
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.586.5
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-10-930-937

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

*Белорусская государственная академия связи, 220076, Минск, Республика Беларусь
E-mail: bsac@bsac.by*

Волоконно-оптические датчики применяются для обнаружения проникновения на охраняемую территорию. Однако они позволяют выявить только факт пересечения границы, но не причину срабатывания датчика — мелкое животное, человек или транспортное средство. Разработан волоконно-оптический датчик, который позволяет определить не только факт проникновения, но и характеристики объекта-нарушителя, а именно его массу. Выбрано оптическое волокно для разрабатываемого датчика с наибольшей восприимчивостью к макроизгибу — G 655. Установлено, что увеличение длины дуги макроизгиба при постоянном радиусе приводит к возрастанию затухания оптического излучения в волокне. Эта зависимость близка к линейной в диапазоне длин дуги макроизгиба от нуля до πR .

Ключевые слова: *волоконно-оптический датчик, оптическое волокно, макроизгиб, длина волны, коэффициент затухания*

Введение. Волоконно-оптические датчики используются для передачи информации о состоянии того или иного охраняемого объекта. Отметим, что в настоящее время разработаны волоконно-оптические датчики, которые позволяют измерять деформацию, вибрацию, давление, температуру, а также обнаруживать проникновение на территорию [1—10]. В работах [11—14] показана возможность создания датчиков на основе макроизгиба оптического волокна. К преимуществам таких волоконно-оптических датчиков перед электрическими можно отнести электробезопасность; невосприимчивость к электромагнитным воздействиям; возможность использования в сочетании с теми оптическими волокнами, по которым осуществляется передача данных о состоянии контролируемого объекта. Последнее позволяет избежать преобразования электрического сигнала в оптический и упростить системы диагностики состояния объектов.

В работе [12] предложен простой в реализации датчик обнаружения проникновения на территорию. Этот датчик позволяет устанавливать только факт пересечения границ, однако не позволяет определить, что является причиной срабатывания датчика, например, мелкое животное, человек, транспортное средство.

Целью настоящей работы является разработка волоконно-оптического датчика, который позволяет определить не только сам факт проникновения, но и характеристики объекта (нарушителя), а именно массу.

Экспериментальная установка и методика исследования. Исследовались оптические волокна G 652, G 655 и G 657. Данные волокна были выбраны, поскольку они наиболее часто используются в волоконно-оптических линиях связи, а также имеют различную восприимчивость к макроизгибу (изгиб радиусом более 1 мм). Под восприимчивостью будем понимать степень реакции оптического волокна на появление макроизгиба. Для оценки реакции на макроизгиб будет использоваться параметр $\Delta\alpha/\Delta L$, где ΔL — изменение длины дуги макроизгиба, $\Delta\alpha$ — соответствующее изменение затухания оптического излучения. При этом затухание оптического излучения в волокне (в дБ) определялось по следующей формуле:

$$\alpha = 10 \lg \left(\frac{P_0}{P} \right), \quad (1)$$

где P_0 и P — мощность оптического излучения на входе и выходе оптического волокна.

Структурная схема экспериментальной установки. На рис. 1 представлена экспериментальная установка для проведения исследований, включающая источник оптического излучения И, измеритель мощности оптического излучения ИМ, которые входят в состав поверенного и калиброванного оптического тестера ОТ 3-1, и формирователь изгибов Ф. Источник оптического излучения И подключен к измерителю оптической мощности при помощи оптического волокна ОВ. Формирователь позволяет формировать изгибы радиусом 2,5—15 мм. Также при помощи Ф можно создавать виток в виде окружности и дуг этой окружности.

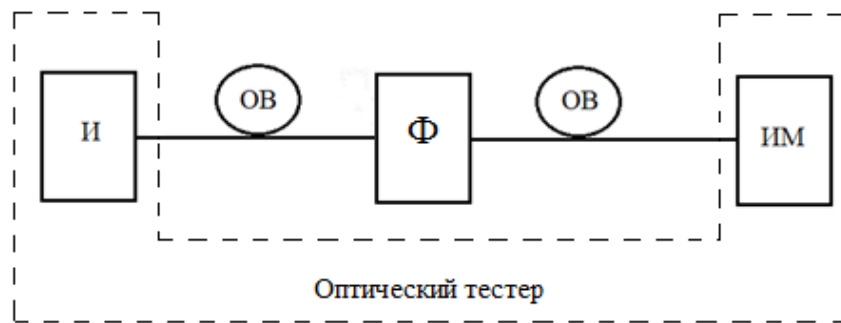


Рис. 1

Экспериментальная установка функционирует следующим образом. От источника в волокно направляется излучение мощностью 1 мВт. Длина волны излучения λ может принимать следующие значения: 1310, 1490, 1550 и 1625 нм, что соответствует окнам прозрачности исследуемых оптических волокон (диапазон измерения оптической мощности на этих длинах волн 10^{-11} — 10^{-2} Вт). При мощности 1 мВт нестабильность мощности излучения не превышает 0,005 дБ. К выходу ОВ подключается измеритель мощности оптического излучения. На оптическом волокне размещался формирователь макроизгиба Ф (см. рис. 1).

Длина ОВ для проведения экспериментов выбиралась небольшой — 2 м, чтобы затуханием оптического излучения в этом волокне можно было пренебречь при отсутствии макроизгиба.

Измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 при следующих условиях окружающей среды: температура 20—25 °С, влажность до 70 %, атмосферное давление 975—1025 гПа. В работе [15] показано, что величина затухания для ОВ достаточно стабильна при этих параметрах окружающей среды. Также при данных условиях стабильность источника оптического излучения и чувствительность измерителя мощности оптического излучения оставались неизменными.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Для определения восприимчивости ОВ к макроизгибу исследована зависимость затухания оптического излучения в волокне α от радиуса макроизгиба R . Результаты полученных исследований представлены на рис. 2, где приведены зависимости α от R для $\lambda=1490$ нм для одного полного витка (1 — G 657; 2 — G 652;

3 — G 655). При других значениях λ зависимости были аналогичными. В табл. 1 представлены значения α при $R=7,5$ мм для всех исследуемых типов ОВ. Как видно из рис. 2 и табл. 1, наибольшие значения затухания во всем исследуемом диапазоне R имеет G 655. Поэтому далее для создания волоконно-оптического датчика используется оно.

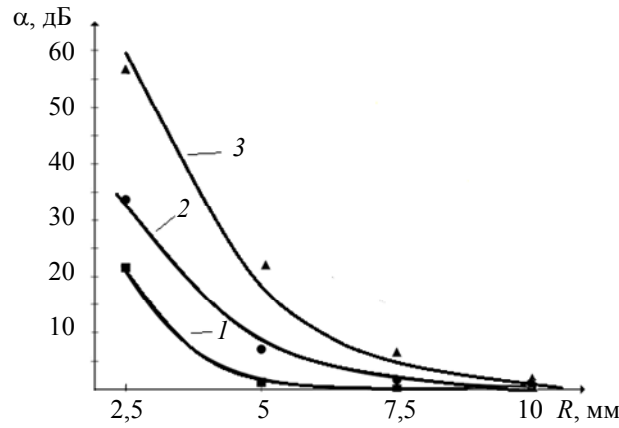


Рис. 2

Таблица 1

Характеристики исследуемых оптических волокон

Оптическое волокно	Затухание мощности оптического излучения на макроизгибе (дБ), при длине волны оптического излучения, нм			
	1310	1490	1550	1625
G 652	0,5	2,0	2,6	5,5
G 655	3,5	5,4	7,5	9,6
G 657	0,2	0,5	1,2	3,3

На рис. 3 показана зависимость затухания оптического излучения от длины дуги макроизгиба L при постоянном значении $R=7,5$ мм для различных длин волн (\blacktriangle — $\lambda=1625$; \blacksquare — 1550 ; \bullet — 1490 ; \blacklozenge — 1310 нм). Как видно из полученных результатов, увеличение L приводит к возрастанию затухания оптического излучения. Эта зависимость близка к линейной, и можно считать, что:

$$\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\Delta L} L. \tag{2}$$

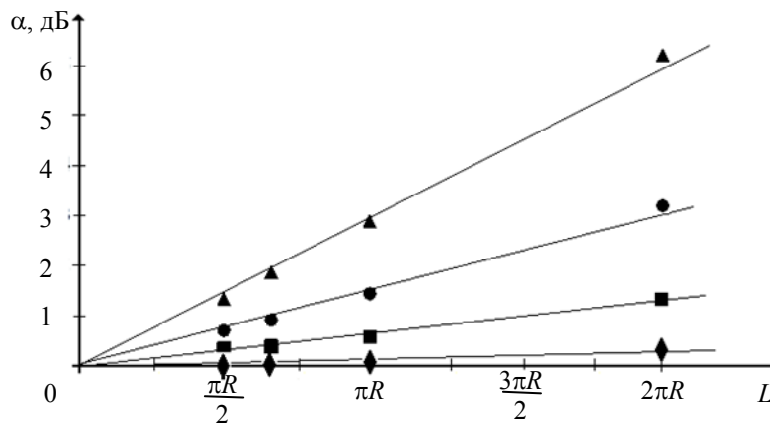


Рис. 3

Увеличение λ приводит к росту $\Delta\alpha/\Delta L$. Так, для $\lambda=1310$ нм $\Delta\alpha/\Delta L = 0,01$ дБ/мм; для 1490 нм — $0,04$ дБ/мм; для 1550 — $0,10$ дБ/мм; для 1625 — $0,21$ дБ/мм. С ростом R от $7,5$ мм и более наблюдалось уменьшение $\Delta\alpha/\Delta L$ для всех значений λ . Необходимо отметить, что при $R=8,0$ мм только для $\lambda=1310$ нм $\Delta\alpha/\Delta L=0$. Дальнейшее увеличение R приводило к $\Delta\alpha/\Delta L=0$ для $\lambda=1490$ нм, а затем — 1550 нм, а для $R \geq 15$ мм для всех длин волн оптического излучения $\Delta\alpha/\Delta L=0$. При $R < 7,5$ мм наблюдалось увеличение $\Delta\alpha/\Delta L$ с уменьшением R для всех значений λ .

При $R < 2,5$ мм оценка величины $\Delta\alpha/\Delta L$ не выполнялась, поскольку для таких R мог произойти излом оптического волокна. Отметим, что при $R=2,5$ мм и $L=2\pi R$ затухание на макроизгибе становится достаточно большим ($\alpha > 90$ дБ) для $\lambda=1625$ нм.

В табл. 2 приведены значения $\Delta\alpha/\Delta L$, полученные для длины излучения 1550 нм и разных радиусов макроизгиба оптического волокна G 655. Из данных табл. 2 следует, что уменьшение R приводит к увеличению $\Delta\alpha/\Delta L$.

Таблица 2

Характеристики макроизгибов оптического волокна			
R , мм	7,5	9,0	10,0
$\Delta\alpha/\Delta L$, дБ/мм	0,07	0,06	0,02

Датчик массы тела. Конструкция датчика представлена на рис. 4, а (1 — крышка верхняя; 2 — крышка нижняя; 3 — кожух; 4 — направляющая; 5 — стержень; 6 — кнопка; 7 — опоры; 8 — планка; 9 — мембраны; 10 — пружина). Принцип его работы заключается в том, что при нажатии на кнопку 6 тела массой m происходит смещение стержня 5. Стержень проходит через направляющую 4 и надавливает на мембраны 9. Между мембранами уложено оптическое волокно. Для предотвращения смещения оптоволокна в стороны и для формирования макроизгиба в виде дуги окружности на одной из мембран предусмотрены два невысоких параллельных направляющих валика. Оптическое волокно располагается между этими валиками. Это расположение не дает оптическому волокну сместиться в сторону в случае воздействия на мембрану стержня, а при прекращении воздействия способствует распрямлению волокна. Также в результате воздействия стержня на мембраны возникает макроизгиб оптического волокна, радиус R которого соответствует радиусу закругленного конца стержня (см. рис. 4, б). Мембраны с оптоволоком крепятся на опорах. Расстояние между опорами равно диаметру стержня, воздействующему на мембрану. Края опор выполнены в виде закругленной воронки с радиусом $R_0=20$ мм. Такой радиус позволяет устранить затухания оптического излучения на макроизгибах, на краях опор (см. рис. 4, б). На стержне 5 предусмотрен упор, который останавливает движение стержня, упираясь в плечи опор. Это необходимо для недопущения прорыва мембран с оптоволоком при сильном воздействии. От смещения стержня Δx будет зависеть длина дуги макроизгиба L . Отметим, что $L=0$ в случае отсутствия воздействия на мембрану стержня.

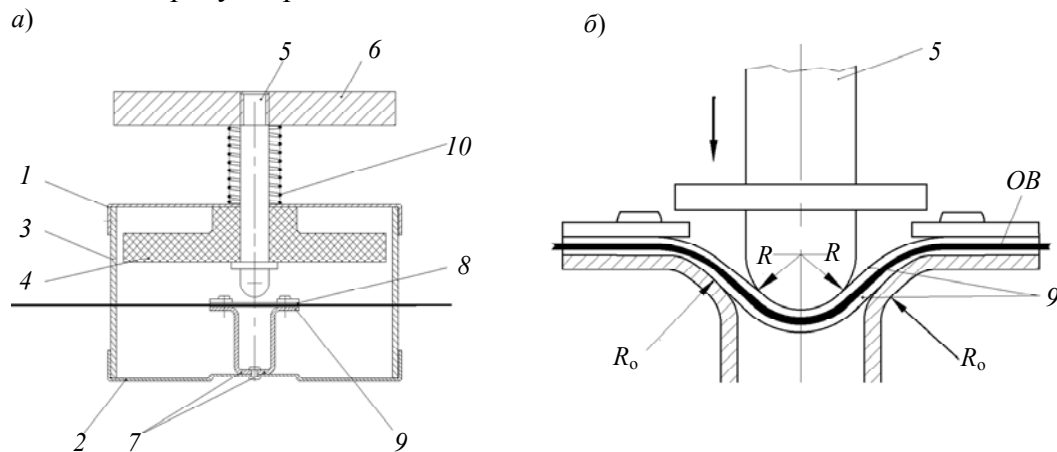


Рис. 4

Максимальное значение длины дуги L макроизгиба, которое можно получить при воздействии тела на датчик, равно πR . Наибольшее смещение стержня Δx под воздействием тела на кнопку 6 соответствует R . Зависимость длины дуги макроизгиба от смещения стержня под воздействием тела на кнопку 6 имеет следующий вид:

$$L = 2R \arccos \left(1 - \frac{\Delta x}{R} \right). \quad (3)$$

Смещение стержня Δx будет зависеть от коэффициента жесткости пружины k и массы груза m , помещенного на кнопку b : $\Delta x = (mg)/k$, где g — ускорение свободного падения. Тогда зависимость затухания α от массы груза имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\Delta L} 2R \arccos\left(1 - \frac{mg}{kR}\right). \quad (4)$$

Таким образом, зависимость между затуханием оптического излучения и массой является функцией арккосинуса. Данная функция, описанная выражением (4), имеет участок, на котором зависимость между α и m близка к линейной. Этот участок зависимости будем использовать в датчике для определения массы по величине α .

Для использовавшейся конструкции датчика и пружины получена экспериментальная зависимость затухания α от массы тела m , расположенного на кнопке b датчика (рис. 5; 1 — $\lambda = 1310$; 2 — 1490; 3 — 1550; 4 — 1625 нм). При радиусе закругленного конца стержня 5 7,5 мм удается выполнять измерения α для всех исследуемых длин волн оптического излучения. Как видно из полученных зависимостей, в диапазоне от 3,3 до 7,5 кг зависимость затухания α от m близка к линейной. Для датчика при $m < 3,3$ кг смещение стержня было таким, при котором длина дуги макроизгиба обеспечивала малое затухание излучения и погрешность измерителя мощности излучения не позволяла получить более точные результаты. Таким образом, данный датчик можно использовать для измерения массы объектов.

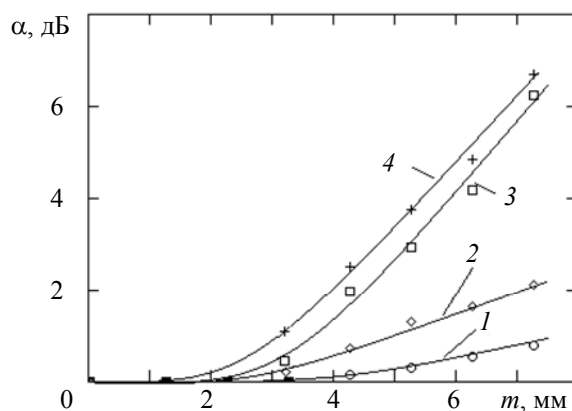


Рис. 5

Отметим, что в некотором диапазоне смещений стержня δ зависимость α от Δx также линейна. Поэтому перед началом работы датчика необходимо определить Δx — минимальное значение этого диапазона. Например, для этого нужно увеличить массу кнопки на 3,3 кг. Тогда датчик сможет измерять массу в диапазоне 0 до 4,2 кг.

Увеличение длины волны оптического излучения приводило к росту чувствительности датчика. Под чувствительностью датчика понимается отношение величины $\Delta\alpha$ к соответствующему ей изменению массы тела Δm . Так, для линейного участка зависимости α от m наибольшая чувствительность соответствовала $\lambda = 1625$ нм и составляла 1,4 дБ/кг, а наименьшая для $\lambda = 1310$ — 0,2 дБ/кг.

Таким образом, экспериментальные исследования волоконно-оптического датчика на основе макроизгиба волокна показали возможность его использования для измерения массы тел. Чтобы датчик мог измерять большую массу, необходимо увеличить коэффициент жесткости пружины. Определить коэффициент жесткости пружины для требуемого диапазона измерения масс можно на основании следующей формулы: $k = (m_{\max}g)/R$, где m_{\max} — максимальная масса. Очевидно, можно использовать и другие конструкции механической части датчика, обеспечивающие смещение стержня, формирующего макроизгиб оптического волокна, на расстояние Δx пропорционально массе.

Заключение. Экспериментально установлено, что среди исследуемых оптических волокон наибольшую восприимчивость к макроизгибу имеет G 655. Установлено, что увеличение длины дуги макроизгиба при постоянном радиусе приводит к увеличению затухания оптического излучения в волокне. Данная зависимость близка к линейной в диапазоне длин $0—\pi R$.

Предложена конструкция волоконно-оптического датчика, позволяющего выполнять измерения массы тела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутусов М. М., Галкин С. Л., Орбинский С. П., Пал Б. П. Волоконная оптика и приборостроение. Л.: Машиностроение, 1987. 328 с.
2. Мурашкина Т. И., Савочкина М. М. Волоконно-оптический датчик гидростатического давления для резервуаров с нефтепродуктами // Тр. Междунар. симп. „Надежность и качество“. 2016. Т. 2. С. 349—350.
3. Ren L. et al. Design and experimental study on FBG hoop-strain sensor in pipeline monitoring // Optical fiber technology. 2014. Vol. 20, N 1. P. 15—23.
4. Li L. et al. Design of an enhanced sensitivity FBG strain sensor and application in highway bridge engineering // Photonic Sensors. 2014. Vol. 4, N 2. P. 162—167.
5. Бурдышева О. В., Шолгин Е. С. Волоконно-оптический датчик вибрации // Специальный выпуск „ФОТОН-ЭКСПРЕСС-НАУКА 2019“, 2019. № 6. С. 52—53.
6. Chen W. et al. Performance assessment of FBG temperature sensors for laser ablation of tumors // IEEE Intern. Symp. on Medical Measurements and Applications (MeMeA). 2015. P. 324—328.
7. Mamidi V. R. et al. Fiber Bragg Grating-based high temperature sensor and its low cost interrogation system with enhanced resolution // Optica Applicata. 2014. Vol. 44, N. 2. P. 299—308.
8. Куликов А. В., Игнатьев А. В. Обзор волоконно-оптических систем охраны периметра // Алгоритмы безопасности. 2010. № 4. С. 56—61.
9. Дмитриев А. В., Красивская М. И., Юрин А. И. Исследование волоконно-оптических датчиков с внешней модуляцией // Датчики и системы. 2013. № 5(168). С. 34—37.
10. Пат. РФ 2509994, МПК G01L11/02. Волоконно-оптическое устройство измерение давления / В. И. Пустовой, И. Г. Лихачев. 2014.
11. Василевский Г. В., Зеневич А. О., Лагутик А. А., Лукашик Т. М., Новиков Е. В. Исследование характеристик отраженного излучения в оптическом волокне как основы для создания волоконно-оптических датчиков // Зв'язок. 2019. № 1. С. 40—44.
12. Василевский Г. В., Зеневич А. О., Лагутик А. А., Лукашик Т. М., Новиков Е. В., Жданович Г. В. Датчик обнаружения проникновения на основе макроизгиба одномодового оптического волокна // Вестник связи. 2020. № 1(159). С. 56—59.
13. Ушаков А. О., Рахимов Н. Р. Исследование оптоэлектронного метода и разработка первичных преобразователей амплитудных датчиков ускорения // Итерэкспо Гео-Сибирь. 2011. Т. 5, № 1. С. 1—5.
14. Шилова И. В. Многоэлементный волоконно-оптический датчик избыточного давления // Вестн. Белорусско-Российского университета. 2012. № 4(37). С. 116—124.
15. Зеневич А. О. Обнаружители утечки информации из оптического волокна. Мн.: Белорусская государственная академия связи, 2019. 280 с.

Сведения об авторах

- Герман Витальевич Василевский** — аспирант; Белорусская государственная академия связи, отраслевая лаборатория информационно-коммуникационных технологий; E-mail: geravasile@tut.by
- Андрей Олегович Зеневич** — д-р техн. наук, профессор; Белорусская государственная академия связи, отраслевая лаборатория информационно-коммуникационных технологий; ректор; E-mail: a.zenevich@bsac.by
- Сергей Вячеславович Жданович** — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи, отраслевая лаборатория информационно-коммуникационных технологий; заведующий лабораторией; E-mail: zsvzsv@tut.by

- Татьяна Михайловна Лукашик** — Белорусская государственная академия связи, отраслевая лаборатория информационно-коммуникационных технологий; преподаватель 1-й категории; E-mail: zeltko@tut.by
- Анастасия Андреевна Лагутик** — аспирант; Белорусская государственная академия связи, отраслевая лаборатория информационно-коммуникационных технологий; E-mail: nasta_zen@mail.ru

Поступила в редакцию
02.07.2020 г.

Ссылка для цитирования: Василевский Г. В., Зеневич А. О., Жданович С. В., Лукашик Т. М., Лагутик А. А. Использование макроизгиба оптоволокна в качестве основы для создания датчика массы // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 10. С. 930—937.

USING AN OPTICAL FIBER MACRO BEND AS THE BASIS FOR CREATING A MASS SENSOR

H. V. Vasileuski, A. O. Zenevich, S. V. Zhdanovich, T. M. Lukashik, A. A. Lagutik

Belarusian State Academy of Communications, 220076, Minsk, Republic of Belarus
E-mail: bsac@bsac.by

A fiber-optic sensor is developed which, in contrast to widely used detectors, allows to detect not only the fact of crossing the protected area border intrusion into, but also a characteristic of the intruder, namely its mass. The optical fiber selected for the presented sensor, G 655, demonstrate the highest susceptibility to macro bending. It shown that an increase in the length of the macro bending arc at a constant radius, R , leads to an increase in the attenuation of optical radiation passing through the fiber. This dependence is close to linear in the range of macro bend arc lengths from zero to πR .

Keywords: fiber-optic sensor, optical fiber, macro bending, wavelength, attenuation coefficient

REFERENCES

- Butusov M.M., Galkin S.L., Orobinskiy S.P., Pal B.P. *Volokonnaya optika i priborostroyeniye* (Fiber Optics and Instrumentation), Leningrad, 1987, 328 p. (in Russ.)
- Murashkina T.I., Savochkina M.M. *Nadezhnost' i kachestvo* (Reliability and Quality), Proceedings of the International Symposium, 2016, vol. 2, pp. 349–350. (in Russ.)
- Ren L. et al. *Optical fiber technology*, 2014, no. 1(20), pp. 15–23.
- Li L. et al. *Photonic Sensors*, 2014, no. 2(4), pp. 162–167.
- Burdysheva O.V., Sholgin E.S. *Foton-Ekspress-Nauka* (Photon-Express-Science), Special issue, 2019, no. 6, pp. 52–53. (in Russ.)
- Chen W. et al. *IEEE on International Symposium*, 2015, pp. 324–328.
- Mamidi V.R. et al. *Optica Applicata*, 2014, no. 2(44), pp. 299–308.
- Kulikov A.V., Ignat'yev A.V. *Algoritmy bezopasnosti*, 2010, no. 4, pp. 56–61. (in Russ.)
- Dmitriyev A.V., Krasivskaya M.I., Yurin A.I. *Datchiki i sistemy*, 2013, no. 5(168), pp. 34–37. (in Russ.)
- Patent RU 2509994, G01L11/02, *Volokonno-opticheskoye ustroystvo izmereniya davleniya* (Fiber Optic Pressure Measuring Device), V.I. Pustovoy, I.G. Likhachev, 2014. (in Russ.)
- Vasilevskiy G.V., Zenevich A.O., Lagutik A.A., Lukashik T.M., Novikov E.V. *Communication*, 2019, no. 1, pp. 40–44. (in Russ.)
- Zhdanovich G.V. *Vesnik svyazi*, 2020, no. 1(159), pp. 56–59. (in Russ.)
- Ushakov A.O., Rakhimov N.R. *Iterekspo Geo-Sibir'*, 2011, no. 1(5), pp. 1–5. (in Russ.)
- Shilova I.V. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2012, no. 4(37), pp. 116–124. (in Russ.)
- Zenevich A.O. *Obnaruzhiteli utechki informatsii iz opticheskogo volokna* (Fiber Optic Leak Detectors) Minsk, 2019, 280 p. (in Russ.)

Data on authors

- Herman V. Vasileuski** — Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications, Industry Laboratory of Information and Communication Technologies; E-mail: geravasile@tut.by
- Andrej O. Zenevich** — Dr. Sci., Professor; Belarusian State Academy of Communications, Industry Laboratory of Information and Communication Technologies; Rector; E-mail: a.zenevich@bsac.by
- Siarhei V. Zhdanovich** — PhD, Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications, Industry Laboratory of Information and Communication Technologies; Head of the Laboratory; E-mail: zsvzsv@tut.by

Tatiana M. Lukashik

— Belarusian State Academy of Communications, Industry Laboratory of Information and Communication Technologies; Teacher of the 1st Category; E-mail: zeltko@tut.by

Nastassia A. Lahutsik

— Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications, Industry Laboratory of Information and Communication Technologies; E-mail: nasta_zen@mail.ru

For citation: Vasileuski H. V., Zenevich A. O., Zhdanovich S. V., Lukashik T. M., Lagutik A. A. Using an optical fiber macro bend as the basis for creating a mass sensor. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 10. P. 930—937 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-10-930-937