

# Методика определения зависимости вероятности отказа оптического волокна от текущего времени эксплуатации

К. А. Карпов, Е. П. Ионикова, В. П. Шувалов

С 1993 года по настоящее время в мире проложено более 2.2 млрд км оптического волокна. Как правило, назначенный техническими условиями срок службы оптического волокна не превышает 25 лет. Поэтому определение пригодности оптического кабеля к дальнейшей эксплуатации после наступления назначенного срока службы является в настоящее время актуальной задачей, имеющей важное народно-хозяйственное значение. В работе рассмотрена зависимость вероятности отказа от приложенного напряжения и затрагивается вопрос о целесообразности использования при моделировании двухстадийной модели разрушения оптических волокон.

*Ключевые слова:* долговечность, назначенный срок службы, распределение Вейбулла, вероятность отказа оптического волокна, статическая и динамическая усталость.

## 1. Введение

Благодаря высокой пропускной способности, помехоустойчивости, информационной безопасности область применения волоконно-оптических кабелей неуклонно расширяется. Помимо использования в телекоммуникациях, оптическое волокно (ОВ) широко применяется в датчиках физических величин и различных волоконно-оптических приборах, что приводит к необходимости рассмотрения их прочности и долговечности.

Срок службы волоконно-оптических кабелей определяется сроком службы оптических волокон и может варьироваться от 2 до 45 лет [1]. Зачастую в технических требованиях на проектирование и тендерах указывается, что срок службы оптического кабеля (ОК) должен быть не менее 25 лет [2].

Долговечность кабеля как одно из свойств, характеризующих его надежность, определяется [3, 4, 5] как:

- средний срок службы – математическое ожидание срока службы;
- гамма-процентный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Назначенный срок службы кабеля не является показателем надежности, т.к. не учитывает зависимость от индивидуальных параметров условий эксплуатации. Он представляет собой календарную продолжительность, при достижении которой эксплуатация объекта может быть продолжена только после принятия решения о возможности продления данного показателя [3].

Прогнозирование срока дальнейшего использования ОК возможно только на основе данных о текущем состоянии ОК: например, данных о проценте его удлинения [6], изменении затухания волоконно-оптической линии связи, изменении нагрузки на ОВ, соответствии вероятности отказа в текущий момент времени максимально допустимой вероятности отказа, определяемой балансодержателем кабеля, и т.д.

В статье рассматривается методика определения вероятности отказа оптического волокна в текущий момент времени с целью определения возможности его дальнейшей эксплуатации.

## 2. Зависимость вероятности отказа ОВ от текущего времени эксплуатации

### 2.1. Долговечность ОВ при испытаниях на статическую и динамическую усталость

Долговечность ОВ с определенным набором характеристик, определяющих срок его жизни, характеризуется временем, в течение которого, находясь под воздействием заданных эксплуатационных напряжений  $\sigma$ , вероятность отказа будет находиться в пределах допустимой нормы:

$$t = f(L, \sigma, P, \delta), \quad (1)$$

где  $L$  – длина ОВ;

$\sigma$  – приложенное напряжение;

$P$  – вероятность разрушения ОВ (вероятность отказа);

$\delta$  – механические характеристики ОВ.

Теоретические основы волоконной оптики и накопленный производственный опыт показывают, что механическое напряжение ОВ является одним из основных параметров, определяющих качество ОК.

Основы механической надежности ОВ разработаны много лет назад и хорошо представлены в литературе – в частности, в серии публикаций известий SPIE (The International Society for Optical Engineering) [7–12]. Теоретические аспекты механической надежности достаточно полно изложены в документе [13] и статьях [14, 15], где представлена следующая формула расчета времени до отказа для статической усталости:

$$t = \frac{B\sigma_c^{n-2}}{\sigma_{\text{эксн.}}^n}, \quad (2)$$

где  $B = \frac{2}{AY^2(n-2)K_{IC}^{n-2}}$ ;

$\sigma_c$  – прочность волокна в инертной среде;

$\sigma_{\text{эксн.}}$  – приложенное напряжение;

$A$  – константа, зависящая от материала и окружающей среды;

$Y$  – коэффициент, зависящий от геометрии трещины;

$n$  – параметр усталости;

$K_{IC}$  – коэффициент интенсивности напряжений, соответствующий инертной среде.

Прологарифмировав (2), получим:

$$\ln t = \ln k_s - n \ln \sigma_{\text{эксн.}}, \quad (3)$$

где  $k_s = B\sigma_c^{n-2}$  – константа, определяемая условиями окружающей среды.

Наряду с понятием «статическая усталость» существует понятие «динамическая усталость». Если статическая усталость определяет время до разрушения ОВ при заданной нагрузке, то динамическая усталость характеризует напряжение ОВ, при котором произойдет разрушение ОВ. Время, когда произойдет разрушение ОВ, определяется формулой [16]:

$$\ln t = \ln \frac{k_d}{n+1} - n \ln \sigma_{исп.}, \quad (4)$$

где  $k_d$  – константа, определяемая условиями окружающей среды при испытаниях динамическим методом;

$\sigma_{исп.}$  – прикладываемая в процессе лабораторных испытаний нагрузка, приводящая к разрушению ОВ.

## 2.2. Статистическая оценка механической прочности. Бимодальное распределение Вейбулла

Для статистической оценки механической прочности ОВ наиболее подходящим типом распределения является закон Вейбулла, записанный в виде [17]:

$$P(\sigma, L) = 1 - \exp \left[ - \frac{L}{L_0} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right], \quad (5)$$

где  $L$  – длина оптического волокна;

$L_0$  – длина образца оптического волокна при испытаниях;

$\sigma$  – предел прочности волокна;

$\sigma_0, m$  – параметры распределения Вейбулла.

Известны результаты оценки кратковременной прочности для различных мод распределения: больших и малых дефектов. Параметр Вейбулла  $m$  определялся в исследованиях [18, 19] для малых значений вероятности разрушения ( $m = 3 \dots 5$ ), в исследовании [20] – для больших значений вероятности разрушения ( $m = 20 \dots 30$ ).

Совместное рассмотрение вышеуказанных мод возможно при применении бимодального закона распределения Вейбулла, в котором обе независимые моды описываются набором параметров Вейбулла:  $m_1, m_2, \sigma_{01}, \sigma_{02}$ .

В рассматриваемом законе первая мода справедлива для вероятностей разрушения оптического волокна  $P_{кр} \leq P(\sigma, L) \leq 1$ , вторая мода – для вероятностей  $0 \leq P(\sigma, L) \leq P_{кр}$ .

$P_{кр}$  соответствует вероятности разрушения на границе двух мод.

$$P(\sigma, L) = \begin{cases} 1 - \exp \left[ - \frac{L}{L_0} \left( \frac{\sigma}{\sigma_{01}} \right)^{m_1} \right] & \text{при } P_{кр} \leq P(\sigma, L) \leq 1 \\ 1 - \exp \left[ - \frac{L}{L_0} \left( \frac{\sigma}{\sigma_{02}} \right)^{m_2} \right] & \text{при } 0 \leq P(\sigma, L) \leq P_{кр} \end{cases}. \quad (6)$$

Графическая интерпретация формулы (6) представлена на рис. 1.

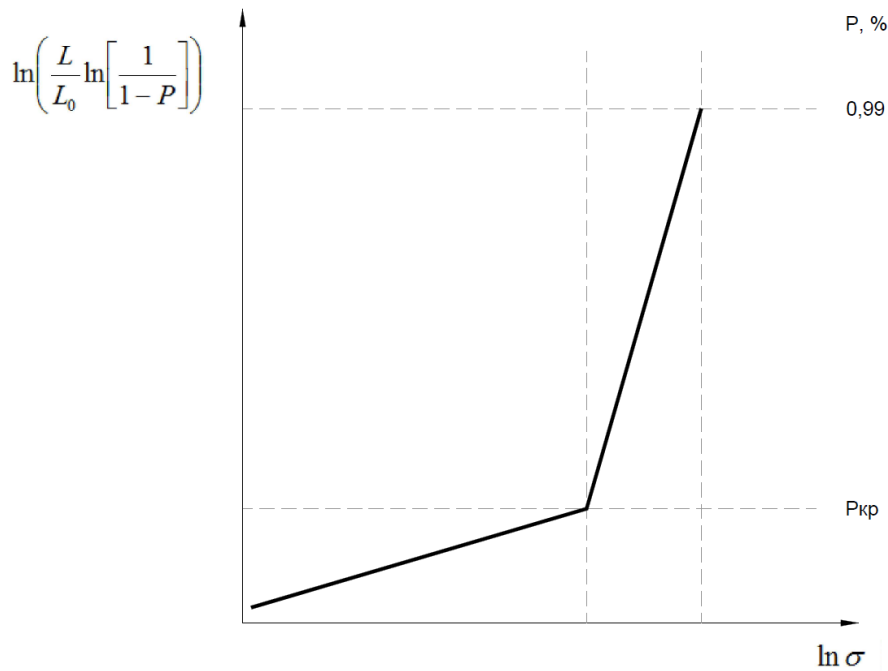


Рис. 1. Бимодальное распределение прочности оптического волокна по закону Вейбулла (функция от  $\ln(\sigma)$ )

### 2.3. Выбор критического значения вероятности разрушения ОВ

Для определения критического значения вероятности разрушения ОВ  $P_{кр}$  необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} P_{кр} = 1 - \exp\left[-\frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_{01}}\right)^{m_1}\right] \\ P_{кр} = 1 - \exp\left[-\frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma_{кр}}{\sigma_{02}}\right)^{m_2}\right] \end{cases} \quad (7)$$

Откуда следует, что

$$P_{кр} = 1 - \exp\left[-\frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma_{01}}{\sigma_{02}}\right)^{\frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 - m_2}}\right], \quad (8)$$

при этом

$$\sigma_{кр} = \frac{\sigma_{01}^{\frac{m_1}{m_1 - m_2}}}{\sigma_{02}^{\frac{m_2}{m_1 - m_2}}}. \quad (9)$$

Критическое значение вероятности разрушения ОВ  $P_{кр}$  может быть вычислено при известных параметрах Вейбулла, определенных в результате испытаний. Вероятность разрушения ОВ является предельной характеристикой коррозионной деградации. На практике часто возникает необходимость в рассмотрении влияния на эксплуатационные параметры пе-

редачи таких характеристик, как затухание, дисперсия и др., что ограничивает значение вероятности отказа до значений

$$P_{тек} < P_{кр}. \quad (10)$$

Таким образом, область распределения прочности ОВ, которую следует рассматривать при моделировании, – это область значений вероятности разрушения, не превышающих критического значения.

#### 2.4. Зависимость вероятности отказа от текущего времени эксплуатации

Приложенное к ОВ эксплуатационное напряжение при одних и тех же условиях окружающей среды будем считать постоянным в течение всего времени эксплуатации. В результате коррозионной деградации образуются поверхностные трещины, которые расширяются со временем, что приводит к уменьшению прочности ОВ на величину  $\Delta\sigma$ .

Текущее время эксплуатации определяется следующим образом:

$$t_{тек.} = t_{life}(P, \sigma_{эксп.}, L) - \Delta t = \frac{B \cdot (\sigma_c^{n-2} - (\sigma_c - \sigma_{тек.})^{n-2})}{\sigma_{эксп.}^n}. \quad (11)$$

На рис. 2 представлена зависимость снижения прочности ОВ от времени эксплуатации.

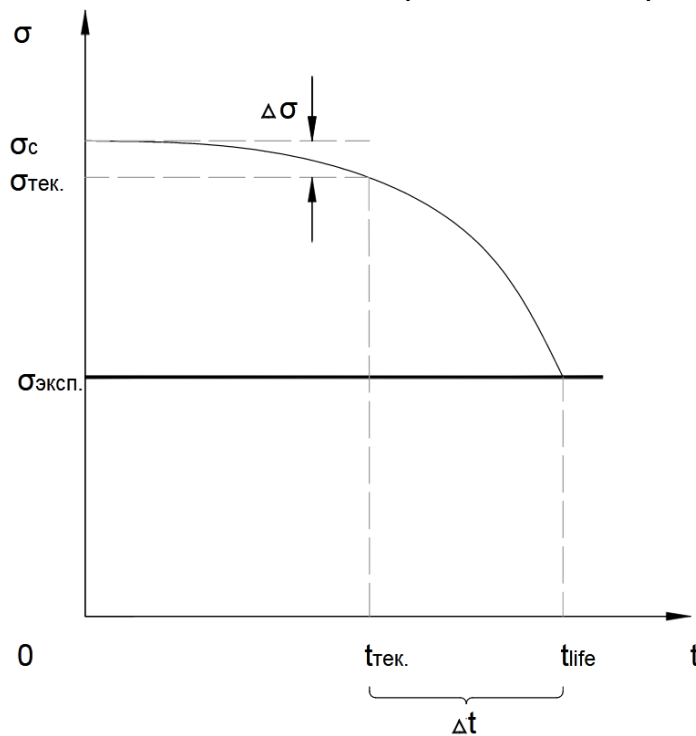


Рис. 2. Уменьшение прочности ОВ с течением времени эксплуатации

С момента начала эксплуатации ОВ до момента  $t_{тек.}$  прочность снизилась на  $\Delta\sigma$ , при этом до момента выхода волокна из строя остался отрезок времени  $\Delta t$ . Таким образом,  $t_{тек.}$  определяется по формуле:

$$t_{\text{мек.}} = \frac{B \cdot \left( \sigma_c^{n-2} - \left[ \sigma_c - \left( \frac{L_0}{L} \cdot \ln \left( \frac{1}{1-P} \right) \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \sigma_0 \right]^{n-2} \right)}{\sigma_{\text{эксн.}}^n}. \quad (12)$$

Вероятность отказа ОВ в момент времени  $t$  при постоянном значении приложенного напряжения может быть определена как

$$P(t) = 1 - e^{-\left( \frac{L}{L_0} \cdot \left[ \frac{\sigma_c}{\sigma_0} - \left( \left[ \frac{\sigma_c}{\sigma_0} \right]^{n-2} - \frac{t \cdot \sigma_{\text{эксн.}}^n}{B \cdot \sigma_0^{n-2}} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right)}. \quad (13)$$

### 3. Расчет зависимости вероятности отказа от величины приложенного к кабелю напряжения

В качестве исходных данных для определения вероятностей отказа оптического кабеля длиной 100 км приняты следующие характеристики:

1)  $L_0 = 0.12$  м,  $\sigma_0 = 5.222$  ГПа,  $m = 5.187$ ,  $n = 23.287$ ,  $\ln B = -24.7731$  [20];

2) инертная прочность для одномодовых волокон категории В  $\sigma_c = 20$  ГПа в соответствии с [16];

3) текущий момент времени эксплуатации – 25 лет;

4) приложенное напряжение  $\sigma_{\text{эксн.}}$  взято в диапазоне от 1.9 ГПа до 2.1 ГПа

В данном случае выражение (13) будет иметь вид:

$$P(\sigma_{\text{эксн.}}) = 1 - e^{-\left( \frac{L}{L_0} \cdot \left[ \frac{\sigma_c}{\sigma_0} - \left( \left[ \frac{\sigma_c}{\sigma_0} \right]^{n-2} - \frac{t \cdot \sigma_{\text{эксн.}}^n}{B \cdot \sigma_0^{n-2}} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right)}. \quad (14)$$

Полученные значения вероятностей отказа для диапазона приложенных напряжений к 25 годам эксплуатации представлены в табл. 1 и на рис. 3.

В табл. 1 так же внесены данные о возможном сроке эксплуатации кабеля после 25 лет использования, если ориентироваться на требуемые показатели надежности 0.982 для магистральной первичной сети [21].

Таблица 1. Результаты расчета

Приложенное напряжение $\sigma_{\text{эксн.}}$ , ГПа	Вероятность отказа ОВ $P(t)$	Возможное время эксплуатации, лет
1.900	0.00000114	125.0
1.925	0.00000568	85.6
1.950	0.0000279	56.9
1.975	0.000136	35.9
2.000	0.000663	20.4
2.025	0.00324	9.0
2.050	0.0159	0.5
2.075	0.0781	–
2.100	0.351	–

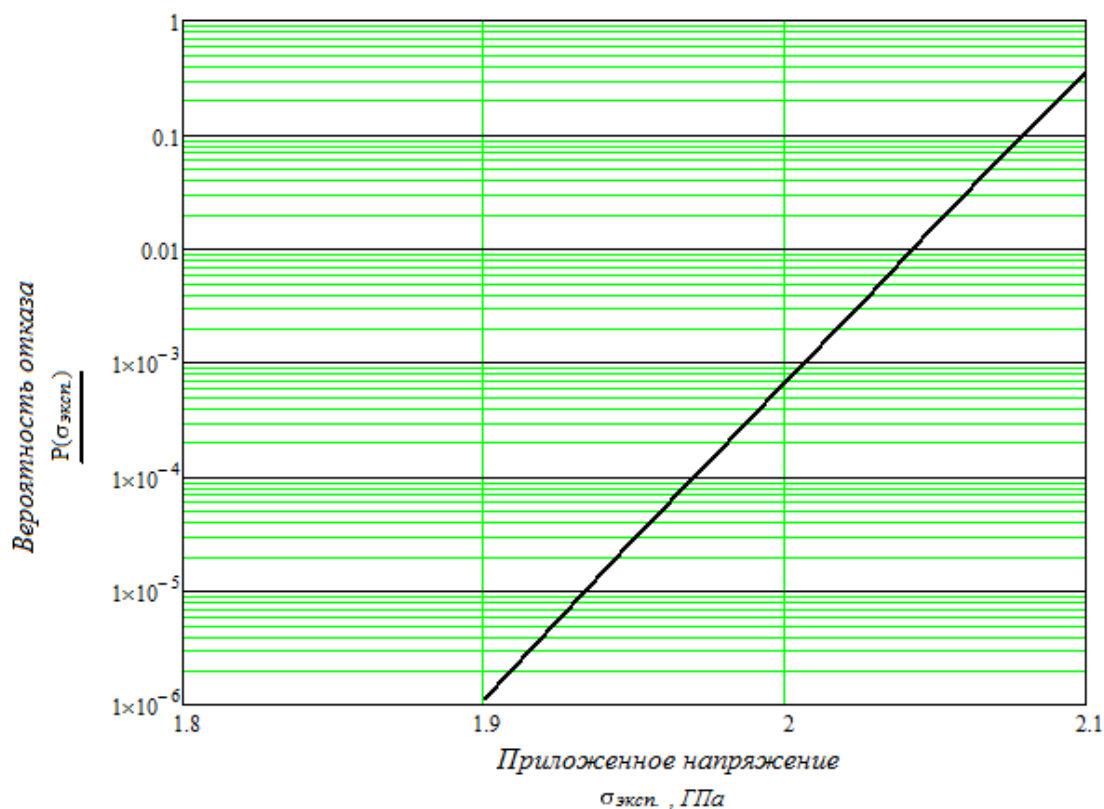


Рис. 3. График зависимости значений вероятности отказа от приложенного напряжения (25 лет эксплуатации)

Таким образом, ориентируясь на требуемые показатели надежности, можно предположить, что по истечении 25 лет кабель, находящийся под напряжением до 2.05 ГПа, может эксплуатироваться в дальнейшем как минимум еще полгода.

#### 4. Заключение

В статье получено выражение для расчета зависимости вероятности отказа оптического кабеля от приложенного в процессе эксплуатации напряжения. Используя полученную формулу, можно оценить коэффициент отказа кабеля к моменту окончания назначенного срока службы и определить необходимость или целесообразность дополнительных вложений в реконструкцию сети в ближайшее время. Сделан вывод, что при моделировании процессов деградации кабеля нет необходимости рассматривать область прочности ОВ после критического значения вероятности разрушения ОВ, т.к. коэффициент отказа после критического значения начинает быстро расти и в течение короткого промежутка времени достигает 1.

#### Литература

1. ГОСТ Р 52266-2004 Кабельные изделия. Кабели оптические. Общие технические условия.
2. Технические требования к оптическому кабелю, применяемому на сети доступа (ОКСН, ОК-ГРУНТ, ОКС-ГТС, ОК-ОБЪЕКТ) для проведения тендеров на поставку. Ростелеком, 2017.
3. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения.

4. *Острейковский В. А.* Теория надежности: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2003. 463 с.
5. *Цым А. Ю.* Сроки службы оптических кабелей. Анализы. Риски // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Линии связи XXI века»: сб. тезисов. Самара, 2019.
6. *Авдеев Б. В., Барышников Е. Н., Длютров О. В., Стародубцев И. И.* Об избыточной длине оптического волокна в оптическом кабеле. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.ruscable.ru/articles/doc/statii/ob\\_izbytochnoy\\_dline\\_opticheskogo\\_volokn](https://www.ruscable.ru/articles/doc/statii/ob_izbytochnoy_dline_opticheskogo_volokn) (дата обращения: 23.11.2020).
7. Optical Fiber Reliability and Testing // SPIE Proceedings 3848, ed. by M. J. Matthewson, 1999.
8. Optical Fiber and Fiber Component Mechanical Reliability and Testing // SPIE Proceedings 4215, ed. by M. J. Matthewson, 2001.
9. Optical Fiber and Fiber Component Mechanical Reliability and Testing II // SPIE Proceedings 4639, ed. by M. J. Matthewson and C.R. Kurkjian, 2002.
10. Reliability of Optical Fiber Components, Devices, Systems, and Networks // SPIE Proceedings 4940, ed. by H. G. Limberger and M. J. Matthewson, 2003.
11. Reliability of Optical Fiber Components, Devices, Systems, and Networks II // SPIE Proceedings 5465, ed. by H. G. Limberger and M. J. Matthewson, 2004.
12. Reliability of Optical Fiber Components, Devices, Systems and Networks III // SPIE Proceedings 6193, ed. by H. G. Limberger and M. J. Matthewson, 2006.
13. Reliability of Optical Fiber Components // Final Report of COST 246, edited by T. Volotinen, W. Griffioen, M. Gadonna and H. Limberger. Springer-Verlag, London, 1999.
14. *Matthewson M. J.* Strength Probability Time Diagrams using Power Law and Exponential Kinetics Models for Fatigue // SPIE Proceedings. 2006.
15. *Baker L. K.* Comparison of Mechanical Reliability Models for Optical Fibers // Corning White Paper WP5049. 2001.
16. ГОСТ Р МЭК 60793-1-33-2014 Волокна оптические. Часть 1-33. Методы измерений и проведение испытаний. Стойкость к коррозии в напряженном состоянии.
17. *Evans A.G. and Wiederhorn S.M.* Proof testing of ceramic materials – an analytical basis for failure prediction // International Journal of Fracture. 1974. № 10. P. 379–392.
18. РМ В 22.24.104-87. Методы оценки соответствия требованиям по надежности оптических кабелей.
19. Typical Fujikura's Fiber Data // Proceedings Optical Fiber Products Div., 1995.
20. *Мильков А. В., Яковлев М. Я.* Оценка надежности оптического волокна на основе испытаний на кратковременную прочность и статическую усталость. [Электронный ресурс]. URL: <https://milkov.ru/files/4.pdf> (дата обращения: 08.10.2020).
21. РД 45.047-99 Линии передачи волоконно-оптические на магистральной и внутризоновых первичных сетях ВСС России. Техническая эксплуатация.

*Статья поступила в редакцию 02.03.2021.*

**Карпов Кирилл Алексеевич**

аспирант СибГУТИ, e-mail: [kirill.karpov@hs-anhalt.de](mailto:kirill.karpov@hs-anhalt.de).

**Ионикова Елена Петровна**

аспирант СибГУТИ, e-mail: [ionikova.lena@mail.ru](mailto:ionikova.lena@mail.ru).

**Шувалов Вячеслав Петрович**

д.т.н, профессор, профессор кафедры передачи дискретных сообщений и метрологии СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: [shvp04@mail.ru](mailto:shvp04@mail.ru).



**Methodology for determining the probability of optical fiber failure as a function of current operating time****К. А. Карпов, Е. П. Ионикова, В. П. Шувалов**

Since 1993 more than 2.2 billion km of optical fiber have been laid all over the world. Typically, the lifetime of optical fiber prescribed by technical conditions does not exceed 25 years. Therefore, determining the suitability of an optical cable for further operation after the designated lifetime of an optical cable is currently an urgent task, having great national economic importance. The paper considers the dependence of the failure probability on the applied voltage and raises the question of the feasibility of using a two-stage model of optical fiber failure when modeling.

*Keywords:* appointed service life, Weibull distribution, optical fiber failure probability, static and dynamic fatigue, durability.