



УДК 535.92

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАМОТКИ АНИЗОТРОПНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С РАЗЛИЧНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ НАТЯЖЕНИЯ НА СТЕПЕНЬ СОХРАНЕНИЯ H -ПАРАМЕТРА

А.Б. Мухтубаев^а, С.М. Аксарин^а, В.Е. Стригалева^а, Р.Л. Новиков^а^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: mukhtubaev.ab@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 21.04.15, принята к печати 18.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-803-808

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Мухтубаев А.Б., Аксарин С.М., Стригалева В.Е., Новиков Р.Л. Исследование влияния намотки анизотропных оптических волокон с различной величиной натяжения на степень сохранения H -параметра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 5. С. 803–808.

Аннотация

Предмет исследования. Исследовано влияние намотки анизотропных оптических волокон с эллиптической напрягающей оболочкой на степень сохранения H -параметра. Данный тип оптических волокон используется при изготовлении волоконного контура волоконно-оптических гироскопов. **Метод исследования.** Метод исследования основан на применении поляризационного сканирующего интерферометра Майкельсона в качестве измерительного устройства. Источником излучения служил суперлюминесцентный диод с центральной длиной волны 1575 нм и полушириной спектра 45 нм. Исследования проводились с анизотропным оптическим волокном с эллиптической напрягающей оболочкой длиной 50 м, намотанным одним слоем виток к витку на катушку диаметром 18 см, которая используется в конструкции волоконно-оптического гироскопа. Сила натяжения оптического волокна контролировалась в процессе намотки на специальном станке. **Основные результаты.** Выявлено, что при увеличении силы натяжения с 0,05 Н до 0,8 Н значение H -параметра увеличивается с $7 \cdot 10^{-6}$ 1/м до $178 \cdot 10^{-6}$ 1/м соответственно, т.е. растет коэффициент связи ортогональных мод в исследуемом волокне. Таким образом, необходимо учитывать продольную силу натяжения волокна при проектировании и производстве волоконно-оптических датчиков высокого класса точности: чем меньше сила намотки волокна, тем выше степень сохранения распределенного H -параметра. При проектировании волоконно-оптических гироскопов рекомендуется продольная сила натяжения анизотропного оптического волокна с эллиптической напрягающей оболочкой, равная 0,2 Н. **Практическая значимость.** Предложенный в исследовании метод сканирующего интерферометра Майкельсона может найти применение в процессе производства для определения качества намотки оптического волокна – отсутствия локальных дефектов, значения H -параметра волокна.

Ключевые словаполяризация, анизотропное оптическое волокно, H -параметр, намотка.**Благодарности**

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту 02.G25.31.0044.

IMPACT STUDY OF ANISOTROPIC OPTICAL FIBERS WINDING WITH DIFFERENT TENSION VALUE ON THE H -PARAMETER INVARIANCE DEGREE

A.B. Mukhtubayev^а, S.M. Aksarin^а, V.E. Strigaleva^а, R.L. Novikov^а^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: mukhtubaev.ab@gmail.com

Article info

Received 21.04.15, accepted 18.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-803-808

Article in Russian

For citation: Mukhtubayev A.B., Aksarin S.M., Strigaleva V.E., Novikov R.L. Impact study of anisotropic optical fibers winding with different tension value on the H -parameter invariance degree. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 5, pp. 803–808.

Abstract

Subject of Research. We have investigated the effect of anisotropic optical fibers winding with an elliptical sheath subjected to stress on the H -parameter invariance degree. This type of optical fiber is used in the manufacture of fiber loop

in fiber-optic gyroscopes. **Method of Research.** The method of research is based on the application of Michelson polarization scanning interferometer as a measuring device. Superluminescent diode with a central wavelength of 1575 nm and a half-width of the spectrum equal to 45 nm is used as a radiation source. The studies were carried out with anisotropic optical fiber with 50 m long elliptical sheath subjected to stress. The fiber was wound with one layer turn to turn on the coil with a diameter of 18 cm, which is used in the design of fiber-optic gyroscope. The tension force of the optical fiber was controlled during winding on a special machine. **Main Results.** It was found that at the increase of tension force from 0.05 N to 0.8 N the value of H -parameter increases from 7×10^{-6} 1/m up to 178×10^{-6} 1/m, respectively; i.e. the coupling coefficient of orthogonal modes in the test fiber is being increased. Thus, it is necessary to consider the longitudinal tension force of fiber in the design and manufacture of the fiber-optic sensors of high accuracy class: the less the fiber winding power, the higher invariance degree of distributed H -parameter. The longitudinal tension force of anisotropic optical fiber with elliptical sheath subjected to stress equal to 0.2 N is recommended in the process of designing fiber-optic gyroscopes. **Practical Relevance.** The proposed method of Michelson scanning interferometer is usable in the production process for quality determination of the optical fiber winding: no local defects, value controlling of fiber H -parameter.

Keywords

polarization, anisotropic optical fiber, H -parameter, winding.

Acknowledgements

The work was carried out at ITMO University under financial support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation according the project 02.G25.31.0044.

Введение

Анизотропные оптические волокна обладают свойством сохранять линейно-поляризованное излучение по всей своей длине. Такие волокна с двулучепреломлением широко используются при проектировании волоконно-оптических датчиков интерферометрического типа и оптических трактов передачи информации. Сохранение поляризации достигается за счет создания асимметрии в структуре волокна либо под действием индуцированной механической напряженности материала, создаваемой в процессе производства волокна, которая приводит к возникновению модового двулучепреломления. Такое двулучепреломление свидетельствует о способности удерживать поляризацию в волокне.

Одним из препятствий на пути создания высокоточных приборов является влияние поляризационных эффектов, связанных с рассогласованиями поляризации интерферирующих волн, приводящее к возникновению ошибок и искажению сигнала интерферометра. Исходя из этого, при проектировании интерферометрических датчиков необходимо использование анизотропных волокон с минимальным значением H -параметра (порядка 10^{-6} 1/м). Помимо этого, способность сохранять поляризацию введенного излучения также имеет предел [1]. Таким образом, связанные с двулучепреломлением параметры являются наиболее важными при рассмотрении оптических волокон с двулучепреломлением. К таким параметрам относятся: величина модового двулучепреломления (фазовое двулучепреломление), величина группового двулучепреломления (поляризационно-модовая дисперсия), дисперсия двулучепреломления, коэффициент экстинкции сохранения поляризации и H -параметр [1–5].

В работах [6–8] уже было проведено исследование зависимости степени сохранения поляризации от радиуса намотки двулучепреломляющего оптического волокна. Однако при намотке с некоторой силой натяжения оптического волокна всегда возникают напряжения в его структуре, что приводит к ухудшению H -параметра. Целью настоящей работы являются исследование влияния различной величины натяжения намотки анизотропных оптических волокон с эллиптической напрягающей оболочкой на сохранение распределенного H -параметра и определение оптимального значения натяжения для минимизации поляризационных преобразований в исследуемом волокне.

Схема экспериментальной установки

Для анализа распределенных локальных неоднородностей (дефектов), которые приводят к поляризационным преобразованиям, в анизотропных оптических волокнах классические методы (к примеру, метод скрещенных поляризаторов [9, 10]) неприменимы. Инструментом для измерения этих поляризационных преобразований может служить методика, основанная на широкополосной интерферометрии. Принцип основан на использовании широкополосного источника излучения и сканирующего интерферометра с анализатором на входе для выделения ортогональных поляризационных мод, распространяющихся в оптическом волокне [11, 12]. В настоящей работе в качестве инструмента для измерения поляризационных преобразований, возникающих в анизотропном оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой за счет влияния силы натяжения волокна, использовался поляризационный сканирующий интерферометр Майкельсона. Когда в интерферометре создается разность оптических путей, превышающая длину декогерентности, амплитуда интерференционного сигнала стремится к нулю. Таким образом, можно добиться высокой точности в определении места локального преобразования в оптическом тракте, а по амплитуде интерференционного сигнала дать оценку величине поляризационного преобразования [11].

В качестве широкополосного источника излучения использовался суперлюминесцентный диод ThorLabs S5FC1005SXL с центральной длиной волны 1575 нм и полушириной спектра 45 нм. Световое

излучение проходит через поляризатор (рис. 1), где поляризуется, затем линейно-поляризованное излучение вводится в оптическое волокно под некоторым углом α к одной поляризационной оси. При сканировании оптического волокна смещением зеркала интерферометра Майкельсона на интерферограмме будут возникать интерференционные пики, соответствующие местоположению локального преобразования. Минимизируя величину последнего пика, можно добиться ввода излучения в поляризационную ось волокна под углом $\alpha = 0^\circ$. По среднему значению видности в области намотки волокна можно определить величину H -параметра для этой области.

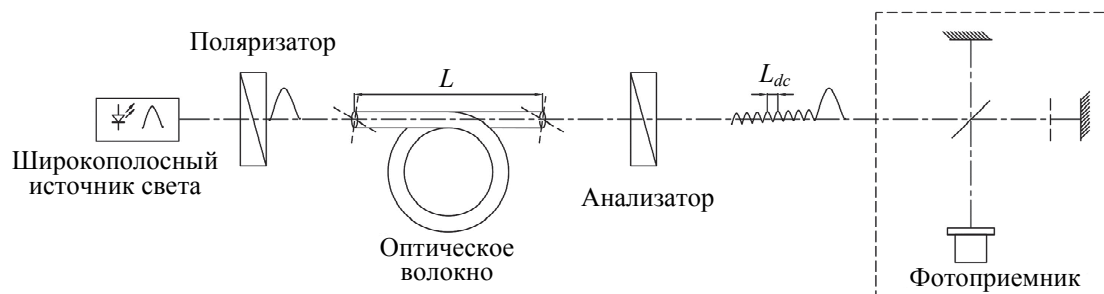


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию влияния намотки анизотропных оптических волокон на степень сохранения H -параметра. L – длина анизотропного оптического волокна с эллиптической напрягающей оболочкой, L_{dc} – длина декогерентности

Исследование влияния силы натяжения анизотропного оптического волокна на величину H -параметра

В ходе работы исследовалось анизотропное оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой (рис. 2) длиной 50 м, которое наматывалось с заданной силой натяжения одним слоем витков к витку на катушку диаметром 18 см.

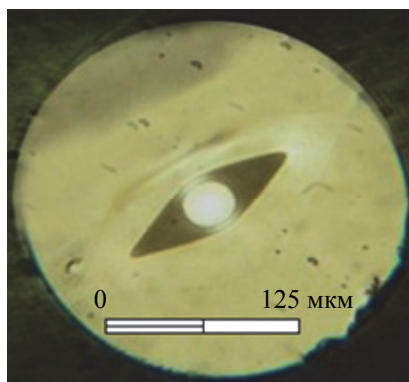


Рис. 2. Фото торца исследуемого анизотропного оптического волокна с эллиптической напрягающей оболочкой

Были получены видности интерференционных картин для каждой исследуемой силы натяжения оптического волокна (рис. 3). На интерференционных картинах последний пик характеризует величину угла рассогласования между плоскостью поляризации излучения и поляризационной осью волокна при вводе оптического излучения, а область до этого пика соответствует зоне намотки. Также была получена видность интерференционной картины аналогичного анизотропного волокна длиной 15 м, которое было свернуто без натяжения (рис. 4). Из полученных характеристик по среднему уровню определяется среднее значение видности интерференционной картины, а затем, исходя из расчетов, вычисляется значение распределенного H -параметра [1]:

$$H = \frac{V_c^2}{L_d},$$

где H – величина поляризационных преобразований, H -параметр; V_c – видность интерференционной картины; L_d – длина деполаризации анизотропного волокна.

Значение длины деполаризации анизотропного оптического волокна определяется как [12, 13]

$$L_d = \frac{\lambda^2}{\Delta n \cdot \Delta \lambda},$$

где λ – центральная длина волны широкополосного источника оптического излучения (1575 нм); Δn – разница эффективных показателей преломления поляризационных мод в двулучепреломляющем волокне

($6 \cdot 10^{-4}$); $\Delta\lambda$ – ширина спектра источника оптического излучения (45 нм). Подставив необходимые данные в формулы, получим значение длины деполяризации исследуемого анизотропного оптического волокна, равное 0,09 м.

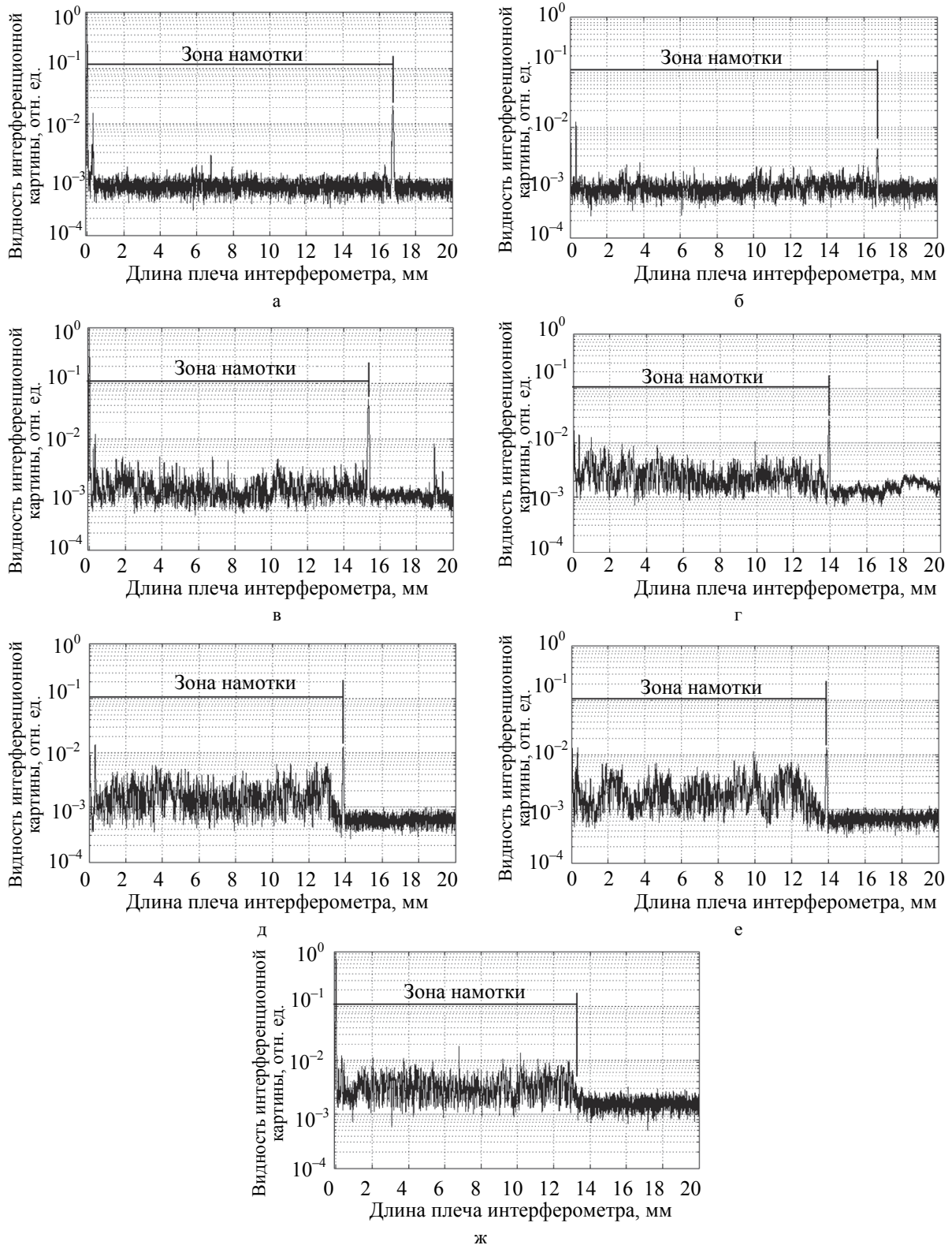


Рис. 3. Видности интерференционной картины, полученные сканированием анизотропного оптического волокна длиной 50 м, намотанного с различными силами натяжения: 0,05 Н (а); 0,1 Н (б); 0,2 Н (в); 0,3 Н (г); 0,4 Н (д); 0,5 Н (е); 0,8 Н (ж)

На рис. 5 представлена зависимость, полученная в ходе исследования распределенного H -параметра от продольной силы натяжения волокна на катушку.

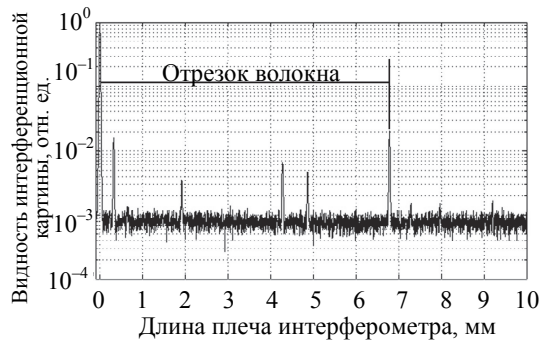


Рис. 4. Видность интерференционной картины, полученная сканированием свернутого анизотропного оптического волокна длиной 15 м

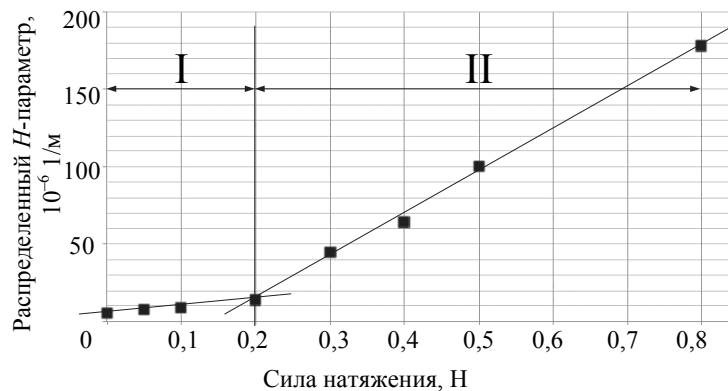


Рис. 5. Зависимость распределенного H -параметра анизотропного оптического волокна от величины силы натяжения

Анализируя полученную зависимость, можно сделать вывод о том, что при увеличении продольной силы натяжения анизотропного оптического волокна с эллиптической напрягающей оболочкой значение распределенного H -параметра увеличивается. Это можно объяснить тем, что при увеличении продольной силы натяжения волокна, увеличивается коэффициент связи ортогональных мод, которые распространяются в этом волокне, что, в свою очередь, увеличивает эффект перекачки распространяющейся моды в ортогональную [14, 15].

Обсуждение результатов

Полученную зависимость распределенного H -параметра анизотропного оптического волокна с эллиптической напрягающей оболочкой от величины продольной силы натяжения можно аппроксимировать двумя линейными зависимостями (рис. 5): от 0 Н до 0,2 Н, для которого коэффициент наклона равен $36 \cdot 10^{-6} 1/(м \cdot Н)$, и от 0,2 Н до 0,8 Н с коэффициентом наклона, равным $274 \cdot 10^{-6} 1/(м \cdot Н)$.

Механизм увеличения распределенного H -параметра при увеличении продольной силы натяжения оптического волокна заключается в эффекте перекачки распространяющейся моды в ортогональную за счет увеличения коэффициента связи мод. Коэффициент связи мод зависит от силы натяжения волокна, радиуса изгиба и от механических и геометрических параметров волокна. Соответственно, чем меньше радиус изгиба оптического волокна, тем выше значение H -параметра, что было получено в [6].

Заключение

В работе проведено исследование влияния намотки анизотропного оптического волокна с эллиптической напрягающей оболочкой на величину распределенного H -параметра. По результатам экспериментов была выявлена зависимость влияния намотки анизотропного оптического волокна с эллиптической напрягающей оболочкой с различной силой натяжения на величину распределенного H -параметра (рис. 4). Получено, что при увеличении силы натяжения с 0,05 Н до 0,8 Н значение H -параметра увеличивается с $7 \cdot 10^{-6} 1/м$ до $178 \cdot 10^{-6} 1/м$. Обнаружена предельная величина натяжения оптического волокна 0,2 Н (рис. 5), после которой характер роста взаимного преобразования ортогональных мод, приводящий к повышению H -параметра, изменяется: значительно увеличивается коэффициент наклона второго линейного участка.

Для волоконно-оптических устройств навигационного класса точности, таких как волоконно-оптический гироскоп, выдвигаются высокие требования к качеству намотки волокна: укладка волокна виток к витку, отсутствие перегибов и микроизгибов, равномерность намотки. Используемый в данном

исследовании метод сканирующего интерферометра Майкельсона позволяет контролировать качество намотки оптического волокна – отсутствие локальных дефектов, значение H -параметра волокна.

References

1. Aksarin S.M. *Issledovanie Polyarizatsionnykh Metodov i Tekhnologii Soglasovaniya Volokonno-Opticheskikh i Integral'no-Opticheskikh Volnovodov: kand. fiz.-mat. nauk* [Study of Polarization Methods and Technologies of Fiber Optic and Integrated Optical Waveguides Matching. Phys.-Math. Sci. Dissertation]. St. Petersburg, 2014, 116 p.
2. Kaminow I.P. Polarization-maintaining fibers. *Applied Scientific Research*, 1984, vol. 41, no. 3–4, pp. 257–270. doi: 10.1007/BF00382456
3. Jia M., Yang G. Research of optical fiber coil winding model based on large-deformation theory of elasticity and its application. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2011, vol. 24, no. 5, pp. 640–647. doi: 10.1016/S1000-9361(11)60075-7
4. Shute Sr. M.W., Brown C.S., Jarzynski J. Polarization model for a helically wound optical fiber. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, vol. 14, no. 12, pp. 3251–3261.
5. Kotov O.I., Liokumovich L.B., Medvedev A.V. Interference method of measuring the extinction coefficient of birefringent optical fibers. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2007, vol. 52, no. 9, pp. 1204–1209. doi: 10.1134/S1063784207090162
6. Aksarin S.M., Arkhipov S.V., Varzhel S.V., Kulikov A.V., Strigalev V.E. Dependence investigation of the anisotropic single-mode fiber parameters on a winding diameter. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 6 (88), pp. 22–26. (In Russian)
7. Meshkovskii I.K., Kiselev S.S., Kulikov A.V., Novikov R.L. Defects of optical fiber winding in manufacturing of sensitive element of fiber-optic interferometer. *Izv. Vuzov. Priborostroenie*, 2010, vol. 53, no. 2, pp. 47–51. (In Russian)
8. Shramko O.A., Rupasov A.V., Novikov R.L., Aksarin S.M. Analysis method of anisotropic lightguide h -parameter dependence on its bending radius. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 1 (89), pp. 26–31. (In Russian)
9. Irodov I.E. *Volnovye Protsestry. Osnovnye Zakony* [Wave Processes. Basic Laws]. 4th ed. Moscow, BINOM, 2007, 263 p. (In Russian)
10. Sezerman O., Best G. Accurate alignment preserves polarization. *Laser Focus World*, 1997, vol. 33, no. 12, pp. 27–30.
11. Aksarin S.M., Strigalev V.E. Method and apparatus for studying local changes in optical fibers with birefringence. *Sbornik Tezisev Dokladov Kongressa Molodykh Uchenykh* [Proc. Congress of Young Scientists]. St. Petersburg, 2012, no. 2, pp. 44–45. (In Russian)
12. Martin P., Le Boudec G., Lefevre H.C. Test apparatus of distributed polarization coupling in fiber gyro coils using white light interferometry. *Proceedings of SPIE*, 1992, vol. 1585, pp. 173–179. doi: 10.1117/12.135045
13. Lefevre H.C. *Fiber-Optic Gyroscopes*. Boston, Artech House, 1993, 313 p.
14. Liokumovich L.B. *Polyarizatsionnye Effekty v Volokonnykh Interferometrakh na Osnove Dvulucheprelomlyayushchikh Svetovodov. Diss. ... dr. fiz.-mat. nauk* [Polarization Effects in Optical Interferometers Based on Birefringent Fibers. Phys.-Math. Sci. Dissertation]. St. Petersburg, 2008, 333 p.
15. Kotov O.I., Liokumovich L.B., Markov S.I., Medvedev A.V., Khlybov A.V. Modulation of the phase difference between polarization modes in single-mode fibers. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 49, no. 1, pp. 71–75. doi: 10.1134/1.1642682

Мухтубаев Азамат Булатович	– студент, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, mukhtubaev.ab@gmail.com
Аксарин Станислав Михайлович	– кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, staksar@gmail.com
Стригалеv Владимир Евгеньевич	– кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, vstrglv@mail.ru
Новиков Роман Леонидович	– кандидат технических наук, инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, shprot10@mail.ru
Azamat B. Mukhtubayev	– student, engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, mukhtubaev.ab@gmail.com
Stanislav M. Aksarin	– PhD, junior scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, staksar@gmail.com
Vladimir E. Strigalev	– PhD, Associate professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, vstrglv@mail.ru
Roman L. Novikov	– PhD, engineer-researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, shprot10@mail.ru