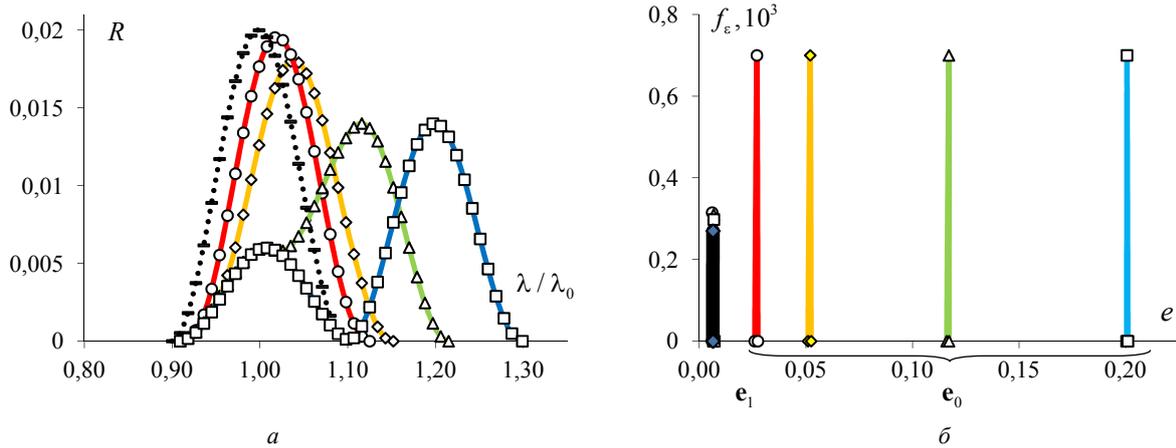


Рис. 3. Спектры коэффициента отражения  $R$  (а) и плотности распределения деформаций  $f_\epsilon(e)$  (б) при объемной доле нитей  $\nu_1 = 0,9$  ( $\circ$ ),  $0,95$  ( $\diamond$ ),  $0,98$  ( $\Delta$ ),  $0,99$  ( $\square$ ) под нагрузкой  $\sigma = 2$  МПа,  $\sigma_{zz} = 10$  МПа, вероятность наличия дефекта пропитки  $p_0 = 0,7$ , без нагрузки  $\sigma = \sigma_{zz} = 0$  ( $\nabla$ )

Fig. 3. Spectra of reflection coefficient  $R$  (a) and density of strains distribution  $f_\epsilon(e)$  (b) at volume fraction of threads  $\nu_1 = 0.9$  ( $\circ$ ),  $0.95$  ( $\diamond$ ),  $0.98$  ( $\Delta$ ),  $0.99$  ( $\square$ ) under load  $\sigma = 2$  MPa,  $\sigma_{zz} = 10$  MPa, probability of presence of impregnation defect  $p_0 = 0.7$ , without load  $\sigma = \sigma_{zz} = 0$  ( $\nabla$ )

По графикам на рис. 3, б, з, е находим численные значения деформаций  $e_1 = 2,77 \cdot 10^{-3}$ ,  $e_0 = 8,12 \cdot 10^{-2}$  (рис. 3, б),  $5,21 \cdot 10^{-3}$ ,  $1,53 \cdot 10^{-1}$  (см. рис. 3, з),  $1,09 \cdot 10^{-2}$ ,  $3,20 \cdot 10^{-1}$  (рис. 3, е) для различных значений нагрузки  $\sigma_{zz} = 5$  МПа, 8 МПа, 15 МПа. По графикам на рис. 3, б находим численные значения деформации  $e_1 = 6,05 \cdot 10^{-3}$ ,  $6,46 \cdot 10^{-3}$ ,  $6,74 \cdot 10^{-3}$ ,  $6,84 \cdot 10^{-3}$  для различных значений  $\nu_1 = 0,9 \dots 0,99$ . Искомые численные значения вероятности наличия дефекта пропитки нити  $p_0$  находим интегрированием (10) по абсциссам локального правого импульса функции  $f_\epsilon(e)$  осевых деформаций пор  $e_0$  на рис. 2, б, з, е, рис. 3, б.

## Заключение

Разработана математическая модель однонаправленного волокнистого полимерного композиционного материала со встроенным в армирующее волокно (нить из элементарных волокон) оптоволоконным датчиком с распределенной брэгговской решеткой (см. рис. 1) с целью диагностирования дефектов пропитки нити – нахождения вероятности дефекта пропитки  $p_0$  как относительной длины  $l_0/l$  локальных участков нити без пропитки  $l_0$ , т.е. без заполнения связующим пространства между ее элементарными волокнами. Использована методика [41–43] цифровой обработки спектра отражения  $R(\lambda)$  по решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода с целью нахождения искомой информативной функции плотности распределения  $f_\epsilon(e)$  осевых деформаций  $\epsilon$  по длине чувствительного

участка  $l$  оптоволоконного датчика. Подход предполагает, что оптоволоконный датчик внедрен в композиционный материал на этапе его изготовления, при этом слабоотражательный характер чувствительного участка оптоволоконна позволяет осуществить линейное суммирование коэффициентов отражения от его различных локальных участков вне зависимости от их взаимных расположений. Разработан алгоритм численной обработки функции плотности распределения деформаций  $f_\epsilon(e)$  для нахождения искомой вероятности  $p_0$  наличия дефектов пропитки по длине нити (9)–(11). Выявлено (9), что функция плотности распределения  $f_\epsilon(e)$  имеет ярко выраженные информативные импульсы (см. рис. 2, б, з, е, рис. 3, б), по расположению и величине которых могут быть найдены искомые значения вероятности  $p_0$  наличия дефектов пропитки (10) по длине нити. Представлены результаты диагностирования различных значений искомой вероятности наличия дефекта пропитки нити  $p_0$  по результатам численного моделирования измеряемых спектров отражения  $R(\lambda)$  и искомой функции плотности распределения деформаций  $f_\epsilon(e)$  по длине чувствительного участка оптоволоконного датчика (см. рис. 2, 3) при различных значениях объемной доли нитей  $\nu_1$ , сочетаниях поперечной  $\sigma$  и продольной  $\sigma_{zz}$  нагрузок представительной области однонаправленного волокнистого композиционного материала в сравнении с графиками для случая без нагрузки.

Математическая модель (см. рис. 1) и методика диагностирования дефектов пропитки армирующих нитей (5)–(11) внутри полимерного волокнистого композиционного материала для случая его осесимметричного

деформирования могут быть адаптированы как на другие «простые» случаи упругого деформирования, например, изгиб и/или кручение стержней с волокнистой структурой с использованием известных аналитических решений [48, 49] для различных вариантов (осевой, окружной, спиральной) ориентации чувствительного участка встроенного оптоволоконного относительно оси стержня, так и на случаи «сложных» нагружений элементов конструкций из полимерных композиционных материалов, например, композитного шпангоута авиационного двигателя [34] с использованием известных численных методов и пакетов прикладных программ механики де-

формируемого твердого тела. Планируется проведение экспериментальных исследований для отработки предложенной методики диагностирования дефектов пропитки армирующих нитей внутри полимерного композиционного материала.

## Благодарность

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2020-0026).

## Библиографический список

1. Воробей В.В., Маркин В.Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций. – Барнаул: Изд-во МЦ ЭОР, 2015. – 181 с.
2. Бормотов А.Н. Декомпозиция систем и иерархические структуры показателей качества композитов // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 9–2. – С. 196–203.
3. Карташова Е.Д., Муйземек А.Ю. Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2. – С. 79–89.
4. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 4. – С. 23–32.
5. Методы формования изделий авиационного назначения из ПКМ (обзор) / Е.Д. Колпачков, А.П. Петрова, А.О. Курносое, И.И. Соколов // Труды ВИАМ. – 2019. – № 11. – С. 22–36.
6. Куприянова О.А., Сержантова М.В., Банщикова М.Н. Параметры контроля качества производства композитных рефлекторов антенн // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2015. – № 3. – С. 324–330.
7. Коваленко А.В. Исследование свойств связующего для формования изделий методом пропитки под давлением // Труды ВИАМ. – 2015. – № 1. – С. 30–37.
8. Сферопластик с регулируемой вязкостью для заполнения участков сотовых конструкций / А.В. Коваленко, Н.К. Сидельников, И.И. Соколов, К.О. Тундайкин // Труды ВИАМ. – 2019. – № 11. – С. 37–43.
9. Гайдачук О.В., Кондратьев А.В., Омельченко К.В. Анализ технологических дефектов, возникающих в серийном производстве интегральных авиаконструкций из полимерных композиционных материалов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 3. – С. 11–20.
10. Гайдачук А.В., Сливинский М.В. Технологические дефекты сотовых конструкций из полимерных композиционных материалов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 4. – С. 5–8.
11. Диков И.А., Бойчук А.С. Способы определения объемной доли пор в полимерных композиционных материалах с помощью ультразвуковых методов неразрушающего контроля (обзор) // Труды ВИАМ. – 2017. – № 2. – С. 80–95.
12. Исследование механического поведения композитной конструкции при разработке методики достоверного выявления дефектов рентгенографическим методом неразрушающего кон-
13. Федотов М.Ю. Концепции создания и тенденции развития интеллектуальных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1. – С. 71–80.
14. Встроенный контроль: от датчиков до информкомпозиции / Е.Н. Каблов, Г.А. Морозов, Д.В. Сиваков, И.Н. Гуляев // Авиационные материалы 75 лет. Избранные труды. – 2007. – С. 331–342.
15. Патент RU № 2643692. Волоконно-оптический датчик объемного напряженного состояния / Паньков А.А., опубл.: 05.02.2018, Бюл. № 4; заявка № 2017111405 от 04.04.2017 г.
16. Патент RU № 2604174. Система гашения спектра акустических шумов / Паньков А.А., Аношкин А.Н., Писарев П.В., опубл. 10.12.2016 Бюл. № 34; заявка RU № 2015144968 от 19.10.2015 г.
17. Патент RU № 2697168. Лопасть воздушного винта с управляемой геометрией профиля / Паньков А.А., Аношкин А.Н., Писарев П.В., опубл.: 12.08.2019 Бюл. № 23, заявка № 2018140318 от 14.11.2018 г.
18. Колобков А.С., Малаховский С.С. Самозалечивающиеся композиционные материалы (обзор) // Труды ВИАМ. – 2019. – № 1. – С. 47–54.
19. Сорокин К.В., Мурашов В.В. Мировые тенденции развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем (обзор) // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 3. – С. 90–94.
20. Качура С.М., Постнов В.И. Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор) // Труды ВИАМ. – 2019. – № 5. – С. 52–61.
21. Возможности контроля внешних механических воздействий волоконно-оптической системой диагностики, встроенной в углепластики различных типов / М.Ю. Федотов, О.Н. Будадин, С.А. Васильев, О.И. Медведков, С.О. Козельская // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 3. – С. 38–47.
22. Федотов М.Ю. Развитие технологии оптического контроля конструкций из ПКМ волоконно-оптическими датчиками: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2019. – 24 с.
23. Дифференцирование дефектов в ПКМ по отклику волоконно-оптических сенсоров (обзор). Часть I / Л.А. Кашарина, В.В. Махсидов, О.И. Смирнов, И.А. Рузаков // Труды ВИАМ. – 2019. – № 2. – С. 97–104.
24. Кашарина Л.А., Махсидов В.В. Дифференцирование дефектов в ПКМ по отклику волоконно-оптических сенсоров (обзор). Часть II // Труды ВИАМ. – 2019. – № 6. – С. 43–50.

25. Рузаков И.А. Мониторинг деформационного состояния элементов конструкции из ПКМ на основе волоконно-оптических датчиков (обзор) // Труды ВИАМ. – 2019. – № 4. – С. 88–98.

26. Обнаружение ультразвуковых воздействий с применением волоконных решеток Брэгга / А.А. Власов, А.С. Алейник, Ф.А. Шуклин, А.Н. Никитенко, Е.А. Моторин, А.Ю. Кириенков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – № 5. – С. 809–817.

27. Волоконно-оптические датчики для мониторинга коррозийных процессов в узлах авиационной техники (обзор) / Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, И.М. Медведев, И.С. Шелемба // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 3. – С. 26–34.

28. Рузаков И.А. Мониторинг деформационного состояния элементов конструкции из ПКМ на основе волоконно-оптических датчиков (обзор) // Труды ВИАМ. – 2019. – № 4. – С. 88–98.

29. Применение оптоволоконных технологий при создании встроенных систем самодиагностики авиационных конструкций / А.Н. Серьезнов, А.Б. Кузнецов, А.В. Лукьянов, А.А. Брагин // Научный вестник НГТУ. Авиационная и ракетно-космическая техника. – 2016. – № 3. – С. 95–105.

30. Будадин О.Н., Кульков А.А., Кутюрин В.Ю. Волоконно-оптические датчики с решетками Брэгга для мониторинга напряженно-деформированного состояния изделий из композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. – 2018. – № 2. – С. 60–67.

31. Разработка чувствительного элемента волоконно-оптического тензометрического датчика на основе решеток Брэгга / А.С. Мунько, С.В. Варжель, С.В. Архипов, К.А. Коннов, А.Б. Петров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – № 4. – С. 340–346.

32. Экспериментальные исследования по определению деформаций образцов из полимерного композиционного материала с применением волоконно-оптических датчиков / Н.А. Кошелева, Г.С. Шипунов, А.А. Воронков, Н.П. Меркушева, А.А. Тихонова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 50. – С. 26–35.

33. 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.

34. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния композитного шпангоута авиационного назначения для разработки методики контроля с применением волоконно-оптических датчиков / А.Н. Аношкин, В.Ю. Зуйко, К.А. Пеленев, П.В. Писарев, Г.С. Шипунов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 4. – С. 47–57.

35. Качура С.М., Постнов В.И. Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор) // Труды ВИАМ. – 2019. – № 5. – С. 52–61.

36. Изображающий спектрометр на основе дискретного интерференционного фильтра / Р.В. Скиданов, А.А. Морозов, А.П. Порфирьев, В.А. Бланк // Компьютерная оптика. – 2015. – № 5. – С. 716–720.

37. Скиданов Р.В., Морозов А.А., Гоголева С.Ю. Решение уравнений Фредгольма первого рода с использованием метода расширенных регуляризованных нормальных уравнений в задаче восстановления гиперспектральных изображений // Информационные технологии и нанотехнологии: материалы междунар. конф. и молодежной школы, Самара, 17–19 мая 2016 г. – Самара: Изд-во Сам. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. С.П. Королева. – С. 273–278.

38. Численные методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов, А.Г. Ягола. – М.: Наука, 1990. – 232 с.

39. Лукьяненко Д.В., Ягола А.Г. Использование многопроцессорных систем для решения обратных задач, сводящихся к интегральным уравнениям Фредгольма 1-го рода // Труды Института математики и механики УрО РАН. – 2012. – № 1. – С. 222–234.

40. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields // Sensors and Actuators A: Physical. – 2019. – Vol. 288. – P. 171–176.

41. Патент RU № 2723921. Способ измерения деформаций / Паньков А.А., опубл.: 18.06.2020 Бюл. № 17, заявка № 2019136251 от 11.11.2019 г.

42. Паньков А.А. Математическая модель диагностирования микропористости материалов оптоволоконным датчиком с распределенной брэгговской решеткой // Оптический журнал. – 2020. – № 4. – С. 3–10.

43. Паньков А.А. Криволинейный оптоволоконный датчик деформаций с распределенной брэгговской решеткой в структуре полимерного композита // Оптический журнал. – 2020. – № 8. – С. 3–11.

44. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 334 с.

45. Паньков А.А. Статистическая механика пьезокомполитов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 480 с.

46. Волков С.Д., Ставров В.П. Статистическая механика композитных материалов. – Мн.: Изд-во Белорус. гос. ун-та, 1978. – 208 с.

47. Pan'kov A.A. Mathematical model for diagnosing strains by an optical fiber sensor with a distributed Bragg grating according to the solution of a Fredholm integral equation // Mechanics of Composite Materials. – 2018. – No. 4. – P. 513–522.

48. Лехницкий С.Г. Кручение анизотропных и неоднородных стержней. – М.: Наука, 1971. – 240 с.

49. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1977. – 416 с.

## References

1. Vorobej V.V., Markin V.B. Kontrol' kachestva izgotovleniya i tekhnologiya remonta kompozitnyh konstrukcij [Quality Control and Technology of Repair of Composite Structures]. Barnaul, Izd-vo MC EOR, 2015, 181 p.

2. Bormotov A.N. Dekompoziciya sistem i ierarhicheskie struktury pokazatelej kachestva kompozitov [Decomposition of systems and hierarchical structures of quality indicators of compo-

sites]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2016, no. 9-2, pp. 196–203.

3. Kartashova E.D., Mujzemek A.YU. Tekhnologicheskie defekty polimernyh sloistyh kompozicionnyh materialov [Technological defects of polymer layered composite materials]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 2, pp. 79–89.

4. Murashov V.V., Romyancev A.F. Defekty monolitnyh detalej i mnogoslojnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov i metody ih vyyavleniya. CHast' 1. Defekty monolitnyh detalej i mnogoslojnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov [Defects of monolithic parts and multilayer structures made of polymer composite materials and methods of their detection. Part 1. Defects of monolithic parts and multilayer structures made of polymer composite materials]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2007, no. 4, pp. 23-32.
5. Kolpachkov E.D., Petrova A.P., Kurnosov A.O., Sokolov I.I. Metody formovaniya izdelij aviacionnogo naznacheniya iz PKM (obzor) [Methods of forming aircraft products from PKM (review)]. *Trudy VIAM*, 2019, no. 11, pp. 22-36.
6. Kupriyanova O.A., Serzhantova M.V., Banshchikova M.N. Parametry kontrolya kachestva proizvodstva kompozitnyh reflektorov antenn [Parameters of quality control of production of composite antenna reflectors]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: tekhnika i tekhnologii*, 2015, no. 3, pp. 324-330.
7. Kovalenko A.V. Issledovanie svoystv svyazuyushchego dlya formovaniya izdelij metodom propitki pod davleniem [Study of the properties of the binder for forming articles by pressure impregnation]. *Trudy VIAM*, 2015, no. 1, pp. 30-37.
8. Kovalenko A.V., Sidel'nikov N.K., Sokolov I.I., Tundajkin K.O. Sferoplastik s reguliruemoy vyazkost'yu dlya zapolneniya uchastkov sotovyh konstrukcij [Spheroplastic with adjustable viscosity to fill sections of cellular structures]. *Trudy VIAM*, 2019, no. 11, pp. 37-43.
9. Gajdachuk O.V., Kondrat'ev A.V., Omel'chenko K.V. Analiz tekhnologicheskikh defektov, voznikayushchih v serijnom proizvodstve integral'nyh aviakonstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov [Analysis of technological defects arising in serial production of integral aircraft structures from polymer composite materials]. *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, no. 3, pp. 11-20.
10. Gajdachuk A.V., Slivinskij M.V. Tekhnologicheskie defekty sotovyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov [Technological defects of cellular structures made of polymer composite materials]. *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2005, no. 4, pp. 5-8.
11. Dikov I.A., Bojchuk A.S. Sposoby opredeleniya ob'emnoj doli por v polimernyh kompozicionnyh materialah s pomoshch'yu ultrazvukovyh metodov nerazrushayushchego kontrolya (obzor) [Methods of determining the volume fraction of pores in polymer composite materials using ultrasonic methods of non-destructive testing (review)]. *Trudy VIAM*, 2017, no. 2, pp. 80-95.
12. Anoshkin A.N., Zujko V.YU., Osokin V.M., Pelenev K.A., Tretyakov A.A. Issledovanie mekhanicheskogo povedeniya kompozitnoj konstrukcii pri razrabotke metodiki dostovernogo vyyavleniya defektov rentgenograficheskim metodom nerazrushayushchego kontrolya [Study of mechanical behavior of composite structure during development of the method of reliable detection of defects by X-ray method of non-destructive control]. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennyh naukah*, 2017, no. 1, pp. 169-172.
13. Fedotov M.Yu. Konceptii sozdaniya i tendencii razvitiya intellektual'nyh materialov (obzor) [Concepts of creation and trends of development of intellectual materials (review)]. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1, pp. 71-80.
14. Kablov E.N., Morozov G.A., Sivakov D.V., Gulyaev I.N. Vstroennyj kontrol': ot datchikov do informkompozitov [Built-in control: from sensors to information complexes]. *Aviacionnye materialy 75 let. Izbrannye trudy*, 2007, pp. 331-342.
15. Patent RU no. 2643692. Volokonno-opticheskij datchik ob'emnogo napryazhennogo sostoyaniya [Fiber-optic sensor of volumetric stressed state] / Pan'kov A.A., opubl.: 05.02.2018, Byul. no. 4; zayavka no. 2017111405 ot 04.04.2017 g.
16. Patent RU no. 2604174. Sistema gasheniya spektra akusticheskikh шумов [Acoustic noise spectrum damping system] / Pan'kov A.A., Anoshkin A.N., Pisarev P.V., opubl. 10.12.2016 Byul. no. 34; zayavka RU no. 2015144968 ot 19.10.2015 g.
17. Patent RU no. 2697168. Lopast' vozdušnogo vinta s upravlyaemoy geometriey profilya [Propeller blade with controlled profile geometry] / Pan'kov A.A., Anoshkin A.N., Pisarev P.V., opubl.: 12.08.2019 Byul. no. 23, zayavka no. 2018140318 ot 14.11.2018 g.
18. Kolobkov A.S., Malahovskij S.S. Samozalechivayushchiesya kompozicionnye materialy (obzor) [Self-killing composite materials (review)]. *Trudy VIAM*, 2019, no. 1, pp. 47-54.
19. Sorokin K.V., Murashov V.V. Mirovye tendencii razvitiya raspredelennyh volokonno-opticheskikh sensornyh sistem (obzor) [World trends in the development of distributed fibre-optic sensor systems (review)]. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 3, pp. 90-94.
20. Kachura S.M., Postnov V.I. Perspektivnye optovolokonnyye datchiki i ih primeneniye (obzor) [Promising fiber-optic sensors and their use (review)]. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5, pp. 52-61.
21. Fedotov M.YU., Budadin O.N., Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I., Kozel'skaya S.O. Vozmozhnosti kontrolya vneshnih mekhanicheskikh vozdeystvij volokonno-opticheskoy sistemoy diagnostiki, vstroennoj v ugleplastiki razlichnyh tipov [Capabilities of control of external mechanical effects by fibre-optic diagnostics system built into carbon plastics of various types]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2019, no. 3, pp. 38-47.
22. Fedotov M.Yu. Razvitie tekhnologii opticheskogo kontrolya konstrukcij iz PKM volokonno-opticheskimi datchikami [Development of technology of optical control of structures from PKM with fibre-optic sensors]: avtoreferat dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk; [Mesto zashchity: Nauch.-issled. in-t introskopii MNPO "Spektr"]. Moskva, 2019, 24 p.
23. Kasharina L.A., Mahsidov V.V., Smirnov O.I., Ruzakov I.A. Differencirovanie defektov v PKM po otkliku volokonno-opticheskikh sensorov (obzor). CHast' I [Differentiation of defects in PKM by response of fibre-optic sensors (overview). Part I]. *Trudy VIAM*, 2019, no. 2, pp. 97-104.
24. Kasharina L.A., Mahsidov V.V. Differencirovanie defektov v PKM po otkliku volokonno-opticheskikh sensorov (obzor). CHast' II [Differentiation of defects in PKM by response of fibre-optic sensors (overview). Part II]. *Trudy VIAM*, 2019, no. 6, pp. 43-50.
25. Ruzakov I. A. Monitoring deformacionnogo sostoyaniya elementov konstrukcii iz PKM na osnove volokonno-opticheskikh datchikov (obzor) [Monitoring of deformation state of structural elements from PKM based on fibre-optic sensors (overview)]. *Trudy VIAM*, 2019, no. 4, pp. 88-98.
26. Vlasov A.A., Alejnik A.S., SHuklin F.A., Nikitenko A.N., Motorin E.A., Kireenkov A.YU. Obnaruzhenie ultrazvukovyh vozdeystvij s primeneniem volokonnyh reshetok Bregga [Detection of ultrasonic effects using Bragg fiber grating]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 2019, no. 5, pp. 809-817.
27. Kablov E.N., Starcev O.V., Medvedev I.M., Shelemba I.S. Volokonno-opticheskie datchiki dlya monitoringa korrozionnyh processov v uzlah aviacionnoj tekhniki (obzor) [Fibre-optic sensors for monitoring corrosion processes in aviation equipment nodes (review)]. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. 3, pp. 26-34.

28. Ruzakov I.A. Monitoring deformatsionnogo sostoyaniya elementov konstrukcii iz PKM na osnove volokonno-opticheskikh datchikov (obzor) [Monitoring of deformation state of structural elements from PKM on the basis of fibre-optic sensors (overview)]. *Trudy VIAM*, 2019, no. 4, pp. 88-98.
29. Ser'oznov A.N., Kuznecov A.B., Luk'yanov A.V., Bragin A.A. Primenenie optovolokonnykh tekhnologij pri sozdanii vstroennykh sistem samodiagnostiki aviacionnykh konstrukcij [Application of fiber-optic technologies in creation of built-in systems of self-diagnostics of aviation structures]. *Nauchnyj vestnik NGTU. Aviacionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika*, 2016, no. 3, pp. 95-105.
30. Budadin O.N., Kul'kov A.A., Kuturina V.Yu. Volokonno-opticheskie datchiki s reshyotkami Bregga dlya monitoringa napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya izdelij iz kompozitsionnykh materialov [Fibre-optic sensors with Bragg screens for monitoring of stressed-deformed state of products from composite materials]. *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov*, 2018, no. 2, pp. 60-67.
31. Mun'ko A.S., Varzhel' S.V., Arhipov S.V., Konnov K.A., Petrov A.B. Razrabotka chuvstvitel'nogo elementa volokonno-opticheskogo tenzometricheskogo datchika na osnove reshetok Bregga [Development of a sensitive element of a fibre-optic strain gauge based on Bragg gratings]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Priborostroenie*, 2017, no. 4, pp. 340-346.
32. Kosheleva N.A., SHipunov G.S., Voronkov A.A., Merkusheva N.P., Tihonova A.A. Eksperimental'nye issledovaniya po opredeleniyu deformatsij obrazcov iz polimernogo kompozitsionnogo materiala s primeneniem volokonno-opticheskikh datchikov [Experimental studies on determination of deformations of samples from polymer composite material using fibre-optic sensors]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2017, no. 50, pp. 26-35.
33. Sozonov N.S., SHardakov I.N. Experimental-theoretical study of influence of structural elements of fiber-optic deformation sensor on its readings and method of correction of transfer function. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2017, no. 4, pp. 173-188.
34. Anoshkin A.N., Zujko V.YU., Pelenev K.A., Pisarev P.V., Shipunov G.S. Simulation of stress-strain state of composite frame of aviation purpose for development of control method using fibre-optic sensors. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no. 4, pp. 47-57.
35. Kachura S.M., Postnov V.I. Perspektivnye optovolokonnye datchiki i ih primenenie (obzor) [Promising fiber-optic sensors and their use (review)]. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5, pp. 52-61.
36. Skidanov R.V., Morozov A.A., Porfir'ev A.P., Blank V.A. Izobrazhayushchij spektrometr na osnove diskretnogo interferentsionnogo fil'tra [Depicting spectrometer based on discrete interference filter]. *Komp'yuternaya optika*, 2015, no. 5, pp. 716-720.
37. Skidanov R.V., Morozov A.A., Gogoleva S.Yu. Reshenie uravnenij Fredgol'ma pervogo roda s ispol'zovaniem metoda rasshirenykh regulyarizovannykh normal'nykh uravnenij v zadache vosstanovleniya giperspektral'nykh izobrazhenij [Solution of Fredholm Equations of the First Kind Using the Method of Extended Regulated Normal Equations in the Problem of Restoring Hyperspectration Images]. *Materialy mezhdunarodnoj konferencii i molodyozhnoj shkoly «Informacionnye tekhnologii i nanotekhnologii»*, Samara, 17-19 maya 2016 g., Samara: Izd-vo Sam. gos. aerokosm. un-ta im. akad. S.P. Korolyova, pp. 273-278.
38. Tihonov A.N., Goncharskij A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G. CHislennyye metody resheniya nekorrektnykh zadach [Numerical methods of solving incorrect problems]. *Moscow, Nauka*, 1990, 232 p.
39. Luk'yanenko D.V., Yagola A.G. Ispol'zovanie mnogoprocessornykh sistem dlya resheniya obratnykh zadach, svodyashchih k integral'nym uravneniyam Fredgol'ma 1-go roda [Use of multiprocessor systems to solve reverse problems, reduced to integral equations of Fredholm of the 1st kind]. *Trudy Instituta matematiki i mekhaniki UrO RAN*, 2012, no. 1, pp. 222-234.
40. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, vol. 288, pp. 171-176.
41. Patent RU no. 2723921. Sposob izmereniya deformatsij [Deformation Measurement Method] / Pan'kov A.A., opubl.: 18.06.2020 Byul. no. 17, zayavka no. 2019136251 ot 11.11.2019 g.
42. Pan'kov A.A. Matematicheskaya model' diagnostirovaniya mikroporistosti materialov optovolokonnykh datchikom s raspredel'noy breggovskoj reshyotkoj [Mathematical model of diagnostics of microporosity of materials with optical fiber sensor with distributed Bragg grating]. *Opticheskij zhurnal*, 2020, no. 4, pp. 3-10.
43. Pan'kov A.A. Krivolinejnyj optovolokonnyj datchik deformatsij s raspredel'noy breggovskoj reshyotkoj v strukture polimernogo kompozita [Curved fiber-optic deformation sensor with distributed Bragg grating in the structure of polymer composite]. *Opticheskij zhurnal*, 2020, no. 8, pp. 3-11.
44. Kristensen R. Vvedenie v mekhaniku kompozitov [Introduction to composites mechanics]. *Moscow, Mir*, 1982, 334 p.
45. Pan'kov A.A. Statisticheskaya mekhanika p'ezokompozitov [Statistical mechanics of piezocomposites]. *Perm', Izd-vo Perm. gos. tekhn. un-ta*, 2009, 480 p.
46. Volkov S.D., Stavrov V.P. Statisticheskaya mekhanika kompozitnykh materialov [Statistical mechanics of composite materials]. *Minsk, Izd-vo Belorus. gos. un-ta*, 1978, 208 p.
47. Pan'kov A.A. Mathematical model for diagnosing strains by an optical fiber sensor with a distributed Bragg grating according to the solution of a Fredholm integral equation [Mathematical model for diagnosing strains by an optical fiber sensor with a distributed Bragg grating according to the solution of a Fredholm integral equation]. *Mechanics of Composite Materials*, 2018, no. 4, pp. 513-522.
48. Lehnickii S.G. Kruchenie anizotropnykh i neodnorodnykh sterznej [Twisting of anisotropic and inhomogeneous rods]. *Moscow, Nauka*, 1971, 240 p.
49. Lehnickii S.G. Teoriya uprugosti anizotropnogo tela [The theory of elasticity of an anisotropic body]. *Moscow, Nauka*, 1977, 416 p.