

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

*Е. А. Полякова, Е. А. Бадеева, Т. И. Мурашкина,
А. В. Бадеев, И. Е. Славкин*

INFLUENCE OF OPTICAL FIBER BENDS ON METROLOGICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF FIBER-OPTIC MEASURING TRANSDUCERS

*E. A. Polyakova, E. A. Badeeva, T. I. Murashkina,
A. V. Badeev, I. E. Slavkin*

Аннотация. *Предмет и цель работы.* Основными элементами волоконно-оптических измерительных преобразователей являются оптические волокна, радиус изгиба которых существенно влияет на метрологические и эксплуатационные характеристики. Поэтому необходимо определить условия, при которых данное влияние не будет приводить к ухудшению технических характеристик волоконно-оптических измерительных преобразователей. Цель работы – улучшение технических характеристик волоконно-оптических измерительных преобразователей, определяемых механической надежностью изогнутого оптического волокна. Предметом исследования являются физические эффекты, проявляющиеся в материале оптического волокна при его неинформативных изгибах в процессе изготовления и эксплуатации волоконно-оптических измерительных преобразователей. *Методы.* Определяются максимальные значения радиусов микро- и макроизгибов оптического волокна, при которых снижается интенсивность светового потока, метрологическая и эксплуатационная надежность оптического волокна. При выполнении исследований использованы методы геометрической оптики, логарифмического дифференцирования, а также соотношения для эффекта фотоупругости при деформации оптического волокна. *Результаты и выводы.* Установлена зависимость интенсивности светового потока от изменения радиуса изгиба оптического волокна. Представлены соотношения для расчетов коэффициентов потерь, обусловленных изгибами малых и больших радиусов и вычисления граничных условий сохранения работоспособности волоконно-оптического кабеля. Определены причины и граничные условия критичности изгибов оптического волокна, при которых снижается надежность волоконно-оптического кабеля как механическая, так и метрологическая при эксплуатации в составе волоконно-оптического преобразователя. При рассмотрении процессов, происходящих в оптических волокнах в моменты их изгиба, необходимо принимать во внимание эффект фотоупругости и изменение коэффициентов преломления слоев оптического волокна. В работе определены граничные условия критичности изгибов оптического волокна, при которых снижается их механическая и метрологическая надежность. Управляя радиусом изгиба волокна, можно не только управлять интенсивностью передаваемого светового сигнала в зоне измерений волоконно-оптического преобразователя, но и добиться повышения надежности и работоспособности средства измерения.

Ключевые слова: волоконно-оптический измерительный преобразователь, оптическое волокно, интенсивность светового потока, радиус изгиба, надежность, механическая прочность, фотоупругость, коэффициент преломления.

Abstract. Subject and goals. The main elements of fiber-optic measuring converters are optical fibers, the bending radius of which significantly affects the metrological and operational characteristics. Therefore, it is necessary to determine the conditions under which this influence will not lead to a deterioration in the technical characteristics of fiber-optic measuring transducers. Purpose of work – the improvement of the technical characteristics of fiber-optic transducers, defined by the mechanical reliability of optical fiber determined from changes in the bending radius of optical fibers and reduce the mechanical reliability of optical fiber. The subject of the research is the physical effects that occur in the optical fiber material during its uninformative bends during the manufacture and operation of fiber-optic measuring transducers. **Methods.** The maximum values of the radii of micro – and macro-bends of the optical fiber are determined, which reduce the intensity of the light flux, metrological and operational reliability of the optical fiber. The research uses methods of geometric optics, logarithmic differentiation, and the ratio for the effect of photoelasticity during optical fiber deformation. **Results and conclusions.** The dependence of the intensity of the light flux on the change in the bending radius of the optical fiber is established. The relations for calculating the loss coefficients due to bends of small and large radius and calculating the boundary conditions for maintaining the operability of a fiber-optic cable are presented. The reasons for reducing the reliability of fiber-optic cable during operation as part of a fiber-optic converter are determined. When considering the processes occurring in optical fibers at the moment of their bending, it is necessary to take into account the effect of photoelasticity and changes in the refractive coefficients of optical fiber layers. The paper defines the boundary conditions for the criticality of optical fiber bends, which reduce their mechanical and metrological reliability. By controlling the bending radius of the fiber, you can not only control the intensity of the transmitted light signal in the measurement zone of the fiber-optical Converter, but also improve the reliability and performance of the measuring tool.

Keywords: fiber-optic measuring converter, optical fiber, light intensity, bending radius, reliability, mechanical strength, photoelasticity, refractive index.

Введение

Оптическое волокно (ОВ) – основной элемент волоконно-оптического кабеля (ВОК) волоконно-оптических измерительных преобразователей (ВОП) [1, 2]. Одним из основных критериев качества ОВ является его надежность, которая в значительной степени определяется прочностными параметрами ОВ (механическая надежность) и точностью передаваемого светового сигнала (метрологическая надежность). Радиус изгиба оптического кабеля существенно влияет на его эксплуатационные характеристики. При изгибах ОВ изменяется интенсивность светового потока, так как изменение геометрических параметров волокна меняет его физические свойства прежде всего коэффициенты преломления сердцевины и оболочки. Тем самым вызывается изменение граничных условий между сердцевиной и оболочкой, т.е. нарушается условие полного внутреннего отражения (ПВО). Изменившиеся граничные условия приводят к генерации излучательных мод, что эквивалентно модуляции оптического излучения по интенсивности [3].

В жестких условиях эксплуатации, характерных для ракетно-космической и авиационной техники, ОВ подвергаются длительному воздействию механических нагрузок, климатических, химических и радиационных факторов, что приводит к возникновению статической усталости и снижению механической прочности ОВ, в результате чего возникают потери при передаче оптического сигнала, снижается механическая и метрологическая надежность

ВОК. Известно, что в результате технологических причин изготовления ОВ, а также изгибов в процессе изготовления и эксплуатации устройств, в которых оно применяется, появляются и развиваются микротрещины на поверхности и внутри ОВ (рис. 1) [4, 5].

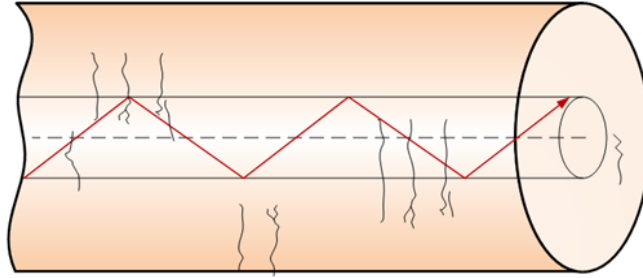


Рис. 1. Возникновение микротрещин в оптическом волокне

В результате происходит постепенное снижение прочности ОВ, что может привести не только к снижению интенсивности светового сигнала, а даже к нарушению целостности ОВ, его обрыву, вызвав отказ ВОП. Возникает необходимость определения максимальных значений радиусов микро- и макроизгибов ОВ, при которых снижаются:

- метрологическая надежность ВОП, определяемая снижением интенсивности светового потока от изменения радиуса изгиба ОВ;
- механическая надежность ВОП, определяемая надежностью ОВ.

Материал и методика

Мощность светового потока $P_{\text{вых}}$ на выходе изогнутого участка определяется выражением

$$P_{\text{вых}} = \tau_L \tau_R P_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где τ_L , τ_R – коэффициенты потерь светового потока в ОВ по длине волокна L и в зависимости от радиуса изгиба R волокна соответственно; $P_{\text{вх}}$ – мощность светового потока на входе изогнутого участка. В соответствии с [6]

$$\tau_L = e^{\chi L}; \quad (2)$$

$$\tau_R = e^{\alpha_R R} \text{ или } \tau_r = e^{\alpha_r r}, \quad (3)$$

где χ – коэффициент экстинкции материала сердцевины ОВ; α_R , α_r – коэффициенты затухания, обусловленные изгибом ОВ.

Для того, чтобы отличать коэффициенты потерь, обусловленные изгибами малых радиусов (которые в литературе называются «выпуклостями») от коэффициентов потерь, обусловленных изгибами больших радиусов R (макроизгибы), они условно обозначены α_R , α_r соответственно.

Для изгибов с большим радиусом $R \gg r_c$ [3]

$$\alpha_R = \frac{NA^2}{r_c} R; \quad (4)$$

– для изгибов с малым радиусом r , сравнимым с радиусом сердцевины ОВ r_c [3]:

$$\alpha_r = \frac{k r_{cp}^2 r_c^4 \sqrt{\left(\frac{E_{об}}{E_c}\right)^3}}{r_{об} \left(1 - \frac{n_c}{n_{об}}\right)^3}, \quad (5)$$

где k – число выпуклостей на единицу длины; r_{cp} – среднеквадратичная высота выпуклостей; $r_{об}$ – внешний радиус оболочки ОВ; n_c , $n_{об}$ – коэффициенты преломления сердцевины и оболочки ОВ соответственно; $E_{об}$, E_c – модули упругости материалов сердцевины и оболочки ОВ соответственно; NA – числовая апертура ОВ [6].

Для ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления, которые более предпочтительны в ВОП [7]:

$$NA = \sqrt{n_c^2 - n_{об}^2}. \quad (6)$$

С учетом выражений (2) и (3) выражение (1) для указанных двух случаев переписывается в виде

$$P_{вых} = e^{\chi L} e^{\alpha_r R} P_{вх}; \quad (7)$$

$$P_{вых} = e^{\chi L} e^{\alpha_r r} P_{вх}. \quad (8)$$

Для повышения надежности разрабатываемых волоконно-оптических датчиков различных физических величин целесообразно использовать ВОП с открытым оптическим каналом, который в них является основным элементом [8]. Поэтому считаем, что микроизгибы в них отсутствуют и дальнейшие выкладки излагаем с позиции возможных изгибов большого радиуса R .

Обсуждение и результаты

Используя метод логарифмического дифференцирования, определим изменение ΔP мощности светового потока, вызванное большим изменением радиуса изгиба ОВ на значение ΔR , учитывая при этом, что при изгибе ОВ происходит его удлинение на значение ΔL и изменяется числовая апертура NA в соответствии с уравнением (6) на значение

$$\Delta NA = \sqrt{\Delta n_c^2 - \Delta n_{об}^2}. \quad (9)$$

Имеем

$$P_{вых} = e^{\chi L - \frac{NA^2}{r_c} R} P_{вх}; \quad (10)$$

$$\ln P_{вых} = \chi L - \frac{NA^2}{r_c} R + \ln P_{вх}; \quad (11)$$

$$\frac{dP_{вых}}{dP_{вх}} = \chi \Delta L - 2 \frac{R}{r_c} \Delta NA - \frac{NA^2}{r_c} \Delta R + \frac{dP_{вх}}{P_{вх}}. \quad (12)$$

При $dP_{\text{вх}} = 0$ окончательно имеем

$$\frac{dP_{\text{вых}}}{dP_{\text{вх}}} = \chi \Delta L - 2 \frac{R}{r_c} \Delta NA - \frac{NA^2}{r_c} \Delta R. \quad (13)$$

Изгибающая внешняя сила F действует на волокно с трехслойной структурой (рис. 2).

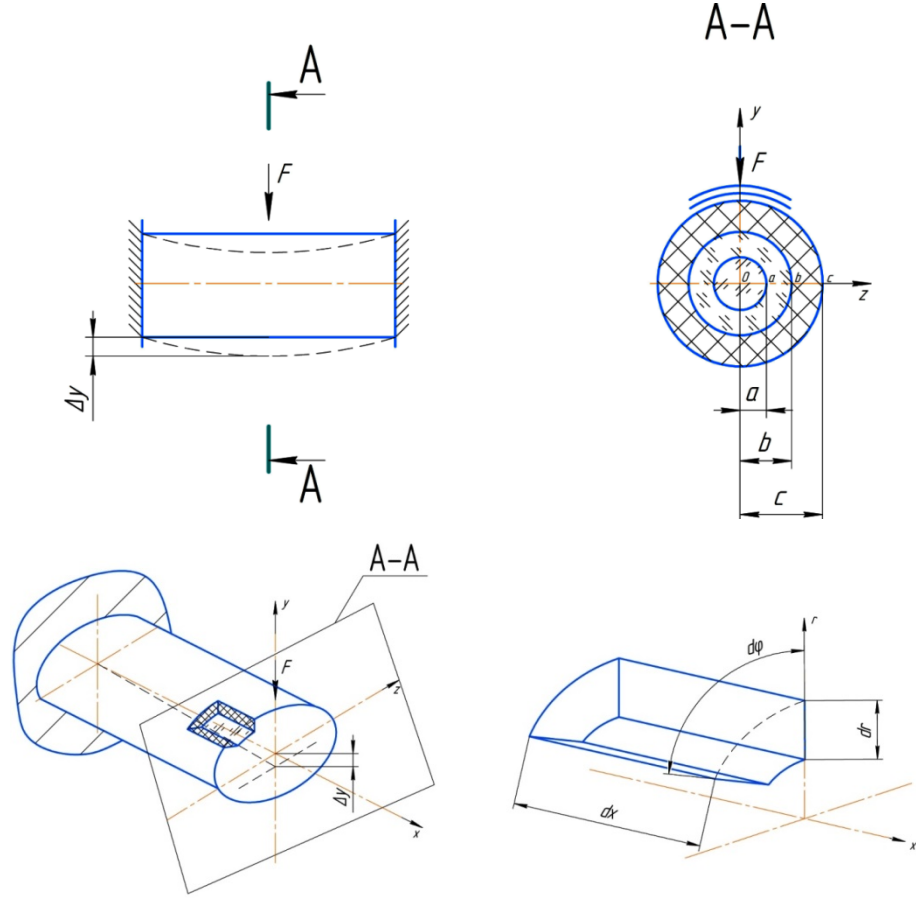


Рис. 2. Действие изгибающих внешних сил F на оптическое волокно с трехслойной структурой

При деформации ОВ проявляется эффект фотоупругости, который заключается в изменении коэффициента преломления n на значение Δn .

Изменение коэффициента преломления i -го слоя Δn_i , вносимое эффектом фотоупругости, выражается известной формулой [9]

$$\Delta n_i = -\frac{n_i^2}{2} (p_{11} \epsilon_{xi} + p_{12} \epsilon_{yi} + p_{12} \epsilon_{zi}) \quad (14)$$

или в полярной системе координат:

$$\Delta n_i = -\frac{n_i^2}{2} (p_{11} + p_{12}) \epsilon_{ri} + p_{12} \epsilon_{zi}, \quad (15)$$

где p_{11}, p_{12} – коэффициенты фотоупругости или коэффициенты Поккельса материала, подвергаемого деформации; $\varepsilon_{xi}, \varepsilon_{yi}, \varepsilon_{ri}$ – относительные деформации в поперечном сечении i -го слоя; ε_{zi} – относительная деформация i -го слоя вдоль оси волокна.

В соответствии с обобщенным законом Гука для пространственно напряженного состояния ОВ относительные деформации в поперечном сечении $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ и вдоль оси Z ε_z составят

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)]; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)],\end{aligned}\tag{16}$$

где E – модуль упругости; $\mu = \varepsilon'/\varepsilon$ – коэффициент Пуассона.

Значения механических напряжений $\sigma_r, \sigma_\phi, \sigma_z$, выраженные в полярной системе координат, связываются со значениями деформаций ОВ $\varepsilon_r, \varepsilon_\phi, \varepsilon_z$ следующими соотношениями [4]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{ri} \\ \sigma_{\phi i} \\ \sigma_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_i + 2\nu_i & \nu_i & \Lambda_i \\ \Lambda_i & \Lambda_i + 2\nu_i & \Lambda_i \\ \nu_i & \nu_i & \Lambda_i + 2\nu_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{ri} \\ \varepsilon_{\phi i} \\ \varepsilon_{zi} \end{bmatrix},\tag{17}$$

где i – индекс слоя ($i = 1$ – для сердцевины, $i = 2$ – для оболочки, $i = 3$ – для внешнего покрытия); Λ_i, ν_i – постоянные Ламе, связанные с модулем упругости E_i и коэффициентами Пуассона μ_i следующими выражениями [10]:

$$\begin{cases} \Lambda_i = \frac{\mu_i E_i}{(1 + \mu_i)(1 - 2\mu_i)}; \\ \nu_i = \frac{E_i}{2(1 + \mu_i)}. \end{cases}\tag{18}$$

Известно распределение напряжений внутри соосных цилиндров, каковыми являются слои оптического волокна [6]:

$$\begin{cases} \sigma_{ri} = A_i + \frac{B_i}{r_i^2}; \\ \sigma_{\phi i} = A_i - \frac{B_i}{r_i^2}; \\ \sigma_{zi} = C_i, \end{cases}\tag{19}$$

где A_i, B_i, C_i – константы, значения которых должны быть определены; r_i – радиус поперечного сечения i -го слоя.

Напряжение внутри сердцевины ОВ конечно и поэтому определяется при $B_i = 0$. Кроме того, для ОВ, имеющего три слоя, постоянные A, B, C определяются из следующих граничных условий:

$$\begin{cases}
\sigma_{ri} \Big|_{i=1, r=a} = \sigma_{ri} \Big|_{i=2, r=a}; \\
u_i \Big|_{i=1, r=a} = u_{ri} \Big|_{i=2, r=a}; \\
\sigma_{ri} \Big|_{i=2, r=b} = \sigma_{ri} \Big|_{i=3, r=b}; \\
u_{ri} \Big|_{i=2, r=b} = u_{ri} \Big|_{i=3, r=b}; \\
\sigma_{ri} \Big|_{i=3, r=c} = -F; \\
\int_0^a \int_0^{2\pi} \sigma_{zi} \Big|_{i=1} r dr d\phi + \int_a^b \int_0^{2\pi} \sigma_{zi} \Big|_{i=2} r dr d\phi + \int_b^c \int_0^{2\pi} \sigma_{zi} \Big|_{i=3} r dr d\phi = 0; \\
u_{zi} \Big|_{i=1} = u_{zi} \Big|_{i=2} = u_{zi} \Big|_{i=3},
\end{cases} \quad (20)$$

где $u_{ri} = \int \epsilon_{ri} dr$ – радиальное смещение i -го слоя.

Первые два уравнения в системе (20) означают, что радиальные напряжения и смещения на границе непрерывны. Пятое уравнение показывает, что сила F равномерно действует на ОВ. Шестое уравнение означает, что оба конца свободны. Седьмое уравнение показывает, что деформация на концах не учитывается, так как по сравнению с деформацией поверхности пренебрежимо мала (тело вытянуто вдоль оси X и его размеры по оси X гораздо больше поперечных размеров).

Результаты вычислений по формулам системы (20) подставляются в формулы системы (19). Значения σ_{ri} , $\sigma_{\phi i}$, σ_{zi} подставляются в формулу (17) для нахождения ϵ_i в зависимости от внешней силы F (давления P , температуры T и проч.). Полученные результаты необходимо подставить в выражения (14) или (15) для определения изменения значений показателей преломления материала сердцевины и оболочки. Полученные значения подставляются в выражение (9). С учетом результатов вычисления по формуле (9) находим ΔR из формулы (13). ΔL пренебрегаем в силу того, что это изменение ничтожно мало.

Известно, что, если осуществляется дифференциальное преобразование оптических сигналов непосредственно в зоне восприятия измерительной информации ВОП [2], то изменение интенсивности оптического сигнала до 20 % от номинального значения, обусловленного неинформативными изгибами оптических волокон, не приведет к возникновению дополнительной погрешности, обусловленной микро- и макроизгибами. Поэтому данное ограничение используем для определения критических изгибов оптического волокна в выражении (13).

В качестве примера проведен расчет максимально возможного изгиба ОВ в волоконно-оптическом датчике (ВОД) давления аттенюаторного типа [4], при котором мощность светового потока в двух измерительных каналах меняется не более чем на 20 %. В датчике использовалось «кварц-кварцевое» ОВ ZLWF200/240НТ//360/newН со следующими параметрами: $NA = 0,22$, $r_c = 100$ мкм, $r_{об} = 120$ мкм, $r_{ов} = 180$ мкм, $E = 0,56 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,25$. В результате расчета определено максимальное значение радиуса изгиба, при котором снижается метрологическая надежность оптического волокна $R_{\min} = 5,3$ мм.

Проверочный расчет максимального значения радиуса изгиба осуществляется исходя из условия сохранения механической прочности ОВ, ко-

торое имеет вид: $R_{\min} \geq (10...20)r_c$ [7]. Для нашего случая $R_{\min}$ должен быть более 2 мм, т.е. данное ограничение выполняется.

Окончательно при разработке ВОП принимаем минимальное значение радиуса изгиба равным 5,3 мм.

Заключение

Проведенные исследования показали, что эффект фотоупругости и изменение коэффициентов преломления слоев ОВ необходимо учитывать при рассмотрении процессов, происходящих в ОВ в момент его изгиба. Доказано, что, управляя радиусом изгиба ОВ, можно управлять интенсивностью передаваемого светового сигнала в ОВ в зоне измерений, определив условия, наилучшим образом отвечающие конкретному случаю применения ВОД, а также установить радиус изгиба, не приводящий к снижению его надежности и работоспособности. Для исключения механических информативных и неинформативных изгибов ОВ и с целью повышения надежности целесообразно использовать ВОП с открытым оптическим каналом [8].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-20045.

Библиографический список

1. Бадеева, Е. А. Разработка теории распределения светового потока в оптической системе волоконно-оптических преобразователей физических величин отражательного типа : монография / Е. А. Бадеева, Н. П. Кривулин, Т. И. Мурашкина [и др.] ; под общ. ред. профессора Т. И. Мурашкиной. – Пенза : ИИЦ ПГУ, 2008. – 102 с.
2. Волоконно-оптические приборы и системы: Научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета / Т. И. Мурашкина, Е. А. Бадеева. – Санкт-Петербург : Политехника, 2018. – Ч. I. – 187 с.
3. Волоконно-оптические датчики. Производственное издание / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ ; под ред. Т. Окоси : пер. с японского Г. Н. Горбунова. – Ленинград : Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1990. – 252 с.
4. Мурашкина, Т. И. Волоконно-оптические датчики давления аттенуаторного типа для ракетной техники : монография / Т. И. Мурашкина, А. Г. Пивкин. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 2005. – 150 с.
5. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом : монография / Е. А. Бадеева, А. В. Гориш, Т. И. Мурашкина [и др.] ; под общ. ред. Т. И. Мурашкиной и А. В. Гориша. – Москва : МГУЛ, 2004. – 246 с.
6. Мурашкина, Т. И. Теория, расчет и проектирование волоконно-оптических измерительных приборов и систем : учеб. пособие / Т. И. Мурашкина. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 1999. – 133 с.
7. Бадеева, Е. А. Волоконно-оптические датчики давления для информационно-измерительных систем ракетно-космической и авиационной техники : дис. ... д-ра техн. наук / Бадеева Е. А. – Пенза, 2017. – 463 с.
8. Бадеева, Е. А. Научная концепция проектирования волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом для ракетно-космической и авиационной техники // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 4. – С. 102–113.

9. Сивухин, Д. В. Общий курс физики / Д. В. Сивухин. – Москва : Физматлит, 2005. – Т. I. Механика. – 560 с.
10. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – Москва : Наука, 1966. – 635 с.

References

1. Badeeva E. A., Krivulin N. P., Murashkina T. I. et al. *Razrabotka teorii raspredeleniya svetovogo potoka v opticheskoy sisteme volokonno-opticheskikh preobrazovateley fizicheskikh velichin otrazhatel'nogo tipa: monografiya* [Development of the theory of light flux distribution in the optical system of fiber-optical converters of physical quantities of reflective type: monograph]. Penza: IITsPGU, 2008, 102 p. [In Russian]
2. Murashkina T. I., Badeeva E. A. *Volokonno-opticheskie pribory i sistemy: Nauchnye razrabotki NTTs «Nano-tehnologii volokonno-opticheskikh sistem» Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta* [Fiber-optic devices and systems: Scientific developments of the STC "Nano-technologies of fiber-optical systems" of the Penza state University]. Saint-Petersburg: Politehnika, 2018, part I, 187 p. [In Russian]
3. Okosi T., Okamoto K., Otsu M., Nisikhara Kh., Kyuma K., Khatate K. *Volokonno-opticheskie datchiki. Proizvodstvennoe izdanie* [Fiber-optic sensors. Production edition]: transl. from Japan. by G. N. Gorbunov. Leningrad: Enegroatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1990, 252 p. [In Russian]
4. Murashkina T. I., Pivkin A. G. *Volokonno-opticheskie datchiki davleniya atnyuatorsnogo tipa dlya raketnoy tekhniki: monografiya* [Fiber-optic attenuator-type pressure sensors for rocket technology: monograph]. Penza: Izd-vo PenzGU, 2005, 150 p. [In Russian]
5. Badeeva E. A., Gorish A. V., Murashkina T. I. et al. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya amplitudnykh volokonno-opticheskikh datchikov davleniya s otkrytym opticheskim kanalom: monografiya* [The theoretical basis for the design of amplitude fiber-optic pressure sensors with an open optical channel : a monograph]. Moscow: MGUL, 2004, 246 p. [In Russian]
6. Murashkina T. I. *Teoriya, raschet i proektirovanie volokonno-opticheskikh izmeritel'nykh priborov i sistem: ucheb. posobie* [Theory, calculation and design of fiber-optic measuring devices and systems: textbook. stipend]. Penza: Izd-vo PenzGU, 1999, 133 p. [In Russian]
7. Badeeva E. A. *Volokonno-opticheskie datchiki davleniya dlya informatsionno-izmeritel'nykh sistem raketno-kosmicheskoy i aviatsionnoy tekhniki: dis. d-ra tekhn. nauk* [Fiber-optical pressure sensors for information and measurement systems of rocket, space and aviation equipment: dis. ... dr. techn. sciences]. Penza, 2017, 463 p. [In Russian]
8. Badeeva E. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [News of higher educational institutions. Volga region. Technical science]. 2016, no. 4, pp. 102–113. [In Russian]
9. Sivukhin D. V. *Obshchiy kurs fiziki* [The course of General physics]. Moscow: Fizmatlit, 2005, vol. I, 560 p. [In Russian]
10. Timoshenko S. P., Voynovskiy-Kriger S. *Plastinki i obolochki* [Plates and shells]. Moscow: Nauka, 1966, 635 p. [In Russian]

Полякова Екатерина Алексеевна
 начальник отдела надежности,
 Научно-исследовательский институт
 физических измерений
 (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
 E-mail: yek.polyakova2016@yandex.ru

Polyakova Ekaterina Alekseevna
 head of department of reliability,
 Research Institute of physical
 measurements
 (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Бадеева Елена Александровна
доктор технических наук, профессор,
кафедра бухгалтерского учета,
налогообложения и аудита,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: badeeva_elena@mail.ru

Мурашкина Татьяна Ивановна
доктор технических наук, профессор,
кафедра приборостроения,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: timurashkina@mail.ru

Бадеев Александр Валентинович
кандидат технических наук,
старший специалист,
Центр информационно-аналитического
обеспечения систем социально-
гигиенического мониторинга г. Пензы
(Россия, г. Пенза, ул. Куйбышева, 30)
E-mail: badeyev@mail.ru

Славкин Илья Евгеньевич
аспирант,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ilya-slavkin@yandex.ru

Badeeva Elena Aleksandrovna
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of accounting,
taxation and auditing,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Murashkina Tatyana Ivanovna
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of instrument making,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Badeev Alexander Valentinovich
candidate of technical sciences,
senior specialist,
Center for information and analytical
support of social and hygienic monitoring
systems in Penza
(30 Kuybysheva street, Penza, Russia)

Slavkin Ilya Evgenevich
postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Улучшение технических характеристик волоконно-оптических измерительных преобразователей / Е. А. Полякова, Е. А. Бадеева, Т. И. Мурашкина, А. В. Бадеев, И. Е. Славкин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 126–135. – DOI 10.21685/2227-8486-2020-1-10.