

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРАЩЕНИЙ ЗАТУХАНИЯ ОВ ПРИ ДЕФОРМАЦИЯХ МОДУЛЯ ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ

Никулина Т.Г., Лиманский Н.С., Никулин А.Г.

Представлены результаты экспериментальных исследований изменений затухания оптических волокон (ОВ) в результате деформации модуля оптического кабеля (ОК). Получены и экспериментально обоснованы эмпирические соотношения для расчета критической деформации модуля ОК.

Постановка задачи

Конструкция ОК должна обеспечивать защиту ОВ от внешних воздействий как при строительстве, так и в процессе эксплуатации кабеля. Соответственно, важнейшей характеристикой ОК является его стойкость к внешним воздействиям, в частности, стойкость к раздавливающим нагрузкам. В соответствии с требованиями нормативной документации эту характеристику принято оценивать по следующей методике [1]. ОК помещается между 2 параллельными пластинами – неподвижной нижней пластиной и верхней – подвижной. Длина подвижной пластины составляет 10 см, а ее края закруглены с радиусом 5 мм. К образцу ОК прикладывается нагрузка, значение которой задается техническими условиями на ОК. До начала, в процессе испытаний и после их завершения контролируют прирост затухания. Считается, что образец одномодового ОК выдержал испытание, если прирост затухания ОВ в кабеле под нагрузкой и после того, как ее снимут, не превышает 0,05 дБ [1-3].

Очевидно, что в кабелях модульной конструкции прирост затухания ОВ при радиальных механических нагрузках на ОК будет иметь место, когда возникающие при этом деформации модуля приведут к механическим воздействиям на ОВ. Как следствие, с точки зрения прогнозирования стойкости ОК к раздавливающим нагрузкам представляет интерес исследование дополнительных потерь в ОВ, уложенных в модульной трубке, в результате радиальных механических воздействий на эту трубку.

В работах [4-5] представлены данные экспериментальных исследований зависимостей увеличения затухания ОВ от раздавливающих нагрузок на модуль кабеля. Исследовались модули кабеля, выполненные из различных материалов отечественного производства, с различными значениями диаметра и толщины модульной трубки. При про-

ведении испытаний и обработке результатов экспериментов число ОВ в модуле не учитывалось. Полученные для частных случаев конструкций модуля зависимости представлены табличными данными и в виде графиков. Очевидно, что воспользоваться этими данными при изменении хотя бы одного из параметров модуля нельзя.

Конструкции ОК постоянно совершенствуются. Используются новые материалы, меняется технология производства ОК и используемые в производстве материалы. Учитывая это, желательно иметь некоторое универсальное соотношение, описывающее взаимосвязь свойств модуля ОК и допустимого приращения затухания ОВ в этом модуле под действием радиальной нагрузки для произвольных параметров модульной трубки и ее заполнения, учитывающего, в том числе, и количество ОВ в модуле.

Следует отметить, что определить нагрузки на модуль ОК заданной конструкции по известным значениям радиального воздействия на кабель крайне сложно. Это делает весьма проблематичным применение, указанных выше зависимостей прироста затухания ОВ от радиальных воздействий на модуль кабеля, для прогноза стойкости конструкции ОК к раздавливающим нагрузкам. С этой точки зрения, предпочтительнее в качестве оценки нагрузки на модуль использовать деформацию модульной трубки. Эта величина однозначно связана с деформациями сердечника кабеля и, соответственно, приложенной к кабелю радиальной нагрузкой.

Будем определять деформацию модульной трубки под действием радиальной нагрузки как разность между внутренним диаметром трубки при отсутствии нагрузки и малой осью эллипса, образованного в сечении модуля внутренней поверхностью модульной трубки при ее поперечном сжатии. Очевидно, что воздействие на волокно, вызывающее рост его затухания, будет иметь место, если волокна окажутся зажатыми в модуле. Это позволяет предположить, что независимо от раздавливающего усилия для произвольных параметров модульной трубки и ее заполнения, деформация трубки, при которой начинается рост затухания ОВ в ней, должна коррелироваться с площадью области сечения внутри модуль-

ной трубки, свободной от волокон. Результаты экспериментальной проверки данной гипотезы и представлены в данной работе.

Экспериментальные исследования увеличения затухания ОВ при деформации модуля ОК

Методика исследования зависимости увеличения затухания ОВ от степени деформации модуля ОК при радиальных механических нагрузках на модуль была разработана с учетом известных технических решений [4, 5] и специфики ОВ типа SMF28e, которое было использовано в испытуемых образцах модулей ОК [6]. Схема установки для испытаний модулей приведена на рис. 1. Параллельные пластины, каждая длиной 4 см, имеют закругленные края с радиусом 5 мм.

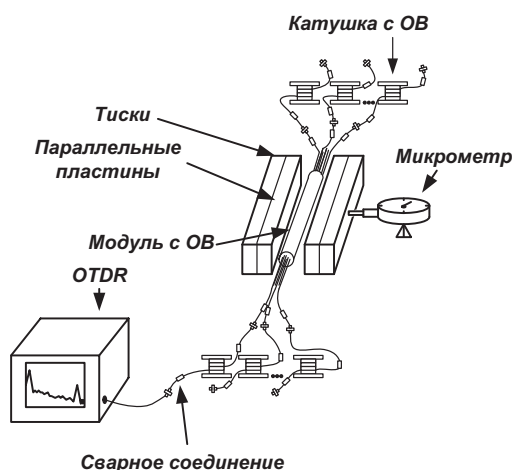


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Затухание ОВ измеряли оптическим рефлектометром Anritsu MW9076B1. Измерения выполнялись на длине волны 1550 нм при длительности зондирующего импульса 10 нс и времени усреднения – 30 с.

К каждому из волокон испытуемого модуля с обеих сторон подваривались ОВ на катушках, каждое длиной около 400 м. Измерения выполнялись по методике измерений затухания волокон короткой кабельной вставки [7], согласно которой суммарные потери на участке ОВ и двух сварных соединений на его концах оценивается как одно соединение (см. рис. 2). Увеличение затухания под действием приложенной нагрузки определяли как разность между оценками, измеренными до и в процессе приложения нагрузки.

Испытания проводили в следующем порядке:

- предварительно, до начала испытания, измеряли затухание вставки;

- модуль с волокнами зажимали в тисках между параллельными пластинами;

- затем пластины сдвигали, зажимая модуль, и измеряли деформацию. Измерения выполняли стрелочным микрометром. Абсолютная погрешность измерений – не более 0,01 мм;

- образец выдерживали при выбранном положении пластин в течение одной минуты, затем измеряли затухание вставки.

На первом этапе, определяли значение порога деформации, при которой имел место прирост затухания, хотя бы на одном ОВ, более 0,05 дБ. На втором этапе проводили повторные испытания модуля, но начиная с деформаций близких к порогу, с шагом 0,05 мм. По завершению испытания пластины раздвигали и измеряли затухание вставки.

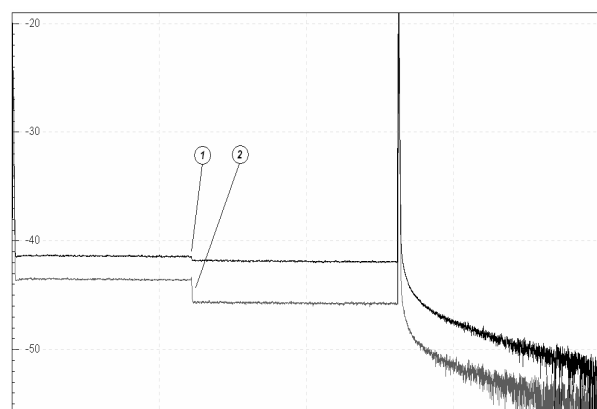


Рис. 2. Пример отображения на рефлектограмме вставки: 1 – до деформации модуля, 2 – после деформации модуля

Поскольку при каждом испытании модуль практически повреждался, каждый новый тест проводили с новым модулем. Испытаниям подвергали модули емкостью: 4, 8 и 12 ОВ, по шесть образцов модулей каждой емкости. Затухание измеряли в каждом ОВ модуля.

Данные исследуемых модулей ОК приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики испытуемых модулей

Параметры	4 ОВ	8 ОВ	12 ОВ
Внешний диаметр, мм	2	2,3	2,5
Внутренний диаметр, мм	1,3	1,5	1,7
Толщина трубки, мм	0,35	0,4	0,4
Материал	Полибутилентерефталат (PBT)		

В результате испытаний были получены зависимости прироста затухания в ОВ от деформации модульной трубки. На рис. 3 в качестве примера приведены данные зависимости для модуля емкостью 12 ОВ. Видно, что при проявлении прироста затухания потери с увеличением деформации резко возрастают практически от нуля до 2,0 дБ. Для каждой из трех емкостей модуля были рассчитаны оценки среднего значения, среднеквадратичного отклонения и границ доверительного интервала для доверительной вероятности 0,9. Для рассматриваемого примера среднее значение $\Delta_{0,05} = 1,43$ мм, среднеквадратическое отклонение $\sigma_{0,05} = 0,17$ мм и, соответственно, с доверительной вероятностью 0,9 получен результат $\Delta_{0,05} = 1,4 \pm 0,17$ мм.

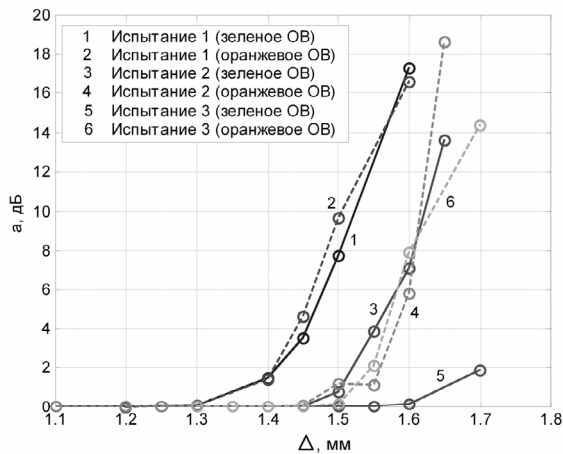


Рис. 3. Зависимость прироста затухания ОВ от деформации модуля с 12 волокнами

Расчет эквивалентного диаметра области сечения модульной трубки, свободной от волокон

Введем понятие эквивалентного диаметра свободной от волокон области сечения модульной трубки. Обозначим этот параметр как D_E , и будем определять его по формуле

$$D_E = 2 \cdot \sqrt{S_0 / \pi}, \quad (1)$$

где S_0 — свободная от волокон область сечения модульной трубки, которая рассчитывается как

$$S_0 = S_{OM} - S_{nOB}, \quad (2)$$

где S_{OM} — площадь сечения внутри модульной трубки; S_{nOB} — площадь области сечения, занятая волокнами. Площадь сечения внутри модульной трубки равна [8]:

$$S_{OM} = \pi \cdot d_{OM}^2 / 4, \quad (3)$$

где d_{OM} — внутренний диаметр оптического модуля. Площадь области сечения, занятой ОВ, можно рассчитать как

$$S_{nOB} = n \cdot S_{OB};$$

$$S_{OB} = \pi \cdot d_{OB}^2 / 4, \quad (4)$$

где d_{OB} — диаметр оптического волокна в акриловом покрытии; n — число волокон в модуле. Результаты расчетов вышеперечисленных параметров сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Параметры модуля

Параметр	Число волокон в модуле		
	4	8	12
$S_{OB}, \text{мм}^2$	0,049		
$S_{nOB}, \text{мм}^2$	0,196	0,392	0,588
$S_{OM}, \text{мм}^2$	1,33	1,77	2,27
$S_0, \text{мм}^2$	1,13	1,37	1,68
$D_E, \text{мм}$	1,12	1,32	1,46

Анализ результатов испытаний

На рис. 4 представлен график зависимости деформации модуля, при которой регистрировали прирост затухания на 0,05 дБ, от эквивалентного диаметра свободной от волокон области сечения модульной трубки. Деформация определялась по результатам статистической обработки результатов измерений. Соответствующие значения D_E брали из таблицы 2.

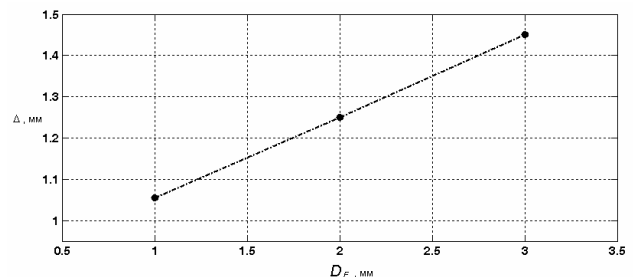


Рис. 4 График зависимости деформации модуля от эквивалентного диаметра (порог – 0,05 дБ)

Как видим, исследуемая зависимость практически линейная, что позволяет аппроксимировать ее формулой:

$$\Delta = a \cdot D_E + b, \quad (5)$$

где a ; b – коэффициенты аппроксимации. Расчеты показали, что погрешность аппроксимации экспериментальной кривой прямой линией при использовании метода наименьших квадратов составляет менее 1 %.

Аналогичные результаты были получены для пороговых оценок 0,1 дБ и 0,2 дБ. В таблице 3 сведены значения коэффициентов линейной аппроксимации, полученные для рассмотренных значений пороговых оценок приращения потерь в ОВ методом наименьших квадратов.

Таблица 3. Значения коэффициентов аппроксимации

Коэффициенты аппроксимации	Пороговая оценка потерь в ОВ		
	0,05 дБ	0,1 дБ	0,2 дБ
a	0,71	0,73	0,73
b	0,26	0,24	0,25

Как следует из таблицы 3, значения коэффициентов аппроксимации для рассмотренных пороговых оценок потерь достаточно близки. Это объясняется, во-первых, характером зависимости приращения затухания ОВ от деформации модуля. При превышении деформацией некоторого порогового значения, соответствующего приросту затухания ОВ на 0,01... 0,05 дБ, с дальнейшим увеличением деформации затухание возрастает практически скачком до 2,0 дБ и более.

Во-вторых, разброс коэффициентов аппроксимации в исследуемом диапазоне изменения пороговых оценок потерь от 0,05 дБ до 0,2 дБ не превышает 7%, что соизмеримо с погрешностями измерений деформации и затухания, и лежит в пределах доверительного интервала для доверительной вероятности 0,9.

Все это позволяет считать справедливым предположение о корреляции деформации модульной трубки, при которой начинается рост затухания расположенных в ней ОВ, с площадью свободной от волокон области сечения внутри модуля. Более того, в диапазоне пороговых оценок потерь до 0,2 дБ независимо от приложенного раздавливающего усилия и параметров модульной трубки критическое значение деформации, при превышении которого имеет место резкое увеличение потерь ОВ в модуле, приближенно может быть рассчитано по эмпирической формуле:

$$\Delta = 0,72 \cdot D_E + 0,25; \quad (5)$$

где значения Δ и D_E выражены в мм.

Заключение

Предложено в качестве оценки радиальной нагрузки на модули оптического кабеля использовать деформацию модульной трубки.

Выполнены экспериментальные исследования зависимости от деформации модульной трубки приращения затухания расположенных в ней ОВ типа SMF-28e.

Показано, что критическое значение деформации модульной трубки, при которой регистрировали прирост затухания превышает пороговые оценки потерь, лежащие в диапазоне от 0,05 дБ до 0,2 дБ, изменяется в зависимости от эквивалентного диаметра свободной от волокон области сечения модульной трубки практически по линейному закону. Получена эмпирическая формула, описывающая эту зависимость для произвольных значений параметров модульной трубки и раздавливающего усилия.

Полученные результаты исследований могут быть использованы для прогноза стойкости конструкций ОК к действию раздавливающих нагрузок.

Литература

- ГОСТ Р МЭК 794-1-93. Кабели оптические. Общие технические требования.
- ТУ 3587-002-43925010-98. Кабели оптические марки ОКЛСт для взаимоувязанных сетей связи. ССКТБ-Томасс, 1998.
- ТУ 3587-003-43925010-98. Кабели оптические марки ОКЛК для взаимоувязанных сетей связи. ССКТБ-Томасс, 1998.
- Ларин Ю.Т. Оптические кабели: методы расчета конструкций. Материалы. Надежность и стойкость к ионизирующему излучению. М.: Престиж, 2006. – 304 с.
- Шитов В.В., Григораш В.В., Шкалов А.А. Исследование оптико-механических характеристик оптических волокон // Электросвязь. №8, 1982. – С. 8-11.
- Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. М.: Лесар-арт, 2003. – 288 с.
- РД 45.180-2001. Руководство по проведению планово-профилактических и аварийно-восстановительных работ на линейно-кабельных сооружениях связи волоконно-оптических линий передачи.
- Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. М.: Наука, 1981. – 704 с.