

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЖИДКОСТЕЙ  
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ  
ПРИ ПОМОЩИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА**

А. О. ЗЕНЕВИЧ<sup>1</sup>, Т. М. МАНСУРОВ<sup>2</sup>, Т. Г. КОВАЛЕНКО<sup>1\*</sup>,  
Е. В. НОВИКОВ<sup>1</sup>, С. В. ЖДАНОВИЧ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусская государственная академия связи, Минск, Беларусь  
\*tgkov@yandex.by

<sup>2</sup>Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

**Аннотация.** Предложен простой в использовании способ идентификации жидкостей и определения концентрации растворенных в воде веществ, при реализации которого применяется короткое оптическое волокно (1—1,5 м) и не требуется сложное и дорогостоящее оборудование. Согласно предложенному способу, в оптическое волокно направляется оптическое излучение постоянной мощности и на этой же стороне волокна регистрируется мощность излучения, отраженного от удаленного торца данного волокна, погруженного в жидкость. Определено, что для реализации предложенного способа может быть использовано как одномодовое, так и многомодовое оптическое волокно с использованием длин волн оптического излучения 650, 850, 1310, 1490, 1550 и 1625 нм, причем применение длин волн 650 и 850 нм менее желательно ввиду большей погрешности измерения, чем для других длин волн. Показано, что предложенный способ может быть применен, в частности, для определения концентрации водных растворов сахара и изопропилового спирта.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, датчик, коэффициент отражения, концентрация, раствор, оптическое излучение

**Ссылка для цитирования:** Зеневич А. О., Мансуров Т. М., Коваленко Т. Г., Новиков Е. В., Жданович С. В. Идентификация жидкостей и определение концентрации водных растворов при помощи оптического волокна // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 10. С. 869—875. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-869-875.

**IDENTIFICATION OF LIQUIDS AND DETERMINATION  
OF AQUEOUS SOLUTIONS CONCENTRATION USING  
OPTICAL FIBER**

A. O. Zenevich<sup>1</sup>, T. M. Mansurov<sup>2</sup>, T. G. Kovalenko<sup>1\*</sup>, E. V. Novikov<sup>1</sup>, S. V. Zhdanovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus  
\*tgkov@yandex.by

<sup>2</sup>Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

**Abstract.** An easy-to-use method for identifying liquids and determining the concentration of substances dissolved in water is proposed, the method implementation uses short optical fiber (1–1.5 m) and does not require complex and expensive equipment. According to the proposed method, optical radiation of constant power is directed into the optical fiber, and on the same side of the fiber the power of the radiation reflected from the remote end of the fiber immersed in the liquid is recorded. It is deduced that to implement the proposed method, both single-mode and multimode optical fiber can be used using optical wavelengths of 650, 850, 1310, 1490, 1550 and 1625 nm, while the use of wavelengths 650 and 850 nm is less desirable due to greater measurement error than for other wavelengths. It is shown that the proposed method can be applied, in particular, to determine the concentration of aqueous solutions of sugar and isopropyl alcohol.

**Keywords:** optical fiber, sensor, reflection coefficient, concentration, solution, optical radiation

**For citation:** Zenevich A. O., Mansurov T. M., Kovalenko T. G., Novikov E. V., Zhdanovich S. V. Identification of liquids and determination of aqueous solutions concentration using optical fiber. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 10. P. 869—875 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-10-869-875.

**Введение.** В последнее время в системах мониторинга состояния объектов все чаще применяются датчики на основе оптического волокна [1—5]. По сравнению с другими видами датчиков, они обладают рядом преимуществ: электробезопасностью, невосприимчивостью к электромагнитным воздействиям, возможностью использования в сочетании с оптическими волокнами, по которым передаются данные о состоянии контролируемой среды или объекта.

Датчики на основе оптического волокна химически нейтральны и достаточно устойчивы к различным химическим воздействиям, они могут применяться для контроля состояния объектов хранения и использования легковоспламеняющихся и взрывоопасных веществ [6]. В связи с этим подобные датчики широко применяются в химической и пищевой промышленности для определения уровня жидкости в производственных емкостях и измерения концентрации растворов [7, 8].

В работе [9] предложен способ идентификации типа жидкостей и определения концентрации растворенных в воде веществ, основанный на использовании рефлектометрии погруженного в раствор оптического волокна. Отметим, однако, что для рефлектометров характерно наличие мертвых зон, т.е. таких участков оптического волокна, с которых нельзя получить информацию об уровне обратнорассеянного или отраженного сигнала [10], что приводит к необходимости использования достаточно протяженного волокна ( $\geq 100$  м). Сам рефлектометр является сложным и дорогим устройством. Все это усложняет и удорожает применение такого способа идентификации.

Поэтому целью настоящей работы является создание простого в реализации способа идентификации жидкостей и определения концентрации растворенных в воде веществ, при котором используется короткое оптическое волокно (1—1,5 м) и не требуется применение сложного и дорогостоящего оборудования.

**Экспериментальная установка.** Сущность предлагаемого способа заключается в том, что в отрезок оптического волокна направляется оптическое излучение заданной постоянной мощности и на этой же стороне отрезка регистрируется мощность оптического излучения, отраженного от торца удаленной стороны отрезка оптического волокна.

По величине мощности оптического излучения, отраженной от торца оптического волокна, можно идентифицировать вид жидкости, в которую погружен этот торец. Это связано с тем, что разные жидкости имеют различающиеся показатели преломления оптического излучения и отличные от показателя преломления сердцевины оптического волокна. Поэтому в месте соприкосновения торца волокна с жидкостью часть оптического излучения выходит за пределы оптического волокна в жидкость, а другая часть — отражается от границы раздела сердцевины волокна и жидкости, поступая обратно в оптическое волокно. Величина мощности оптического излучения, вернувшейся в оптическое волокно, будет зависеть от разности показателей преломления жидкости и сердцевины оптического волокна.

Также по мощности оптического излучения, отраженного от торца оптического волокна, можно определить концентрацию растворенного в воде вещества, благодаря тому что от нее зависит показатель преломления раствора.

Отметим, что отражение части оптического излучения от торца отрезка волокна характерно и для оптического волокна, находящегося в воздухе.

Для реализации предлагаемого способа использовалась экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рис. 1 (НИ — набор источников оптического излучения, ИМ1 и ИМ2 — измерители мощности, ПЧ1 и ПЧ2 — патчкорды, Р — волоконно-оптический разветвитель, ОВ — оптическое волокно, Е — емкость с жидкостью).

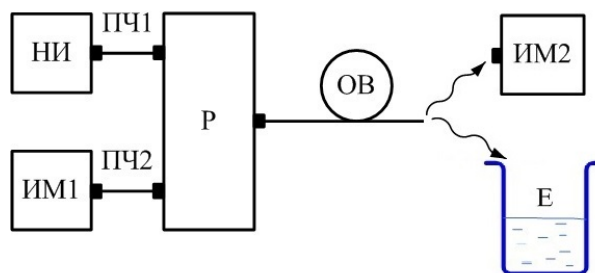


Рис. 1

В экспериментальной установке используется набор источников оптического излучения с  $\lambda = 650, 850, 1310, 1490, 1550$  и  $1625$  нм. Такие значения длины волны соответствуют „окнам прозрачности“ оптических волокон. Исключением является длина волны  $650$  нм, использованная для оценки возможности применения при реализации данного способа оптического излучения видимого диапазона спектра. Мощность источников оптического излучения —  $1$  мВт.

Излучение от одного из источников направляется на один из входов двунаправленного волоконно-оптического разветвителя Р. Для этого используется патчкорд ПЧ1. Излучение со входа волоконно-оптического разветвителя поступает на его выход, а затем — в оптическое волокно ОБ. Часть излучения, достигнув выхода оптического волокна, выходит за пределы волокна, а другая — отражается от торца волокна.

Отразившаяся часть мощности оптического излучения поступает на выход волоконно-оптического разветвителя Р, а затем в равных частях распределяется между двумя его входами.

Использование волоконно-оптического разветвителя Р с таким коэффициентом деления обеспечивает достаточную для регистрации величину мощности отраженного сигнала. При других коэффициентах деления необходимо увеличивать мощность оптического излучения источника с целью получения достаточной для регистрации мощности отраженного сигнала либо повышать чувствительность измерителя мощности.

Мощность оптического излучения на втором входе разветвителя измеряется измерителем мощности ИМ1, подключенным к разветвителю патчкордом ПЧ2.

При идентификации жидкостей и определении концентрации растворенных в воде веществ выход оптического волокна ОБ помещается в емкость Е с жидкостью или в водный раствор. Торцевой конец оптического волокна ОБ располагается в емкости на  $2\text{--}3$  см ниже уровня жидкости.

Для измерения мощности оптического излучения на выходе оптического волокна используется измеритель ИМ2. При этом выходной конец ОБ извлекается из емкости Е с жидкостью.

В качестве измерителей мощности ИМ1 и ИМ2 использованы калиброванные и поверенные оптические многофункциональные приборы МТР 9000.

В процессе измерений определяется коэффициент отражения мощности оптического излучения от границы раздела сердцевины волокна и жидкости. Коэффициент отражения  $k$  характеризует способность объекта отражать падающее на него оптическое излучение:

$$k = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{п}}} \times 100 \%, \quad (1)$$

где  $P_{\text{п}}$  — мощность оптического излучения, падающего на границу раздела сердцевины оптического волокна и окружающей среды;  $P_{\text{отр}}$  — мощность оптического излучения, отраженного от границы раздела сердцевины оптического волокна и окружающей среды.

Значение  $P_{\text{п}}$  определяется на основе мощности источника оптического излучения, подключенного к разветвителю Р, с учетом потерь мощности излучения на соединениях в экспериментальной установке. Потерей мощности оптического излучения в волокне можно пренебречь, поскольку длина отрезка волокна ОБ не более  $1,5$  м, а наибольшая потеря мощности

в этом волокне 4 дБ/км. При определении величины  $P_{отр}$  учитывается, что на измеритель мощности ИМ1 через разветвитель Р поступает только половина мощности обратно отраженного в оптическое волокно излучения.

Измерения выполнены согласно требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025-2019\*, при этом контролировались условия окружающей среды: температура от 20 до 25 °С, влажность до 70 %, атмосферное давление от 975 до 1025 ГПа.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В процессе исследований определен коэффициент отражения излучения от границы раздела воздуха и сердцевины одномодовых оптических волокон G652, G655, G657 и многомодового оптического волокна G651 для различных значений длины волны оптического излучения. Величина этого коэффициента оставалась постоянной для исследуемых длин волн —  $k = 2,7 \%$ . Это связано с тем, что показатель преломления сердцевины волокна был приблизительно одинаковым для всех рассматриваемых волокон и не зависел от длины волны или изменялся незначительно в рассматриваемом нами диапазоне длин волн излучения.

Согласно оценке, относительная погрешность измерения коэффициента отражения от границы раздела сердцевины оптического волокна и воздуха составляет: для  $\lambda = 650$  нм — 5,2 %; 850 — 3,0; 1310 — 0,2; 1490 — 0,7; 1550 — 0,5; 1625 — 1,0. Погрешность измерения определялась в основном нестабильностью мощности используемого источника оптического излучения [11]. Как видно, наименьшая погрешность измерения для  $\lambda = 1310$  нм. Наибольшая нестабильность мощности наблюдается для источников с  $\lambda = 650$  и 850 нм, что связано с тем, что для генерации излучения с этими длинами волн применялся полупроводниковый лазер с резонаторами Фабри—Перо. Для генерации других длин волн использовались полупроводниковые лазеры с распределенными брэгговскими отражателями.

Полупроводниковые лазеры с резонаторами Фабри—Перо имеют поперечные собственные моды, искажающие спектр генерации лазера, что приводит к нестабильности мощности их излучения. Полупроводниковые лазеры с распределенными брэгговскими отражателями не имеют этого недостатка. В связи с этим такие лазеры имеют меньшую нестабильность мощности оптического излучения, чем лазеры с резонаторами Фабри—Перо [12—15].

Среди полупроводниковых лазеров с распределенными брэгговскими отражателями наименьшая нестабильность наблюдалась для лазеров с  $\lambda = 1310$  нм. Поэтому далее для определения значений коэффициента отражения использовалась эта длина волны.

При выполнении исследований в качестве тестовых веществ использовались жидкости, имеющие различные показатели преломления (см. таблицу).

**Данные о коэффициенте отражения  
от границы раздела сердцевины оптического волокна и жидкости**

Вид жидкости	$k, \%$	$P_{отр}, \text{мкВт}$
Вода	0,18	1,86
Водный раствор изопропилового спирта 40 %-ный	0,12	1,29
Водный раствор сахара 40 %-ный	0,06	0,62
Глицерин	0,02	0,21

Экспериментальные данные, представленные в таблице, подтверждают наличие прямо пропорциональной зависимости между коэффициентом отражения жидкости и мощностью отраженного оптического излучения. Таким образом, предлагаемый способ, естественно, не позволяет выполнить химический анализ жидкости, но может быть использован для проверки наличия в емкости определенного вещества или примеси такого вещества в основном продукте.

Исследованы также зависимости мощности оптического излучения  $P_{отр}$  от концентрации  $C$  водных растворов сахара и изопропилового спирта. Полученные результаты для

\* ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 „Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий“.

$\lambda = 1310$  нм представлены на рис. 2 (1 — раствор изопропилового спирта; 2 — раствор сахара). Как видно из рис. 2, зависимости  $P_{\text{отр}}$  от концентрации  $C$  в исследуемом диапазоне концентраций близки к линейным, причем увеличение концентрации раствора приводит к уменьшению  $P_{\text{отр}}$ . Такой характер зависимостей связан с тем, что с увеличением концентрации показатель преломления для раствора повышается, приближаясь к показателю преломления сердцевины оптического волокна. В результате уменьшается коэффициент отражения  $k$ , а значит, и величина  $P_{\text{отр}}$ .

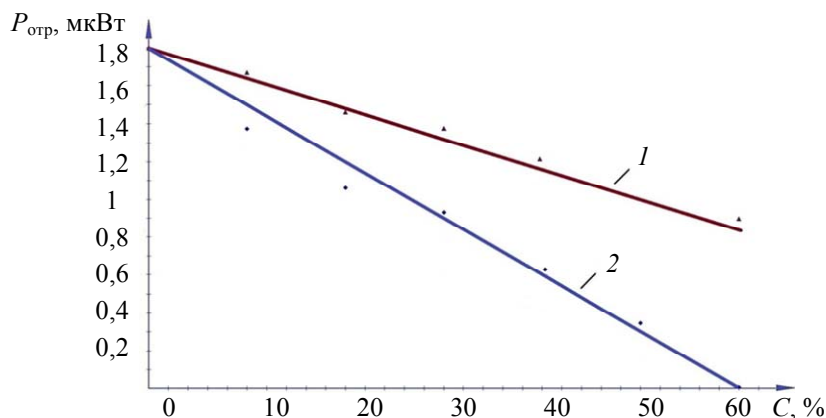


Рис. 2

Как следует из рис. 2, угол наклона зависимостей к горизонтальной оси различается для растворов сахара и изопропилового спирта. Это объясняется тем, что у этих растворов показатели преломления по-разному зависят от концентрации. Кривые выходят из одной точки, так как при  $C = 0$  для всех растворов показатель преломления равен показателю преломления воды. При максимальной концентрации раствора изопропилового спирта показатель преломления не может превышать 1,377 [9]. Для концентрации раствора сахара в воде  $C = 60$  % его показатель преломления составляет 1,442 [9], что достаточно близко к показателю преломления сердцевины оптического волокна.

Отметим, что мощность оптического излучения  $P_{\text{отр}}$  при изменении концентрации  $C$  варьирует таким же образом, как и информационный параметр, предложенный нами в работе [9]. При этом измерение мощности отраженного оптического излучения позволяет обеспечить более высокую чувствительность при определении концентрации вещества, по сравнению с ранее предложенным способом, использующим оптическую рефлектометрию [9].

Кроме того, рассматриваемый в настоящей работе подход может быть реализован на коротких отрезках оптического волокна (1—1,5 м), не требует использования такого сложного и дорогостоящего оборудования, как оптический рефлектометр, и упрощает обработку результатов измерений.

**Заключение.** Предложен простой в реализации способ идентификации жидкостей и определения концентрации растворенных в воде веществ. Сущность способа заключается в том, что в оптическое волокно направляется оптическое излучение постоянной мощности и на этой же стороне волокна регистрируется мощность оптического излучения, отраженного от погруженного в жидкость удаленного торца данного оптического волокна.

Определено, что для реализации предложенного способа может быть использовано как одномодовое, так и многомодовое оптическое волокно. При реализации способа может быть использовано оптическое излучение на длинах волн 650, 850, 1310, 1490, 1550 и 1625 нм. Однако использование оптического излучения 650 и 850 нм приводит к большей погрешности измерения, чем для другой длины.

Показано, что предложенный способ может быть применен, в частности, для определения концентрации водных растворов сахара и изопропилового спирта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов А. В., Игнатъев А. В. Обзор волоконно-оптических систем охраны периметра // Алгоритмы безопасности. 2010. № 4. С. 56—61.
2. Качура С. М., Постнов В. И. Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 5(77). С. 52—60.
3. Connolly C. Structural monitoring with fibre optics // Europhotonics. 2009. N 2—3. P. 16—18.
4. Franz J., Jain V. Optical communications. Components and Systems: analysis: design: optimization: application. CRC Press, 2000. 717 p.
5. Зеневич А. О., Жданович С. В., Новиков Е. В., Матковская Т. А., Коваленко Т. Г. Исследование возможности совмещения волоконно-оптической линии связи и системы мониторинга объекта // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 406—412.
6. Вяльцев А. И., Добров В. М., Долгов А. А., Бутов О. В., Плешков А. Ю. Волоконно-оптические датчики для контроля параметров состояния объектов и окружающей среды в задачах мониторинга // Природообустройство. 2014. № 3. С. 32—37.
7. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / Под ред. С. А. Дмитриева и Н. Н. Слепова. М.: Техносфера, 2010. 608 с.
8. Гулаков И. Р., Зеневич А. О. Волоконно-оптические датчики физических величин. Минск: Белорусская государственная академия связи, 2022. 367 с.
9. Зеневич А. О., Мансуров Т. М., Коваленко Т. Г., Новиков Е. В., Жданович С. В., Матковская Т. А. Использование оптического волокна как основы для создания датчиков идентификации жидкостей и определения концентрации растворов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. № 12. С. 895—901.
10. OTDR Dead Zone Explained: How to Eliminate Its Effect? // FS Community [Электронный ресурс]: <<https://community.fs.com/blog/otdr-optical-time-domain-reflectometer-dead-zone-tutorial.html>>. (19.03.2023).
11. Лагутик А. А., Матковская Т. А. Исследование влияния коэффициента ослабления аттенуатора на нестабильность мощности источника оптического излучения // Веснік сувязі. 2022. № 4. С. 54—57.
12. Веснин В. Л., Низаметдинов А. М., Иванов О. В., Черторийский А. А. Волоконно-оптические брэгговские решетки как спектрально-селективные элементы при обработке сигнала волоконно-оптического брэгговского датчика // Датчики и системы. 2018. № 3(223). С. 27—32.
13. Koeth J. J., Fischer M., Legge M., Seufert J., Werner R. Quantum well-, quantum dot-, and quantum cascade lasers with DFB-gratings. Photonik International, 2006. P. 60—63.
14. Werle P. Diode-Laser Sensors for in-situ Gas Analysis // Lasers in Environmental and Life Sciences – Modern Analytical Methods. Springer, Heidelberg, 2004. P. 223—243.
15. Лазерные источники с резонатором Фабри-Перо [Электронный ресурс]: <[https://azimp.ru/catalogue/fabry\\_perot\\_lasers/](https://azimp.ru/catalogue/fabry_perot_lasers/)>. (Дата доступа 19.03.2023).

**Сведения об авторах**

- Андрей Олегович Зеневич** — д-р техн. наук, профессор; Белорусская государственная академия связи; ректор; E-mail: a.zenevich@bsac.by
- Тофиг Магомедович Мансуров** — д-р техн. наук, профессор; Азербайджанский технический университет, кафедра радиотехники и коммуникации; E-mail: tofiq-mansurov@rambler.ru
- Татьяна Георгиевич Коваленко** — аспирант; Белорусская государственная академия связи; кафедра физических и математических основ информатики; E-mail: tgkov@yandex.by
- Евгений Владимирович Новиков** — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи, директор Института современных технологий связи; E-mail: e.novikov@bsac.by
- Сергей Вячеславович Ждапович** — канд. техн. наук, доцент; Белорусская государственная академия связи; лаборатория перспективных информационно-коммуникационных технологий; заведующий лабораторией; E-mail: zsvzsv@tut.by

Поступила в редакцию 12.04.23; одобрена после рецензирования 15.05.23; принята к публикации 28.08.23.

## REFERENCES

1. Kulikov A.V., Ignatiev A.V. *Algoritmy bezopasnosti* (Security algorithms), 2010, no. 4, pp. 56–61. (in Russ.)
2. Kachura S.M., Postnov V.I. *Trudy VIAM* (Proceedings of VIAM), 2019, no. 5(77), pp. 52–60. (in Russ.)
3. Connolly C. *Europhotonics*, 2009, no. 2-3, pp. 16–18.
4. Franz J., Jain V. *Optical communications. Components and Systems: analysis: design: optimization: application*, CRC Press, 2000, 717 p.
5. Zenevich A.O., Zhdanovich S.V., Novikov E.V., Matkovskaia T.A., Kovalenko T.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 6(65), pp. 406–412, DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-406-412. (in Russ.)
6. Vyalyshv A.I., Dobrov V.M., Dolgov A.A., Butov O.V., Pleshkov A.Yu. *Prirodoobustroystvo* (Environmental Management), 2014, no. 3, pp. 32–37 (in Russ.)
7. Dmitriyev S.A. *Volokonno-opticheskaya tekhnika: sovremennoye sostoyaniye i novyye perspektivy* (Fiber Optic Technology: Current State and New Prospects), Moscow, 2010, 608 p. (in Russ.)
8. Gulakov I.R., Zenevich A.O. *Volokonno-opticheskiye datchiki fizicheskikh velichin* (Fiber-Optic Sensors of Physical Quantities), Minsk, 2022, 367 p. (in Russ.)
9. Zenevich A.O., Mansurov T.M., Kovalenko T.G., Novikov E.V., Zhdanovich S.V., Matkovskaia T.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 12(65), pp. 895–901, DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-895-901. (in Russ.)
10. OTDR Dead Zone Explained: *How to Eliminate Its Effect?*, <https://community.fs.com/blog/otdr-optical-time-domain-reflectometer-dead-zone-tutorial.html>.
11. Lagutik A. A., Matkovskaya T.A. *Vestnik Communications*, 2022, no. 4, pp. 54–57. (in Russ.)
12. Vesnin V.L., Nizametdinov A.M., Ivanov O.V., Chertoriyskiy A.A. *Sensors and systems*, 2018, no. 3(223), pp. 27–32. (in Russ.)
13. Koeth J.J., Fischer M., Legge M., Seufert J., Werner R. *Quantum well-, quantum dot-, and quantum cascade lasers with DFB-gratings*, Photonik International, 2006, pp. 60–63.
14. Werle P. *Lasers in Environmental and Life Sciences – Modern Analytical Methods*, Springer, Heidelberg, 2004, pp. 223–243.
15. [https://azimp.ru/catalogue/fabry\\_perot\\_lasers/](https://azimp.ru/catalogue/fabry_perot_lasers/). (in Russ.)

**Data on author**

<b>Andrey O. Zenevich</b>	—	Dr. Sci., Professor; Belarusian State Academy of Communications; Rector; E-mail: a.zenevich@bsac.by
<b>Tofiq M. Mansurov</b>	—	Dr. Sci., Professor; Azerbaijan Technical University, Department of Radio Engineering and Communication; E-mail: tofiq-mansurov@rambler.ru
<b>Tatiana G. Kovalenko</b>	—	Post-Graduate Student; Belarusian State Academy of Communications, Department of Physical and Mathematical Foundations of Computer Science; E-mail: tgkov@yandex.by
<b>Evgeny V. Novikov</b>	—	PhD; Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications, Institute of Modern Communication Technologies; Director of the Institute; E-mail: e.novikov@bsac.by
<b>Sergey V. Zhdanovich</b>	—	PhD; Associate Professor; Belarusian State Academy of Communications; Laboratory of Perspective Information and Communication Technologies; Head of the Laboratory; E-mail: zsvzsv@tut.by

Received 12.04.23; approved after reviewing 15.05.23; accepted for publication 28.08.23.