

Метод неразрушающего контроля прочности кварцевого оптического волокна

В.А. Андреев¹, **А.В. Бурдин**^{1,2}, **В.А. Бурдин**¹, **М.В. Дашков**¹

¹ ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», 443010, Россия, г. Самара, ул. Льва Толстого, д. 23;

² Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Биржевая линия, д. 12

Аннотация

В работе предложен метод неразрушающего контроля прочности оптического волокна по оценкам энергии нелинейной акустической эмиссии, базирующийся на использовании тестируемого оптического волокна в качестве акустического сенсора. Представлены модели процессов, на которых базируется метод. Приведены результаты экспериментальных исследований. Данные, полученные по результатам испытаний образцов оптического кабеля и оптических волокон предложенным методом, сопоставлялись с результатами измерений тех же образцов известным 2-точечным методом. Погрешность относительных оценок прочности тестируемых образцов оптических волокон не превышала 3,0%. Полученные результаты позволяют говорить о корректности используемых моделей и потенциальной возможности применения предлагаемого метода для неразрушающего контроля прочности оптических волокон, а также о перспективе разработок по применению рассмотренного подхода для неразрушающего контроля прочности оптических волокон в кабеле, в том числе в кабеле на линии, введенной в эксплуатацию.

Ключевые слова: оптическое волокно, прочность, микротрещина, акустическое воздействие, нелинейная акустическая эмиссия, волоконно-оптический акустический датчик.

Цитирование: Андреев, В.А. Метод неразрушающего контроля прочности кварцевого оптического волокна / В.А. Андреев, А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, Д.М. Дашков // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 2. – С. 224-231. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1015.

Citation: Andreev VA, Bourdine AV, Burdin VA, Dashkov MV. A method for non-destructive testing of the strength of a silica optical fiber. Computer Optics 2022; 46(2): 224-231. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1015.

Введение

Кабельные линии сетей связи относятся к высоконадежным системам, для которых наиболее перспективными являются прогнозирующие стратегии технического обслуживания. Реализация данных стратегий требует предсказания остаточного срока службы кабеля на линии, введенной в эксплуатацию. Как следствие, операторы связи всегда проявляли интерес к задаче определения ресурса кабеля на сети связи. Но особенно актуальна эта задача стала сегодня, когда срок службы волоконно-оптических линий передачи, построенных в конце прошлого века, приблизился к заявленному производителем сроку службы оптических кабелей или превысил его. Соответственно, возникла потребность прогноза остаточного срока службы оптических кабелей, проработавших на линии 20–30 лет и более. Согласно рекомендациям ITU-T, срок службы оптического кабеля оценивают по сроку службы оптического волокна в кабеле [1]. Для прогноза срока службы оптического волокна рекомендуется использовать формулу, предложенную Ю. Митцунага с соавторами [1–4], для использования которой необходимо знать напряжения в оптическом волокне и прочность оптического волокна. Методы неразрушающего контроля механических

напряжений в оптическом волокне известны достаточно хорошо. Они позволяют определять распределения напряжений в оптических волокнах по длине кабеля. В частности, для измерения распределения растягивающих нагрузок в волокнах кабеля рекомендуется использовать Бриллюэновские импульсные оптические рефлектометры (BOTDR), а для измерения распределений напряжений на изгибах оптического волокна – рефлектометрические методы измерения распределения кривизны волокна по длине кабеля [1, 5–7]. К сожалению, это нельзя сказать о неразрушающих методах контроля прочности оптических волокон в кабеле. Авторам не удалось найти описаний таких методов и тем более рекомендаций по их применению. Контрольные испытания, основанные на перемотке волокна под нагрузкой (proof-test), не могут использоваться для испытания оптических волокон в кабеле, а методы испытания на растяжение и испытание на изгиб от точки к точке являются разрушающими методами [2–4, 8–13]. Проблема актуализации оценок прочности оптических волокон значительно усложняет задачу прогноза срока службы оптических кабелей. Из-за отсутствия актуальных данных предлагается использовать данные тестирования оптического волокна, полученные при его перемотке под нагрузкой до каблирования [1]. Очевид-

но, что такой подход вполне приемлем для кабелей, поставляемых со склада производителя, с малым сроком хранения, но недопустим для оптических кабелей, прослуживших 20–30 лет и более. Прогнозы ресурса таких кабелей требуют оценок прочности оптических волокон в кабеле и напряжений в них на момент прогноза. Все это делает крайне актуальной задачу неразрушающего контроля прочности оптических волокон.

К перспективным методам диагностики состояния различных конструкций относятся методы, основанные на оценках параметров нелинейной акустической эмиссии [14–19]. В частности, известно применение метода акустической эмиссии для проверки прочности пучка оптических волокон [20, 21]. Для этого к пучку оптических волокон прикладывается регулируемая растягивающая нагрузка, а сигнал акустической эмиссии измеряется акустическим датчиком, расположенным рядом с пучком. Прочность пучка волокон оценивается по результатам обработки полученных данных. Метод дает вполне удовлетворительные оценки прочности пучка волокон, фиксируя момент разрушения волокна [22]. Этот метод также относится к методам разрушающего контроля. Авторам не удалось найти данных о применении методов акустической эмиссии для неразрушающего контроля прочности оптического волокна. На наш взгляд, основная проблема здесь связана с тем, что при нахождении акустического датчика на некотором расстоянии от волокна трудно обеспечить необходимое для измерений уровней акустической эмиссии на ранней стадии разрушения оптического волокна соотношение сигнал/шум.

Следует отметить, что в последние годы активно разрабатываются и находят все большее применение оптические датчики [23–27]. В частности, хорошо известно, что оптическое волокно является чувствительным акустическим датчиком и широко используется для измерения сигналов акустической эмиссии [28–31]. Особенно перспективны волоконно-оптические распределенные акустические сенсоры (DAS), которые отличаются сверхвысокой чувствительностью и высоким пространственным разрешением [29, 30].

В данной статье предлагается способ неразрушающего контроля прочности оптического волокна, базирующийся на измерениях параметра сигналов нелинейной акустической эмиссии с использованием испытуемого оптического волокна в качестве акустического датчика. Рассмотрены теоретические основы предлагаемого подхода, дано описание метода и приведены основные положения его реализации. Приведено описание экспериментальной установки, представлены результаты эксперимента, которые наглядно демонстрируют потенциальные возможности предлагаемого метода. Результаты, полученные в данной работе, позволяют предположить, что указанный метод может быть использован для неразрушающего контроля прочности оптического волокна, а в

будущем возможно и для оптических волокон в кабеле, в том числе на трассе кабельной линии.

1. Взаимодействие акустических волн с трещинами

Известно, что трещины существенно изменяют акустические свойства твердых тел, и особенно их нелинейные акустические свойства [32–44]. Их наличие приводит к высокому уровню акустической нелинейности, повышенному поглощению энергии звука и ряду других особенностей. Нелинейный характер взаимодействия акустических волн с трещинами обусловлен тем, что при приложении растягивающих напряжений трещины раскрываются, а при приложении сжимающих напряжений – закрываются. Как следствие, акустические параметры сред с трещинами, такие как поглощение и упругие модули, до определенного порогового значения средней деформации существенно зависят от приложенного давления. При превышении этого порогового значения, когда трещина практически закрывается, они стремятся к значениям, характерным для однородной среды без трещин. Как отмечено в [41], «трещины являются планарными дефектами твердого тела с малым аспект-отношением $d/L \ll 1$ », где d – характерный размер раскрытия трещины, L – характерный размер диаметра трещины. Важной особенностью трещин является то, что контактирующие поверхности трещин неровные. Причем искривленность поверхностей такова, что контакты имеют не точечную, а удлиненную форму. При этом в окрестности контактов локальное расстояние между поверхностями трещины значительно меньше среднего значения раскрытия трещины. Из-за этого, как отмечено в [41, 42], окрестности контакта более чувствительны к внешнему напряжению, чем трещина в целом. Состояние контактов в трещине существенно изменяется уже при относительно малой средней деформации в среде, значительно меньшей по сравнению со значениями, необходимыми для полного закрытия трещины. Как показано в [41, 42], трещины с такими контактами могут приводить к заметному термоупругому поглощению в широком диапазоне частот от релаксационной частоты трещины в целом до релаксационных частот контактов. Для описания термоупругих потерь энергии за период на контакте трещины предлагаются следующие выражения [38, 41–42, 44]:

$$W_{LF} \approx 2\pi\omega T(\alpha^2 K^2 / k)l^2 \tilde{L}L^2 \varepsilon^2, \omega \ll \omega_l, \quad (1)$$

$$W_{LF} \approx (2\pi / \omega)kT(\alpha K / C\rho)^2 \tilde{L}L^2 \varepsilon^2 / l^2, \omega \gg \omega_l, \quad (2)$$

$$W_{\max} \approx 2\pi T(\alpha^2 K^2 / C\rho)\tilde{L}L^2 \varepsilon^2, \omega \approx \omega_l, \quad (3)$$

$$\omega_l \approx k / (\rho Cl^2), \quad (4)$$

где ω – круговая частота; T – температура; α – коэффициент объемного теплового расширения; K – модуль объемного сжатия; ρ – плотность; C – удельная

теплоемкость; ε – средняя деформация в материале; k – коэффициент теплопроводности; L – диаметр трещины; \tilde{L} – длина контакта; l – ширина контакта; ω_l – релаксационная частота контакта.

Если допустить, что исследуется ограниченная область, в которой длина и ширина контакта характеризуются некоторыми характерными средними значениями и их можно приближенно полагать постоянными, то формулы (1–3) для всех трех диапазонов частот можно представить в общем виде, как

$$W_l \approx C_\omega L^2 \varepsilon^2, \tag{5}$$

где C_ω – постоянная величина, которая в каждом из трех рассматриваемых диапазонов частот принимает свое значение, определяемое в зависимости от соотношения частот ω и ω_l согласно (1–3).

2. Модель оптоволоконного акустического сенсора на основе фазовой модуляции оптической несущей

Как было отмечено ранее, к наиболее перспективным средствам акустического контроля относятся системы с распределенными оптоволоконными акустическими сенсорами. Данные системы базируются на фазовой модуляции оптической несущей акустическими волнами. Для приема акустических сигналов в подобных системах применяют фазочувствительные оптические рефлектометры [29, 30]. Также здесь для выделения акустических сигналов могут быть использованы различные варианты схем интерферометров [46].

Модель приема акустических сигналов с помощью распределенного оптоволоконного акустического сенсора на основе фазовой модуляции описана в работе [34]. Акустическое воздействие модулирует оптическую несущую в оптическом волокне по фазе в результате действия механизмов изменения показателя преломления сердцевин n (фотоупругий эффект) и изменения длины волокна и изменения диаметра сердцевин волокна (эффект Пуассона). Эти механизмы дают вклады одного порядка как для продольных, так и для поперечных напряжений. Для продольных напряжений фазовый сдвиг в большей степени определяется изменением длины волокна, а для поперечных напряжений – изменением показателя преломления. В общем случае изменения фазы оптической несущей при акустическом воздействии на волокно определяются формулой

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \times \delta(nL) = \frac{2\pi}{\lambda} \times \left[L \frac{\partial n}{\partial p} \delta p + n \frac{\partial L}{\partial p} \delta p \right], \tag{6}$$

где λ – длина волны света; p – звуковое давление; n – показатель преломления сердцевин оптического волокна; L – длина участка оптического волокна, на который действует акустический сигнал.

При когерентном приеме на выходе фотоприемника формируется сигнал, амплитуда которого на частоте акустического воздействия пропорциональна

изменениям фазы и, соответственно, пропорциональна звуковому давлению. Тогда, учитывая, что энергия звука пропорциональна квадрату звукового давления, при воздействии на оптическое волокно акустического сигнала одной частоты ω_k , следует полагать, что квадрат амплитуды A принимаемого на этой частоте сигнала прямо пропорционален энергии W акустического воздействия на этой частоте

$$A_k^2 \propto W_k. \tag{7}$$

3. Взаимосвязь между прочностью оптического волокна и оценкой энергии нелинейной акустической эмиссии

Пусть на оптическое волокно воздействует акустический сигнал на частоте ω_0 . В результате акустического воздействия оптическое волокно периодически изгибается, что приводит к изменениям длины, диаметра и показателя преломления сердцевин оптического волокна и в итоге фазовой модуляции оптической несущей сигналом с частотой акустического воздействия ω_0 . При изгибах оптического волокна с частотой ω_0 микротрещины на его поверхности периодически закрываются и открываются, что ведет к нелинейному поглощению доли энергии акустического воздействия, часть которой, в свою очередь, преобразуется в энергию нелинейной акустической эмиссии. Суммарная энергия воздействующего акустического сигнала равна

$$W = W_0 + W_{NE}, \tag{8}$$

где W_0 – энергия сигнала на частоте акустического воздействия ω_0 , а W_{NE} – энергия сигнала нелинейной акустической эмиссии.

Этот сигнал формирует звуковое давление, которое модулирует по фазе распространяющуюся в оптическом волокне оптическую несущую. Как следствие, спектр сигнала на выходе приемника включает составляющую на частоте акустического воздействия ω_0 и нелинейные компоненты. Учитывая (7), будем полагать

$$A_0^2 \propto W_0, \quad \sum A_i^2 \propto W_{NE}, \tag{9}$$

где A_0 – амплитуда принимаемого сигнала на частоте акустического воздействия ω_0 , а A_i – амплитуда i -й нелинейной компоненты принимаемого сигнала. Из (9) следует

$$\frac{W_{NE}}{W_0} \propto \frac{\sum A_i^2}{A_0^2}. \tag{10}$$

Будем полагать, что энергия нелинейной акустической эмиссии пропорциональна доле энергии акустического воздействия, поглощаемой на микротрещинах. Тогда, согласно (5) и (10), получаем

$$\frac{\sum A_i^2}{A_0^2} \propto \frac{L^2 \varepsilon^2}{W_0}. \tag{11}$$

Очевидно, что $W_0 \gg W_{NE}$ и, соответственно, $W_0 \approx W$. Тогда, допуская, что $W \propto \varepsilon^2$, получаем

$$\frac{\sum A_i^2}{A_0^2} \propto L^2. \quad (12)$$

Известно, что прочность оптического волокна обратно пропорциональна корню квадратному от радиуса зеркальной зоны микротрещины [47, 48]

$$S \propto 1/\sqrt{R_C}. \quad (13)$$

Будем полагать, что характерный размер диаметра микротрещины L прямо пропорционален радиусу зеркальной зоны микротрещины R_C . Тогда из (12), (13) следует

$$S \approx C_{ne} \times (A_0^2 / \sum A_i^2)^{1/4}, \quad (14)$$

где C_{ne} – постоянная.

4. Метод контроля прочности оптического волокна, базирующийся на оценках нелинейной акустической эмиссии

В данной работе предлагается метод контроля прочности оптического волокна, базирующийся на оценках нелинейной акустической эмиссии, согласно которому тестируемое оптическое волокно используется в качестве распределенного акустического сенсора. Согласно данному методу, тестируемое оптическое волокно подвергают направленному акустиче-

скому воздействию на одной частоте, равной 1–2 кГц. Фазочувствительным фотоприемником, подключенным к данному оптическому волокну, измеряют модулирующий по фазе оптическую несущую сигнал и анализируют его спектр, по которому оценивают амплитуду составляющей на частоте акустического воздействия A_0 и определяют оценку энергии нелинейной акустической эмиссии как $\sum A_i^2$. Затем в тех же условиях повторяют описанную выше процедуру для эталонного оптического волокна, прочность которого S_E известна. Введем оценку нормированной энергии акустической эмиссии, равную

$$\bar{W} = (\sum A_i^2) / A_0^2. \quad (15)$$

Тогда, согласно (14), искомая прочность тестируемого оптического волокна определяется по формуле

$$S_T = S_E \times (\bar{W}_E / \bar{W}_T)^{1/4}. \quad (16)$$

5. Описание эксперимента

В целях верификации модели взаимосвязи прочности оптического волокна с оценкой энергии нелинейной акустической эмиссии, на которой базируется предлагаемый метод, и оценки его потенциальных возможностей были проведены экспериментальные исследования. Для тестирования оптического волокна по предложенной процедуре была собрана экспериментальная установка. Ее общая схема представлена на рис. 1.

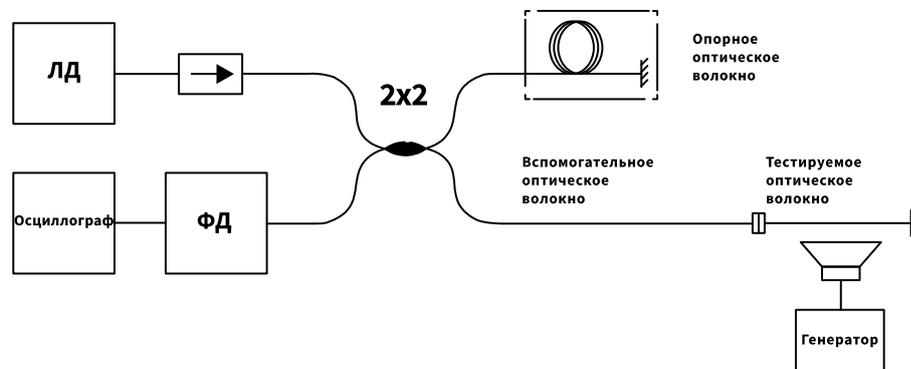


Рис. 1. Общая схема установки для испытаний оптического волокна по предложенному методу

Оптоволоконный интерферометр Майкельсона реализован на разветвителе 2×2 с коэффициентом деления 50/50. В качестве источника оптического излучения использован лазерный диод с распределенной обратной связью (LD) с центральной длиной волны 1550 нм и полосой пропускания менее 1 МГц. Лазерный диод подключен через оптический изолятор с изоляцией 25 дБ. Детектирование оптического сигнала осуществляется с помощью p-i-n фотодиода (PD). Выделенный на приеме сигнал через трансимпедансный усилитель вводится в запоминающий осциллограф (Osc). Спектральные характеристики принятого сигнала получены методом быстрого преобразования Фурье.

Для уменьшения паразитных воздействий система опроса с опорным плечом интерферометра и тестируемое оптоволокно размещены в разных лабораториях. Между лабораториями был проложен оптический кабель со стандартным одномодовым оптическим волокном (Feed fiber), соответствующим Рекомендациям МСЭ-Т G.652.D, для соединения оптического волокна с системой опроса. Общая длина оптического кабеля составляет 85 метров. Опорное плечо интерферометра (Reference arm) представляет собой бухту оптического волокна соответствующей длины, помещенную в теплоизолированный корпус с защитой от вибрации.

В качестве источника акустических воздействий использован динамик с диафрагмой 40 см, подключенный к генератору сигналов (Gen). Измерения проводились под воздействием непрерывного синусоидального звукового сигнала с частотой, лежащей в диапазоне 1–2 кГц. Образцы оптического волокна помещали непосредственно над диафрагмой динамика без натяжения и фиксировали в двух точках по концам. Тестируемый образец оптического волокна (Testing fiber) с одной стороны оконцовывали пигтейлом с разъемом FC/PC для подключения к питающему оптическому волокну, а с другой стороны конец оптического волокна скалывали прецизионным скалывателем так, чтобы коэффициент отражения на границе оптического волокна с воздухом составлял около 3,6%. Тестируемое оптическое волокно и динамик помещали в бокс со звукопоглощающим покрытием так, что участки волокна с разъемами и сколом находились вне зоны облучения динамиком. При этом элементы крепления тестируемого оптического волокна в боксе были виброизолированы относительно динамика.

Испытаниям подвергались оптические волокна в образцах оптического кабеля и эти же оптические волокна, извлеченные из образцов оптических кабелей. Было отобрано три образца оптических кабелей.

Образец №1. Оптический кабель, изготовленный в 1996 году. В том же году строительная длина кабеля на барабане была размещена на открытой кабельной площадке, где она хранится по настоящее время как оперативный резерв. Образец для испытаний был отрезан от данной строительной длины весной 2020 года.

Образец №2. Оптический кабель, изготовленный в 1998 году. В этом же году он был проложен в городской кабельной канализации. Весной 2020 года длина кабеля около 100 м была извлечена из кабельной канализации. После чего от нее был отрезан образец для испытаний.

Образец №3. Оптический кабель, изготовленный в 2020 г. Образец для испытаний был отрезан от строительной длины кабеля, прошедшей выходной контроль на заводе-изготовителе.

Испытания проводили в три этапа. На первом этапе предложенным методом определяли оценку нормированной энергии акустической эмиссии по (15) для оптических волокон в образцах кабелей длиной 1,5 метра. При этом образцы оптического кабеля помещали непосредственно над диафрагмой динамика и закрепляли по концам. Оптические волокна подключали в соответствии со схемой рис. 1. В качестве итоговой оценки для образца оптического кабеля принимали среднее значение оценок, полученных для всех волокон образца.

На втором этапе испытаниям подвергали эти же оптические волокна, извлеченные из образца кабеля. Для этого была выполнена полная разделка образцов оптического кабеля. Из модульных трубок аккуратно были извлечены оптические волокна. С поверхности

оптических волокон был удален гидрофобный гель. Оптические волокна подключали в соответствии со схемой рис.1. Предложенным методом определяли оценку нормированной энергии акустической эмиссии по (15) тестируемых оптических волокон. В качестве итоговой оценки для образца оптического кабеля принимали среднее значение оценок, полученных для всех волокон образца.

На третьем этапе 2-точечным методом измеряли прочность каждого из протестированных образцов оптических волокон. Для каждого из образцов измерения прочности 2-точечным методом выполняли не менее 10 раз. В качестве оценки прочности отдельного оптического волокна принимали среднее значение результатов измерений для него. В качестве итоговой оценки для образца оптического кабеля принимали среднее значение оценок, полученных для всех волокон образца.

Оценки прочности образцов оптических волокон, полученные 2-точечным методом, сопоставляли с оценками, полученными предложенным в данной работе методом, базирующимся на оценках энергии нелинейной акустической эмиссии. В качестве действительной величины принимали результаты измерений 2-точечным методом.

На рис. 1 представлены примеры оценок нормированной энергии спектральных компонент нелинейной акустической эмиссии, полученные при испытаниях предложенным методом оптических волокон, извлеченных из образцов кабелей 1996, 1998 и 2020 гг. производства.

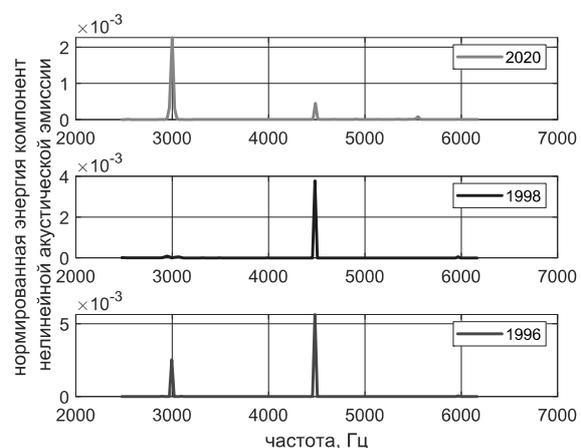


Рис. 2. Нормированная энергия спектральных компонент нелинейной акустической эмиссии в тестируемых оптических волокнах, извлеченных из образцов кабелей 1996, 1998 и 2020 гг. производства

В табл. 1 приведены средние значения относительных оценок прочности оптических волокон, извлеченных из тестируемых образцов оптических кабелей, полученные предложенным методом и 2-точечным методом. Там же приведены значения относительной погрешности оценок предложенным методом. В табл. 2 приведены средние значения относительных оценок прочности оптических волокон в те-

стируемых образцах кабелей, полученные предложенным методом и 2-точечным методом.

Табл. 1. Средние значения относительных оценок прочности оптических волокон, извлеченных из тестируемых образцов оптических кабелей

| Отношение | Предложенный метод | 2-точечный метод | Относительная погрешность, % |
|-----------------------|--------------------|------------------|------------------------------|
| S_{2020} / S_{1996} | 1,30 | 1,27 | 2,36 |
| S_{2020} / S_{1998} | 1,10 | 1,11 | -0,90 |

Табл. 2. Средние значения относительных оценок прочности оптических волокон в тестируемых образцах оптических кабелей

| Отношение | Предложенный метод | 2-точечный метод |
|-----------------------|--------------------|------------------|
| S_{2020} / S_{1996} | 1,71 | 1,27 |
| S_{2020} / S_{1998} | 1,21 | 1,11 |

Погрешности оценок предложенным неразрушающим методом контроля прочности оптического волокна, извлеченного из кабеля, малы и не превышают 3,0 %, что позволяет говорить о применимости предложенного метода для контроля прочности оптических волокон. Вместе с тем, как и следовало ожидать, погрешности оценок прочности, полученные для оптических волокон в образцах кабелей, недопустимо велики. Столь большие расхождения обусловлены тем, что из-за различия конструкций испытываемых оптических кабелей условия воздействия на оптические волокна в образцах кабелей в данном эксперименте были неодинаковы. Соответственно, не обеспечивались условия применения предложенного метода. Однако несмотря на это качественно полученные соотношения подтверждают возможности применения метода. Менее прочные оптические волокна имеют большие значения оценок нормированной энергии нелинейной акустической эмиссии. Очевидно, что для получения более адекватных оценок прочности оптических волокон в кабеле необходимо совершенствовать методику испытаний и разработать способы формирования образцов оптических кабелей с эталонным оптическим волокном и конструкцией, идентичной образцам тестируемых кабелей.

В целом, полученные данные позволяют говорить о возможности применения предложенного метода для контроля прочности оптического волокна. Хотя, конечно же, для того чтобы его рекомендовать, необходимо проведение значительно большего объема испытаний. Но результаты обнадеживают и позволяют сделать заключение о перспективности исследований применений предложенного подхода для разработки метода неразрушающего контроля прочности оптических волокон в оптическом кабеле, включая кабели на линиях, введенных в эксплуатацию.

Заключение

В работе предложен метод неразрушающего контроля прочности оптического волокна по оценкам

энергии нелинейной акустической эмиссии, базирующийся на использовании тестируемого оптического волокна в качестве акустического сенсора с модуляцией оптической несущей по фазе. Представлены модели процессов, на которых базируется метод. Приведены результаты экспериментальных исследований. Данные, полученные по результатам испытаний образцов оптических волокон предложенным методом, сопоставлялись с результатами измерений тех же образцов известным 2-точечным методом. Погрешность относительных оценок прочности оптических волокон, извлеченных из образцов тестируемых оптических кабелей, не превышала 3,0 %, что позволило говорить о применимости предложенного метода для свободных оптических волокон. Данные испытаний оптических волокон в кабеле качественно подтвердили характер взаимосвязи полученных оценок нормированной нелинейной акустической эмиссии и прочности оптического волокна. Вместе с тем очевидно, что методика испытаний оптических волокон в кабеле требует совершенствования. В частности, необходима разработка способов создания эталонов.

В целом, полученные результаты позволяют говорить о корректности используемых моделей и потенциальной возможности применения предлагаемого метода для неразрушающего контроля прочности оптических волокон, а также о перспективе разработок по применению рассмотренного подхода для неразрушающего контроля прочности оптических волокон в кабеле, в том числе в кабеле на линии, введенной в эксплуатацию.

References

- [1] ITU-T G-series Recommendations. Supplement 59, Series G: Transmission systems and media, digital systems and net-works, Guidance on optical fibre and cable reliability. Source: (www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?id=13585&lang=en).
- [2] IEC TR 62048:2014. Optical fibres. Reliability. Power law theory. Source: (www.standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/ec106772-ad49-4820-9b71-6fd8a1af37e4/iec-tr-62048-2014).
- [3] Mitsunaga Y, Katsuyama Y, Ishida Y. Reliability assurance for long-length optical fibre based on proof testing. *Electron Lett* 1981; 17(16): 567. DOI: 10.1049/el:19810398.
- [4] Mitsunaga Y, Katsuyama Y, Kobayashi H, Ishida Y. Failure prediction for long length optical fiber based on proof testing. *J Appl Phys* 1982; 53(7): 4847-4853. DOI: 10.1063/1.331316.
- [5] Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers. *IEEE Photon Technol Lett* 1989; 1(5): 107-108. DOI: 10.1109/68.34756.
- [6] Sankawa I, Koyamada Y, Furukawa S ichi, Horiguchi T, Tomita N, Wakui Y. Optical fiber line surveillance system for preventive maintenance based on fiber strain and loss monitoring. *IEICE Trans Commun* 1993; E76-B(4): 402-409.
- [7] Anderson DR, Johnson LM, Bell FG. Troubleshooting optical fiber networks: Understanding and using optical time-

- domain reflectometers. 1st ed. New York, NY: Academic Press; 2004. ISBN: 978-0-387-09847-0.
- [8] Evans AG, Wiederhorn SM. Proof testing of ceramic materials: an analytical basis for failure prediction. *Int J Fract* 1974; 10(3): 379-392. DOI: 10.1007/BF00035499.
- [9] Ritter JE, Jakus K. Applicability of crack velocity data to life-time predictions for fused silica fibers. *J Am Ceram Soc* 1977; 60(3-4): 171-171. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1977.tb15500.x.
- [10] Hanson TA, Glaesemann GS. Incorporating multi-region crack growth into mechanical reliability predictions for optical fibres. *J Mater Sci* 1997; 32(20): 5305-5311. DOI: 10.1023/A:1018662727060.
- [11] Semjonov S, Glaesemann SG. High-speed tensile testing of optical fibers – new understanding for reliability prediction. In Book: Suhir E, Lee YC, Wong CP, eds. *Micro- and opto-electronic materials and structures: Physics, mechanics, design, reliability, packaging*. Boston, MA: Springer US; 2007: A595-A625. DOI: 10.1007/0-387-32989-7_18.
- [12] IEC 60793-1-31:2010 Optical fibres – Part 1-31: Measurement methods and test procedures – Tensile strength. Geneva: International Electrotechnical Commission; 2010. ISBN: 978-2-88910-916-6.
- [13] IEC 60793-1-33:2001 Optical fibres – Part 1-33: Measurement methods and test procedures – Stress corrosion susceptibility. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission; 2017. ISBN: 978-2-8322-4736-5.
- [14] Ono K. Structural integrity evaluation using acoustic emission. *J Acoustic Emission* 2007; 25: 1-20. DOI: 10.1201/9780203892220.pt1.
- [15] Kaphle M, Tan A, Thambiratnam D, Chan T. Review: Acoustic emission technique – Opportunities, challenges and current work at QUT. In Book: Cowled CJL, ed. *Proc First Int Conf on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing*. Australia: Queensland University of Technology; 2011: 312-317.
- [16] Beattie AG. Acoustic emission non-destructive testing of structures using source location techniques: Sandia report. SAND2013-7779. Albuquerque, NM, US: Sandia National Laboratories; 2013. DOI: 10.2172/1096442.
- [17] Gholizadeh S, Leman Z, Baharudin BHT. A review of the application of acoustic emission technique in engineering. *Struct Eng Mech* 2015; 54(6): 1075-1095. DOI: 10.12989/SEM.2015.54.6.1075.
- [18] Świt G, Adamczak A, Krampikowska A. Time-frequency analysis of acoustic emission signals generated by the Glass Fibre Reinforced Polymer Composites during the tensile test. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 2017; 251: 012002. DOI: 10.1088/1757-899X/251/1/012002.
- [19] Sial TR, Jin Y, Juan Z. Crack identification in Beams by Vibration based analysis techniques – A review. *Int J Sci Technol Eng* 2018; 07(10): 766-771.
- [20] Cowking A, Attou A, Siddiqui AM, Sweet MAS, Hill R. Testing E-glass fibre bundles using acoustic emission. *J Mater Sci* 1991; 26(5): 1301-1310. DOI: 10.1007/BF00544469.
- [21] Jihan S, Siddiqui AM, Sweet MAS. Fracture strength of E-glass fibre strands using acoustic emission. *NDT & E International* 1997; 30(6): 383-388. DOI: 10.1016/S0963-8695(97)00009-1.
- [22] R'Mili M, Moevus M, Godin N. Statistical fracture of E-glass fibres using a bundle tensile test and acoustic emission monitoring. *Compos Sci Technol* 2008; 68(7-8): 1800-1808. DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.01.018.
- [23] Udd E, Spillman WB, eds. *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. 2nd ed. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons; 2011. ISBN: 978-0-470-12684-4.
- [24] Volkov OA, Demin AV, Konstantinov KV. An optical system of a sensor for measuring the meteorological optical range. *Computer Optics* 2018; 42(1): 67-71. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-67-71.
- [25] Morozov OG, Sakhabutdinov AJ. Addressed fiber Bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems. *Computer Optics* 2019; 43(4): 535-543. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-535-543.
- [26] Pevec S, Donlagić D. Multiparameter fiber-optic sensors: a review. *Opt Eng* 2019; 58(7): 072009. DOI: 10.1117/1.OE.58.7.072009.
- [27] Degtyarev S, Khonina S, Butt A, Kazanskiy N. Achievements in the development of plasmonic waveguide sensors for measuring the refractive index. *Computer Optics* 2020; 44(3): 295-318. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-743.
- [28] Teixeira JGV, Leite IT, Silva S, Frazão O. Advanced fiber-optic acoustic sensors. *Photonic Sens* 2014; 4(3): 198-208. DOI: 10.1007/s13320-014-0148-5.
- [29] Muanenda Y. Recent advances in distributed acoustic sensing based on phase-sensitive optical time domain reflectometry. *J Sens* 2018; 2018: 3897873. DOI: 10.1155/2018/3897873.
- [30] He Z, Liu Q, Fan X, Chen D, Wang S, Yang G. A review on advances in fiber-optic distributed acoustic sensors (DAS). *CLEO Pacific Rim Conference, OSA Technical Digest* 2018: Th2L.1. DOI: 10.1364/CLEOPR.2018.Th2L.1.
- [31] Xiong W, Cai CS. Development of fiber optic acoustic emission sensors for applications in civil infrastructures. *Adv Struct Eng* 2012; 15(8): 1471-1486. DOI: 10.1260/1369-4332.15.8.1471.
- [32] Gordon RB, Davis LA. Velocity and attenuation of seismic waves in imperfectly elastic rock. *J Geophys Res* 1968; 73(12): 3917-3935. DOI: 10.1029/JB073i012p03917.
- [33] Savage JC. Thermoelastic attenuation of elastic waves by cracks. *J Geophys Res* 1966; 71(16): 3929-3938. DOI: 10.1029/JZ071i016p03929.
- [34] Mavko GM, Nur A. The effect of nonelliptical cracks on the compressibility of rocks. *J Geophys Res* 1978; 83(B9): 4459. DOI: 10.1029/JB083iB09p04459.
- [35] Mavko GM. Frictional attenuation: An inherent amplitude dependence. *J Geophys Res* 1979; 84(B9): 4769. DOI: 10.1029/JB084iB09p04769.
- [36] Stewart RR, Toksoz MN, Timur A. Strain dependent attenuation: Observations and a proposed mechanism. *J Geophys Res* 1983; 88(B1): 546. DOI: 10.1029/JB088iB01p00546.
- [37] Mavko G, Jizba D. The relation between seismic *P*- and *S*-wave velocity dispersion in saturated rocks. *Geophysics* 1994; 59(1): 87-92. DOI: 10.1190/1.1443537.
- [38] Zaitsev VY, Sas P. Dissipation in microinhomogeneous solids: inherent amplitude-dependent losses of a non-hysteretical and non-frictional type. *Acta Acustica united with Acustica* 2000; 86(3): 429-445.
- [39] Zaitsev V, Gusev V, Castagnede B. Luxemburg-Gorky effect retooled for elastic waves: A mechanism and experimental evidence. *Phys Rev Lett* 2002; 89(10): 105502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.105502.
- [40] Moussatov A, Gusev V, Castagnède B. Self-induced hysteresis for nonlinear acoustic waves in cracked material. *Phys Rev Lett* 2003; 90(12): 124301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.90.124301.
- [41] Zaitsev VYu, Gusev VÉ, Nazarov VE, Castagnède B. Interaction of acoustic waves with cracks: Elastic and inelastic nonlinearity mechanisms on different time scales. *Acoust Phys* 2005; 51(S1): S67-S77. DOI: 10.1134/1.2133955.

- [42] Fillinger L, Zaitsev VY, Gusev V, Castagnede B. Nonlinear relaxational absorption/transparency for acoustic waves due to thermoelastic effect. *Acta Acustica united with Acustica* 2006; 92: 24-34.
- [43] Tszeng TC. Modulation spectroscopy of acoustic waves in solids containing contact-type cracks. *J Vib Acoust* 2013; 135(6): 064504. DOI: 10.1115/1.4025017.
- [44] Broda D, Staszewski WJ, Martowicz A, Uhl T, Silberschmidt VV. Modelling of nonlinear crack-wave interactions for damage detection based on ultrasound—A review. *J Sound Vib* 2014; 333(4): 1097-1118. DOI: 10.1016/j.jsv.2013.09.033.
- [45] Pieczonka L, Klepka A, Martowicz A, Staszewski WJ. Nonlinear vibroacoustic wave modulations for structural damage detection: an overview. *Opt Eng* 2015; 55(1): 011005. DOI: 10.1117/1.OE.55.1.011005.
- [46] Lee BH, Kim YH, Park KS, Eom JB, Kim MJ, Rho BS, Choi HY. Interferometric fiber optic sensors. *Sensors* 2012; 12(3): 2467-2486. DOI: 10.3390/s120302467.
- [47] Mecholsky JJ, Rice RW, Freiman SW. Prediction of fracture energy and flaw size in glasses from measurements of mirror size. *J Am Ceram Soc* 1974; 57(10): 440-443. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1974.tb11377.x.
- [48] Castilone RJ, Glaesemann GS, Hanson TA. Relationship between mirror dimensions and failure stress for optical fibers. *Proc SPIE* 2002; 4639: 11-20. DOI: 10.1117/12.481339.

Сведения об авторах

Андреев Владимир Александрович (1951–2020) доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, в 1974 году окончил с отличием Куйбышевский электротехнический институт связи (КЭИС) по специальности «Многоканальная электросвязь». Область научных интересов: линии связи и электромагнитная совместимость систем телекоммуникаций, волоконно-оптические линии передачи, эффективные технологии строительства и технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений оптических линий передачи сетей связи.

Бурдин Антон Владимирович, 1977 года рождения, доктор технических наук, профессор. В 1999 году окончил Поволжскую государственную академию телекоммуникаций и информатики по специальности «Многоканальные телекоммуникационные системы». Работает профессором на кафедре линий связи и измерений в технике связи, а также заместителем генерального директора по научной работе и развитию АО «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова». Область научных интересов: адаптация волоконно-оптических линий связи с многомодовыми волокнами под одномодовые оптические системы передачи, сращивание волокон неодинаковой конструкции. E-mail: bourdine@psuti.ru.

Бурдин Владимир Александрович (1953–2021), доктор технических наук, профессор, в 1975 году окончил с отличием Куйбышевский электротехнический институт связи по специальности «Многоканальная электросвязь», работает заведующим кафедрой линий связи и измерений в технике связи. Область научных интересов: волоконно-оптические линии передачи, эффективные технологии строительства и технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений оптических линий передачи сетей связи, управление солитонами в волоконных световодах, маломодовые технологии волоконной оптики и их приложения на сетях связи. E-mail: burdin@psuti.ru.

Дашков Михаил Викторович, 1978 года рождения, кандидат технических наук, доцент, в 2000 г. окончил с отличием Поволжскую государственную академию телекоммуникаций и информатики по специальности «Многоканальные телекоммуникационные системы», работает доцентом на кафедре линий связи и измерений в технике связи. Область научных интересов: волоконно-оптические линии передачи, нелинейные и поляризационные явления в оптическом волокне. E-mail: dashkov@psuti.ru.

ГРНТИ: 49.29.17: ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Поступила в редакцию 22 июля 2021 г. Окончательный вариант – 11 октября 2021 г.

A method for non-destructive testing of the strength of a silica optical fiber

V.A. Andreev¹, *A.V. Bourdine*^{1,2}, V.A. Burdin¹, *M.V. Dashkov*¹

¹ FSBEI HE "Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics",
443010, Samara, Russia, L'va Tolstogo st. 23,

² S.I. Vavilov State Optical Institute, 199034, St. Petersburg, Russia, Birzhevaya Liniya 12

Abstract

The paper proposes a method for non-destructive testing of the strength of an optical fiber based on estimates of the energy of nonlinear acoustic emission, based on the use of the tested optical fiber as an acoustic sensor. Models of the processes on which the method is based are presented. Results of experimental studies are presented. Data obtained from testing samples of the optical cables and optical fibers by the proposed method are compared with measurement results for the same samples obtained by the known 2-point method. The error in the estimates of the relative strength of the tested samples of optical fibers is found not to exceed 3.0%. The results obtained allow us to suggest that the models used are correct and the proposed method shows promise for non-destructive testing of the strength of optical fibers, with the further development of the considered approach showing prospects for the application for non-destructive testing of the strength of optical fibers in a cable, including in-service cables.

Keywords: fiber optics, strength, microcrack, acoustic impact, nonlinear acoustic emission, fiber-optic acoustic sensor.

Citation: Andreev VA, Bourdine AV, Burdin VA, Dashkov MV. A method for non-destructive testing of the strength of a silica optical fiber. *Computer Optics* 2022; 46(2): 224-231. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1015.

Authors' information

Vladimir Aleksandrovich Andreev (1951–2020), Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, graduated with honors from the Kuibyshev Electrotechnical Institute of Communications in 1974 (KEIC), specializing in "Multichannel Telecommunications". Research interests: communication lines and electromagnetic compatibility of telecommunication systems, fiber-optic transmission lines, effective technologies for the construction and technical operation of line-cable facilities for optical transmission lines of communication networks.

Anton Vladimirovich Bourdine, born in 1977, Doctor of Technical Sciences, Professor. In 1999 he graduated from the Volga State Academy of Telecommunications and Informatics with a degree in Multichannel Telecommunication Systems. Works as the professor of Communication Lines and Measurements in Communication Engineering department of FSBEI HE "Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics" and as the Deputy General Director for Research and Development of JSC "Scientific and Production Association State Optical Institute named after S.I. Vavilov". Research interests: adaptation of fiber-optic lines with multimode fibers for single-mode optical transmission systems, fiber-optic splicing. E-mail: bourdine@psuti.ru.

Vladimir Aleksandrovich Burdin (1953–2021), Doctor of Technical Sciences, Professor, in 1975 graduated with honors from the Kuibyshev Electrotechnical Institute of Communications (KEIC) with a degree in Multichannel Telecommunications, works as the head of Communication Lines and Measurements in Communication Engineering department. Research interests: fiber-optic transmission lines, effective technologies for the construction and maintenance of linear-cable installations of optical transmission lines of communication networks, control of solitons in fiber optics, low-mode fiber optics technologies and their applications in communication networks. E-mail: burdin@psuti.ru.

Mikhail Viktorovich Dashkov, born in 1978, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, in 2000 graduated with honors from the Volga State Academy of Telecommunications and Informatics with a degree in Multichannel Telecommunication Systems, works as an Associate Professor of Communication Lines and Measurements in Communication Engineering department. Research interests: fiber-optic transmission lines, nonlinear and polarization phenomena in optical fiber. E-mail: dashkov@psuti.ru.

Received July 22, 2021. The final version – October 11, 2021.
