



# РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИЗБЫТОЧНОЙ ДЛИНЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН В МОДУЛЬНЫХ ТРУБКАХ КАБЕЛЯ

В.А.Бурдин, А.В.Бурдин, [burdin@psati.ru](mailto:burdin@psati.ru),  
Поволжский государственный университет теле-  
коммуникаций и информатики, Самара, Россия

Рассмотрены рефлектометрические методы измерений избыточной длины оптических волокон в модульных трубках оптического кабеля. Приводятся результаты климатических испытаний строительной длины оптического кабеля модульной конструкции. Предложен способ оценки избыточной длины оптического волокна по результатам измерений характеристик обратного рассеяния волокна обычным оптическим рефлектометром. Проведено сравнение способов определения избыточной длины оптического волокна по оценкам потерь на изгибах. В качестве критерия принята погрешность линейной аппроксимации температурных зависимостей избыточной длины оптического волокна, полученных экспериментально. Приведены оценки погрешностей способов и рассмотрены условия их применения.

**М**одульные конструкции оптических кабелей (ОК) для наружной прокладки предусматривают свободную укладку оптических волокон (ОВ) в модульных трубках с избыточной длиной [1-4]. Избыточная длина ОВ обеспечивает его защиту от прикладываемых к ОК растягивающих усилий. Из-за избыточной длины ОВ в модульной трубке многократно изгибается, располагаясь по траектории близкой к геликоиду (рис.1) [1-5]. При этом распределение радиусов изгиба по длине кабеля носит случайный характер [6]. Поскольку потери, поляризационная модовая дисперсия (ПМД) и механические напряжения на изгибах ОВ зависят от радиуса изгиба, то избыточная длина ОВ приводит к увеличению затухания, ПМД и механических

# OPTICAL TIME-DOMAIN REFLECTOMETRY METHODS FOR MEASUREMENT OF DISTRIBUTION OF EXCESS OPTICAL FIBER LENGTH IN FIBER-OPTIC CABLE LOOSE-TUBES

V.A. Burdin, A.V. Burdin, [burdin@psati.ru](mailto:burdin@psati.ru),  
Povolzhskiy State University of Telecommunications  
and Informatics, Samara, Russia

The methods of excess fiber length measurement in loose-tube cable by optical time-domain reflectometer are considered in this paper. The results of climatic tests of the delivery length of fiber-optic cable loose-cable design demonstrating the possibility of estimating the excess fiber length based on the results of measurements of the backscattering fiber characteristics by a conventional optical time-domain reflectometer and used for comparison of methods for determining the excess fiber length according to the estimates of bend losses. An error of line approximation of experimental curves of excess fiber length dependency from temperature is assumed as a criterion. The errors estimating described methods are given, and conditions of its application are considered.

**L**oose-tube optical cables (OC) for outdoor installation provides for the free laying of optical fibers (OF) in loose-tubes with excess length [1-4]. The excess fiber length ensures its protection from the applied tensile forces of OC. Because of the excess fiber length, the optical fibers are repeatedly bent within the loose-tube, being located along a trajectory close to the helicoid (Fig. 1) [1-5]. In this case, the distribution of the bending radii along the length of the cable is of a random nature [6]. Since the losses, polarization mode dispersion (PMD) and mechanical stresses on the OF bends depend on the bending radius, the excess fiber length leads to an increase in the damping, PMD, and mechanical stresses of the fiber. Accordingly, when designing OC structures, the excess fiber length is chosen to be large enough to provide the required allowable cable

напряжений ОВ. Поэтому при разработке конструкций ОК избыточную длину ОВ выбирают достаточно большой для обеспечения требуемой допустимой растягивающей нагрузки на кабель и при том достаточно малой для ограничения прироста затухания, ПМД и напряжений на изгибах ОВ. Избыточная длина волокна фактически является оценкой качества ОК. Очевидно, что чем более равномерно по длине кабеля распределена избыточная длина ОВ, а соответственно и значения его радиуса изгиба в модульной трубке, тем меньше вероятность того, что значение радиуса изгиба окажется ниже допустимого. При этом повышается вероятность того, что прирост затухания и ПМД, а также механические напряжения на изгибах ОВ останутся в допустимых пределах. А учитывая, что при отсутствии внешних нагрузок на ОК, механические напряжения волокна определяются в основном напряжениями на изгибах, можно уверенно прогнозировать увеличение срока службы ОК.

В целях обеспечения постоянства кривизны ОВ в модульных трубках применяют системы автоматизации контроля и управления избыточной длиной при изготовлении модулей [7-9]. Однако как показывают исследования [10], в процессе последующих технологических операций изготовления кабеля распределение кривизны ОВ в модульных трубках кабеля может изменяться. Эти явления определяют актуальность задачи измерения распределений избыточной длины волокон в модульных трубках готового изделия – строительной длины кабеля.

Измерения распределений оценок избыточной длины волокна вдоль кабеля могут быть выполнены косвенными методами на основе измерений механических напряжений в ОВ, поляризационных характеристик или затухания ОВ. При этом наибольший интерес представляют рефлектометрические методы.

Авторы работы [11] демонстрируют возможность выявления механических напряжений на изгибах с помощью BOTDR – бриллюэновского импульсного оптического рефлектометра. Вместе с тем, в работе [12, 13] отмечаются существующие проблемы измерений механических напряжений на изгибах ОВ с помощью BOTDR. Основной причиной, ограничивающей массовое применение бриллюэновских рефлектометров, оказывается их высокая стоимость. По данным авторов на сегодняшний день в эксплуатации находится ограниченное число экземпляров рефлектометров такого типа. Промышленно выпускаемые поляри-

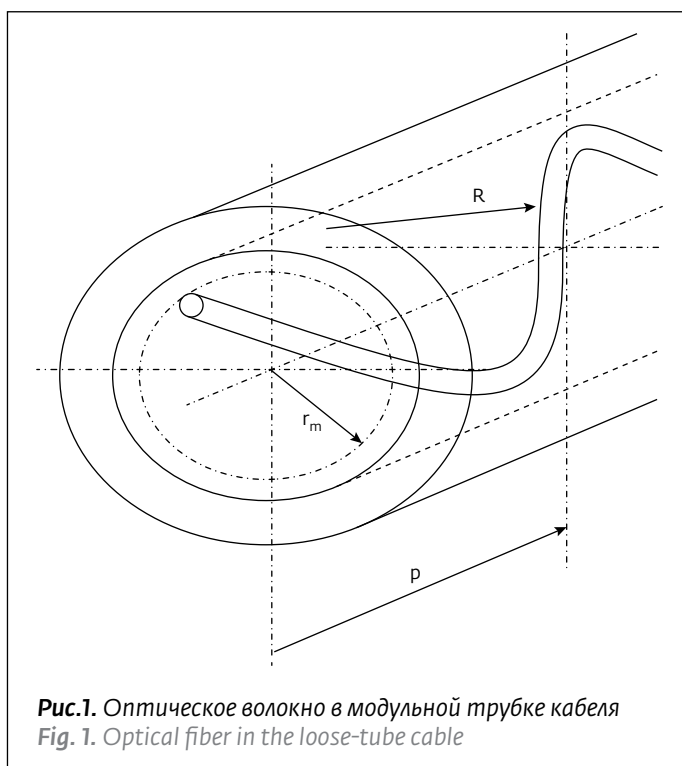


Рис.1. Оптическое волокно в модульной трубке кабеля  
Fig. 1. Optical fiber in the loose-tube cable

tensile load, and, at the same time, small enough to limit the increase in attenuation, PMD, and stresses on the bends of fibers. Given the above, the excess fiber length is actually an estimate of the OC quality. Obviously, the more uniformly excess fiber length is distributed, and therefore its bend radii in the loose-tube along the length of the cable, the less likely that the bend radius will be less than the allowable radius. Therefore, the probability that the increase in attenuation and PMD, as well as the mechanical stresses on the fiber bends will remain within the permissible limits, is increased. And given that, in the absence of external cable loads, the mechanical stresses of the fiber are determined mainly by stresses at the bends, it is possible to predict with certainty the increase in the optical cable service life.

In order to ensure the constancy of the fiber curvature in loose-tubes, the systems of control automation and control of excess length in the manufacture of loose-tubes are used [7-9]. However, the studies [10] have shown that during the subsequent technological operations of cable manufacture, the distribution of the fiber curvature in the loose-tube cable tubes can vary. These phenomena determine the urgency of the problem of measuring the distributions of excess fiber length in the loose-tubes of the finished product, i.e., delivery length of the cable.

Measurements of distributions of excess fiber length estimates along the cable can be performed



зационные импульсные оптические рефлектометры (POTDR), предназначенные для измерения ПМД, имеют низкое разрешение по расстоянию и достаточно высокую стоимость. Специализированные комплекты для анализа распределений избыточной длины ОВ по результатам измерений поляризационных характеристик авторам не известны.

С точки зрения массового применения наибольший интерес представляют рефлектометрические методы оценки избыточной длины ОВ, базирующиеся на измерениях потерь в ОВ, которые могут быть реализованы с помощью широко распространенных типовых импульсных оптических рефлектометров обратного рассеяния (OTDR).

Здесь следует заметить, что при разработке конструкций ОВ и ОК стремятся минимизировать потери на изгибах. Поэтому рассматриваемый подход имеет существенные ограничения. В частности, он не применим при использовании в ОК волокон с уменьшенными потерями на изгибах (рекомендации МСЭ\* и Т.С. 657). Но поскольку стандартные ступенчатые волокна (рекомендации МСЭ и Т.С. 652) все еще широко распространены, он может представлять интерес для ряда практических приложений.

Оценки радиуса изгиба ОВ в модульной трубке, кривизны и избыточной длины однозначно связаны между собой. Кривизна ОВ однозначно связана с радиусом изгиба  $R$  [5, 6]:

$$\text{Curve} = \frac{1}{R}. \quad (1)$$

Для геликоидальной траектории ОВ (рис.1) в модульной трубке избыточная длина волокна определяется [6, 14] как

$$\text{EFL} = \frac{(L_F - P)}{P}. \quad (2)$$

\* *Примечание редактора:* При классификации оптоволокон общепринятым правилом являются рекомендации "Международного союза электросвязи" (МСЭ), добавление МСЭ-Т означает Телекоммуникационный. В переводе на английский ITU-T (International Telecommunication Union - Telecommunication standardization sector).

G.657 "Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля, не чувствительного к потерям на макроизгибе, для использования в сетях доступа"

G.652 "Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля". Волокна этого типа оптимизированы для передачи на длине волны 1310 нм.

indirectly based on measurements of mechanical stresses in the fiber, polarization characteristics, or attenuation of the fiber. Optic time-domain reflectometric methods are of the particular interest.

The authors of the paper [11] demonstrate the possibility of detecting mechanical stresses on bends using BOTDR – brillouin pulse optical time-domain reflectometer. At the same time, [12, 13] focus on the existing problems of measuring mechanical stresses at the fiber bends using BOTDR. The main reason limiting the mass application of brillouin optical time-domain reflectometers is their high cost. According to the authors, limited number of optical time-domain reflectometers is in operation up to date. The commercially available polarization pulse optical time-domain reflectometers (POTDR) for measuring PMD have low distance resolution and a fairly high cost. Specialized kits for the analysis of distributions of excess fiber length are not known from the results of measurements of polarization characteristics.

From the point of view of mass application, the most interesting are the reflectometric methods of excess fiber length estimation based on the measurement of the losses in the fiber, which can be implemented with the help of widely applied conventional pulsed backscattering optical time-domain reflectometers (OTDR).

It should be noted that in the design of fiber and cable structures, bend losses are tend to be minimized. Therefore, the approach under consideration has significant limitations. In particular, it is not applicable when using fibers with reduced bend loss for OC (ITU\* and T.С. 657 recommendation). But since the standard stepped fibers (ITU and T.С. 652 recommendation) are still widespread, it can be of interest for a number of practical applications.

The estimates of the fiber bending radius in the loose-tube, the curvature and the excess length are unambiguously related.

The fiber curvature is uniquely related to the bending radius  $R$  [5, 6]:

\* *Editor's note:* In the classification of optical fiber, the standard rule is the recommendation of International Telecommunication Union (ITU), "T" in "ITU-T" means Telecommunications (International Telecommunication Union - Telecommunication standardization sector).

G.657 "Characteristics of single-mode optical fiber and cable insensitive to macro-bend losses, for use in access networks"

G. 652 "Characteristics of single-mode optical fiber and cable". Fibers of this type are optimized for transmission at a wavelength of 1310 nm.



Здесь, длина волокна равна

$$L_F = \sqrt{p^2 + (2\pi \cdot r_m)^2}, \quad (3)$$

где  $r_m$ ,  $p$  – радиус и шаг геликоида, соответственно. Для  $r_m \ll R$  можно приближено считать, что

$$EFL = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{2\pi \cdot r_m}{p} \right)^2 \quad (4)$$

или

$$EFL = \frac{r_m}{2 \cdot R}. \quad (5)$$

Известен другой метод анализа избыточной длины волокна в ОК [15] – на основе измерений затухания ОВ. В соответствии с данным способом предварительно на нескольких длинах волн  $\lambda_i$  выполняются измерения характеристики обратного рассеяния оптического волокна в ОК. По результатам анализа этих характеристик определяется распределение по длине кабеля оценок увеличения потерь, обусловленных изгибами ОВ,  $\Delta\alpha(z, \lambda_i)$ . Для исключения изменений затухания ОВ, не связанных с изгибами, используется зависимость величины релеевских потерь от длины волны, а именно пропорциональность ее значения величине  $1/\lambda^4$ . Метод обработки характеристик обратного рассеяния для определения потерь на изгибах в [15] не раскрывается, но очевидно, что он базируется на зависимости этих потерь от длины волны и радиуса изгиба и, в частности, от увеличения затухания на изгибах ОВ с ростом длины волны и уменьшением радиуса изгиба [16, 17]. Радиус изгиба в зависимости от величины потерь на изгибе рассчитывают по формуле [15]:

$$R(z) = R_c - \frac{\Delta\alpha(z, \lambda_i)}{\eta(\lambda_i)}, \quad (6)$$

где  $\eta(\lambda_i)$  – параметр ОВ, а  $R_c$  – значение радиуса изгиба, при превышении которого потерями на изгибе можно пренебречь. Параметры  $\eta(\lambda_i)$  и  $R_c$  определяются либо экспериментально, либо рассчитываются [17].

В работах [18–20] предлагается для локализации в кабеле участков с повышенной кривизной ОВ сопоставлять результаты измерений характеристик обратного рассеяния ОВ, выполненные при положительной и низкой отрицательной температуре. Так в [20] предложен способ измерения распределений избыточной длины ОВ в модульной трубке на строительной длине ОК, заключаю-

$$\text{Curve} = \frac{1}{R}. \quad (1)$$

For the helical fiber trajectory (Fig. 1) in the loose-tube, the excess fiber length is determined [6, 14] as

$$EFL = \frac{(L_F - p)}{p}. \quad (2)$$

Here, the fiber length is

$$L_F = \sqrt{p^2 + (2\pi \cdot r_m)^2}, \quad (3)$$

where  $r_m$ ,  $p$  is the radius and pitch of the helicoid, correspondingly. For  $r_m \ll R$ , it can be approximated to assume that

$$EFL = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{2\pi \cdot r_m}{p} \right)^2 \quad (4)$$

or

$$EFL = \frac{r_m}{2 \cdot R}. \quad (5)$$

Another method is known for analyzing the excess fiber length in optical cable [15] and it is based on fiber attenuation measurements. In accordance with this method, measurements of the backscattering characteristic of the optical fiber in the cable are performed at several wavelengths  $\lambda_i$  in advance. Based on the results of the analysis of these characteristics, the distribution of estimates of the increase in losses due to the fiber bending is determined along the length of the cable,  $\Delta\alpha(z, \lambda_i)$ . To exclude changes in the fiber attenuation non-connected to bends, the dependence of the Rayleigh losses on the wavelength is applied, namely, their proportionality to  $1/\lambda^4$ . The method for processing the backscattering characteristics for determining the bend loss in [15] is not disclosed, but it is obvious that it is based on the dependence of these losses on the wavelength and bending radius, and in particular on the increase in fiber bend loss with increasing wavelength and decreasing bending radius [16, 17]. The bending radius, depending on the bending loss, is calculated according to the formula [15]:

$$R(z) = R_c - \frac{\Delta\alpha(z, \lambda_i)}{\eta(\lambda_i)}, \quad (6)$$

where  $\eta(\lambda_i)$  is the fiber parameter, and  $R_c$  is the value of the bending radius, beyond which the bend loss can be neglected. The parameters  $\eta(\lambda_i)$  and  $R_c$  are determined either experimentally or calculated [17].



щийся в том, что барабан со строительной длиной ОК подвергают воздействию низкой отрицательной температуры, измеряют характеристики обратного рассеяния ОВ при положительной температуре и при низкой отрицательной температуре, по которым определяют соответствующие распределения коэффициентов затухания ОВ вдоль кабеля. Затем определяют распределение затухания, обусловленного изгибами волокна как разность коэффициентов затухания, измеренных при отрицательной и положительной температурах. После чего делают оценку радиусов изгиба при соответствующей отрицательной температуре, решая уравнение:

$$\Delta\alpha(\lambda, T) = C_g(\lambda) \frac{\exp[-g(\lambda) \cdot R(T)]}{\sqrt{R(T)}}, \quad (7)$$

где  $C_g(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$  - параметры, которые определяются либо экспериментально, либо рассчитываются. Выражение (12) 7- это фактически форма записи известной формулы Маркузе для потерь на изгибе ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления [21]. Зная распределение радиусов изгиба ОВ в модульной трубке вдоль длины кабеля, из (1) и (4) определяют распределения кривизны и избыточной длины волокна.

Для вычисления оценок радиуса изгиба ОВ в модульной трубке по известным значениям потерь на изгибах можно также воспользоваться известной формулой Хансона [22] для определения  $\Delta\alpha(\lambda, T)$ . Хорошо известно [1-2, 6], что изменения избыточной длины прямо пропорциональны изменениям температуры:

$$EFL(T) = EFL(T_n) + \Delta\alpha_T(T_n - T), \quad (8)$$

где  $T$ ,  $T_n$  - текущее и некоторое опорное значения температуры соответственно;  $\Delta\alpha_T$  - абсолютная разность коэффициентов линейного расширения материала модульной трубки и кварцевого стекла. Поэтому получаем:

$$EFL(\lambda, T) = A + B \cdot \sqrt{\Delta\alpha(\lambda, T)}, \quad (9)$$

где  $A$ ,  $B$  - параметры, которые определяются экспериментально или теоретически.

Таким образом, имеем три метода определения избыточной длины ОВ в модульной трубке ОК по результатам измерений потерь на изгибах волокна: метод 1, базирующийся на формулах (5) и (6), метод 2, базирующийся на формулах (5) и (7),

It is suggested in [18-20] to localize in the cable sections with areas with increased fiber curvature to compare the results of measurements of the fiber backscattering characteristics, performed at positive and low negative temperatures. Thus, in [20], a method for measuring the distributions of excess fiber length in a loose-tube for the delivery length of the optical cable is suggested, consisting in the fact that the reel with the cable delivery length is exposed to low negative temperature, the fiber backscattering characteristics are measured at positive temperature and at low negative temperature, followed by determination of the corresponding distributions of fiber attenuation ratio along the cable. Then, the distribution of attenuation due to fiber bends is determined as the difference in attenuation ratios measured at negative and positive temperatures. The estimates of the bending radii are determined further at the appropriate negative temperature, solving the equation:

$$\Delta\alpha(\lambda, T) = C_g(\lambda) \frac{\exp[-g(\lambda) \cdot R(T)]}{\sqrt{R(T)}}, \quad (7)$$

where  $C_g(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$  are the parameters determined either experimentally or calculated. Expression (12) 7 is in fact the form of writing the well-known Marcuse formula for bend losses in a fiber with a stepped profile of refractive index [21]. Knowing the distribution of the fiber bending radii in the loose-tube along the length of the cable, the distributions of the curvature and excess fiber length are determined according to (1) and (4).

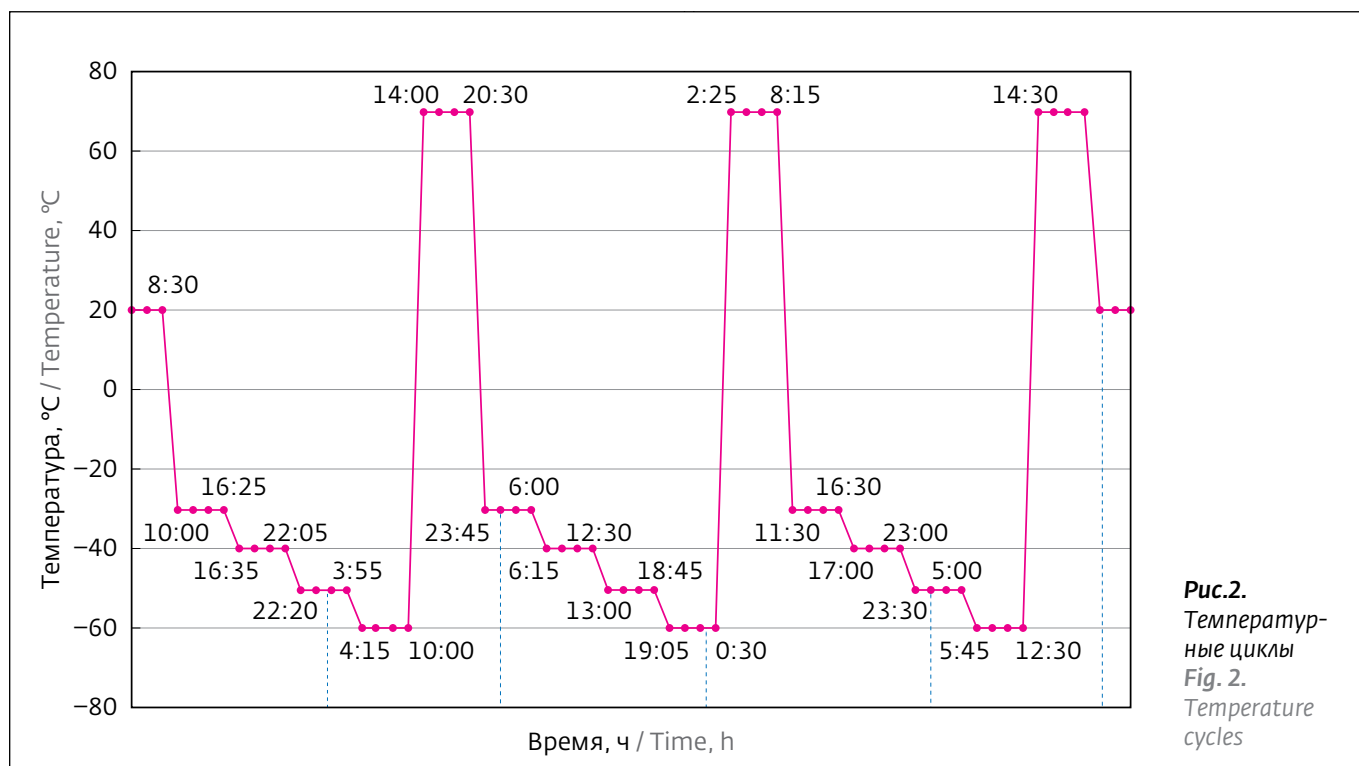
To calculate the estimates of the fiber bending radius in the loose-tube, using the well-known bend loss values, one can also use well-known Hanson formula [22] to determine  $\Delta\alpha(\lambda, T)$ . It is well known [1-2, 6] that changes in excess length are directly proportional to temperature changes:

$$EFL(T) = EFL(T_n) + \Delta\alpha_T(T_n - T), \quad (8)$$

where  $T$ ,  $T_n$  is the current and some reference temperature values, respectively;  $\Delta\alpha_T$  is the absolute difference of the coefficients of linear expansion of the material of the loose-tube and quartz glass. Therefore, we obtain:

$$EFL(\lambda, T) = A + B \cdot \sqrt{\Delta\alpha(\lambda, T)}, \quad (9)$$

where  $A$ ,  $B$  are the parameters determined experimentally or theoretically.



**Рис.2.**  
Температурные циклы  
**Fig. 2.**  
Temperature cycles

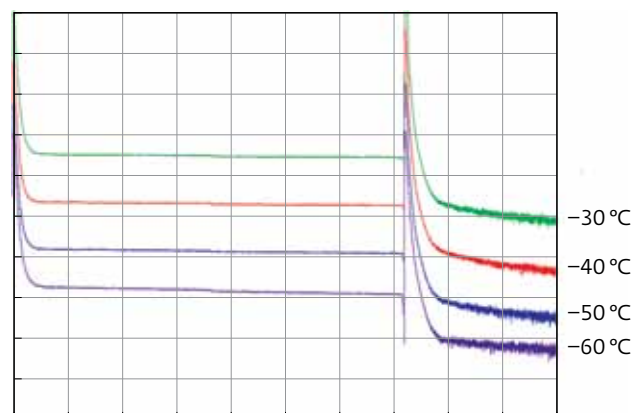
метод 3, использующий формулу (9). Представляет интерес оценка потенциальной возможности определения распределения избыточной длины волокна по результатам измерений затухания ОВ, а также корректности и погрешности перечисленных методов.

В качестве критерия оценки метода предлагается использовать линейный характер зависимости избыточной длины ОВ в модульной трубке от температуры. И соответственно, погрешности методов оценивать как погрешность аппроксимации линейной зависимостью кривой, полученной экспериментально. Для реализации такого подхода барабан с оптическим кабелем помещали в климатическую камеру, где его подвергали воздействию температурных циклов. Испытаниям подвергали оптический кабель длиной 577 м со стандартными ступенчатыми оптическими волокнами типа SMF-28. Кабель модульной конструкции – четыре модульных трубки с четырьмя ОВ каждая. График изменений температуры приведен на рис.2. На каждом шаге, после того как барабан выдерживали при заданном значении температуры не менее 4 часов, выполняли измерения характеристик обратного рассеяния ОВ кабеля. В качестве примера отдельные характеристики представлены на рис.3.

Коэффициенты затухания определяли в результате обработки характеристик обратного рассея-

Thus, we have three methods for determining excess fiber length in the optical cable loose-tube according to the results of measurements of fiber bend losses: method 1, based on formulas (5) and (6), method 2, based on formulas (5) and (7), method 3 using formula (9). It is of interest to estimate the potential for determining the distribution of excess fiber length from the results of fiber attenuation measurements, as well as the correctness and inaccuracy of the listed methods.

As a criterion for evaluating the method, it is suggested to use the linear nature of the dependence of



**Рис.3.** Экспериментальные рефлектограммы  
**Fig. 3.** Experimental reflectograms

ния по типовой методике, основанной на аппроксимации методом наименьших квадратов. Изменения коэффициента затухания ОВ на изгибах рассчитывали как разность между найденными значениями коэффициентов затухания при соответствующей отрицательной температуре (-30°C, -40°C, -50°C, -60°C) и положительной температуре равной 20°C. Затем одним из описанных выше методов получали оценки избыточной длины ОВ и строили экспериментальные кривые зависимости избыточной длины ОВ в модульной трубке от температуры. Экспериментальные кривые аппроксимировали линейной зависимостью и оценивали погрешность данной аппроксимации, которую и полагали погрешностью метода.

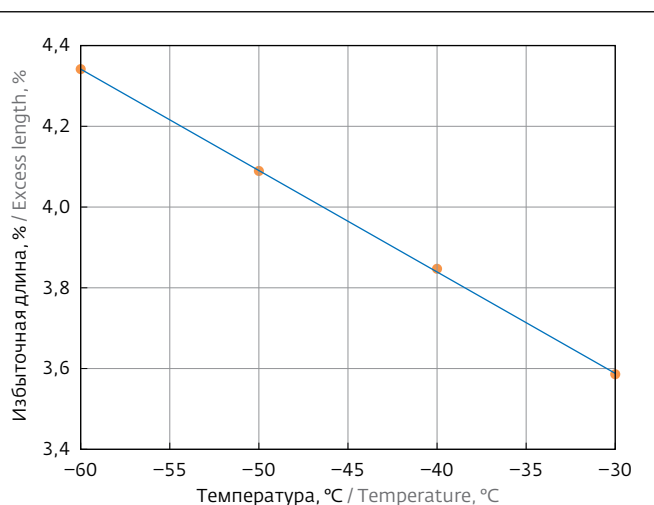
Итоговые результаты показали, что экспериментальная кривая, построенная при использовании метода 1, не может быть аппроксимирована линейной зависимостью. Примеры экспериментальных зависимостей, полученных при использовании метода 2 и метода 3, представлены на рис.4, 5. Погрешность метода 2 во всех случаях не превышала 1-5%. Погрешность метода 3 во всех случаях не превышала 10-15%.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют возможность оценивания распределений избыточной длины ОВ в модульных трубках по длине кабеля типовыми оптическими рефлектометрами по результатам измерений затухания. Предпочтение следует отдать методу 2, погрешность которого не превышает единиц процентов. Для грубой оценки может быть использован и метод 3, который не требует решения нелинейного уравнения и обеспечивает погрешность до 10-15%.

Очевидно, что для получения корректных результатов необходимо снижать погрешность измерений затухания на изгибах. Для этого измерения следует выполнять при более низких температурах на большей длине волны. Из этого вытекает вывод о невозможности применения метода для ОК с волокнами, соответствующими рекомендациям G.657. Для кабелей с такими волокнами необходимо разрабатывать специализированные рефлектометры, например на основе взаимосвязей кривизны и поляризационных характеристик оптических волокон.

## ЛИТЕРАТУРА

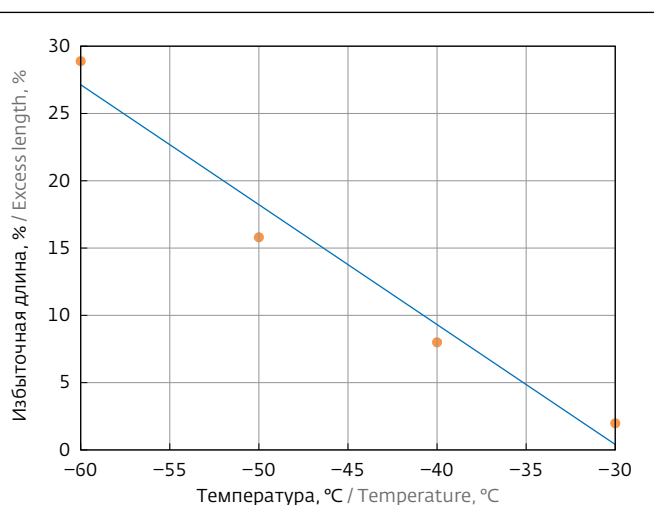
1. Ларин Ю.Т. Оптические кабели: методы расчета конструкций. Материалы. Надежность и стойкость к ионизирующему излучению. – М: Престиж, 2006.
2. Мальке Г., Гессинг П. Волоконно-оптические кабели. – Corning Cable Systems. 2001.
3. Авдеев Б.В., Барышников Е.Н., Длютров О.В., Стародуб-



**Рис.4.** Экспериментальная зависимость избыточной длины ОВ от температуры (измерения по методу 2) и ее линейная аппроксимация

**Fig. 4.** Experimental dependence of the excess fiber length on temperature (measured by method 2) and its linear approximation

the excess fiber length in the loose-tube on temperature. And, accordingly, the errors of the methods are estimated as the approximation error by the linear dependence of the curve obtained experimentally. To implement this approach, a reel with optical cable was placed in a climatic chamber where it was exposed to temperature cycles. The optical cable with a length



**Рис.5.** Экспериментальная зависимость избыточной длины ОВ от температуры (измерения по методу 3) и ее линейная аппроксимация

**Fig. 5.** Experimental dependence of the excess fiber length on temperature (measured by method 3) and its linear approximation

- цев И.И.** Об избыточной длине оптического волокна в оптическом кабеле. – Деп. в Информэлектро, 2001, № 6-эт-2001.
4. **Авдеев Б.В., Барышников Е.Н., Длютров О.В., Стародубцев И.И.** Оптический модуль – основа волоконно-оптического кабеля. – Кабели и провода, 2002, № 1(272), с. 22–25.
  5. **Fraser W.B., Fackerell E.D.** Modelling optical fibre cable. – Proceedings of MISG96, 1996, p. 92–102.
  6. **Stueflotten S.** Low temperature excess loss of loose tube fiber cables. – Applied Optic, 1982, v. 21, № 23, p. 4300–4307.
  7. Patent 4983333 US. Method for controlling excess fiber length in a loose tube optical fiber buffer tube / Blew D.J., 1991.
  8. Patent 0189255 US. Method and apparatus for manufacturing an optical cable and cable so manufactured / Casals L.S. et al, 2012.
  9. **Сепелин Т.** Усовершенствование промежуточной компрессионной тяги и контроля диаметра оптических модулей со свободной укладкой волокон. – Кабели и провода, 2012, № 3(334), с. 15–18.
  10. **Авдеев Б.В., Барышников Е.Н., Длютров О.В., Стародубцев И.И.** Изменение избыточной длины в процессе изготовления ВОК. – Кабели и провода, 2002, № 3(274), с. 32–34.
  11. **Богачков И.В., Майстренко В.А.** Экспериментальные исследования поперечных деформаций оптических волокон. – Электросвязь, 2016, № 5, с. 55–59.
  12. **Акопов С.Г.** Контроль бриллиантовым рефлектометром технологии производства оптических кабелей. – Вестник связи, 2013, № 4, с. 136–138.
  13. **Корн В.М., Длютров О.В., Авдеев Б.В., Барышников Е.Н.** О применении метода Манделштам-Бриллиантового рассеяния для измерения характеристик оптических кабелей. – Кабели и провода, 2004, № 5 (288), с. 19–21.
  14. **Крылов Н.Н., Иконникова Г.С., Николаев В.Л., Васильев В.Е.** Начертательная геометрия. – М.: В.Ш., 2002.
  15. Patent 0362367 US. Distributed fiber bend and stress measurement for determining optical fiber reliability by multi-wavelength optical reflectometry / Chen H., Chen X. and Yao X.S. 2014.
  16. **Anderson D.R., Johnson L., Bell F.G.** Troubleshooting optical-fiber networks. Understanding and using your optical time-domain reflectometer. – Elsevier, 2004, p. 437.
  17. **Zendehnam A., Mirzaei M., Farashiani A. and Horabadi Farahani L.** Investigation of bending loss in a single-mode optical fibre. – Pramana journal of physics, 2010, № 74(4), p. 591.
  18. **Burdin V.A., Vazhdaev M.A.** Method of excess fiber length estimating based on low subzero temperature climatic test. – SPIE Proceedings, 2014, v.9156, p.91560P-1-91560P-12.
  19. **Бурдин В.А., Вахдаев М.А.** Метод оценивания распределений избыточной длины волокна в оптическом кабеле по результатам рефлектометрических измерений коэффициентов затухания при низких отрицательных температурах. – Инфокоммуникационные технологии, 2015, т. 12, № 3, с. 22–28.
  20. Patent 2562141 RU. Method of measurement of excessive length of fibre optic in optic module of optic cable during climatic test / Burdin V.A., 2015.
  21. **Marcuse D.** Curvature loss formula for optical fibers. – J. Opt. Soc. Am., 1976, № 66(3), p.216–220.
  22. **Hansona E.G.** Origin of temperature dependence of microbending attenuation in fiber optic cables. – Fiber and Integrated Optics, 1980, v.3, Issue 2–3, p. 113–148.

of 577 m with standard stepped optical fibers such as SMF-28 was exposed to testing. The loose-tube cable consisted of four loose-tubes with four fibers each. The temperature profile is given in Fig. 2. At each step, after the reel was exposed at a set temperature for at least 4 hours, the backscattering characteristics of the cable fiber were measured. As an example, separate characteristics are given in Fig. 3.

The attenuation ratios were determined as a result of processing the backscattering characteristics by a conventional technique based on least-squares approximation. The changes in the fiber attenuation ratios at the bends were calculated as the difference between the found values of the attenuation ratios at the corresponding negative temperature (–30 °C, –40 °C, –50 °C, –60 °C) and positive temperature of 20 °C. Then, using one of the methods described above the estimates of the excess fiber length were obtained, and the experimental curves for the dependence of the excess fiber length in the loose-tube on temperature were plotted. The experimental curves were approximated by a linear relationship and the error of this approximation was estimated, which was assumed to be the error of the method.

The final results showed that the experimental curve plotted using method 1 cannot be approximated by linear dependence. The examples of experimental dependences obtained using method 2 and method 3 are given in Fig. 4, 5. The error of method 2 did not exceed 1–5% in all cases. The error of method 3 did not exceed 10–15% in all cases.

Thus, the obtained results demonstrate the possibility of estimating the distributions of excess fiber length in loose-tubes along the cable length by conventional optical time-domain reflectometers based on the results of attenuation measurements. Preference should be given to method 2, the error of which does not exceed units of percent. For a rough estimate, method 3 can also be used, which does not require the solution of a nonlinear equation, and provides an error of up to 10–15%.

However, it is obvious that to obtain correct results, it is necessary to reduce the errors of attenuation measurements at bends. In order to achieve this, in particular, the measurements should be performed at lower temperatures at a longer wavelength. Hence, it follows that this method cannot be applied to optical cables with the fibers corresponding to G.657 recommendations. For cables with such fibers, the development of specialized OTDRs is required, for example, based on the relationship between the curvature and the polarization characteristics of the fibers.