

Научная статья

УДК 621.382

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-6-19-25>

Оценка возможности формирования канала утечки информации из оптического волокна тепловым воздействием

Иван Романович Гулаков, gulakov@bsu.by

Андрей Олегович Зеневич, a.zenevich@bsac.by

Татьяна Александровна Матковская ✉, tandem7m@gmail.com

Евгений Владимирович Новиков, e.novikov@bsac.by

Белорусская государственная академия связи,
Минск, 220114, Республика Беларусь

Аннотация

Работа посвящена оценке возможности формирования канала утечки информации с дефекта оптического волокна, созданного путем теплового воздействия. Свойства неоднородностей оптического волокна, вызванные таким воздействием, на сегодняшний день практически не изучены, что определяет **актуальность** исследований. С учетом вышесказанного, **целью исследования** является определение характеристик неоднородностей оптического волокна, вызванных тепловым воздействием.

Используемые методы. В работе проведен расчет потерь мощности излучения, вносимых дефектом, вызванным тепловым воздействием при высокой температуре, а также мощности излучения, отводимой с дефекта за пределы оптического волокна. В ходе исследований характеристики неоднородностей оптического волокна, вызванных тепловым воздействием, оценивались также и по рефлектограммам.

Результат. В работе показано, что при помощи локального температурного воздействия удастся сформировать дефект оптического волокна, позволяющий выводить часть оптического излучения за пределы этого волокна, то есть создать канал несанкционированного съема данных. Величина вносимых потерь мощности излучения на создаваемом дефекте возрастала с увеличением времени теплового воздействия на оптическое волокно. При времени теплового воздействия на оптическое волокно менее 1 с сформировать дефект с существенными вносимыми потерями мощности излучения не удавалось, а при времени теплового воздействия более 10 с вносимые потери на дефекте превышали 20 дБ (в этом случае прекращается передача данных зональных и магистральных ВОЛС). Показано, что с увеличением длины волны распространяющегося по волокну оптического излучения возрастают потери мощности излучения на дефекте, сформированном тепловым воздействием на оптическое волокно. Установлено, что при одинаковой потере мощности на дефекте, сформированном тепловым воздействием, мощность оптического излучения, отводимая с такого дефекта, имеет наибольшее значение при использовании оптического волокна G652, а наименьшее – при использовании волокна G657.

Научная новизна работы состоит в исследовании ранее неизученных свойств неоднородностей оптического волокна, вызванных тепловым воздействием.

Практическая значимость. Результаты, приведенные в статье, могут найти применение при проектировании систем защиты информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям связи

Ключевые слова: оптическое волокно, дефект оптического волокна, тепловое воздействие, канал утечки информации

Ссылка для цитирования: Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Матковская Т.А., Новиков Е.В. Оценка возможности формирования канала утечки информации из оптического волокна тепловым воздействием // Труды учебных заведений связи. 2024. Т.10. № 6. С. 19–25. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-6-19-25. EDN:MQXMKY

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-6-19-25>

Assessment of Forming Information Leakage Channel from Optical Fiber Possibility by Thermal Exposure

- ✉ Ivan R. Gulakov, gulakov@bsu.by
- ✉ Andrey O. Zenevich, a.zenevich@bsac.by
- ✉ Tatyana A. Matkovskaia ✉, tandem7m@gmail.com
- ✉ Evgeniy V. Novikov, e.novikov@bsac.by

Belarusian State Academy of Communications,
Minsk, 220114, Republic of Belarus

Annotation

The article is devoted to assessing the possibility of forming an information leakage channel from an optical fiber defect created by thermal exposure. The properties of optical fiber inhomogeneities caused by such exposure have not been practically studied to date, which determines the **relevance** of research. Taking into account the above, the **purpose of the study** is to determine the characteristics of optical fiber inhomogeneities caused by thermal exposure. **The methods used.** The paper calculates the radiation power losses introduced by a defect caused by thermal action at high temperature, as well as the radiation power removed from the defect beyond the optical fiber. During the studies, the characteristics of optical fiber inhomogeneities caused by thermal action were also estimated using reflectograms.

The result. The work that local temperature exposure makes it possible to form a defect in an optical fiber that allows part of the optical radiation to be emitted beyond the fiber, i.e. to create a channel for unauthorized data retrieval. The magnitude of the insertion loss of radiation power on the created defect increased with increasing time of thermal exposure to the optical fiber. When the time of thermal exposure to the optical fiber was less than 1 s, it was not possible to form a defect with significant insertion loss of radiation power, and when the time of thermal exposure was more than 10 s, the insertion loss on the defect exceeded 20 dB, at which data transmission of zonal and trunk fiber-optic communication lines ceases. It is shown that with increasing wavelength of optical radiation propagating along the fiber, the loss of radiation power on the defect formed by thermal exposure to the optical fiber increases. It has been established that with the same power loss on a defect formed by thermal action, the optical radiation power removed from such a defect has the greatest value when using G652 optical fiber, and the least when using G657 fiber. **The scientific novelty** of the work consists in the study of previously unexplored properties of optical fiber inhomogeneities caused by thermal exposure.

Practical Significance. The results presented in the article can be used in the design of information protection systems transmitted over fiber-optic communication lines.

Keywords: optical fiber, optical fiber defect, thermal effect, information leakage channel

For citation: Gulakov I.R., Zenevich A.O., Matkovskaia T.A., Novikov E.V. Assessment of Forming Information Leakage Channel from Optical Fiber Possibility by Thermal Exposure. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(6):19–25. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-6-19-25. EDN:MQXMKY

Введение

На сегодняшний день для передачи информации активно применяются волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). Оптические волокна, входящие в состав ВОЛС, имеют преимущества в скорости и пропускной способности по сравнению с медными жилами [1–4]. Данные, передаваемые по оптическим волокнам, более защищены от несанкционированного доступа к передаваемой информации,

однако возможно формирование канала утечки информации путем отвода части оптического излучения из волокна без его разрыва [5]. К способам реализации канала утечки информации относятся формирование макроизгиба и микроизгиба оптического волокна [6–9], а также способы, реализованные на основе оптического туннелирования и сдавливания оптического волокна [10].

В случае подключения устройств, реализующих вышеуказанные способы, обычно требуется доступ к отрезку оптического волокна определенной протяженности, однако не всегда удается его получить. Вместе с тем оказывается возможным создать зону подключения устройства, обеспечивающего несанкционированный съем информации, путем теплового воздействия на волокно. Такое воздействие приводит к появлению его неоднородности, с которой возможен выход части мощности оптического излучения за пределы волокна.

Для обнаружения неоднородностей оптического волокна, вызванных тепловым воздействием при высокой температуре, необходимо знать характеристики этих неоднородностей. Наиболее важными характеристиками неоднородностей являются вносимые ими потери мощности излучения в оптическом волокне и доля мощности оптического излучения, отводимая через сформированную неоднородность за пределы оптического волокна. Первое из этих свойств определяет возможность обнаружения наличия неоднородности. Второе позволяет оценить возможность применения неоднородности для съема данных. Однако свойства неоднородностей оптического волокна, вызванные тепловым воздействием, на сегодняшний день практически не исследованы. Поэтому целью настоящей работы является определение характеристик неоднородностей оптического волокна, вызванных тепловым воздействием.

Экспериментальная установка и методика измерения

Объектами исследований выбраны стандартные одномодовые оптические волокна G652, G655 и G657, достаточно часто применяемые в оптических кабелях. Свойства неоднородностей оптического волокна, вызванных тепловым воздействием, проанализированы на экспериментальной установке, структурная схема которой приведена на рисунке 1.

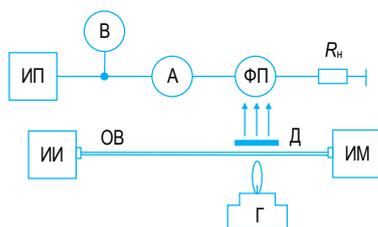


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки

Fig. 1. Block Diagram of the Experimental Setup

В схеме приняты обозначения: ИИ – источник излучения; ОВ – оптическое волокно; ИМ – измеритель мощности; Д – диафрагма; ФП – фотоприемник; Г – горелка; А – амперметр; В – вольтметр; ИП – источник питания; R_n – резистор нагрузки.

Принцип работы экспериментальной установки: от источника ИИ оптическое излучение поступает

в волокно ОВ, а из него – на измеритель мощности ИМ. От источника постоянного напряжения ИП на фотоприемник ФП подается напряжение питания U_n . Вольтметр В необходим для контроля величины напряжения питания. Амперметр А используется для измерения электрического тока, протекающего через фотоприемник ФП. Последовательно с фотоприемником включен резистор нагрузки R_n номиналом 1 кОм, необходимый для ограничения величины тока, протекающего через фотоприемник.

Длина волны оптического излучения ИИ в процессе измерений могла изменяться и принимать значения 1310, 1490, 1550 и 1650 нм, соответствующие «окнам прозрачности» одномодовых оптических волокон. В ходе проведения исследования не учитывались потери мощности оптического излучения в волокне, так как его длина составляла всего 1 м. Отметим, что для всех используемых оптических волокон на исследуемых длинах волн потери мощности излучения не превышает 0,4 дБ/км.

Для формирования дефекта в оптическом волокне ОВ небольшая часть этого волокна помещалась в пламя горелки Г. При этом диафрагма Д закрывалась, чтобы ограничивать попадания света и тепла от горелки Г на фотоприемник ФП.

При проведении исследований вычислялся фототок I_ϕ фотоприемника ФП:

$$I_\phi = I - I_t, \tag{1}$$

где I_t – темновой электрический ток, измеряемый при закрытой диафрагме Д; I – электрический ток, измеряемый при открытой диафрагме.

По величине фототока определялась мощность оптического излучения, поступающего на фотоприемник ФП с неоднородности оптического волокна, вызванной температурным воздействием: $P_{отв} = I_\phi/S$, где S – чувствительность фотоприемника.

Отметим, что различные области пламени имеют различную температуру [11]. Так, температура верхней области пламени наибольшая (1500 К), а температура области, находящаяся возле фитиля – наименьшая (800 К) [12]. Поэтому оптическое волокно помещалось в верхнюю часть пламени. Это позволяло подвергать волокно тепловому воздействию с постоянной температурой 1500 К.

При выполнении измерений потери мощности излучения, вносимые дефектом, вызванным температурным воздействием, определялись по следующей формуле:

$$D_n = 10 \lg \left(\frac{P}{P_n} \right), \tag{2}$$

где P – мощность источника излучения ИИ; P_n – мощность оптического излучения, поступающая на измеритель мощности ИМ.

Время теплового воздействия изменялось от 1 до 10 с. Чем более длительное воздействие осуществлялось на оптическое волокно, тем большими были вносимые потери мощности излучения на создаваемом дефекте. Отметим, что при времени теплового воздействия на оптическое волокно менее 1 с сформировать дефект с существенными вносимыми потерями мощности излучения D_n не удавалось. При времени теплового воздействия на оптическое волокно более 10 с вносимые потери мощности излучения D_n на дефекте превышали 20 дБ. Такая величина D_n для зональных и магистральных ВОЛС приводит к прекращению передачи данных. Поэтому рассматривать воздействия, вносящие такие потери мощности излучения, считалось нецелесообразным.

Длина участка, на котором возникал вызванный тепловым воздействием дефект, составляла около 1 см. Этого было достаточно для регистрации величины мощности, отводимой за пределы оптического волокна с неоднородности, вызванной тепловым воздействием. Отметим, к примеру, что несанкционированное снятие данных с оптического волокна при помощи микроизгиба требует доступа к участку оптического волокна протяженностью от 1,5 до 3 см, а в случае использования макроизгиба – от 3 до 5 см.

Под влиянием температуры в области воздействия на оптическое волокно сгорало лакокрасочное покрытие волокна, если такое имелось. После теплового воздействия в области сформированного дефекта волокно становилось хрупким и даже при незначительном изгибе ломалось. В отсутствие лакокрасочного покрытия внешний вид области, на которую осуществлялось температурное воздействие, оставался таким же, как и до него.

Для определения мощности излучения $D_{отв}$, отводимой за пределы оптического волокна с неоднородности, вызванной тепловым воздействием, применялось следующее выражение:

$$D_{отв} = 10 \lg \left(\frac{P_{отв}}{P} \right). \quad (3)$$

В ходе исследований характеристики неоднородностей оптического волокна, вызванных тепловым воздействием, оценивались также и по рефлектограммам, полученным на экспериментальной установке, структура которой приведена в работе [13]. В этом случае неоднородность, вызванная тепловым воздействием, формировалась в середине оптического волокна протяженностью 1,5 км. При проведении измерений регистрировались рефлектограммы сигналов в волокне с наличием такой неоднородности, для чего ко входу оптического волокна подключался рефлектометр. Длительность оптического импульса рефлектометра

составляла 3 нс. При такой длительности оптических импульсов длина мертвой зоны по затуханию используемого рефлектометра была минимальной, что позволяло с наибольшей точностью определять местоположения теплового воздействия и величину потерь мощности излучения на сформированном дефекте.

Измерения величин D_n и $D_{отв}$, а также рефлектограмм выполнялись при комнатной температуре $T = 293$ К.

Результаты измерений и их обсуждения

В процессе исследований создавался дефект оптического волокна путем теплового воздействия на оптическое волокно пламенем горелки (см. рисунок 1). При этом величина потери мощности на дефекте зависела от времени воздействия на оптическое волокно пламени, подвергающегося воздействию пламени.

При тепловом воздействии в оптическом волокне может происходить диффузия примесей, введенных в это волокно при его производстве. Такая диффузия приводит к изменению абсолютных значений показателей преломления сердцевины и оболочки оптического волокна в месте температурного воздействия, а, следовательно, и их разности. Это приводит к нарушению условия существования одной моды в одномодовом волокне и появлению дополнительных мод. Перераспределение энергии между модами приводит к потере мощности передаваемого оптического сигнала и выходу энергии дополнительных мод за пределы волокна в области его локального нагрева. Выходу энергии оптического излучения за пределы волокна способствует также удаление лакокрасочного покрытия.

Результаты измерений потери мощности оптического излучения для одного и того же дефекта, вызванного тепловым воздействием на оптическое волокно, для разных длин волн оптического излучения, приведены в таблице 1. Как следует из полученных результатов, чем больше длина волны, тем больше потери мощности оптического излучения для всех исследуемых оптических волокон. В таблице 1 также отображены сведения об отведении мощности оптического излучения с боковой поверхности оптического волокна в области дефекта. Как видно из полученных данных, с увеличением длины волны отводится большая мощность оптического излучения с боковой поверхности оптического волокна в области дефекта. Вышеописанные тенденции наблюдаются для всех исследуемых оптических волокон. Отметим, что дефекты оптических волокон G652, обладающих меньшей потерей мощности оптического излучения, чем другие исследуемые оптические волокна, имели большие

значения отводимой мощности оптического излучения с боковой поверхности оптического волокна в области дефекта. Это связано с различной внутренней структурой исследуемых волокон.

ТАБЛИЦА 1. Результаты измерений потери мощности оптического излучения в области дефекта, вызванного тепловым воздействием на оптическое волокно

TABLE 1. Measurements of Optical Radiation Power Loss in the Area of Defect Caused by Thermal Effects on the Optical Fiber Results

Тип ОВ	λ , нм	Потери мощности оптического излучения, дБ	Отведение мощности оптического излучения, дБ
G652	1310	0,40	-48,70
	1490	1,23	-48,10
	1550	1,29	-47,40
	1625	1,51	-46,90
G655	1310	0,97	-56,60
	1490	2,16	-56,10
	1550	2,79	-55,60
	1625	3,52	-55,10
G657	1310	5,01	-57,80
	1490	5,27	-57,20
	1550	5,49	-56,30
	1625	6,10	-54,30

Анализ участка рефлектограммы оптического волокна G652, содержащего дефект, показывает, что для места нахождения такого дефекта характерно наличие перепада мощности в виде «ступеньки» (рисунок 2). Величина такого перепада мощности увеличивается с ростом длины волны, т. е. для этих дефектов наблюдается зависимость потери мощности оптического излучения от длины волны оптического излучения. Отметим, что рефлектограммы для этих дефектов и их поведение с ростом длины волны оптического излучения схожи с рефлектограммами, характерными для макроизгибов оптического волокна [14].

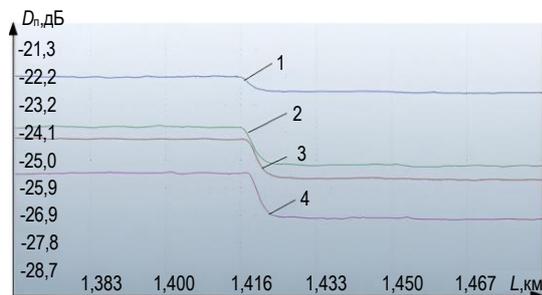


Рис. 2. Участок рефлектограммы оптического волокна G652, содержащего дефект, для длин волн: 1 – 1310 нм, 2 – 1490 нм, 3 – 1550 нм, 4 – 1625 нм

Fig. 2. The Section of Optical Fiber G652 Reflectogram Containing Defect for Wavelengths: 1 – 1310 nm, 2 – 1490 nm, 3 – 1550 nm, 4 – 1625 nm

Рефлектограммы приведены для оптического волокна G652. Для других оптических волокон рефлектограммы идентичны. На рефлектограммах

можно увидеть, что увеличение потери мощности оптического излучения на дефекте приводит к росту величины мощности оптического излучения, отводимой с дефекта. При одинаковом значении потери мощности на дефекте для разных длин волн оптического излучения наблюдалась различная величина отводимой с дефекта мощности оптического излучения.

На рисунке 3 представлены типичные зависимости величины мощности излучения $P_{отв}$, отводимой с дефекта, сформированного в результате теплового воздействия, от величины потери мощности излучения, возникшей из-за этого дефекта, для различных длин волн. Как следует из полученных зависимостей, с увеличением потери мощности излучения растет значение мощности излучения, отводимой с дефекта $P_{отв}$. Полученные зависимости имели нелинейный вид. Это свидетельствует о том, что потери мощности на таком дефекте обусловлены не только излучением, выходящим за пределы оптического волокна в области этого дефекта.

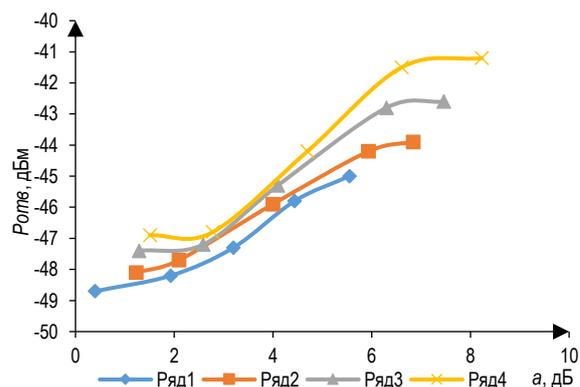


Рис. 3. Зависимость отведения мощности оптического излучения с дефекта, сформированного в результате теплового воздействия, от величины потери мощности, возникшей из-за этого воздействия, для длин волн: 1 – 1310 нм, 2 – 1490 нм, 3 – 1550 нм, 4 – 1625 нм

Fig. 3. The Dependence of Optical Radiation Power Removal from Defect Formed as Thermal Exposure Result on Power Loss Magnitude Caused by this Effect for Wavelengths: 1 – 1310 nm, 2 – 1490 nm, 3 – 1550 nm, 4 – 1625 nm

В процессе проведенного исследования было выполнено сравнение отводимой с дефекта мощности оптического излучения для разных оптических волокон. При проведении сравнения в каждом из исследуемых оптических волокон создавались дефекты, которые вносили одинаковую потерю мощности на одной и той же длине волны оптического излучения. Для этой же длины волны оптического излучения измерялась потеря мощности оптического излучения. Сведения о полученных результатах представлены в таблице 2. Исходя из представленных данных, наибольшее значение мощности, отводимой с сформированного в результате теплового воздействия дефекта, наблюдается для оптического волокна G652, а наименьшее – для G657.

Это наблюдается для всех исследуемых длин волн излучения. Такое отличие в значениях отводимой мощности с дефекта связано с различной внутренней структурой исследуемых оптических волокон. Отметим, что исследуемые волокна имеют отличие в геометрических размерах сердцевин и оболочки волокна [15–17].

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений отведения мощности оптического излучения с боковой поверхности оптического волокна в области дефекта, сформированного тепловым воздействием

TABLE 2. Measurements of Optical Radiation Power Removal from Lateral Surface of Optical Fiber in the Defect Area Formed by Thermal Action Results

Тип ОВ	Длина волны, нм	Потеря мощности, дБ	Отведение мощности с боковой поверхности волокна в области дефекта, дБ
G652	1310	3,5	-47,1
G655			-52,8
G657			-58,6
G652	1490	4,5	-46,0
G655			-52,0
G657			-58,0
G652	1550	5,0	-44,1
G655			-51,0
G657			-56,5
G652	1625	6,0	-42,0
G655			-50,7
G657			-54,4

Сравнение величины мощности, отводимой за пределы оптического волокна с неоднородности, вызванной тепловым воздействием, со значениями мощностей, отводимых из волокна в области специально сформированных микро- или макроизгибов, показало, что они составляли -46, -35 и -20 дБ, соответственно, для теплового воздействия, микро- и макроизгибов. Сравнение выполнялось для оптического волокна G652 и длины волны 1310 нм в условиях одинаковой потери мощности в 4 дБ на каждом из видов неоднородностей. Наименьшая по величине мощность отводится за пределы оптического волокна с неоднородности, вызванной тепловым воздействием, однако такого значения мощности достаточно, чтобы обеспечить несанкционированный съём данных с этой неоднородности.

Заключение

Показано, что при помощи локального температурного воздействия удаётся сформировать дефект оптического волокна, позволяющий выводить часть оптического излучения за пределы этого волокна. Определено, что при увеличении длины волны возрастает мощность оптического излучения, отводимого с дефекта, сформированного тепловым воздействием на оптическое волокно. Исследования показали, что при одинаковой потере мощности на дефекте, сформированном тепловым воздействием на оптическое волокно, отводимая мощность оптического излучения с такого дефекта имеет наибольшее значение при использовании оптического волокна G652, а наименьшее – при использовании G657.

Список источников

- Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. СПб.: Лань, 2021. 268 с.
- Senior J.M., Jamro M.Y. Optical fiber communications: principles and practice. Financial Times/Prentice Hall, 2009. 1127 p.
- Ионов А.Д. Волоконно-оптические линии передачи. Новосибирск: СибГУТИ, 2003. 152 с.
- Govind P. Agrawal Fiber-Optic Communication Systems. New York: Wiley-Interscience, 2002. 563 p.
- Зеневич А.О. Обнаружители утечки информации из оптического волокна. Минск: Белорусская государственная академия связи, 2017. 142 с.
- Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Кочергина О.В., Матковская Т.А. Исследование канала утечки информации в области изгиба оптического волокна // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 44–49. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-36-44-49. EDN:CPHMYU
- Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Матковская Т.А., Новиков Е.В. Исследования свойств микроизгиба одномодового оптического волокна // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 15–20. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-15-20. EDN:QFEQEF
- Wang Q., Farrell G., Freir T. Theoretical and Experimental Investigations of Macro-Bend Losses for Standard Single Mode Fibers // Optics Express. 2005. Vol. 13. Iss. 12. PP. 4476–4484. DOI:10.1364/OPEX.13.004476
- Schermer R.T., Cole J.H. Improved Bend Loss Formula Verified for Optical Fiber by Simulation and Experiment // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2007. Vol. 43. Iss. 10. PP. 899–909. DOI:10.1109/JQE.2007.903364
- Шубин В.В. Информационная безопасность волоконно-оптических систем. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. 257 с.
- Девисилов В.А., Дроздова Т.И., Тимофеева С.С. Теория горения и взрыва: учебное пособие. М.: ФОРУМ, 2012. 352 с.
- Стариков А.Н. Основы теории горения и взрыва. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2019. 148 с.
- Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРпт, 2005. 208 с.
- Зеневич А.О., Новиков Е.В., Матковская Т.А., Горбадей О.Ю., Василевский Г.В. Обнаружение изгибов оптического волокна вблизи сварных и механических соединений // Проблемы инфокоммуникаций. 2022. № 2(16). С. 32–38. EDN:QGIWAB
- Рекомендация МСЭ-Т G652 (11/2016). Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля.
- Рекомендация МСЭ-Т G655 (11/2009). Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля с ненулевой смещенной дисперсией.
- Рекомендация МСЭ-Т G657 (11/2016). Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля, не чувствительного к потерям на изгибе.

References

1. Sklyarov O.K. *Fiber-optic networks and communication systems*. St. Petersburg: Lan Publ.; 2021. 268 p. (in Russ.)
2. Senior J.M., Jamro M.Y. *Optical fiber communications: principles and practice*. Financial Times/Prentice Hall; 2009. 1127 p.
3. Ionov A.D. *Fiber-Optic Transmission Lines*. Novosibirsk: SibSUTI Publ.; 2003. 152 p. (in Russ.)
4. Govind P. Agrawal *Fiber-Optic Communication Systems*. New York: Wiley-Interscience; 2002. 563 p.
5. Zenevich A.O. *Optical Fiber Information Leak Detectors*. Minsk: Belarusian State Academy of Communications Publ.; 2017. 142 p. (in Russ.)
6. Gulakov I., Zenevich A., Kochergina O., Matkovskaia T. Investigation of an Information Leakage Channel in the Area Optical Fiber Bending. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2022;8(3):44–49. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-36-44-49. EDN:CPHMYU
7. Gulakov I., Zenevich A., Matkovskaya T., Novikov E. Investigations of Single-Mode Optical Fiber Microbending Properties. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2023;9(4):15–20. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-15-20. EDN:QFEQEF
8. Wang Q., Farrell G., Freir T. Theoretical and Experimental Investigations of Macro-Bend Losses for Standard Single Mode Fibers. *Optics Express*. 2005;13(12):4476–4484. DOI:10.1364/OPEX.13.004476.
9. Schermer R.T., Cole J.H. Improved Bend Loss Formula Verified for Optical Fiber by Simulation and Experiment. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2007;43(10):899–909. DOI:10.1109/JQE.2007.903364
10. Shubin V.V. *Information Security of Fiber-Optic Systems*. Sarov: RFNC-VNIIEF Publ.; 2015. 257 p. (in Russ.)
11. Devisilov V.A., Drozdova T.I., Timofeeva S.S. *Theory of Combustion and Explosion*. Moscow: FORUM Publ.; 2012. 352 p. (in Russ.)
12. Starikov A.N. *Fundamentals of the Theory of Combustion and Explosion*. Vladimir: VISU Publ.; 2019. 148 p. (in Russ.)
13. Listvin A.V., Listvin V.N. *Reflectometry of Optical Fibers*. Moscow: LESARart Publ.; 2005. 208 p. (in Russ.)
14. Zenevich A.O., Novikov E.V., Matkovskaya T.A., Gorbaday O.Yu., Vasilevsky G.V. Detection of Bends of Optical Fiber Near Welded And Mechanical Joints. *Problems of infocommunications*. 2022;2(16):32–38. (in Russ.) EDN:QGIWAB
15. Rec. ITU-T G652. *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. 2016.
16. Rec. ITU-T G655. *Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable*. November 2009.
17. Rec. ITU-T G657. *Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable*. November 2016.

Статья поступила в редакцию 15.09.2024; одобрена после рецензирования 25.11.2024; принята к публикации 05.12.2024.

The article was submitted 15.09.2024; approved after reviewing 25.11.2024; accepted for publication 05.12.2024.

Информация об авторах:

ГУЛАКОВ
Иван Романович

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физических и математических основ информатики Белорусской государственной академии связи
 <https://orcid.org/0000-0002-7330-9928>

ЗЕНЕВИЧ
Андрей Олегович

доктор технических наук, профессор, ректор Белорусской государственной академии связи
 <https://orcid.org/0000-0002-3534-3885>

МАТКОВСКАЯ
Татьяна Александровна

аспирант кафедры физических и математических основ информатики Белорусской государственной академии связи
 <https://orcid.org/0000-0002-1499-6158>

НОВИКОВ
Евгений Владимирович

кандидат технических наук, доцент, директор Института современных технологий связи Белорусской государственной академии связи
 <https://orcid.org/0009-0009-2944-758X>

Зенеvич A.O. является членом редакционного совета журнала «Труды учебных заведений связи» с 2023 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Zenevich A.O. has been a member of the journal "Proceedings of Telecommunication Universities" Editorial Council since 2023, but has nothing to do with the decision to publish this article. The article has passed the review procedure accepted in the journal. The authors have not declared any other conflicts of interest.