

*А. А. Паньков\**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия*

## **ДИАГНОСТИРОВАНИЕ МИКРОПОР В ПОЛИМЕРНОМ МАТЕРИАЛЕ ВСТРОЕННОЙ ОПТОВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКОЙ**

*А. А. Pan'kov\**

### **DIAGNOSTICS OF MICROPORES IN A POLYMER MATERIAL WITH A BUILT-IN FIBER-OPTIC BRAGG GRATING**

**Keywords:** optical fiber, long Bragg grating, distributed strain sensor, flaw detection, Fredholm integral equation, mathematical modeling

A mathematical model for the diagnostics of technological defects (micropores) in a polymer material using built-in fiber-optic sensor with a long low-reflective Bragg grating is presented. The diagnostics is based on measuring the informative reflection spectrum of the Bragg grating at the output of the optical fiber. An algorithm for processing the strain spectrum was developed for the cases where the sensitive part of the optical fiber is located in the polymeric material in the deformation “disturbance zone” of the defect in the form of a spherical cavity. The diagnosable parameters were the defect size and location relative to the known length and location of the sensitive part. Results of a mathematical simulation of light and strain spectra along the sensitive part of the optical fiber, at various diagnosed distances from the optical fiber to the center of the spherical cavity in the polymer material are presented. A direct numerical solution (deconvolution) of the Fredholm integral equation is not considered here, and the reflection spectra, are obtained as convolutions with corresponding known strain spectra for the sensitive part of the fiber. The strain spectra were found using the solution of an elasticity theory problem for a “defective medium/fiber” domain.

---

\*Автор, с которым следует вести переписку: [a\\_a\\_pankov@mail.ru](mailto:a_a_pankov@mail.ru)  
Corresponding author: [a\\_a\\_pankov@mail.ru](mailto:a_a_pankov@mail.ru)

**Ключевые слова:** волокно оптическое, решетка брэгговская длинная, датчик деформации распределенный, дефектоскопия, уравнение Фредгольма интегральное, моделирование математическое

Представлена математическая модель диагностирования технологических дефектов (микропор) в полимерном материале с использованием встроенного оптоволоконного датчика с протяженной малоотражательной брэгговской решеткой. Диагностика основана на результатах измерения на выходе из оптоволоконного информативного спектра отражения брэгговской решетки. Разработан алгоритм обработки деформационного спектра для случаев, когда чувствительный участок оптоволоконного датчика расположен в полимерном материале в деформационной “зоне возмущений” дефекта в виде сферической полости; диагностируемые параметры — размер и расположение дефекта относительно известной длины и расположения чувствительного участка. Представлены результаты математического моделирования световых и деформационных спектров вдоль чувствительного участка оптоволоконного датчика при разных диагностируемых расстояниях от оптоволоконного датчика до центра сферической полости в полимерном материале. Непосредственное численное решение (деконволюция) интегрального уравнения Фредгольма здесь не рассматривали, спектры отражения получены как конволюции с соответствующими известными спектрами деформаций для чувствительного участка оптоволоконного датчика; спектры деформаций найдены с использованием решения задачи теории упругости для области “среда с дефектом/оптоволоконно”.

**Введение.** Изготовление композитных “материал-конструкций” как сложных иерархических технических систем с использованием современных аддитивных технологий происходит в несколько этапов, на каждом из которых возможно образование дефектов: расслоений, непроклеев, локальной пористости, трещин и зон неполного отверждения связующего, разрывов и дефектов пропитки армирующих волокон [1, 2]. Это обуславливает сложность возникающей задачи дефектоскопии и многообразие используемых для ее решения методов неразрушающего контроля конструкций из композитных материалов [3, 4].

Актуальность решения проблемы непрерывного мониторинга состояния ответственных высоконагруженных полимерных композитных конструкций обусловила появление и интенсивное развитие встроенных систем неразрушающего контроля [5—7]. “Информкомпози́ты” [5] со встроенной системой самоконтроля посредством функциональных сенсорных элементов для регистрации и контроля параметров своего состояния являются

основой перехода авиационной техники на качественно новый уровень безопасности и надежности ее эксплуатации. Интеллектуальные сенсорные системы могут быть встроены в материал для управления процессом “самозалечивания” повреждений материала через контролируемое раскрытие распределенных в нем капсул с лечащими агентами [6]. Направления развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем и методы обработки информативных сигналов рассмотрены в [7]. Актуальность и подходы к использованию оптоволоконных датчиков в качестве составной части систем мониторинга состояния авиационных конструкций из полимерных композитных материалов рассмотрены в [8]. Результаты экспериментальных исследований по мониторингу состояния конструкции через измерение информационных откликов от встроенных оптоволоконных брэгговских решеток, вызванных внешними ультразвуковыми воздействиями, представлены в [9]. Отметим обзорные работы [10—13] по интегрированию оптоволоконных брэгговских решеток в структуру полимерного композитного материала. Результаты математического моделирования и экспериментальных исследований функционирования встроенных в полимерные композитные материалы оптоволоконных брэгговских решеток для решения разных задач, в частности, для диагностирования градиентного поля деформаций в пластине из стеклопластика, приведены в [14], для обнаружения и идентификации разных типов повреждений в сегменте композитного шпангоута авиационного двигателя — в [15]. Современные технологии производства оптоволокон позволяют варьировать их свойства в широких пределах, удовлетворяя требованиям в зависимости от области применения [8]. Научным заделом решения многих “обратных задач” обработки изображений [16, 17] 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 [18, 19].

Цель настоящей работы — разработка математической модели диагностирования технологических дефектов в виде сферических микропор в полимерном материале посредством встроенного оптоволоконного датчика с протяженной слабоотражающей брэгговской решеткой с использованием и развитием методик [20—22] обработки информативного спектра отражения оптоволоконна.

**1. Спектры оптоволоконной брэгговской решетки.** Рассматриваемая математическая модель предполагает [21], что распределенная брэгговская решетка с периодом  $\Lambda_0$  на всем протяженном (длиной  $l$ ) чувствительном участке оптоволоконна является слабоотражательной. Известен ее “начальный” спектр отражения  $R_0(\lambda)$  с центральной (резонансной) длиной волны отраженного света  $\lambda_0$  для недеформированного ( $\varepsilon = 0$ ) случая. При некотором неоднородном по продольной координате  $\xi \in (0; l)$  осевом де-

формировании  $\varepsilon(\xi)$  чувствительного участка имеем результирующий спектр отражения оптоволоконна [23—25]

$$R(\lambda) = \int_l dR_\varepsilon = \int_l r_0(\lambda - \lambda_0 e) dl_\varepsilon. \quad (1)$$

Этот спектр  $R(\lambda)$  образуется суммированием элементарных спектров  $dR_\varepsilon$  для участков длиной  $dl_\varepsilon$ , где реализуется некоторое “постоянное” значение деформации ( $\varepsilon \approx e$ ) из интервала значений  $\varepsilon \in (e; e + de)$ . Здесь функция  $l_\varepsilon = l_\varepsilon(e)$  — суммарная длина брэгговской решетки с деформацией  $\varepsilon < e$ , область значений  $0 < l_\varepsilon \leq l$ , функция  $r_0(\lambda) = R_0(\lambda)/l$  — начальный спектр отражения от единицы длины брэгговской решетки с центральной длиной волны  $\lambda_0$ . В подынтегральном выражении (1) спектр отражения  $r(\lambda)$  от единичной длины брэгговской решетки с осевой деформацией  $e$  получен смещением известного спектра  $r_0(\lambda)$  на величину  $\lambda_0 e$  по оси абсцисс  $\lambda$ . Элементарную длину  $dl_\varepsilon$  чувствительного участка оптоволоконна с осевой деформацией  $\varepsilon \in (e; e + de)$  в (1) представим в виде

$$dl_\varepsilon = l f_\varepsilon(e) de \quad (2)$$

на основе двойного равенства для геометрической вероятности

$$dP = dl_\varepsilon / l = f_\varepsilon(e) de, \quad (3)$$

где искомый деформационный спектр  $f_\varepsilon(e)$  — функция плотности распределения деформации  $\varepsilon$  по длине в общем неоднородно деформированной брэгговской решетки. Вид функции

$$l_\varepsilon(e) = l \int_{-\infty}^e f_\varepsilon(e') de' \quad (4)$$

следует из (2), (3), где  $e' \in (-\infty; e)$  — параметр интегрирования. Нижний предел интегрирования (4) может быть заменен на  $e_{\min}$  для случая, когда диагностируемые деформации  $\varepsilon \in (e_{\min}; e_{\max})$ , при этом граничные значения функции  $l_\varepsilon(e) = 0, l$  для случаев  $e = e_{\min}, e_{\max}$  соответственно. В результате подстановки (2) в (1) получим уравнение Фредгольма 1-го рода

$$R(\lambda) = l \int_{-\infty}^{\infty} r_0(\lambda - \lambda_0 e) f_\varepsilon(e) de, \quad (5)$$

из которого может быть найден искомый деформационный спектр  $f_\varepsilon(e)$  по результатам измеряемого спектра отражения  $R(\lambda)$  оптоволоконной брэгговской решетки.

**2. Анализ деформационного спектра.** Рассмотрим анализ информативного деформационного спектра  $f_\varepsilon(e)$  (5) с целью нахождения радиуса  $a$  и расположения одиночной сферической полости относительно известной длины  $l \gg a$  и расположения чувствительного участка оптоволоконна (рис. 1). Считаем, что спектр  $f_\varepsilon(e)$  найден из решения интеграль-

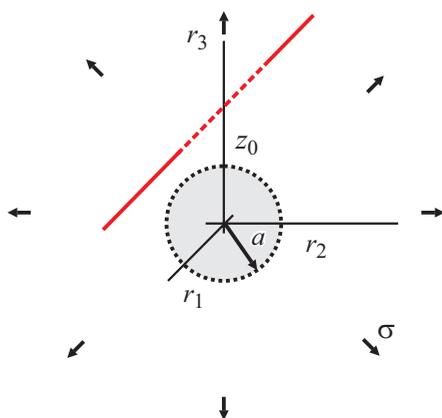


Рис. 1. Взаимное расположение сферической полости и чувствительного участка (---) оптоволоконна.

ного уравнения Фредгольма (5) на некотором интервале значений аргумента  $e \in (e_{\min}; e_{\max})$ ; выполняется равенство

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_{\varepsilon}(e)de = 1.$$

При этом найденные значения  $e_{\min}, e_{\max}$  являются минимальным и максимальным значениями функции продольных деформаций  $\varepsilon(\xi)$  на чувствительном участке оптоволоконна, где  $\xi \in (0; l)$ . На графике деформационного спектра  $f_{\varepsilon}(e)$  находим два ярко выраженных максимума (“левый” и “правый”) в виде узких импульсов, аргументы центров которых — это информативные значения  $e_{\infty}$  и  $e_{\max}$  соответственно,  $e_{\infty}$  — однородная осевая деформация полимерного материала в области  $V$  вдали от сферической полости (где влияние полости несущественно). Далее рассчитываем значение однородной осевой деформации  $e_0 = qe_{\infty}$  в области сферической полости  $V_0$  с использованием известного решения механики композитов [26, 27] для коэффициента концентраций деформации  $q$  в области одиночной сферической полости, где коэффициент  $q$  не зависит от действующего напряжения  $\sigma$ . Находим разность  $\Delta \equiv e_0 - e_{\max} \geq 0$ , при этом  $\Delta = 0$  — индикатор “прохождения”, а  $\Delta \neq 0$  ( $\Delta > 0$ ) — “непрохождения” чувствительного участка оптоволоконна через область полости  $V_0$ .

Для случая “прохождения” ( $\Delta = 0$ ) чувствительного участка оптоволоконна через область полости  $V_0$  находим искомый “коэффициент пористости”

$$\kappa_0 \equiv l_0 / l = \int_{\mathbf{e}_0} f_{\varepsilon}(e)de \tag{6}$$

через интегрирование функции  $f_{\varepsilon}(e)$  по малой ширине  $\mathbf{e}_0$  сингулярного “импульса полости”, который при  $e \in \mathbf{e}_0$  имеет вид

$$f_{\varepsilon}(e) = \kappa_0 \delta(e - e_0), \tag{7}$$

где  $\delta(e)$  — обобщенная дельта-функция Дирака;  $l_0$  — длина чувствительного участка, “попавшая” во внутрь однородно деформируемой области полости  $V_0$ . Длина  $l_0 = 2\sqrt{(a^2 - z_0^2)}$  — для случая расположения чувствительного участка на расстоянии  $z_0 \leq a$  от центра полости,  $l_0 = 0$  — для случая  $z_0 > a$  с учетом  $0 \leq l_0 \leq 2a < l$  (см. рис. 1). В случае отсутствия дефекта (полости) в диагностируемой области  $V$  или при его “значительном” удалении от чувствительного участка оптоволокна с учетом локальности деформационного “поля возмущения” дефекта [26] имеем  $f_{\varepsilon}(e) = \delta(e - e_{\infty})$ , где  $e_{\infty}$  — однородная осевая деформация всей области  $V$ .

Для случая “непрохождения” ( $\Delta \neq 0$ ) чувствительного участка оптоволокна через область полости  $V_0$  находим искомое относительное расстояние (см. рис. 1)

$$\zeta \equiv z_0 / a = \zeta(\Delta) \tag{8}$$

через найденное ранее значение разности  $\Delta > 0$ , где  $\zeta(\Delta)$  — функция, обратная функции разности:

$$\Delta(\zeta) \equiv e_0 - e_{\max}(\zeta), \tag{9}$$

значение  $\Delta = 0$  имеем для случая  $\zeta \leq 1$ . Функциональная зависимость  $e_{\max}(\zeta)$  в (9) считается известной или может быть получена известными методами механики композитов [26, 27] для рассматриваемого случая нагружения (см. рис. 1).

**3. Результаты моделирования.** Рассматриваем случай всестороннего растяжения напряжением  $\sigma = 1,2$  МПа неограниченной области изотропного упругого полимерного материала, когда чувствительный участок оптоволокна симметрично расположен в сферической деформационной

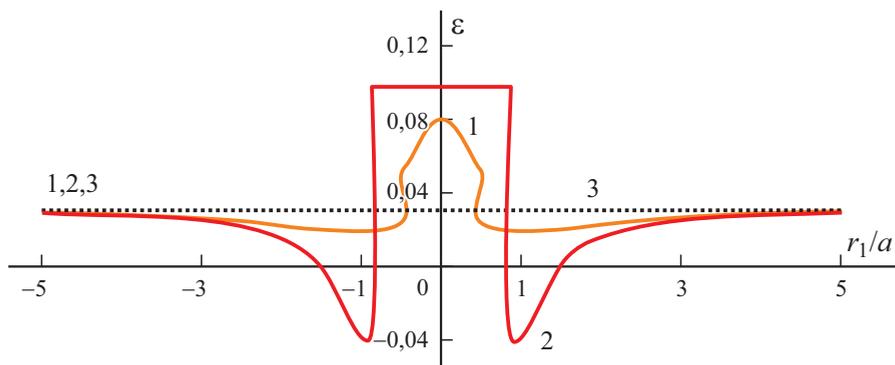


Рис. 2. Распределение осевых деформаций  $\varepsilon$  вдоль  $r_1$  чувствительного участка при расположении полости на расстоянии  $z_0 / a = 1,1$  (1); 0,5 (2); без полости  $\varepsilon = e_{\infty}$  (3).

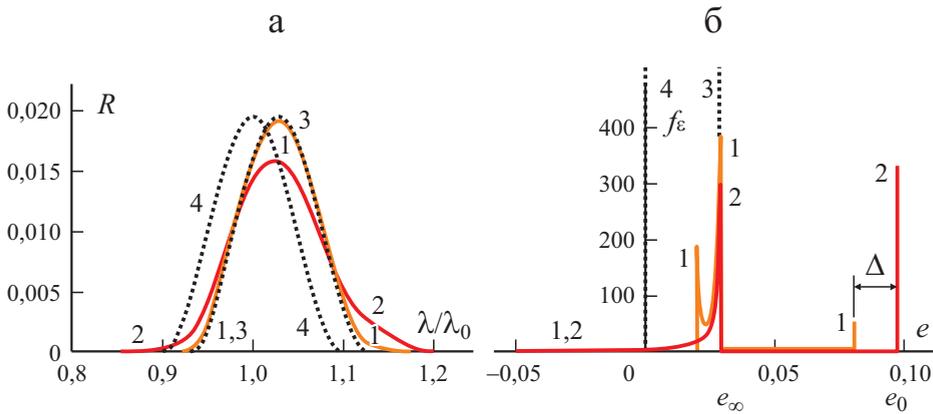


Рис.3. Спектр отражения  $R(\lambda)$  (а) и деформационный спектр  $f_\epsilon(e)$  (б) при расположении полости на расстоянии  $z_0/a = 1,1$  (1); 0,5 (2); без полости (3); без нагрузки (4).

зоне возмущения одиночной сферической полости (см. рис. 1). Центр полости радиусом  $a$  размещен на расстоянии  $z_0$  до прямолинейного чувствительного участка оптоволоконна с распределенной брэгговской решеткой (см. рис. 1). Изотропные упругие свойства материала — полиуретанового термопласта — заданы модулем Юнга  $E = 12$  МПа и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,35$ . Распределение диагностируемых осевых деформаций  $\epsilon$  вдоль чувствительного участка (см. рис. 1) показано на рис. 2 при длине чувствительного участка  $l/a = 10$ , где центрированная локальная координата  $r_1 = \xi - l/2$  для чувствительного участка оптоволоконна,  $\xi \in (0; l)$ .

Считающийся известным спектр отражения  $R_0(\lambda)$  для недеформированной распределенной однородной брэгговской решетки с центральной длиной волны отраженного света  $\lambda_0$  (см. график для случая “без нагрузки” на рис. 3—а) приведен в [21]. На рис. 3—а представлены результаты моделирования спектров отражения  $R(\lambda)$  при разных значениях отношения  $z_0/a$  расстояния от центра полости до оптоволоконна  $z_0$  к радиусу полости  $a$ , длине чувствительного участка  $l/a = 10$  в сравнении с предельными случаями “без полости” или “без нагрузки” материала. Спектры отражения  $R(\lambda)$  (см. рис. 3—а) использованы для нахождения соответствующих деформационных спектров  $f_\epsilon(e)$  (см. рис. 3—б) диагностируемых осевых деформаций  $\epsilon(\xi)$  (см. рис. 2) по решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода (5). Деформационный спектр  $f_\epsilon(e)$  (см. рис. 3—б) для случая “без нагрузки” имеет вид  $f_\epsilon(e) = \delta(e)$ , для случая с нагрузкой “без полости” (или с полостью, но на большом удалении ее от чувствительного участка оптоволоконна) —  $f_\epsilon(e) = \delta(e - e_\infty)$ , где  $e_\infty \approx 0,03$  — однородная осевая деформация материала. При нагружении материала и расположении чувствительного участка оптоволоконна в деформационной зоне возмущения полости (см. рис. 1) график деформационного спектра  $f_\epsilon(e)$  (см. рис. 3—б) имеет два ярко выраженных максимума с искомыми

информативными значениями аргументов  $e_\infty$  и  $e_{\max}$ . Далее эти параметры  $e_\infty$  и  $e_{\max}$  используем для нахождения характеристики  $z_0/a$  расположения центра полости относительного чувствительного участка оптоволокна.

**Заключение.** Разработана математическая модель диагностирования технологического дефекта в виде сферической полости в полимерном материале с использованием встроенного оптоволоконного датчика для случая, когда чувствительный участок оптоволокна — брэгговская решетка расположена в деформационной зоне возмущения полости (см. рис. 1). Непосредственное численное решение интегрального уравнения Фредгольма здесь не рассматривали, и спектры отражения  $R(\lambda)$  получены конволюцией (5) по соответствующим известным спектрам деформаций  $f_\varepsilon(e)$  для чувствительного участка оптоволокна. Спектры деформаций  $f_\varepsilon(e)$  найдены с использованием решения задачи теории упругости для области “среда с дефектом/оптоволокно” для осевых деформаций  $\varepsilon(\xi)$  чувствительного участка оптоволокна,  $\xi \in (0; l)$ . Выявлено, что деформационный спектр  $f_\varepsilon(e)$  имеет ярко выраженные информативные импульсы (см. рис. 3—б), по расположению и величине которых могут быть найдены искомые величины — размер и расположение сферической полости относительно известной длины  $l$  и расположения чувствительного участка оптоволокна в полимерном материале. Проведенные исследования выявили актуальность апробации известных численных методов деконволюции для интегрального уравнения Фредгольма (5) и оценки влияния на точность решения разных случайных факторов рассматриваемой системы “среда с дефектом/оптоволокно” (см. рис. 1), в частности, отклонений реальной формы полости от идеальной сферической. Для некоторых частных случаев такие оценки точности могут быть получены с использованием аналитического решения задачи Эшелби для материала с эллипсоидальной формой полости (включения) и известных методов статистической механики композитов на основе метода функций Грина [27].

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карташова Е. Д., Муйземек А. Ю.* Технологические дефекты полимерных слоистых композитных материалов // Изв. вузов. Поволж. регион. Техн. науки. — 2017. — № 2. — С. 79—89.
2. *Мурашов В. В., Румянцев А. Ф.* Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композитных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композитных материалов // Контроль. Диагностика. — 2007. — № 4. — С. 23—32.
3. *Воробей В. В., Маркин В. Б.* Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций. — Барнаул: Изд-во МЦ ЭОР, 2015. — 181 с.

4. *Бормотов А. Н.* Декомпозиция систем и иерархические структуры показателей качества композитов // *Соврем. наукоемкие технологии.* — 2016. — № 9—2. — С. 196—203.

5. *Каблов Е. Н., Морозов Г. А., Сиваков Д. В., Гуляев И. Н.* Встроенный контроль: от датчиков до информкомполитов / *Авиац. материалы 75 лет. Юбилейн. науч.-техн. сб.* — М.: Изд-во ВИАМ, 2007. — С. 331—342.

6. *Колобков А. С., Малаховский С. С.* Самозалечивающиеся композитные материалы (обзор) // *Тр. ВИАМ.* — 2019. — № 1. — С. 47—54.

7. *Сорокин К. В., Мурашов В. В.* Мировые тенденции развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем (обзор) // *Авиац. материалы и технологии.* — 2015. — № 3. — С. 90—94.

8. *Качура С. М., Постнов В. И.* Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор) // *Тр. ВИАМ.* — 2019. — № 5. — С. 52—61.

9. *Власов А. А., Алейник А. С., Шуклин Ф. А., Никитенко А. Н., Моторин Е. А., Киреевков А. Ю.* Обнаружение ультразвуковых воздействий с применением волоконных решеток Брэгга // *Науч.-техн. вестн. информац. технологий, механики и оптики.* — 2019. — № 5. — С. 809—817.

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

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

12. *Серьёзов А. Н., Кузнецов А. Б., Лукьянов А. В., Брагин А. А.* Применение оптоволоконных технологий при создании встроенных систем самодиагностики авиационных конструкций // *Науч. вестн. НГТУ. Авиац. и ракетно-косм. техника.* — 2016. — № 3. — С. 95—105.

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

14. *Кошелева Н. А., Шипунов Г. С., Воронков А. А., Меркушева Н. П., Тихонова А. А.* Экспериментальные исследования по определению деформаций образцов из полимерного композитного материала с применением волоконно-оптических датчиков // *Вестн. ПНИПУ. Аэрокосм. техника.* — 2017. — № 50. — С. 26—35.

15. *Аношкин А. Н., Зуйко В. Ю., Пеленев К. А., Писарев П. В., Шипунов Г. С.* Численное моделирование напряженно-деформированного состояния композитного шпангоута авиационного назначения для разработки методики контроля с применением волоконно-оптических датчиков // *Вестн. ПНИПУ. Механика.* — 2018. — № 4. — С. 47—57.

16. *Скиданов Р. В., Морозов А. А., Порфирьев А. П., Бланк В. А.* Изображающий спектрометр на основе дискретного интерференционного фильтра // *Компьютер. оптика.* — 2015. — № 5. — С. 716—720.

17. *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 / *Материалы междунар. конф. и молодёж. школы “Информационные технологии и нанотехнологии”, Самара, 17—19 мая 2016 г.* — Самара: Изд.-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. С. П. Королёва, 2016. — С. 273—278.

18. *Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г.* Численные методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1990. — 232 с.

19. Лукьяненко Д. В., Ягола А. Г. Использование многопроцессорных систем для решения обратных задач, сводящихся к интегральным уравнениям Фредгольма 1-го рода // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. — 2012. — № 1. — С. 222—234.
20. Патент RU № 2723921. Способ измерения деформаций / А. А. Паньков, опубли.: 18.06.2020; Бюл. № 17.
21. 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 // Mech. Compos. Mater. — 2018. — No. 4. — P. 513—522.
22. Паньков А. А. Математическая модель диагностирования микропористости материалов оптоволоконным датчиком с распределённой брэгговской решёткой // Оптич. журн. — 2020. — № 4. — С. 3—10.
23. Wang Y, Gong J, Wang D. Y, Dong B., Bi W., Wang A. A quasi-distributed sensing network with time—division multiplexed fiber Bragg gratings // IEEE Photonics Technol. Lett. — 2011.—Vol. 23, N 1.—P. 70—72.
24. Нуреев И. И. Сенсорные пассивные оптические сети и ключевые вопросы применения в них волоконных брэгговских решеток // Электрон. науч. журн. “Инженерный вестник Дона”. — 2016. — №2; URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3605>
25. Zhang J. Распределенная система датчиков вибраций, использующая сигналы, отраженные слабыми волоконными брэгговскими решетками // Оптич. журн. — 2018. — № 7. — С. 76—83.
26. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. — М.: Мир, 1982 — 334 с.
27. Паньков А.А. Статистическая механика пьезокомпозитов. — Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. — 480 с.

Поступила в редакцию 01.02.2021

Окончательный вариант поступил 13.12.2021

Received Feb. 1, 2021 (Dec. 13, 2021)

---