

# Влияние внешних воздействий на оптические характеристики волоконного световода

Д.П.Андреев  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия  
andreev.dp@edu.spbstu.ru

М.А. Орлов  
Санкт-Петербургский  
Государственный университет  
Телекоммуникаций  
им. проф. М.А.Бонч-Бруевича,  
г. Санкт-Петербург, Россия

Е.И.Андреева  
Санкт-Петербургский  
Государственный университет  
Телекоммуникаций  
им. проф. М.А.Бонч-Бруевича,  
г. Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация** — Исследовано влияние на оптические и прочностные характеристики волоконных световодов таких внешних воздействий, как изгиб, осевое натяжение и кручение. Показано, что натяжение изогнутого волоконного световода вызывает увеличение оптических потерь по сравнению со случаем ненапрянутого световода. Следует учитывать, что этот эффект влияет не только на отношение сигнал-шум на выходе системы, но также на возможность несанкционированного доступа. Риск сокращения срока службы световода при этом также возрастает. Совместное влияние изгиба и кручения световода также вызывает ухудшение передаточных характеристик световода и его механическую прочность. Таким образом, показано, что при монтаже и эксплуатации оптической кабельной системы следует избегать ситуаций, вызывающих изгиб, осевое натяжение и кручение волоконного световода и тем более их совместное влияние. Для диагностики этих эффектов могут применяться рефлектометрические методы.

**Ключевые слова**— волоконно-оптические линии связи, оптические потери, волоконный световод, изгиб, натяжение, кручение, надежность ВОЛС

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений современного научно-технического прогресса является всестороннее развитие систем связи, в частности волоконно-оптических, так как они способны предоставить максимальные на сегодняшний день возможности по передаче большого объема информации: на дальние расстояния. Важную роль играет фактор надежности волоконно-оптических линий, повышения срока службы оптической кабельной системы. Разрабатываются новые типы волоконных световодов с улучшенными оптическими, прочностными параметрами, в том числе – повышенной устойчивостью к изгибу. В процессе строительства и эксплуатации оптической кабельной системы возникают ситуации, связанные с механическим воздействием на волоконный световод – непосредственную среду передачи сигнала [1-3]. На механическую прочность волоконных световодов непосредственное влияние оказывают технология их производства и геометрические параметры. Технологии изготовления волоконных световодов постоянно совершенствуются (например, [4]). Достигнутое значение механической прочности для кварцевых волоконных световодов для линий составляет 6 ГПа и более [4]. Однако, внешние воздействия в процессе строительства и эксплуатации могут приводить к изменению упруго-оптических характеристик волоконного световода [1]. По характеру влияния на оптические характеристики волоконного световода как непосредственной среды передачи внешние воздействия можно условно подразделить на эффекты, оказывающие непосредственное влияние на передаточные

характеристики, и эффекты, проявляющиеся в совместном действии с другими, и, что немаловажно, оказывающие влияние на срок службы оптической кабельной системы. Все эти эффекты требуют рассмотрения не только по отдельности, но и в комплексе, так как даже не оказывающие влияние на оптические параметры волоконного световода воздействия могут негативно сказаться в будущем на работе оптической кабельной системы.

Целью данной работы является комплексное исследование влияния на работу оптической кабельной системы таких внешних факторов, как натяжение, изгиб и кручение.

## 2. ОСЕВОЕ НАТЯЖЕНИЕ ВОЛОКОННОГО СЕТОВОДА

При осевых натяжениях волоконного световода, изготовленного из кварцевого стекла, справедливо использование закона Гука [1]. Будем считать, что к световоду приложено растягивающее усилие  $P$ . Соответствующие напряжения в световодном стержне и защитных оболочках можно определить по соотношениям:

$$\sigma_k = P \frac{E_k}{\sum_{i=1}^4 E_i F_i},$$

где значению  $k = 1$  соответствует сердцевина,  $k=2$  – отражающая оболочка,  $k = 3$  и  $k = 4$  – защитное лаковое и полимерное покрытие, где  $F_i$  – текущая площадь поперечного сечения,  $E_i$  – модуль Юнга  $i$ -го слоя.

В общем виде при расчете параметров волоконного световода по линейной модели можно пользоваться соотношениями для сердцевин

$$n_{x_1} = n_1 + \frac{C_{11} P E_1}{\sum_i E_i F_i},$$

, и отражающей оболочки

$$n_{x_2} = n_2 + \frac{C_{12} P E_2}{\sum_i E_i F_i}.$$

Как показывают расчеты, под влиянием осевого натяжения волоконного световода показатели преломления сердцевин и отражающей оболочки уменьшаются, но их разность увеличивается. Экспериментальное исследование, проведенное при растягивающих усилиях 2 - 20 Н подтвердило отсутствие дополнительных потерь. Однако, значительные растягивающие усилия, особенно длительного воздействия или большие по величине, могут сократить срок службы оптического кабеля. Для выявления сегментов волоконного световода, подверженных осевому растягивающему усилию, применяются бриллюэновские рефлектометры.

### 3. ИЗГИБ ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА С НАТЯЖЕНИЕМ

Напряжения в волоконном световоде вследствие изгиба приводят к изменению профиля показателя преломления и, как результат, нарушают эффект полного внутреннего отражения на границе сердцевина-оболочка. Для сердцевины световода и отражающей оболочки соответственно [1]:

$$n_{1z} = n_1 + C_{11} (\sigma_{z_{bend}}^{(1)} + \sigma_{z_f}^{(1)}),$$

$$n_{2z} = n_2 + C_{12} (\sigma_{z_{bend}}^{(2)} + \sigma_{z_f}^{(2)}),$$

где  $n_i$  – показатель преломления в ненагруженной (невозмущенной) среде,  $n_x, n_y, n_z$  – диагональные компоненты тензора показателя преломления,  $C_{11}, C_{12}$  – светоупругие постоянные.

Расчет оптических параметров в общем случае должен проводиться с учетом профиля показателя преломления и параметров покрытия волоконного световода. Поэтому большое значение имеет экспериментальное исследование. На рис. 1 приведены спектральные зависимости изгибных потерь для разных типов волоконных световодов: волоконные световоды со смещенной дисперсией для высокоскоростных линий связи (NZDSF — Non-Zero Dispersion Shifted Fiber), характеристики которых соответствуют международному стандарту G.655, 2 – стандартные одномодовые волоконные световоды, SSMF – Standard Singlemode Fiber, стандарт G.652, 3 – волоконные световоды с пониженной чувствительностью к изгибу, BLIF – Bending Loss Insensitive Fiber, стандарт G.657. Как видно из представленных результатов характер спектральных зависимостей изгибных потерь исследованных световодов имеет линейный характер, что позволяет применять предлагаемую модель. Различие профилей показателя преломления исследованных волоконных световодов обуславливает различие потерь при их изгибе.

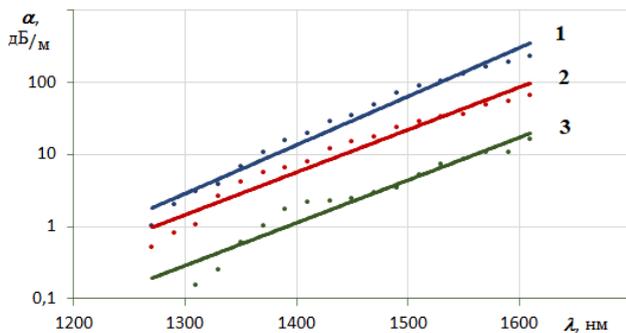


Рис. 1. Изгибные потери  $\alpha(\lambda)$ : 1 – волоконный световод со смещенной дисперсией (G.655), 2 – стандартный волоконный световод (G.652), 3 – волоконный световод с пониженной чувствительностью к изгибу (G.657) (радиус изгиба  $R = 6,25$  мм)

Осевое натяжение волоконного световода приводит к росту оптических потерь на изогнутом участке волокна. Так, при осевом натяжении с усилием от 2,5 до 15 Н изогнутого участка волоконного световода со смещенной дисперсией дополнительные потери оптической мощности возрастают в пять раз (рис. 2). Линейная динамика зависимости  $\alpha(P)$  подтверждает справедливость используемой модели.

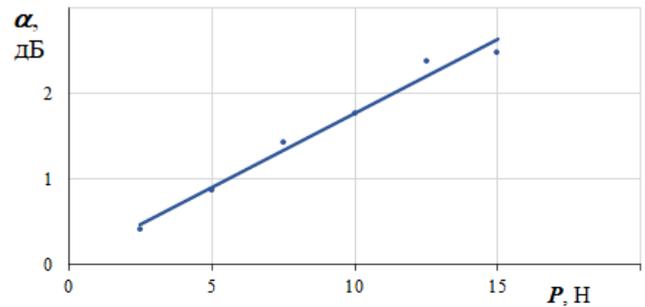


Рис. 2. Дополнительные потери  $\alpha$  на изогнутом участке волоконного световода со смещенной дисперсией (G.655) от приложенного осевого усилия  $P$

Следует учитывать, что значительно большие осевые натяжения изогнутого волоконного световода могут вызвать его пластические деформации и разрушение.

### 4. ИЗГИБ ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА С КРУЧЕНИЕМ

Аналогичное влияние оказывает совместное воздействие изгиба и кручения волоконного световода. Как показало исследование, кручение прямолинейного волоконного световода не приводит к изменению волноводных параметров. Дополнительные потери оптической мощности вследствие скрутки изогнутого волоконного световода оказались малы, что согласуется с численными оценками [1]. Однако даже сравнительно небольшое кручение изогнутого волоконного световода относительно его оси приводит к возникновению касательных напряжений, которые могут отрицательно сказаться на механической прочности и сроке службы волоконного световода.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модель совместного учета изгиба и натяжения волоконного световода. Проведено экспериментальное исследование различных типов волоконных световодов. Показано, что необходимо учитывать совместное действие изгиба и натяжения, изгиба и кручения световода, так как их наложение вызывает существенно большее ухудшение передаточных характеристик световода, по сравнению со случаем, когда эти эффекты проявляются по отдельности.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Черненко, В.Д. Оптомеханика волоконных световодов / В.Д.Черненко. – СПб.: Политехника, 2010. – 291 с.
- [2] Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / Сборник статей под. ред. С.А. Дмитриева и Н.Н. Слепова. – М.: Техносфера, 2010. – 608 с.
- [3] Andreev, D.P. Influence of Optical Cable Bending in Fiber Optic Systems Video Surveillance and Subscriber Access with Spectral Multiplexing / D.P. Andreev, E.I. Andreeva, A.N. Sergeev, V.R. Sumkin // ICAIT Proc. – 2020 – Vol.1. – P. 57-61.
- [4] Вихман, С.В. Морфология поверхности заготовок и волокна из кварцевого стекла / С. В. Вихман, М. А. Ероньян, П. А. Лесников, И. К. Мешковский, П. С. Парфенов, Е. Е. Татаринев, А. А. Реуцкий. // Физика и химия стекла. – 2021. – Т. 47(3). – С. 358–361.