

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ПАРАМЕТРОВ МИКРОИЗГИБОВ ОДНОМОДОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА
ДЛЯ ДАТЧИКОВ МАССЫ**

Т. Г. КОВАЛЕНКО*, А. О. ЗЕНЕВИЧ, С. В. ЖДАНОВИЧ,
Е. В. НОВИКОВ, Т. А. МАТКОВСКАЯ

Белорусская государственная академия связи, Минск, Беларусь
**t.kovalenko@bsac.by*

Аннотация. Исследуется возможность создания волоконно-оптического датчика массы с использованием микроизгибов одномодового оптического волокна. Определено, что при постоянном значении массы воздействия на микроизгиб увеличение диаметра его формирования приводит к ослаблению мощности оптического излучения на микроизгибе. Предложена экспериментальная установка, с помощью которой определено, что наибольшее значение чувствительности к массе воздействия наблюдается для оптоволокна G 655 при всех используемых длинах волн. Максимальная чувствительность для оптоволокна G 655 получена при длине волны 1625 нм. Установлено, что для определения массы с помощью микроизгибов одномодового оптического волокна целесообразно использовать микроизгибы, формируемые металлической проволокой диаметром 200 мкм, длину волны 1625 нм и оптоволокно G 655.

Ключевые слова: микроизгиб, одномодовое оптическое волокно, волоконно-оптический датчик, ослабление мощности оптического излучения, датчик массы

Ссылка для цитирования: Коваленко Т. Г., Зеневич А. О., Жданович С. В., Новиков Е. В., Матковская Т. А. Исследование параметров микроизгибов одномодового оптического волокна для датчиков массы // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 1. С. 96—102. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-96-102.

**STUDY OF MICROBENDING PARAMETERS
OF SINGLE-MODE OPTICAL FIBER FOR MASS SENSORS**

T. G. Kovalenko*, A. O. Zenevich, S. V. Zhdanovich, E. V. Novikov, T. A. Matkovskaya

Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus
**t.kovalenko@bsac.by*

Abstract. The possibility of creating a fiber-optic mass sensor using microbends of single-mode optical fiber is investigated. It is found that for a constant value of the mass influencing the microbend, an increase in the microbend formation diameter leads to a weakening of the power of optical radiation at the microbend. An experimental setup is proposed and used to deduce that the highest sensitivity to impact mass is observed for optical fiber G 655 at all the wavelengths applied. The maximum sensitivity for optical fiber G 655 is obtained at a wavelength of 1625 nm. It is established that for mass determination with microbends of single-mode optical fiber, it is advisable to use microbends formed by a metal wire with a diameter of 200 μm , a wavelength of 1625 nm, and the G 655 optical fiber.

Keywords: microbending, single-mode optical fiber, fiber-optic sensor, optical power attenuation, mass sensor

For citation: Kovalenko T. G., Zenevich A. O., Zhdanovich S. V., Novikov E. V., Matkovskaya T. A. Study of microbending parameters of single-mode optical fiber for mass sensors. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 1. P. 96—102 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-96-102.

Введение. Для контроля состояния различных объектов и окружающей среды применяются волоконно-оптические датчики, позволяющие измерять физические параметры, такие как вибрация, давление, деформация, температура и др. [1—9]. Возможность технической реализации датчиков на основе макроизгибов оптического волокна доказана ранее в работах [10—13]. Такие датчики достаточно просты в реализации, однако имеют большие размеры. Так, макроизгиб представляет собой любое макроскопическое отклонение оси оптического

волокна от прямой линии (ГОСТ ИЕС 60050-731-2017, ГОСТ Р 52266—2020, [14]), а радиус макроизгиба R_m значительно больше диаметра оптического волокна с акрилатным покрытием (как правило, $R_m \geq 2,0$ мм). Если для контроля параметров объекта или среды необходимо применять датчики малых размеров (с площадью поверхности менее 12 мм^2), то датчики на основе макроизгиба волокна [13] для использования не подойдут. В этом случае необходимо применять волоконно-оптические датчики на основе микроизгибов. Эти датчики также просты в реализации, но по размерам меньше датчиков на основе макроизгиба. Под микроизгибом оптического волокна понимается резкое изменение кривизны волокна, представляющее собой локальное осевое смещение порядка нескольких микрометров (ГОСТ ИЕС 60050-731-2017). Микроизгиб отличается от макроизгиба тем, что радиус микроизгиба меньше диаметра оптического волокна с акрилатным покрытием. Однако волоконно-оптические датчики на основе микроизгибов недостаточно изучены. На основании вышеизложенного цель настоящей статьи — определение возможности использования микроизгибов одномодовых оптических волокон для создания волоконно-оптических датчиков измерения массы.

Экспериментальная установка и методика исследования. Для исследования выбраны одномодовые оптические волокна G 652, G 655 и G 657, имеющие широкое распространение в волоконно-оптических системах передачи данных. Датчики на основе этих волокон можно использовать в данных системах в сочетании с оптическими волокнами, по которым осуществляется трансляция информации о состоянии контролируемого объекта.

На рис. 1 представлена экспериментальная установка для проведения исследований, включающая источник оптического излучения ИИ, измеритель мощности оптического излучения ИМ, оптическое волокно ОВ, текстолитовые пластины Π_1 и Π_2 , формирователь микроизгибов, в качестве которого используется металлическая проволока Пр разного диаметра, резервуар с жидкостью (вода). В качестве ИИ и ИМ используется оптический тестер ОТ 3-1, поверенный и калиброванный согласно графику поверки и калибровки средств измерения. Источники излучения оптического тестера позволяют направлять в оптическое волокно излучение в исследуемом диапазоне длин волн: 1310, 1490, 1550 и 1625 нм, что соответствует „окнам прозрачности“ одномодового оптического волокна [14, 15]. Мощность оптического излучения, поступающего в ОВ, для всех длин волн составляет 1 мВт.

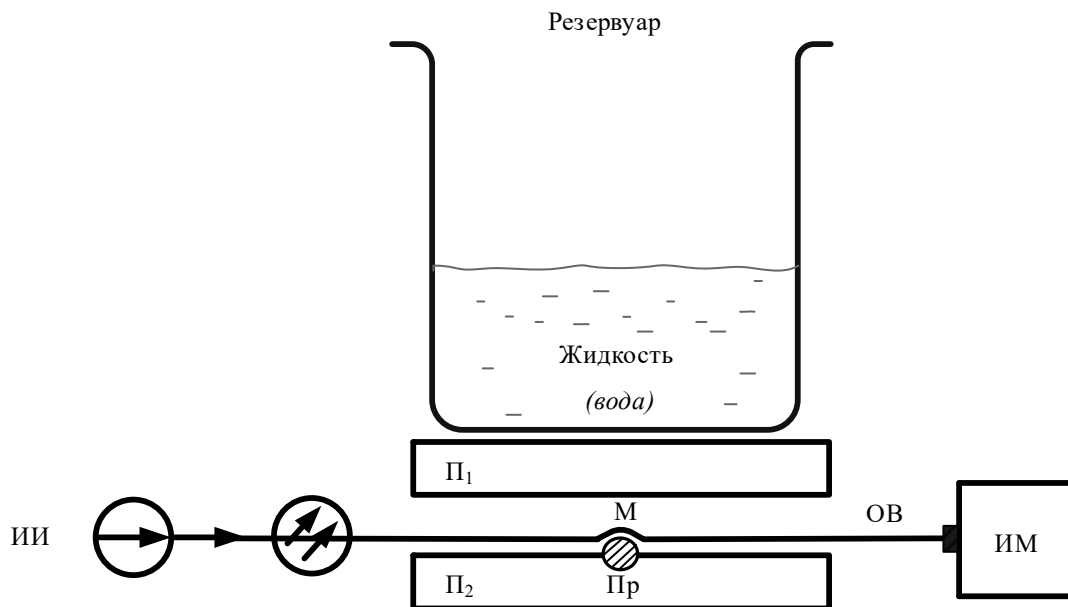


Рис. 1

Посредством оптоволокна источник оптического излучения подключается к измерителю мощности оптического излучения. Потери мощности в исследуемых оптических волокнах на всех тестируемых длинах волн не превышают $0,4 \text{ дБ/км}$. Поэтому при выборе ОВ длиной

$L = 1$ м потерей мощности оптического излучения в волокне можно пренебречь. На оптоволокне формируется микроизгиб M , для создания которого металлическая проволока располагается перпендикулярно оптоволокну. При проведении исследований использовались проволоки диаметром $d = 100 \dots 200$ мкм. При $d > 200$ мкм происходил излом оптического волокна, а при $d < 100$ мкм потери мощности излучения на микроизгибе практически отсутствовали. Формирование микроизгиба осуществляется при сдавливании проволоки и оптического волокна пластинами Π_1 и Π_2 посредством усилия, создаваемого при наполнении резервуара жидкостью. Резервуар располагается на пластине Π_1 , при этом пластина Π_2 — на горизонтальной твердой поверхности.

Текстолитовая пластина Π_1 и резервуар имеют постоянную массу $m_0 = 375$ г, которой для каждого из исследуемых типов оптического волокна соответствует определенная величина ослабления мощности излучения $D_{0п}$ на микроизгибе при отсутствии жидкости в резервуаре. Эта величина принималась соответствующей нулевому отсчету массы жидкости в резервуаре. При увеличении массы жидкости m в резервуаре величина ослабления мощности излучения на микроизгибе увеличивается.

В ходе экспериментальных исследований было определено вносимое микроизгибом ослабление мощности излучения

$$D_{п} = 10 \lg \left(\frac{P}{P_{в}} \right), \quad (1)$$

где P — мощность источника излучения на входе в ОВ; $P_{в}$ — мощность оптического излучения, поступающего на измеритель мощности, на выходе из ОВ.

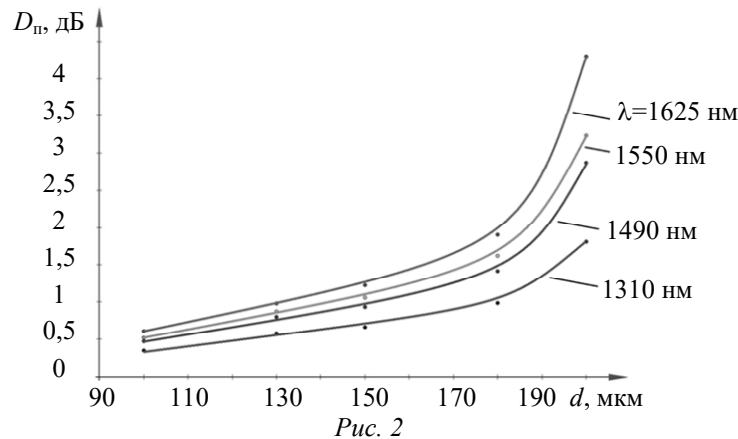
Чувствительность микроизгиба оптического волокна, формируемого под воздействием некоторой массы, характеризуется величиной α , определяемой по формуле

$$\alpha = \frac{\Delta D_{п}}{\Delta m} = \frac{D_{1п} - D_{0п}}{m_1 - m_0}, \quad (2)$$

где Δm — изменение воздействующей массы; $\Delta D_{п}$ — изменение ослабления мощности оптического излучения; $D_{1п}$ — ослабление мощности оптического излучения в оптоволокну при воздействии на него усилия, создаваемого массой m_1 .

Стабильность источников оптического излучения и свойства одномодового оптического волокна, а также параметров измерителя мощности оптического излучения (ГОСТ ИЕС 60050-731-2017) достигалась соблюдением условий измерения в соответствии с требованиями ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Исследования проводились при температуре окружающей среды 20—25 °С, влажности до 70 %, атмосферном давлении 975—1025 гПа.

Результаты эксперимента и их обсуждение. В процессе исследования были определены зависимости ослабления мощности на микроизгибе оптоволокну $D_{п}$ от диаметра d проволоки для всех тестируемых длин волн (рис. 2). Типичные зависимости $D_{п}(d)$ получены для оптического волокна G 655 при воздействующей на ОВ массе $m_1=975$ г. Аналогичные результаты были получены для других исследуемых оптоволокон; величины ослабления для них принимали меньшие значения, чем для оптоволокну G 655. Так, для G 652 и G 657 при $\lambda=1310$ нм и $d = 100$ мкм значения $D_{п}$ составляли 0,16 и 0,05 дБ, а при $d = 200$ мкм — 1,50 и 1,12 дБ соответственно; при $\lambda=1625$ нм и $d = 100$ мкм значения $D_{п}$ составляли 0,28 и 0,19 дБ, а при $d = 200$ мкм — 2,37 и 1,56 дБ соответственно. Указанные значения меньше величин, зафиксированных при тех же условиях для оптоволокну G 655. Как следует из результатов эксперимента, при увеличении диаметра проволоки потери мощности оптического излучения на микроизгибе растут для всех тестируемых длин волн. Такое поведение зависимости $D_{п}(d)$ объясняется тем, что создание микроизгиба проволокой большого диаметра приводит к сужению большей части сердцевины оптоволокну, чем при использовании проволоки меньшего диаметра.



Наиболее значительное ослабление мощности на всех длинах волн наблюдается при $\lambda=1625$ нм. Это является следствием того, что при увеличении длины волны увеличивается диаметр модового пятна, а следовательно, и его площадь. При увеличении площади модового пятна большая часть распространяющегося по волокну в области микроизгиба излучения переходит в оболочку оптического волокна и покидает его через боковую поверхность.

В исследуемом интервале диаметров проволоки, формирующей микроизгиб, для волокна G 655 при $\lambda=1625$ нм были получены наибольшие значения $D_{п}$, чем при других длинах волн.

Далее для исследований был выбран диаметр проволоки $d = 200$ мкм, поскольку в этом случае наблюдается наибольшее ослабление мощности оптического излучения для всех длин волн. Также была определена чувствительность микроизгибов оптоволокон к оказываемому на них воздействию в соответствии с формулой (2) при $m_1 = 775$ г. Значения α для исследуемых оптоволокон представлены в таблице.

Оптическое волокно	λ , нм	$D_{0п}$, дБ	$D_{1п}$, дБ	α , дБ/г
G 652	1310	0,70	1,50	0,0020
	1490	0,70	1,60	0,0023
	1550	0,70	1,70	0,0025
	1625	0,78	1,80	0,0026
G 655	1310	0,60	1,40	0,0020
	1490	1,20	2,30	0,0028
	1550	1,50	2,70	0,0030
	1625	1,70	3,30	0,0040
G 657	1310	0,50	0,90	0,0010
	1490	0,50	1,10	0,0015
	1550	0,60	1,25	0,0016
	1625	0,64	1,30	0,0017

Наибольшее значение α удается получить при $\lambda=1625$ нм. Согласно данным, представленным в таблице, наибольшее значение α при одинаковых λ наблюдается для оптоволокон G 655. Различие значений α для исследуемых оптоволокон связано с их разной внутренней структурой.

В ходе исследования также была определена зависимость ослабления мощности оптического излучения $D_{п}$ на микроизгибе оптоволокон от массы жидкости m при $\lambda=1625$ нм (рис. 3). Установлено, что зависимость $D_{п}(m)$ имеет линейный вид. При $m>850$ г происходил излом волокна при формировании микроизгиба с применением проволоки диаметром 200 мкм. Для используемой конструкции экспериментальной установки диапазон измерения массы жидкости составляли 0...850 г. В случае измерения больших значений массы необходимо изменить конструкцию экспериментальной установки.

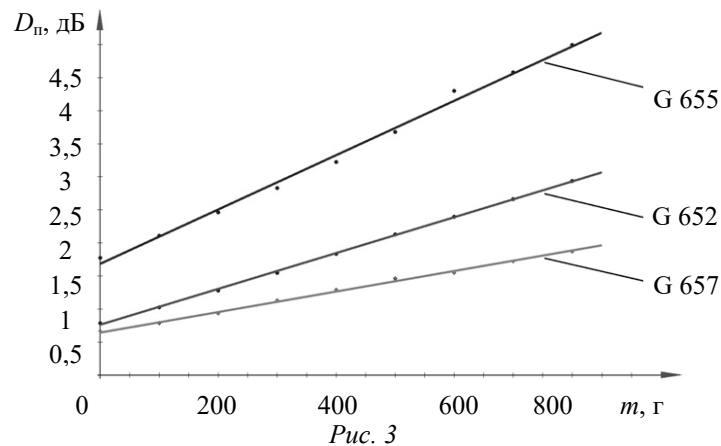


Рис. 3

Таким образом, как показывают результаты эксперимента, на основе микроизгиба оптоволокон можно создать датчик массы, при этом в качестве чувствительного элемента целесообразно использовать оптоволокно G 655 при длине волны оптического излучения 1625 нм.

Заключение. На основе результатов исследования установлено, что увеличение диаметра формирующей микроизгиб проволоки приводит к росту ослабления мощности оптического излучения на микроизгибе оптоволокон при постоянном значении воздействующей на него массы.

Определено, что наибольшее значение чувствительности к массе воздействия наблюдается для оптоволокон G 655 для всех используемых длин волн, максимальная чувствительность достигается при $\lambda=1625$ нм.

Для создания датчика массы с использованием микроизгиба одномодового оптического волокна следует применять формирующую микроизгиб проволоку диаметром 200 мкм при длине волны 1625 нм и оптическое волокно G 655.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулаков И. Р., Зеневич А. О. Волоконно-оптические датчики физических величин: Монография. Минск : Белорусская гос. академия связи, 2022. 367 с.
2. Udd E. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. Wiley, 2011.
3. Качура С. М., Постнов В. И. Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор) // Композиционные материалы. Тр. ВИАМ. 2019. № 5 (77).
4. Дмитриев С. А., Слепов Н. Н. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. М.: Техносфера, 2010. 607 с.
5. Jurgen F., Vi-Rander J. Optical communications. Components and Systems: Analysis, Design, Optimization, Application. Harrow, UK: Alpha Science Intern. Ltd, 2000. 717 p.
6. Компоненты волоконно-оптических линий связи: Учеб. пособие / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, Т. М. Мансуров. Минск: Белорусская гос. академия связи, 2020. 336 с.
7. Connolly C. Structural monitoring with fibre optics // Europhotonics. 2009. N 2—3. P. 16—18.
8. Волоконно-оптические датчики для контроля параметров состояния объектов и окружающей среды в задачах мониторинга / А. И. Вяльцев, В. М. Добров, А. А. Долгов, О. В. Бутов, А. Ю. Плешков // Природообустройство. 2014. № 3. С. 32—37.
9. Гончаренко И. А., Рябцев В. Н. Датчики контроля состояния инженерных и строительных конструкций на основе оптических волноводных структур // Вестн. Командно-инженерного ин-та МЧС Республики Беларусь. 2013. № 2 (18).
10. Датчик обнаружения проникновения на основе макроизгиба одномодового оптического волокна / А. О. Зеневич, Т. М. Лукашик, Е. В. Новиков, С. В. Жданович, Г. В. Василевский, А. А. Лагутик // Веснік сувязі. 2020. № 1. С. 56—59.

11. Применение волоконно-оптических датчиков на основе макроизгиба в системах мониторинга безопасности объектов / А. О. Зеневич, Е. В. Новиков, О. М. Солиев, С. В. Жданович, Т. М. Лукашик, Г. В. Василевский, А. А. Лагутик // Веснік сувязі. 2020. № 5. С. 50—53.
12. Исследование характеристик мультидатчика на основе оптического волокна / А. О. Зеневич, С. В. Жданович, Г. В. Василевский, А. А. Лагутик, Т. Г. Коваленко, Т. М. Лукашик // Докл. БГУИР. 2021. Т. 19, № 1. С. 70—78.
13. Использование макроизгиба оптоволокна в качестве основы для создания датчика массы / Г. В. Василевский, А. О. Зеневич, С. В. Жданович, Т. М. Лукашик, А. А. Лагутик // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 10. С. 930—937.
14. Laferriere J., Lietaert G., Taws R., Wolszczak S. Reference Guide to Fiber Optic Testing. Saint-Etienne: JDS Uniphase Corporation. 2011. 172 p [Электронный ресурс]: <https://cms.trsrntelco.com/sites/default/files/content/resource/pdf/2022-01/viavi_fiber_optic_guide_book_-_volume_1_pocket_guide_en.pdf>, 05.06.2023.
15. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. М.: Изд-во ЛЕСАРпт, 2003. 288 с.

Сведения об авторах

- Татьяна Георгиевна Коваленко** — аспирант; Белорусская государственная академия связи; кафедра физических и математических основ информатики; E-mail: t.kovalenko@bsac.by
- Андрей Олегович Зеневич** — д-р. техн. наук, профессор; Белорусская государственная академия связи; ректор; E-mail: a.zenevich@bsac.by
- Сергей Вячеславович Жданович** — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи; отраслевая лаборатория перспективных информационно-коммуникационных технологий; заведующий лабораторией; E-mail: zsvzsv@tut.by
- Евгений Владимирович Новиков** — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи, Институт современных технологий связи; директор; E-mail: e.novikov@bsac.by
- Татьяна Александровна Матковская** — аспирант; Белорусская государственная академия связи, кафедра физических и математических основ информатики; E-mail: tandem7m@gmail.com

Поступила в редакцию 19.07.2023; одобрена после рецензирования 08.09.2023; принята к публикации 14.11.2023.

REFERENCES

1. Gulakov I.R., Zenevich A.O. *Volokonno-opticheskiye datchiki fizicheskikh velichin* (Fiber-Optic Sensors of Physical Quantities), Minsk, 2022, 367 p. (in Russ.)
2. Udd E. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, 2011.
3. Kachura S.M., Postnov V.I. *Composite Materials. Proceedings of VIAM*, 2019, no. 5(77). (in Russ.)
4. Dmitriev S.A., Slepov N.N. *Volokonno-opticheskaya tekhnika: sovremennoye sostoyaniye i novyye perspektivy* (Fiber-Optic Technique: the Current State and New Prospects), Moscow, 2010, 607 p. (in Russ.)
5. Jurgen F., Vi-rander J. *Optical Communications. Components and Systems: Analysis: Design: Optimization: Application*, Harrow, UK, Alpha Science International Ltd, 2000, 717 p.
6. Gulakov I.R., Zenevich A.O., Mansurov T.M. *Komponenty volokonno-opticheskikh liniy svyazi* (Components of Fiber Optic Communication Lines), Minsk, 2020, 336 p. (in Russ.)
7. Connolly C. *Europhotonics*, 2009, no. 2-3, pp. 16–18.
8. Vyalyshev A.I., Dobrov V.M., Dolgov A.A., Butov O.V., Pleshkov A.Y. *Natural Resources Management*, 2014, no. 3, pp. 32–37. (in Russ.)
9. Goncharenko I.A., Reabtsev V.N. *Newsletter Command and Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations Republic of Belarus*, 2013, no. 2(18). (in Russ.)
10. Zenevich A.O., Lukashik T.M., Novikov E.V., Zhdanovich S.V., Vasileuski G.V., Lagutik A.A. *Vesnik svyazi*, 2020, no. 1, pp. 56–59. (in Russ.)
11. Zenevich A.O., Novikov E.V., Soliev O.M., Zhdanovich S.V., Lukashik T.M., Vasileuski G.V., Lagutik A.A. *Vesnik svyazi*, 2020, no. 5, pp. 50–53. (in Russ.)
12. Zenevich A.O., Zhdanovich S.V., Vasileuski G.V., Lagutik A.A., Kovalenko T.G., Lukashik T.M. *Doklady BGUIR*, 2021, no. 1(19), pp. 70–78. (in Russ.)
13. Vasileuski G.V., Zenevich A.O., Zhdanovich S.V., Lukashik T.M., Lagutik A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 10(63), pp. 930–937. (in Russ.)
14. Laferriere J., Lietaert G., Taws R., Wolszczak S. *Reference Guide to Fiber Optic Testing*, Saint-Etienne, JDS Uniphase Corporation, 2011, 172 p., https://cms.trsrntelco.com/sites/default/files/content/resource/pdf/2022-01/viavi_fiber_optic_guide_book_-_volume_1_pocket_guide_en.pdf.

15. Listvin A.V., Listvin V.N., Shvyrkov D.V. *Opticheskiye volokna dlya liniy svyazi* (Optical Fibers for Communication Lines), Moscow, 2003, 288 p. (in Russ.)

Data on authors

- Tatiana G. Kovalenko** — Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications; Department of Physical and Mathematical Foundations of Computer Science; E-mail: t.kovalenko@bsac.by
- Andrey O. Zenevich** — Dr. Sci., Professor; Belarusian State Academy of Communications; Rector; E-mail: a.zenevich@bsac.by
- Sergey V. Zhdanovich** — PhD, Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications; Industry Laboratory of Advanced Information and Communication Technologies; Head of the Laboratory; E-mail: zsvzsv@tut.by
- Evgeny V. Novikov** — PhD, Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications, Institute of Modern Communication Technologies; Director; E-mail: e.novikov@bsac.by
- Tatiana A. Matkovskaya** — Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications, Department of Physical and Mathematical Foundations of Computer Science; E-mail: tandem7m@gmail.com

Received 19.07.2023; approved after reviewing 08.09.2023; accepted for publication 14.11.2023.