



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-14-20>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 681.7.068.2:681.586.5

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ИДЕНТИФИКАЦИИ ЖИДКОСТЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРОВ

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

Белорусская государственная академия связи (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 14.06.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Исследована возможность использования различных типов одномодовых оптических волокон, массово выпускаемых промышленностью и широко применяемых в оптических кабелях и телекоммуникациях, для создания волоконно-оптических датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов. Для идентификации жидкостей, имеющих разные показатели преломления, и определения концентрации растворенных в воде веществ в качестве информационного параметра можно использовать величину пика рефлектограмм оптического волокна, находящегося на границе раздела сердцевины оптического волокна и окружающей среды. Значение информационного параметра зависит от показателя преломления жидкости, в которой находится торец оптического волокна. Параметры волоконно-оптических датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов исследованы методом оптической рефлектометрии в разных диапазонах длин волн оптического излучения при длительности зондирующих импульсов рефлектометра от 25 до 300 нс. Установлено, что волоконно-оптический датчик может работать на любой длине волны оптического излучения, соответствующей окнам прозрачности спектра оптических потерь волокна. Исследовано влияние длины оптического волокна между регистрирующим устройством и местом определения концентрации раствора жидкости с помощью волоконно-оптического датчика.

Ключевые слова: оптическое волокно, датчик, коэффициент отражения, показатель преломления, рефлектометр, концентрация раствора.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Волоконно-оптический датчик идентификации жидкостей и определения концентрации растворов / А. О. Зеневич [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 6. С. 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-14-20>.

FIBER-OPTIC SENSOR FOR IDENTIFYING LIQUIDS AND DETERMINING SOLUTIONS CONCENTRATION

ANDREI O. ZENEVICH, TATIANA G. KOVALENKO, EVGENIY V. NOVIKOV,
SIARHEI V. ZHDANOVICH

Belarusian State Academy of Communications (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 14.06.2023

Abstract. Fiber-optic sensors for identifying liquids and determining the concentration of solutions have been studied with the possibility of using various types of single-mode optical fibers produced by industry and widely used in optical cables and telecommunications to create sensors for identifying liquids and determining the concentration of solutions. To identify liquids with different refractive indices and determine the concentration of sub-

stances dissolved in water, the peak value of the reflectograms of the optical fiber located at the interface between the optical fiber core and the environment can be used as an information parameter. The value of the information parameter depends on the refractive index of the liquid in which one end of the optical fiber is located. The parameters of fiber-optic sensors for identifying liquids and determining the concentration of solutions were studied by optical reflectometry in different wavelength ranges of optical radiation with a duration of reflectometer probe pulses from 25 to 300 ns. It has been established that the fiber-optic sensor can operate at any wavelength of optical radiation corresponding to the transparency windows of the optical loss spectrum of the optical fiber. The influence of the length of the optical fiber between the recording device and the place where the concentration of a liquid solution is determined using a fiber-optic sensor was studied. The possibility of creating a fiber-optic sensor for determining the concentration of the liquid solutions based on optical fibers has been demonstrated.

Keywords: optical fiber, sensor, reflection coefficient, refractive index, reflectometer, solution concentration.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Zenevich A. O., Kovalenko T. G., Novikov E. V., Zhdanovich S. V. (2023) Fiber-Optic Sensor for Identifying Liquids and Determining Solutions Concentration. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-14-20> (in Russian).

Введение

Датчики на основе оптоволокна химически нейтральны, устойчивы к различного рода химическим воздействиям и могут использоваться для контроля состояния объектов с легковоспламеняющимися и взрывоопасными жидкостями [1–3]. В связи с этим особый интерес представляет их применение в химической и пищевой промышленности для определения наличия и уровня жидкостей в производственных емкостях, а также для измерения концентрации растворов. В [4] показана возможность использования оптического волокна как основы датчиков для идентификации жидкостей и определения концентрации растворенных в воде веществ. Доказано, что в сочетании с методом оптической рефлектометрии оптоволокно может применяться для создания таких датчиков.

Для идентификации жидкостей, имеющих разные показатели преломления, а также определения концентрации растворенных в воде веществ в качестве информационного параметра можно использовать величину пика рефлектограммы оптического волокна, находящегося на границе раздела сердцевины оптического волокна и окружающей среды [4]. Величина информационного параметра зависит от показателя преломления жидкости, в которой находится торец оптоволокна.

В статье рассмотрена возможность использования различных типов оптоволокна, массово выпускаемого промышленностью и широко применяемого в оптических кабелях и телекоммуникациях, для создания датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов. Методом оптической рефлектометрии установлены параметры датчиков в диапазоне длин волн оптического излучения, используемого в таких волокнах.

Методика проведения эксперимента

В качестве объектов исследований рассматривались серийно выпускаемые одномодовые оптические волокна с параметрами, соответствующими рекомендациям МСЭ-Т G.652 и МСЭ-Т G.657. Такие волокна часто используются в оптических кабелях, что позволяет упростить сопряжение датчика на основе оптоволокна с кабелем, применяемым для передачи данных о его состоянии.

Исследования проводили с помощью метода оптической рефлектометрии. Экспериментальная установка состояла из рефлектометра, к которому подключалось оптическое волокно (катушка с оптоволокном). На одной из сторон катушки на оптоволокне с помощью прецизионного скальвателя оптического волокна формировался торец с ровной поверхностью, перпендикулярной оси оптоволокна. Качество скола контролировали с применением микроскопа. Использовали катушки с оптическим волокном разных типов и длины (до 4 км). Торец оптоволокна помещался в емкость с жидкостью. Измерения выполняли поверенными и калиброванными оптическими рефлектометрами МТР 6000 и FX 300 в соответствии с требованиями ГОСТ ISO/IEC 17025–2019. Эксперименты проводили при следующих параметрах: температура окружающей среды 20–25 °С, влажность до 70 %, атмосферное давление 975–1025 гПа. Измеряли четыре длины волн оптического излучения (1310, 1490, 1550 и 1625 нм), соответствующие окнам прозрачности спектра

оптических потерь оптоволокна. Длительность зондирующих импульсов рефлектометра находилась в диапазоне 3–300 нс.

Принцип работы экспериментальной установки заключался в том, что торец оптического волокна частично отражал излучение. Если изменялся показатель преломления оптического излучения среды, в которой находился торец оптоволокна, то изменялся и коэффициент отражения оптического излучения от границы раздела сред. Это приводило к изменению мощности отраженного оптического излучения, регистрируемого рефлектометром. Одной средой являлась сердцевина оптоволокна, другой – вещество, в которое погружался торец волокна. Для веществ, имеющих разные показатели преломления, наблюдались различные коэффициенты отражения оптического излучения от границы раздела сред. При попадании оптического излучения на границу раздела двух сред с различными показателями преломления только часть его выходила из оптического волокна, а часть отражалась обратно в него. Чем сильнее отличались показатели преломления сердцевины оптоволокна и вещества, в которое погружался торец волокна, тем больше был коэффициент отражения [5] и большая часть оптического излучения отражалась.

Для определения концентрации растворов и идентификации жидкостей, имеющих разные показатели преломления, в качестве информационного параметра использовали величину пика рефлектограммы оптического волокна, находящегося на границе раздела сердцевины оптоволокна и окружающей среды [4]. Величина этого параметра зависит от показателя преломления жидкости, в которой находится торец оптического волокна. Методика определения информационного параметра представлена на рис. 1, где приведены участки рефлектограмм в области торца оптоволокна G.652, помещенного в воду, в изопропиловый спирт и глицерин. Рефлектограммы получали на длине волны оптического излучения 1310 нм. На каждой рефлектограмме пик соответствует отражению излучения от торца оптоволокна при длине оптического волокна $L = 1,48$ км. Величину пика рефлектограммы оптоволокна (информационного параметра) f в месте границы раздела сердцевины оптического волокна и окружающей среды определяли по формуле

$$f = a_p - a_e, \quad (1)$$

где a_p , a_e – значение ослабления по шкале рефлектометра в точке максимума пика и перед пиком рефлектограммы, дБ.

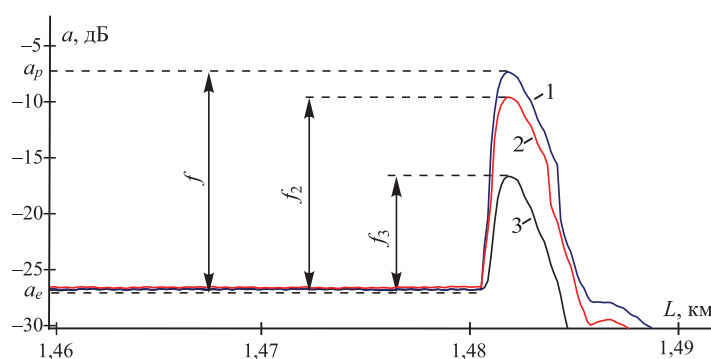


Рис. 1. Фрагменты рефлектограмм в торце оптического волокна, находящегося в:

1 – воде; 2 – изопропиловом спирте; 3 – глицерине;

f, f_2, f_3 – пики рефлектограмм для воды, изопропилового спирта и глицерина соответственно

Fig. 1. Fragments of reflectograms at the end of an optical fiber located in: 1 – water; 2 – isopropyl alcohol; 3 – glycerol; f, f_2, f_3 – reflectogram peaks for water, isopropyl alcohol and glycerol, respectively

Согласно рис. 1, величина пика рефлектограммы для каждой среды имеет свое значение – f, f_2 или f_3 , причем $f > f_2 > f_3$. Таким образом, по величине пика рефлектограммы можно определить, в какой из этих жидких сред находится торец оптического волокна.

Результаты исследований и их обсуждение

Величину пика рефлектограммы определяли при помещении торца оптоволокна в различные жидкие среды – в воду, изопропиловый спирт, глицерин, подсолнечное масло. Для использовавшихся в эксперименте оптических волокон G.652 и G.657 получены результаты зависимостей

величины пика рефлектограммы во всем исследуемом диапазоне длин волн оптического излучения (1310–1625 нм) при длительностях зондирующих импульсов рефлектометра 3, 5, 10, 25, 100, 200 и 300 нс. На рис. 2, *a* приведены результаты для оптического волокна G.652, где штриховой линией показаны зависимости величины пика рефлектограммы от длины волны оптического излучения, полученные с помощью рефлектометра FX 300, а сплошной линией – зависимости величины пика рефлектограммы, полученные на рефлектометре МТР 6000. Рис. 2, *b* демонстрирует зависимость величины пика рефлектограммы от длительности зондирующего импульса рефлектометра при помещении торца оптоволоконна G.652 в различные жидкости.

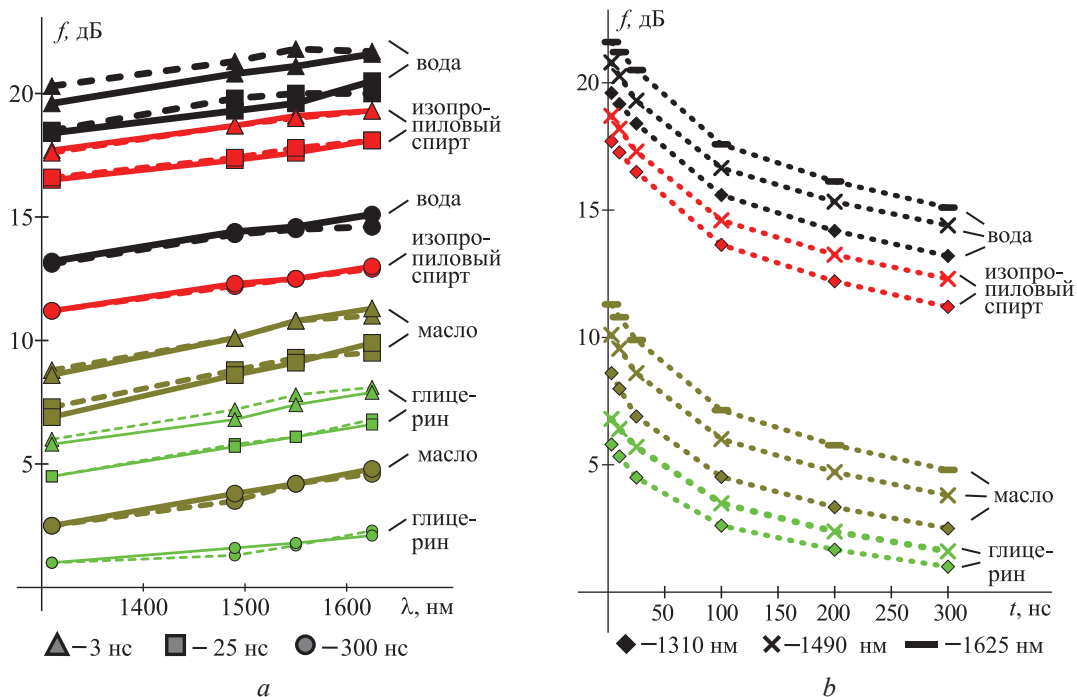


Рис. 2. Зависимости величины пика рефлектограммы от: *a* – длины волны оптического излучения; *b* – длительности зондирующего импульса рефлектометра

Fig. 2. Dependences of the reflectogram peak value of the reflection signal on the: *a* – wavelength of optical radiation; *b* – reflectometer pulse duration

Полученные с помощью двух рефлектометров зависимости величины пика рефлектограммы практически совпадают (рис. 2), что подтверждает возможность использования метода рефлектометрии для определения концентрации растворов и идентификации жидкостей по величине пика рефлектограммы, являющегося информационным параметром. Представленные на рис. 2 результаты демонстрируют, что исследуемый датчик на основе оптического волокна позволяет по величине пика рефлектограммы определить, в какой из жидких сред находится торец оптоволоконна при различных длинах волн оптического излучения (рис. 2, *a*) и длительностях зондирующих импульсов рефлектометра (рис. 2, *b*).

Согласно рис. 2, при увеличении длины волны оптического излучения регистрируется большая величина пика рефлектограммы и, соответственно, мощность отраженного оптического излучения от торца оптоволоконна, находящегося в жидкой среде. Это свидетельствует об увеличении коэффициента отражения [5] и разности между показателями преломления жидкости и оптоволоконна G.652 при увеличении длины волны. Для оптических волокон G.652 и G.657 показатель преломления больше при большей длине волны, для жидкостей он уменьшается при увеличении длины волны в исследуемом диапазоне (например, для воды при длине волны от 0,5 до 1,3 мкм показатель преломления изменяется от 1,336 до 1,321) [6, 7].

Наибольшая величина пика рефлектограммы наблюдается при минимальной длительности зондирующего импульса рефлектометра 3 нс (рис. 2, *a*), а при увеличении длительности величина пика рефлектограммы уменьшается. Значение последней зависит от мощности оптического излучения, направляемого рефлектометром в оптоволоконно. При меньших длительностях зондирующих импульсов в рефлектометрах используются зондирующие импульсы с большей

пиковой мощностью, а при больших длительностях импульса мощность необходимо уменьшать, чтобы исключить перегрев лазера. Для длительностей зондирующих импульсов рефлектометра менее 25 нс наблюдается нестабильность отображения на рефлектограмме величины пика. Определено, что оптимальным для использования является диапазон зондирующих импульсов от 25 до 300 нс (рис. 2, *b*).

Поскольку рефлектометр показывает относительные уровни ослабления в децибелах, для каждой длины волны и каждой длительности зондирующего импульса зависимость информационного параметра пропорциональна коэффициенту отражения на границе оптического волокна и среды, в которой находится торец волокна. Это подтверждается экспериментальными результатами, представленными на рис. 2, где зависимости смещены по оси ординат (информационный параметр, соответствующий пику рефлектограммы) на величину, определяемую коэффициентом отражения и параметрами оптического излучения.

Возможность измерения концентрации растворов различных веществ с помощью волоконно-оптического датчика продемонстрируем на примере измерения концентрации раствора сахара (рис. 3). На рис. 3 изображены зависимости величины пика рефлектограммы от концентрации водного раствора сахара для оптического волокна G.652.

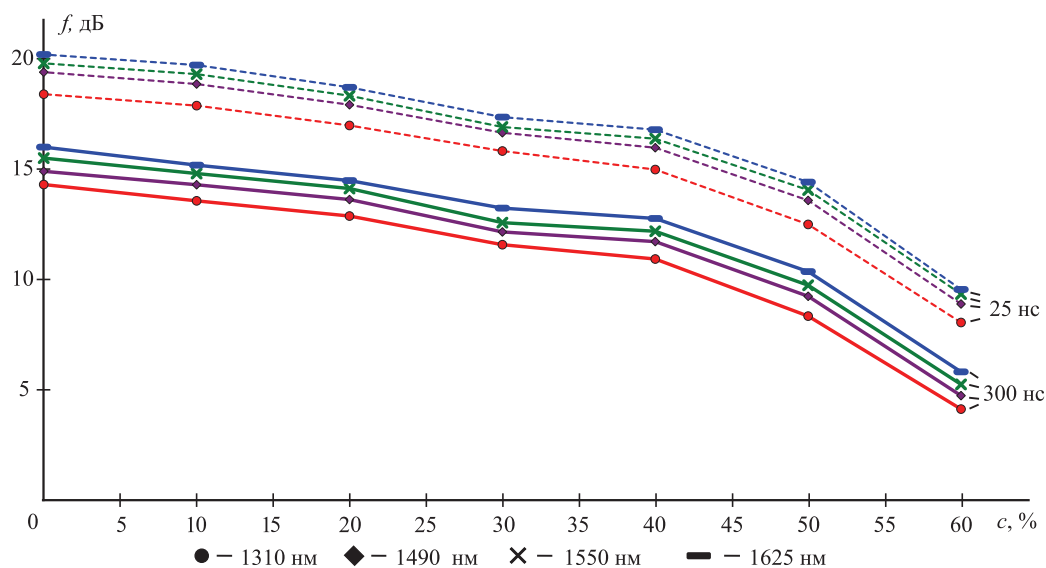


Рис. 3. Зависимость величины пика рефлектограммы от концентрации водного раствора сахара для оптического волокна G.652

Fig. 3. Dependence of the peak value of the reflectogram on the concentration of an aqueous sugar solution for optical fiber G.652

На рис. 3 представлены результаты исследования, проведенного на четырех длинах волн оптического излучения при длительностях зондирующих импульсов рефлектометра 25 и 300 нс. Каждой величине концентрации c водного раствора сахара соответствует определенное значение пика рефлектограммы, что позволяет создать волоконно-оптический датчик для определения концентрации различных растворов. Характер зависимостей при разных длинах волн оптического излучения показывает, что волоконно-оптический датчик может работать на любой длине волны оптического излучения, соответствующей окнам прозрачности спектра оптических потерь оптоволокна.

Исследовали влияние длины оптического волокна между регистрирующим устройством и торцом оптоволокна на характеристики датчика концентрации растворов жидкостей при разной концентрации сахара в них. Использовали оптические волокна G.652 и G.657A длиной 1,48 и 3,18 км соответственно. Результаты экспериментов, проведенных на длине волны 1625 нм, представлены на рис. 4. Характер зависимостей для длин волокон 1,48 и 3,18 км одинаков в диапазоне длительности зондирующих импульсов рефлектометра 3–300 нс. Различия наблюдаются только для величины пика рефлектограммы при разных концентрациях раствора сахара.

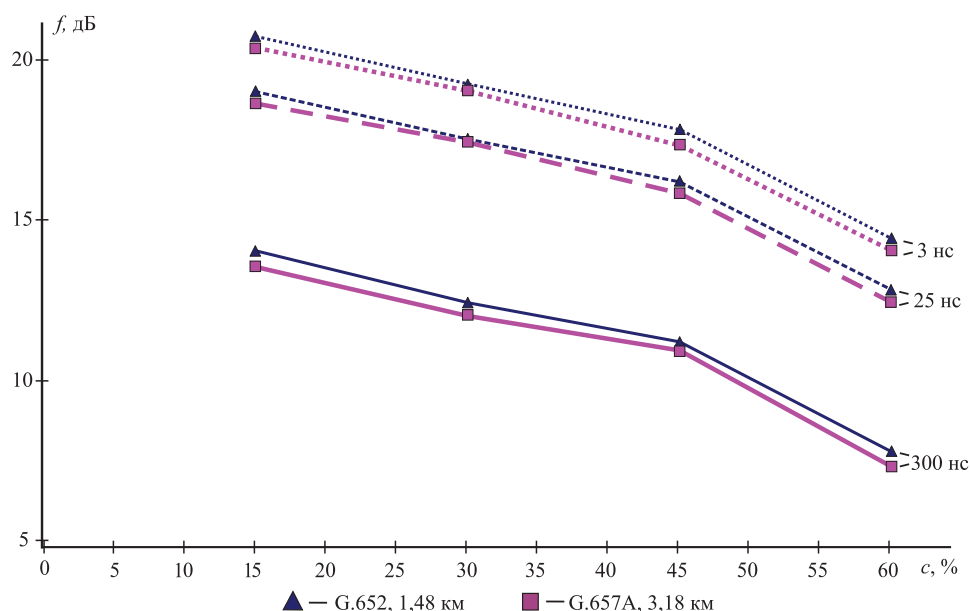


Рис. 4. Зависимость величины пика рефлектограммы от концентрации водного раствора сахара для оптических волокон G.652 и G.657A

Fig. 4. Dependence of the reflectogram peak value on the concentration of an aqueous sugar solution for optical fibers G.652 and G.657A

Графики величины пика рефлектограммы для оптоволокна G.657A расположены ниже графиков для G.652, значит, регистрируется отраженное оптическое излучение меньшей мощности. Это обусловлено большей величиной показателя преломления оптоволокна G.657A, чем G.652. Соответственно, при использовании оптического волокна G.657A коэффициент отражения на границе раздела двух сред будет меньше [5, 7]. Полученные результаты для G.652 и G.657A показывают возможность применения оптических волокон различных типов для создания волоконно-оптического датчика определения концентрации растворов жидкостей. Используя представленные на рис. 3, 4 зависимости величины пика рефлектограммы от концентрации водного раствора сахара, можно провести калибровку волоконно-оптического датчика определения концентрации водных растворов как для сахара, так и для других жидкостей.

Заключение

1. Методом оптической рефлектометрии установлены параметры волоконно-оптических датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов в диапазоне длин волн оптического излучения 1310–1625 нм. Найден оптимальный диапазон длительности зондирующих импульсов в пределах 25–300 нс. Установлено, что волоконно-оптический датчик может работать на любой длине волны оптического излучения, соответствующей окнам прозрачности спектра оптических потерь оптоволокна.

2. Исследовано влияние длины оптического волокна между регистрирующим устройством и местом определения концентрации раствора жидкости с помощью волоконно-оптического датчика. Установлена возможность размещения датчика на расстоянии более 3 км (длина оптоволокна). При этом информация с датчика поступает в место регистрации по этому же оптическому волокну, а в месте размещения датчика не требуется наличия электронных устройств, элементов питания и механических приспособлений.

3. Показана возможность создания волоконно-оптического датчика определения концентрации растворов жидкостей на основе оптических волокон различных типов (G.652 и G.657A), массово выпускаемых промышленностью и широко применяемых в оптических кабелях и телекоммуникациях.

Список литературы

1. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Удда. М.: Техносфера, 2008. 520 с.

2. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси [и др.], пер. с япон. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1991. 256 с.
3. Вялышев, А. И. Волоконно-оптические датчики для контроля параметров состояния объектов и окружающей среды в задачах мониторинга / А. И. Вялышев [и др.] // Природообустройство. 2014. № 3. С. 32–37.
4. Оптическое волокно как основа для создания датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов / А. О. Зеневич [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 895–901. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-895-901.
5. Шредер, Г. Техническая оптика / Г. Шредер, Х. Трайбер; пер. с нем. М.: Техносфера, 2002. 424 с.
6. Ахманов, С. А. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов / С. А. Ахманов, В. А. Выслоух, А. С. Чиркин. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 312 с.
7. Оптика и связь. Оптическая передача и обработка информации / А. Козанне [и др.]; пер. с фр. М.: Мир, 1984. 504 с.

References

1. Udd E. (ed.) (2008) *Fiber-Optic Sensors. Introductory Course for Engineers and Scientists*. Moscow, Technosphere Publ. 520 (in Russian).
2. Okosi T., Okamoto K., Otsu M., Nishihara H., Kyuma K., Hatate K. (1991) *Fiber-Optic Sensors, Transl.* Leningrad, Energoatomizdat, Leningrad Branch Publ. 256 (in Russian).
3. Vyalyshv A. I., Dobrov V. M., Dolgov A. A., Butov O. V., Pleshkov A. Yu. (2014) Fiber-Optic Sensors for Monitoring the Parameters of the State of Objects and the Environment in Monitoring Tasks. *Environmental Management*. (3), 32–37 (in Russian).
4. Zenevich A. O., Mansurov T. M., Kovalenko T. G., Novikov E. V., Zhdanovich S. V., Matkovskaia T. A. (2022) Optical Fiber as a Basis for Creating Sensors for Identifying Liquids and Determining the Concentration of Solutions. *Journal of Instrument Engineering*. 65 (12), 895–901. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-895-901 (in Russian).
5. Schroder G., Treiber H. (2002) *Technische Optik*. Moscow, Technosphere Publ. 424 (in Russian).
6. Akhmanov S. A., Vysloukh V. A., Chirkin A. S. (1988) *Optics of Femtosecond Laser Pulses*. Moscow, Science. Main Editorial Office of Physical and Mathematical Literature Publ. 312 (in Russian).
7. Cozannet A., Fleuret J., Maitre H., Rousseau M. (1984) *Optics and Communications. Optical Transmission and Information Processing*. Moscow, Mir Publ. 504 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Зеневич А. О., д-р техн. наук, проф., ректор Белорусской государственной академии связи

Коваленко Т. Г., асп. Белорусской государственной академии связи

Новиков Е. В., канд. техн. наук, доц., дир. Института современных технологий связи Белорусской государственной академии связи

Жданович С. В., канд. техн. наук, доц., зав. отраслевой лабораторией перспективных информационно-коммуникационных технологий Белорусской государственной академии связи

Адрес для корреспонденции

220076, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Франциска Скорины, 8/2
Белорусская государственная академия связи
Тел.: +375 29 351-23-45
E-mail: zsvzsv@tut.by
Жданович Сергей Вячеславович

Information about the authors

Zenevich A. O., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Rector of Belarusian State Academy of Communications

Kovalenko T. G., Postgraduate at the Belarusian State Academy of Communications

Novikov E. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Director of the Institute of Modern Communication Technologies of the Belarusian State Academy of Communications

Zhdanovich S. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Industry Laboratory of Perspective Information and Communication Technologies of the Belarusian State Academy of Communications

Address for correspondence

220076, Republic of Belarus,
Minsk, Francisk Skorina St., 8/2
Belarusian State Academy of Communications
Tel.: +375 29 351-23-45
E-mail: zsvzsv@tut.by
Zhdanovich Siarhei Viacheslavovich