

13. Volynkin V.M., Khankov S.I., Cherepanov A.N. *Ustroistvo dlya nagrevaniya i plavleniya khimicheskikh produktov. Svidetel'stvo na poleznuyu model' no. 20909* [Device for heating and melting of chemical products. Certificate on useful model no.20909]. Filing no. 2001118373. Priority date: 04.07.2001. Publication date: 10.12.2001. Bull. no. 34. IPC 7 V 67 D 5/00, V 65 D 88/74.
14. Volynkin V.M., Khankov S.I., Cherepanov A.N. *Ustroistvo dlya plavleniya i nagrevaniya khimicheskikh produktov. Svidetel'stvo na poleznuyu model' no. 21195* [Device for melting and heating of chemical products. Certificate on useful model no. 21195]. Filing no. 2001118375. Priority date: 04.07.2001. Publication date: 27.12.2001. Bull. no. 36. IPC 7 V 67 D 5/00.
15. Cherepanov A.N., Khankov S.I. *Metody rascheta protsessov rasplavleniya organicheskogo khimicheskogo syr'ya s prosvetlyayushcheysya zhidkoi fazoi* [Methods of calculation of processes of melting of organic chemical raw materials with the clarified liquid phase]. St. Petersburg, L.T. Tuchkov Scientific Technical Center, 2006, 230 p.

- Черепанов Аркадий Николаевич** – кандидат технических наук, докторант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия, Leva0007@rambler.ru
- Arkady Cherepanov** – PhD, doctoral candidate, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia, Leva0007@rambler.ru

УДК 681.7.068: 519.25

## О ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НЕСОВЕРШЕНСТВАХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОГО СТЕРЖНЯ ДЛЯ ЗАГОТОВКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА PANDA<sup>1</sup>

Н.В. Семенов<sup>a</sup>, Н.А. Труфанов<sup>a</sup>, А.А. Адамов<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, nikita@studio-gd.ru

<sup>b</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия, adamov@icmm.ru

На основе экспериментальных данных о геометрии сечений партии силовых стержней для заготовки анизотропного оптического волокна типа Panda выявлены зависимости изменения радиальных размеров заготовок от угловой координаты. Описан алгоритм статистической обработки геометрических параметров, который позволяет найти подобие в геометрии сечений разных стержней и выявить характерную форму сечения для всех образцов. Алгоритм заключается в смещении точек зависимостей радиусов от угловых координат с целью нахождения кривых с максимальным показателем корреляции, а затем на основе найденных кривых находится распределение значений радиусов для каждой угловой координаты. Показано, что при изготовлении силовых стержней с переменным содержанием легирующих добавок по радиусу модифицированным методом химического осаждения из газовой фазы не удается получить идеально круглую форму поперечного сечения стержня. При этом наиболее существенные отклонения (до 10%) от кругового профиля фиксируются для границы, разделяющей легированную сердцевину стержня и наружный слой чистого кварца, а отклонения других границ от круга незначительны (десятые доли процента). Установлено, что закономерным образом в условиях данного технологического процесса реализуется некруговая форма поперечного сечения легированного ядра, которую можно условно назвать формой типа «огранка» (с тремя «гранями» разной длины). Последующий длительный контроль формы поперечного сечения силовых стержней подтвердил повторяемость полученных результатов.

**Ключевые слова:** силовой стержень, оптическое волокно Panda, технологический разброс геометрических параметров, статистическая обработка результатов измерений.

## TECHNOLOGICAL IMPERFECTIONS OF FORCE ROD GEOMETRICAL PARAMETERS FOR PANDA OPTICAL FIBERS PRODUCTION<sup>2</sup>

N. Semenov<sup>c</sup>, N. Trufanov<sup>c</sup>, A. Adamov<sup>d</sup>

<sup>c</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, nikita@studio-gd.ru

<sup>d</sup> Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, adamov@icmm.ru

The paper deals with the dependence in radial dimensions changes of the workpieces on the angular coordinate based on experimental data about the geometry of the cross-sections of force rods batch for the production of anisotropic Panda-type optical fibers. An algorithm of geometrical parameters statistical processing is described, which gives the possibility to find the similarity in the geometry of the cross-sections of different force rods, and reveal the characteristic shape of the cross-section for all the samples. The algorithm contains the shift of points for dependence changes in radial dimensions of the workpieces on the angular coordinate in order to find curves with maximum correlation coefficient. Afterwards, the distribution of the radius values for each angular coordinate is found basing on the obtained curves. It is demonstrated that in case of the force rods production with variable amount of alloying dopes on the radius via the MCVD method, it is impossible to get

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект №13-08-96036 p\_ural\_a).

<sup>2</sup> The work was done with financial support from the Russian Foundation for Basic Research (project №13-08-96036 r\_ural\_a)

ideally round shape of the cross-section. At the same time, the biggest deviation from the round profile (up to 10%) is fixed on the border between the alloyed core of the force rod and the external layer of the pure quartz, whereas the deviations on other borderlines are negligible (a tenth hundredth of a percent). It is determined that within this technological process the non-circular cross-sectional shape of alloyed core is realized, which can be called “faceting” for convenience (with three “faces” of different length). The following long control of the cross-sectional shape of the force rods has proved the results recurrence.

**Keywords:** force rod, Panda optical fiber, technological geometry scattering, statistical processing of measurement results.

### Введение

Для изготовления волоконно-оптических датчиков широко применяются анизотропные кварцевые оптические волокна [1–4], поддерживающие поляризацию сигнала за счет разности механических напряжений в светопроводящей жиле, например, волокна типа Panda. Создание необходимого уровня разности главных напряжений в жиле оптического волокна Panda обеспечивается введением в состав заготовки для вытяжки волокна специальных силовых элементов из легированных кварцевых стекол, имеющих большее значение коэффициента линейного температурного расширения, чем чистый кварц [5–7]. Волокна типа Panda имеют два круглых цилиндрических силовых стержня с переменным содержанием легирующих добавок по радиусу, изготовленных с помощью модифицированного метода химического осаждения из газовой фазы (MCVD) [8].

Конструирование волокна Panda обычно ведется с использованием предположения о том, что сечения силовых стержней имеют круговую форму [9–11], однако на практике профиль сечения зависит от множества факторов, предопределенных технологическим процессом изготовления. Технологический разброс геометрических параметров формы сечения может сказываться на прочности самих стержней и на оптических характеристиках волокон, в составе которых применяются такие силовые элементы.

В настоящей работе на основе измерений, анализа и статистической обработки [12] значений геометрических параметров большой партии изготовленных силовых стержней для заготовок анизотропного волокна Panda с помощью программного пакета MATLAB [13, 14] устанавливается математический закон, описывающий возможные отклонения радиуса легированной зоны от круговой формы.

### Описание технологии получения данных

Измерение геометрических параметров исследуемых стержней производится с помощью анализатора «2600 Photon Kinetics». Прибор позволяет осуществлять поворот исследуемой заготовки на заданный угол и выбор сечения по длине стержня. Изучается профиль коэффициента преломления в сечении заготовки на основе изменения углов отклонения лазерного луча, сканирующего заготовку по диаметру, а затем определяется положение границ слоев с разными оптическими средами.

Рассмотренные силовые стержни производились на одном и том же оборудовании, сходны по конструкции и состоят из трех различных по химическому составу слоев (рис. 1). Основным интересом представляет изучение геометрии наружного кварцевого слоя силового стержня, а также границ между различными оптическими средами, образованных за счет легирования заготовок разными добавками.

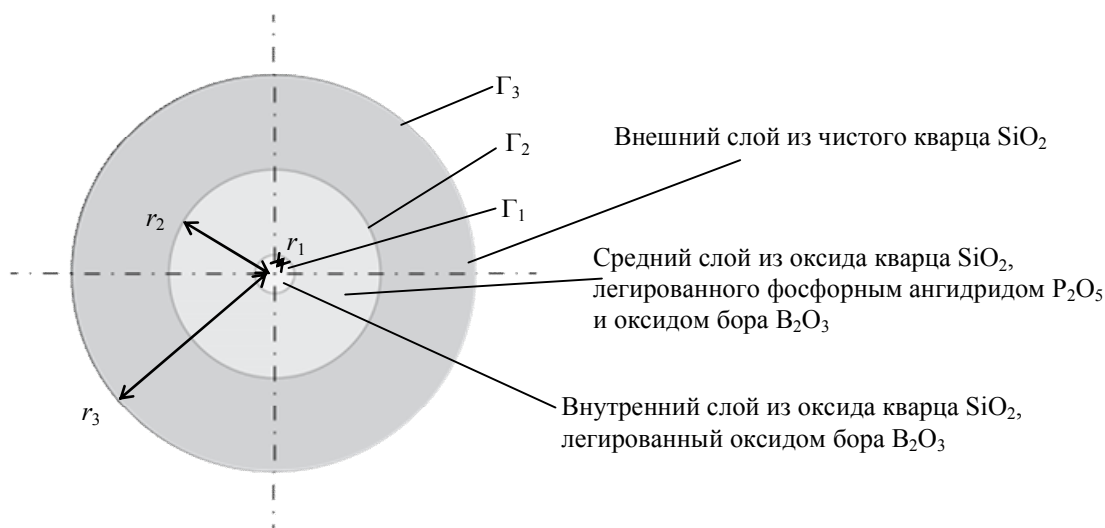


Рис. 1 – Схема осевого сечения заготовки силового стержня:  $\Gamma_1$  – граница между внутренним и средним легированными слоями;  $\Gamma_2$  – граница между средним и внешним слоями;  $\Gamma_3$  – наружная граница заготовки

Для каждого стержня замеры положения границ  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  и  $\Gamma_3$  снимаются в 15 радиальных сечениях (30 точек) и 10 осевых сечениях. На рис. 2 в качестве примера показаны полученные данные для одного из типовых осевых сечений. Всего было обработано 100 стержней, изготовленных друг за другом на одном и том же оборудовании за 5 месяцев. Таким образом, имеется по 30 наборов фактически замеренных зависимостей радиусов от угла в 30 точках для каждого стержня  $R_{nij}(\varphi_k)$ ,  $n = \overline{1,3}$ ,  $i = \overline{1,100}$ ,  $j = \overline{1,10}$ ,  $k = \overline{1,30}$ , где  $n$  – номер границы;  $i$  – номер стержня из набора;  $j$  – номер сечения по длине;  $k$  – номер углового сечения. Длина заготовок составляет  $L \approx 0,5$  м. Проектные значения радиусов: сердцевин  $r_1 = 0,46$  мм, двухкомпонентного слоя  $r_2 = 2,8$  мм, наружного слоя  $r_3 = 5,3$  мм.

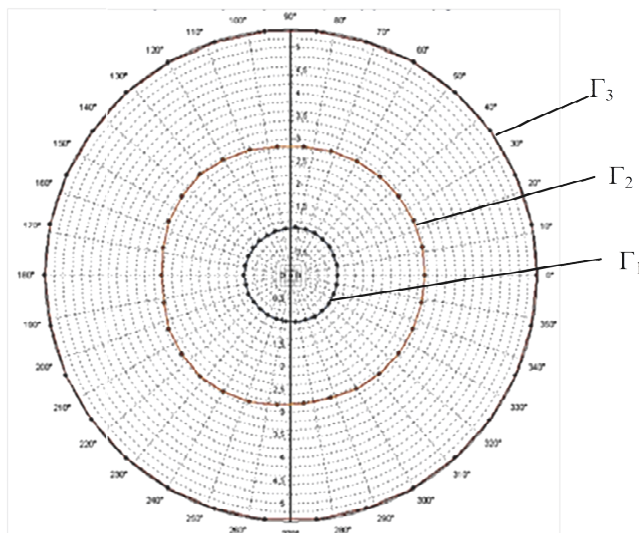


Рис. 2. Диаграмма зависимости экспериментально установленных радиусов от угловой координаты  $R_{nij}(\varphi_k)$  для одного из сечений типового силового стержня

### Статистическая обработка результатов

Анализ данных на границах  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_3$  не позволил выявить существенных отклонений от проектных значений (разброс в значениях  $R_{1ij}(\varphi_k)$  и  $R_{3ij}(\varphi_k)$  составляет десятые доли процента от среднего значения в рамках конкретного стержня). Внешняя граница стержня ( $\Gamma_3$ ) имеет очень малые случайные отклонения от круговой формы. Производитель исходных опорных трубок, из которых изготавливаются заготовки, указывает максимальное отклонение радиуса внешней границы не более чем 0,2% от проектного значения. В связи с этим далее речь идет о положении точек на границе  $\Gamma_2$  между зоной чистого оксида кремния  $\text{SiO}_2$  и легированной частью, так как разброс значений функций  $R_{2ij}(\varphi_k)$  на этой границе довольно велик и достигает 10% (до 275 мкм) и более в рамках одного стержня. Для упрощения записей индекс  $n$  принимаем равным двум и опускаем  $R_{ij}(\varphi_k) = R_{2ij}(\varphi_k)$ .

Будем считать функцию радиуса от угловой координаты  $R_{ij}(\varphi_k)$  случайной величиной, где  $i$  – номер стержня;  $j$  – номер осевого сечения;  $k$  – номер угловой координаты.

При построении функции изменения радиуса от угла  $R_{ij}(\varphi_k)$  для 10 сечений по длине для каждого стержня было выявлено, что при наложении графиков друг на друга они практически полностью повторяются. Исходя из этого, для описания геометрии сечений отдельного стержня можем использовать среднее арифметическое значение радиусов соответствующих точек по всем осевым сечениям стержня:

$$R_i(\varphi_k) = \sum_{j=1}^{10} \frac{R_{ij}(\varphi_k)}{10}.$$

Анализ зависимостей  $R_i(\varphi_k)$  на границе  $\Gamma_2$  для разных стержней позволяет установить их качественное сходство. На всех графиках визуально определяется по три характерных «максимума» и по три «минимума» (вид зависимостей соответствует изображенным на рис. 3).

Поскольку при помещении заготовки в анализатор начальное положение отсчета по углу никак не регламентируется, заготовки, несмотря на схожесть геометрии, оказываются повернутыми друг относительно друга по угловой координате. Наложение графиков друг на друга показывает, что схожести общей картины без предварительной обработки не видно. Построение нормированной корреляционной матрицы также указывает на то, что графики в таком виде между собой не коррелируют.

Для обработки результатов измерений используется следующий алгоритм.

1. За основу выбирается любая зависимость из исследуемого набора  $R_n(\varphi_k)$ ,  $n = \overline{1,100}$ .
2. Выбирается произвольная зависимость  $R_m(\varphi_k)$ ,  $m \neq n$ ,  $m = \overline{1,100}$  из исследуемого набора и проверяется на наличие корреляции с кривой  $R_n(\varphi_k)$  по формуле вычисления нормированного корреляционного момента  $r_{nm}$  [15]:

$$r_{nm} = \frac{M(R_n - M(R_n))M(R_m - M(R_m))}{\sigma_n \sigma_m},$$

где  $M$  – математическое ожидание;  $\sigma_n, \sigma_m$  – средние квадратичные отклонения для  $R_n$  и  $R_m$  соответственно.

Кривые сравниваются 30 раз (количество точек соответствует числу возможных комбинаций), при этом каждый раз происходит сдвиг: все точки смещаются влево, а самая левая становится самой правой,  $R'_m(\varphi_k) = R_m(\varphi_{k+1})$ ,  $k = \overline{1,29}$  и  $R'_m(\varphi_{30}) = R_m(\varphi_1)$ .

3. Среди 30 проверенных комбинаций находится та, у которой получается максимальный нормированный корреляционный момент с эталонной кривой  $n$ , и запоминается, а график сохраняется с учетом найденного сдвига  $R'_i(\varphi_k) = R'_m(\varphi_k)$ , где  $i = m$ . Таким образом, комбинация, полученная с учетом сдвига всех точек на  $m$  позиций влево, является максимально подобной эталонной среди возможных.
4. Пункты 2 и 3 повторяются до тех пор, пока не будут обработаны данные обо всех исследуемых стержнях.

Реализация описанной процедуры дает набор кривых  $R'_i(\varphi_k)$ , максимально коррелирующих между собой (рис. 3): между всеми кривыми нормированный корреляционный момент  $r_{nm} > 0,9$ . На рис. 3 и далее значения радиусов записываются в виде отношения реального радиуса к среднему.

Таким образом, отклонение формы легированной сердцевинки от круговой повторяется практически на всех изделиях данной партии. Проведем статистический анализ полученных зависимостей  $R'_i(\varphi_k)$ .

Установлено, что распределения радиусов  $f(R'_i(\varphi_k))$ ,  $k = \overline{1,10}$  близки к нормальному закону (рис. 4).

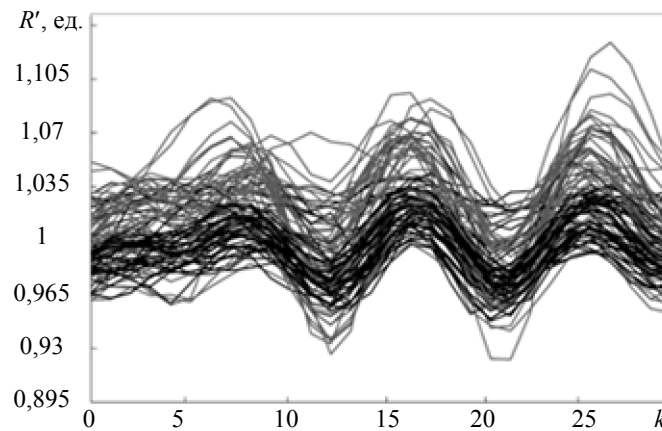


Рис. 3. Распределения  $R'_i(\varphi_k)$  для всех исследуемых стержней после обработки

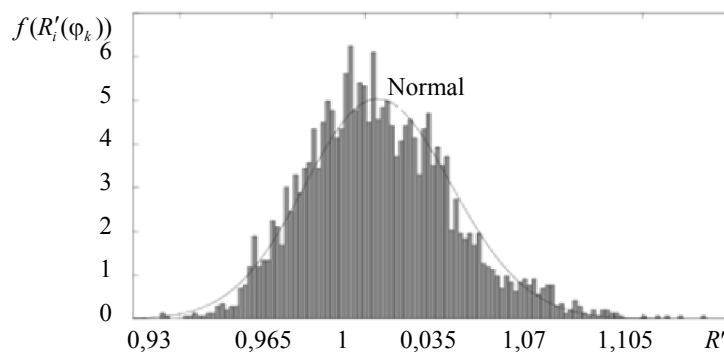


Рис. 4. Вероятность распределения радиусов  $R'_i(\varphi_k)$  в одном типовом угловом положении  $\varphi_k$

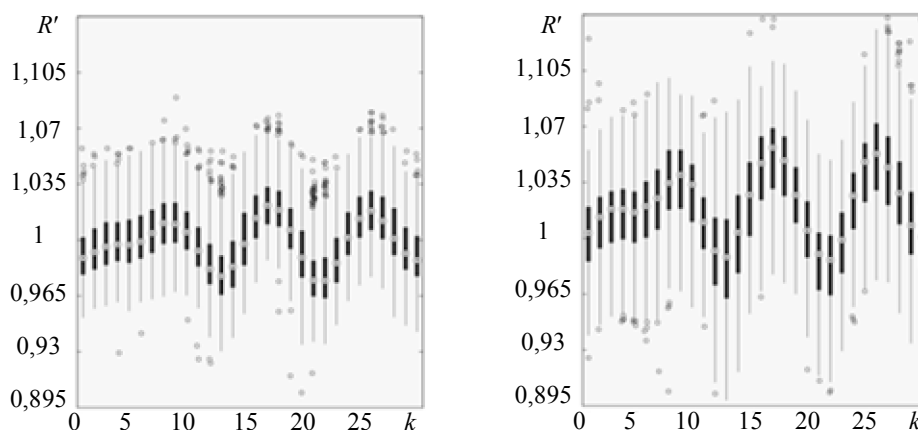


Рис. 5. Распределения вероятностей радиуса  $R'_i(\varphi_k)$ ,  $k = \overline{1,30}$ : заготовки прошедшие (а) и не прошедшие (б) технологический контроль соответственно

Для наглядности распределения радиусов во всех сечениях можно представить в виде общего графика типа «ящик с усами» (рис. 5). Жирными вертикальными линиями обозначен интерквартильный размах, т.е. 50% всех значений входит в этот диапазон. Границы тонких линий («концы усов») – это границы статистически значимой выборки. Примерно посередине жирных линий указаны медианы, соответствующие серединам выборки, а за пределами линий – одиночные круги, соответствующие случайным выбросам. Видно, что у заготовок, прошедших технологический контроль (рис. 5, а), размах значений меньше, чем у заготовок, не прошедших контроль (отбракованных) (рис. 5, б). Случайных выбросов гораздо больше на графике рис. 5, б. По положению медиан можно судить о симметричности распределения значений в каждом угловом сечении  $\varphi_k$ .

Зависимости математических ожиданий от номера углового сечения  $M[R'_i(\varphi_k)]$  также меньше у заготовок, прошедших заводской контроль. Это свидетельствует о том, что увеличение радиальных размеров легированного слоя, увеличение отклонения от круглости или величина случайных выбросов радиуса могут быть связаны с непрохождением технологического контроля. Также следует отметить, что на всех графиках  $M[R'_i(\varphi_k)]$  наблюдаются три явных максимума и три минимума, т.е. особенности данного технологического процесса изготовления силовых стержней закономерно приводят к реализации некруговой формы поперечного сечения, которую можно условно назвать формой типа «огранка» (с тремя «гранями» разной длины).

### Заключение

Показано, что при изготовлении методом MCVD силовых стержней с переменным содержанием легирующих добавок по радиусу, предназначенных для заготовки анизотропного оптического волокна типа Panda, не удастся получить идеально круглую форму поперечного сечения стержня. При этом наиболее существенные отклонения от кругового профиля фиксируются для границы, разделяющей легированную сердцевину стержня и наружный слой чистого кварца, а отклонения других границ от круга незначительны. В результате статистической обработки результатов измерений геометрических параметров стержней за достаточно длительный срок установлено, что закономерным образом в условиях данного технологического процесса реализуется некруговая форма поперечного сечения легированного ядра, которую можно условно назвать формой типа «огранка» (с тремя «гранями» разной длины). Имеются основания считать, что результат есть следствие реализации при изготовлении стержня цепочки технологических операций, сопровождающихся неосесимметричными циклическими термосиловыми воздействиями.

### References

1. Guan R., Zhu F., Gan Z., Huang D., Liu S. Stress birefringence analysis of polarization maintaining optical fibers. *Optical Fiber Technology*, 2005, vol. 11, no. 3, pp. 240–254.
2. Okosi T., Okamoto K., Otsu M., Nisikhara Kh., Kayuma K., Khatate K. *Volokonno-opticheskie datchiki* [Fiber Optic Sensors]. Translation from Japanese. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990, 256 p.
3. Grodnev I.I., Larin Yu.T., Teumin I.I. *Opticheskie kabeli: konstruktii, kharakteristiki, proizvodstvo i primeneniye* [Optical cables: design, characterization, production and application]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991, 264 p.
4. Butusov M.M., Galkin S.L., Orobinskii S.P., Pal B.P. *Volokonnaya optika i priborostroenie* [Fiber Optics and Instrumentation]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987, 328 p.
5. Mazurin O.V., Strel'tsina M.V., Shvaiko-Shvaikovskaya T.P. *Svoistva stekol i stekloobrazuyushchikh rasplavov* [Properties of glasses and glass-forming melts]. Leningrad, Nauka Publ., 1973, vol. 1, 444 p.

6. Leko V.K., Mazurin O.V. *Svoistva kvartseвого стекла* [Properties of the quartz glass]. Leningrad, Nauka Publ., 1985, 166 p.
7. Shelby J.E. *Introduction to glass science and technology*. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge, The Royal Society of Chemistry, 2005, 291 p.
8. Burkov V.D., Ivanov G.A. *Fiziko-tehnologicheskie osnovy volokonno-opticheskoi tekhniki* [Physical and technological bases of fiber-optic technology]. Moscow, Moscow State Forest University Publ., 2007, 222 p.
9. Trufanov A.N., Smetannikov O.Yu., Trufanov N.A. Numerical analysis of residual stresses in preform of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers. *Optical Fiber Technology*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 156–161.
10. Smetannikov O.Yu., Trufanov N.A. Technological and residual stresses in the non-uniform vitrifying cylindrical rod. *Composite Mechanics and Design*, 2009, vol. 15, no. 2, pp. 180–191.
11. Trufanov N.A., Smetannikov O.Yu., Trufanov A.N. Modeli formirovaniya polei tekhnologicheskikh i ostatochnykh napryazhenii v usloviyakh relaksatsionnogo perekhoda (steklovaniya) [The model of formation of fields of technological and residual stresses in terms of relaxation of transition (vitrification)]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I.Lobachevskogo*, 2011, no. 4 (5), pp. 2534–2536.
12. Pugachev V.S. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2002, p. 91.
13. Chen K., Giblin P., Irving A. *Mathematical Explorations with MATLAB*. Cambridge University Press, 1999, 322 p. (Russ. ed.: Chek K., Dzhiblin P., Irving A. *MATLAB v matematicheskikh issledovaniyakh*. Moscow, Mir Publ., 2001, 346 p.)
14. Martynov N.N., Ivanov A.P. *MATLAB 5.X. Vychisleniya, vizualizatsiya, programmirovaniye* [MATLAB 5.X. Computing, visualization, programming]. Moscow, KUDITS-OBRAZ Publ., 2000, p. 47.
15. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostei* [Probability theory]. 7<sup>nd</sup> ed. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2001, 575 p.

<b>Семенов Никита Владимирович</b>	– аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, nikita@studio-gd.ru
<b>Труфанов Николай Александрович</b>	– доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, nat@pstu.ru
<b>Адамов Анатолий Арсангалеевич</b>	– доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное учреждение науки Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия, adamov@icmm.ru
<b>Nikita Semenov</b>	– postgraduate, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, nikita@studio-gd.ru
<b>Nikolai Trufanov</b>	– D.Sc., Professor, Department head, Perm National Research Polytechnic University, Professor, Perm, Russia, nat@pstu.ru
<b>Anatoly Adamov</b>	– D.Sc., Professor, leading scientific researcher, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, adamov@icmm.ru