

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**(ФГБОУ ВО «КубГУ»)**

**Физико-технический факультет**

**Кафедра оптоэлектроники**

Допустить к защите  
Заведующий кафедрой  
д-р техн. наук, профессор

\_\_\_\_\_ Н. А. Яковенко

\_\_\_\_\_ 2018 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

**РАЗРАБОТКА УЧЕБНОГО СТЕНДА ПО ИЗУЧЕНИЮ  
ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН G.657**

Работу выполнил \_\_\_\_\_ Головачев Евгений Дмитриевич

Направление подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и  
системы связи

Направленность (профиль) Оптические системы и сети связи

Научный руководитель

доцент \_\_\_\_\_ В. С. Дорош

Нормоконтролер инженер \_\_\_\_\_ И. А. Прохорова

Краснодар

2018

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 50 с., 27 рис., 3 табл., 16 источников.

ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН, ОДНОМОДОВЫЕ И МНОГОМОДОВЫЕ ВОЛОКНА, ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА G.651, G.652 И G.657, СЕТЬ FTTH, ПОТЕРИ И СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ

Объектом разработки данной дипломной работы является устройство, предназначенное для изучения возможностей оптических волокон и измерения потерь на изгибах.

Целью работы является исследование особенностей и возможностей оптических волокон типа G.657, а также изучение применения оптических волокон в сетях FTTH и, в частности, потерь и скорости передачи в них.

В результате выполнения выпускной работы были изучены основные виды оптических волокон, а также составлен обзор их свойств, характеристик, особенностей и возможностей в сетях доступа. Представлены возможности технологии FTTH. Рассмотрены разные типы волокон G.657. Выполнено сравнение волокон G.652 и G.657.

Собран учебный экспериментальный стенд по изучению возможностей оптических волокон G.657.

Разработаны учебно-методическая презентация и тренировочный обучающий тест.

# СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения.....	4
Введение.....	5
1 Свойства и характеристики оптических волокон.....	6
1.1 Типы оптических волокон.....	6
1.2 Параметры оптических волокон.....	12
1.3 Потери в оптических волокнах.....	15
1.4 Дисперсия сигналов в оптических волокнах.....	17
2 Свойства, характеристики и возможности оптических волокон G.657.....	25
2.1 Анализ возможностей оптических волокон в сетях FTTH по скорости передачи информации.....	25
2.2 Рассмотрение особенностей оптических волокон G.657 различных модификаций.....	27
2.3 Потери излучения на изгибе оптического волокна.....	32
3 Измерение потерь на изгибах и на соединениях в различных оптических волокнах.....	37
3.1 Экспериментальный стенд.....	37
3.2 Экспериментальное сравнение потерь на изгибах различных волокон.....	40
4 Разработка учебно-методических материалов.....	43
4.1 Разработка презентации.....	43
4.2 Разработка тренировочного обучающего теста.....	45
Заключение.....	48
Список использованных источников.....	49

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ОВ	оптическое волокно
ВОК	волоконно - оптический кабель
ВОСП	волоконно - оптические системы передачи
ОК	оптический кабель
FTTH	оптическое волокно до дома
ITU	международный союз электросвязи
MMF	многомодовые волокна
SMF	одномодовые волокна
SF	стандартные волокна
DSF	волокна со смещенной дисперсией
NZDSF	волокна с ненулевой смещенной дисперсией
ВОЛС	волоконно - оптические линии связи
EDFA	эрбиевые усилители на основе легированного эрбием волокна
MOD	межмодовая дисперсия
PMD	поляризованная модовая дисперсия
WDM	спектральное уплотнение каналов
DWDM	технология плотного волнового мультиплексирования

## ВВЕДЕНИЕ

Оптические волокна в данный момент широко употребляются во всевозможных областях, таких как волоконные лазеры и усилители, измерительные устройства, оптические жгуты для передачи изображений, световоды для медицинских целей, системы охраны, и другие.

Самое удачное употребление оптические волокна приобрели в системах связи. Волоконно-оптическая связь — это способ передачи информации, использующий в качестве носителя информационного сигнала электромагнитное излучение оптического диапазона, а в качестве направляющих систем — волоконно-оптические кабели. Благодаря высокой несущей частоте и обширным возможностям мультиплексирования, пропускная способность волоконно-оптических линий довольно сильно превосходит пропускную способность всех иных систем связи и может измеряться терабитами в секунду. А благодаря малому затуханию света в оптическом волокне, волоконно-оптическую связь можно использовать на существенных расстояниях без применения усилителей. Волоконно-оптическая связь свободна от электромагнитных помех и труднодоступна для несанкционированного использования: незаметно перехватить сигнал, распространяемый по оптическому кабелю, технически чрезвычайно сложно.

В данный момент такая архитектура построения сети как FTTH является наиболее актуальной для современных потребностей пользователей. Данную сеть активно внедряют провайдеры третьего уровня на последней миле во многих городах. Если затрагивать оптические волокна, здесь самым актуальным вариантом является волокно рекомендации G.657, работоспособность которого позволяет проектировщикам сетей больше не волноваться о потерях на изгибах волокон.

# 1 Свойства и характеристики оптических волокон

## 1.1 Типы оптических волокон

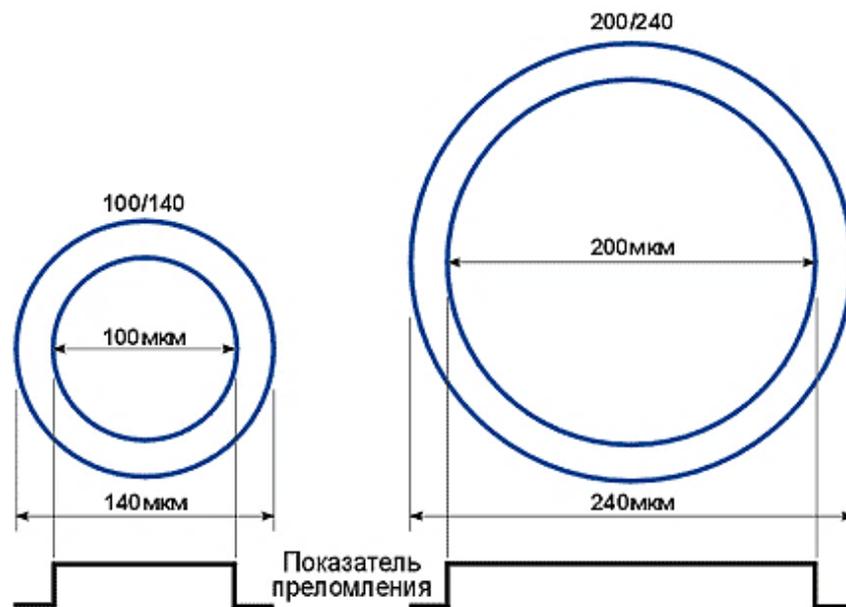
Оптические волокна создаются различными способами, позволяют совершать передачу оптического излучения на разных длинах волн, обладают разнообразными характеристиками и свойствами, а также осуществляют различные задачи.

Оптические волокна принято разделять на многомодовые (MMF) и одномодовые (SMF).

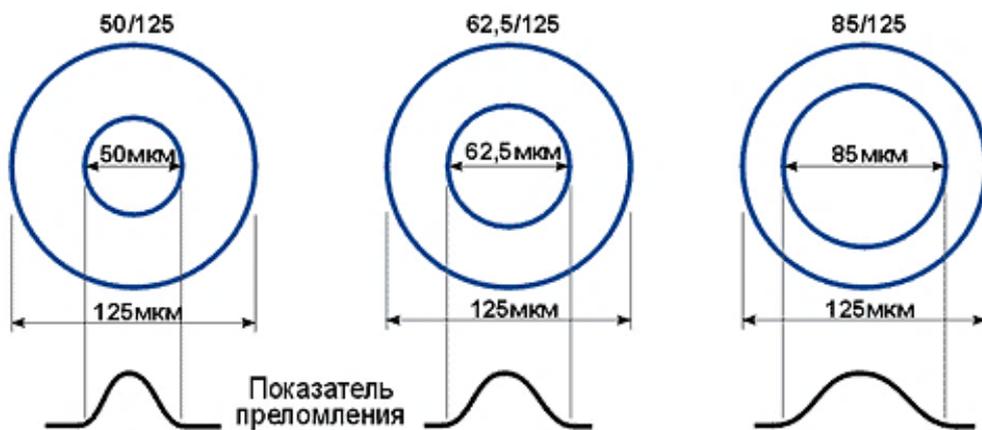
Многомодовые в свою очередь делятся на ступенчатые и градиентные, а одномодовые волокна включают в себя стандартные волокна (SF), волокна со смещенной дисперсией (DSF), а также волокна с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF).

Любое волокно состоит из сердцевины и оболочки с отличающимися показателями преломления. Сердцевина, с распространяющимся в ней световым сигналом, всегда создается из оптически более плотного материала. Такие параметры, как диаметры сердцевины и оболочки при обозначении волокна принято записывать через дробь. В волокнах различаются диаметры сердцевины и оболочек, а также профили показателя преломления сердцевины. У многомодового градиентного волокна и одномодового волокна со смещенной дисперсией показатель преломления сердцевины зависит от радиуса. Такой более сложный профиль делается для совершенствования технических характеристик или для достижения специальных характеристик волокна.

Размеры и типы оптических волокон показаны на рисунке 1. При сравнении многомодовых волокон (рисунок 1 а, б) видно, что градиентное волокно имеет наилучшие технические характеристики по дисперсии, в сравнении со ступенчатым.



а) Ступенчатое многомодовое волокно



б) Градиентное многомодовое волокно



в) Ступенчатое  
одномодовое волокно



г) Одномодовое волокно со  
смещенной дисперсией

Рисунок 1 – Размеры и типы оптических волокон

Это происходит по причине того, что межмодовая дисперсия в градиентном многомодовом волокне значительно меньше, чем в ступенчатом многомодовом волокне. Вследствие этого у градиентного волокна увеличивается пропускная способность. Одномодовое волокно обладает меньшим диаметром сердцевины, чем многомодовое, а также более высокой пропускной способностью, по причине отсутствия межмодовой дисперсии. Тем не менее оно требует применения более дорогостоящих лазерных передатчиков.

В ВОЛС используются следующие стандарты волокон (таблица 1):

Таблица 1 – Стандарты оптических волокон

Многомодовое волокно		Одномодовое волокно		
MMF 50/125 градиентное волокно	MMF 62,5/125 градиентное волокно	SF (NDSF) ступенчатое волокно	DSF волокно со смещенной дисперсией	NZDSF волокно с ненулевой смещенной дисперсией
ЛВС (Ethernet, Fast/Gigabit Ethernet, FDDI, ATM)	ЛВС (Ethernet, Fast/Gigabit bit Ethernet, FDDI, ATM)	Протяжен- ные сети (Ethernet, Fast/Gigabit Ethernet, FDDI, ATM), магистрал SDH)	Сверхпротяжен- ные сети, супермагистрала (SDH, ATM)	Сверхпротяжен- ные сети, супермагистрала (SDH, ATM), полностью оптические сети

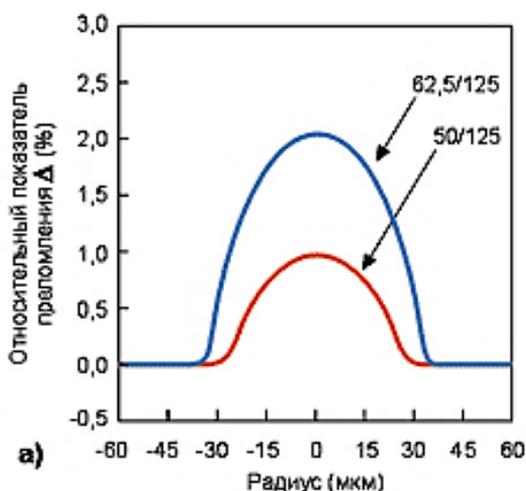
Из большого количества мировых производителей оптического волокна стоит отметить несколько крупнейших: Corning Optical Fiber, Lucent Technologies и Alcoa Fujikura. Также существует множество менее

значительных производителей волокна. Тестировать волокна принято не только при производстве, но и после изготовления [1].

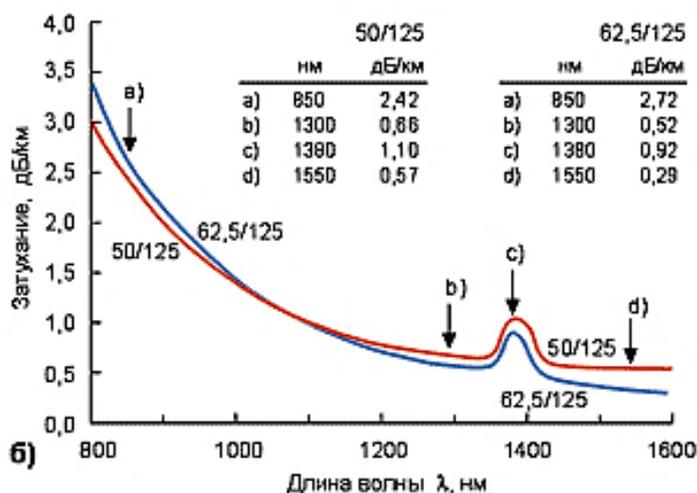
Самыми используемыми на практике из градиентных многомодовых волокон являются стандарты 62,5/125 и 50/125, отличающиеся профилем сердцевины (рисунок 2 а). На рисунке 2 б показаны спектральные потери для соответствующих волокон.

В волокнах 50/125 и 62,5/125 диаметр светонесущей жилы имеет размеры 50 мкм и 62,5 мкм соответственно, что существенно превышает длину волны передачи. В результате происходит распространение разнообразных световых лучей в трех окнах прозрачности. Для передачи света по многомодовому волокну принято использовать окна прозрачности 850 нм и 1310 нм.

Следует заметить, что значение полосы пропускания на длине волны 1310 нм больше, чем на длине волны 850 нм. Исходя из этого становится понятно, что дисперсия, которая определяет полосу пропускания, включает в себя межмодовую и хроматическую составляющие.



а) Профили показателей преломления



б) Кривые спектральных потерь мощности

Рисунок 2 – Градиентные многомодовые волокна

Межмодовая дисперсия не сильно зависит от длины волны, зато хроматическая дисперсия пропорциональна ширине спектра излучения. Как правило при использовании многомодовых волокон в виде передатчиков используются светоизлучающие диоды, которые имеют уширение спектральной линии излучения в среднем в 50 нм, в отличие от лазерных диодов с уширением 2 нм и менее. В связи с этим, хроматическая дисперсия начинают играть значительную роль на длине волны 850 нм. Также существует способ, который позволяет довольно сильно уменьшить хроматическую дисперсию. Этого можно достигнуть, используя лазерные передатчики, спектральное уширение которых намного меньше. Применить данное преимущество можно непосредственно в окнах прозрачности 1310 нм и 1550 нм при отсутствии межмодовой дисперсии.

Одномодовые волокна принято делить на ступенчатые (SF), волокно со смещенной дисперсией (DSF), волокно с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF), а также на оптический усилитель на волокне, легированном эрбием (EDFA).

Описывается ступенчатое одномодовое волокно тем, что диаметр его светонесущей жилы равен от 8 до 10 мкм и оно сравнимо с длиной световой волны. В данном волокне передается только один луч, что и обеспечивает высочайшую пропускную способность одномодового волокна в окнах прозрачности 1310 нм и 1550 нм.

Значительным преимуществом одномодового волокна со смещенной дисперсией считается смещение длины волны нулевой дисперсии в окно 1550 нм. Данное преимущество было достигнуто благодаря специальному профилю показателя преломления. В результате, такое волокно считается наилучшим как по минимуму дисперсии, так и по минимуму потерь.

Одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией в свою очередь настроено для передачи сразу нескольких длин волн. Наилучшим образом данное волокно можно используется в сетях, на узлах которых не

совершается оптоэлектронного преобразования при передаче оптического сигнала.

Передача мультиплексного сигнала на значительные расстояния требует применения линейных широкополосных оптических усилителей, из которых наибольшее распространение получили эрбиевые усилители на основе волокна легированного эрбием. Линейные усилители типа EDFA эффективно усиливают сигнал в своем рабочем диапазоне от 1530 нм до 1560 нм [2].

В данный момент также существует большое количество стандартов, отличающихся оптическими характеристиками и предназначению.

Исходя из этого было решено классифицировать оптические волокна согласно рекомендациям, установленным «Международным союзом электросвязи» (International Telecommunication Union - Telecommunication standardization sector). Данная организация разрабатывает и создает технические рекомендации по международным вопросам цифрового сообщения и работает над решением проблем, которые возникают при строительстве волоконно-оптических линий связи с использованием оптоволокна. Рекомендации МСЭ-Т (ITU-T) не обязывают к неукоснительному исполнению, но крайне упрощают сетевое взаимодействие и облегчают работу провайдеров. Далее рассмотрим такие стандарты и рекомендации как G.651, G.652.

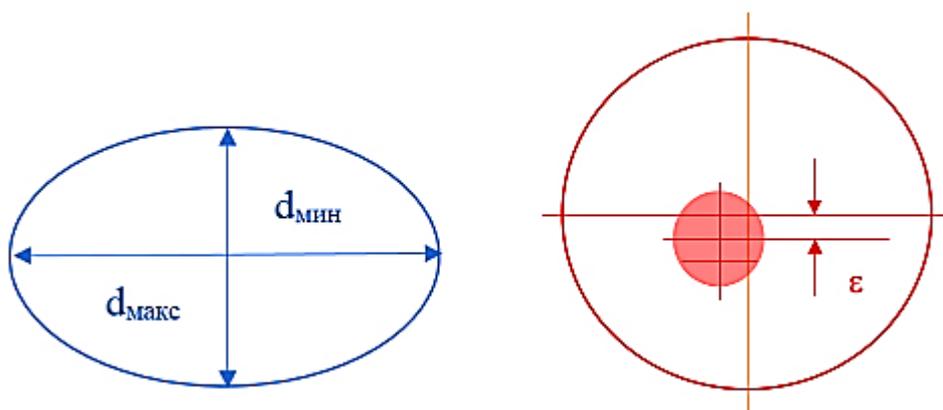
Официально рекомендация ITU-T G.651 была заменена в списке стандартов рекомендацией ITU-T G.651.1, которая описывает многомодовые оптические волокна с градиентным показателем преломления, диаметром светопроводящей сердцевины 50 мкм и оболочки 125 мкм. В данном стандарте определены рекомендации, определяющие параметры многомодовых оптоволокон, их характеристики и возможные отклонения от общих значений. Ранее этот тип оптики применялся для сетей небольшой протяженности (в пределах одного километра). Сейчас данный тип волокон используется на коротковолновых линиях связи, в основном внутри зданий и помещений.

Рекомендация G.652 официально называется «Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля». Она характеризует ОВ, часто называемое как стандартное одномодовое. Волокна данного типа настроены для передачи на длине волны 1310 нм. Это значение располагает к нулевому лучевому рассеиванию, а также малому показателю затухания сигнала. ОВ данной категории является весьма надежным и способно передавать данные в пределах 50 км. Скорость передачи данных при этом достигает 10 Гбит/с. Этот показатель возможно увеличить, но уже с применением дополнительного оборудования, для чего потребуются большие материальные расходы [3].

## 1.2 Параметры оптических волокон

Параметры оптических волокон принято делить на механические, оптические, геометрические и параметры передачи оптических волокон.

В свою очередь геометрические параметры оптических волокон подразделяются на диаметр защитного покрытия, диаметр сердцевины, диаметр оболочки, некруглость сердцевины, некруглость оболочки, а также неконцентричность сердцевины и оболочки (рисунок 3).



а) Некруглость

б) Неконцентричность сердцевины

Рисунок 3 – Примеры неоднородностей в ОВ

Некруглостью сердцевин оптических волокон считается разность минимального и максимального диаметров сердцевин, поделенная на общепринятый диаметр сердцевин. Некруглость сердцевин принято определять только в многомодовых волокнах, а некруглость оболочки – во всех типах волокон. Некруглость сердцевин оптических волокон находится по формуле:

$$N_c = \frac{d_{\text{макс}} + d_{\text{мин}}}{d_n}, \quad (1)$$

где  $N_c$  - некруглость сердцевин, %;

$d_{\text{макс}}$ ,  $d_{\text{мин}}$  - максимальный и минимальный диаметры сердцевин, мкм;

$d_n$  - допустимый диаметр сердцевин, мкм.

Некруглость оболочки оптических волокон находится аналогично.

Неконцентричность сердцевин относительно оболочки формулируется как расстояние между центрами оболочки и сердцевин оптических волокон и выражается в виде:

$$N_{c/o} = \rho_0 - \rho_c, \quad (2)$$

где  $N_{c/o}$  - неконцентричность сердцевин относительно оболочки, мкм;

$\rho_c$  - координаты центра сердцевин, мкм;

$\rho_0$  - координата центра оболочки, мкм.

Следует отметить, что геометрические параметры принято стандартизировать для разных видов оптических волокон.

Основными оптическими показателями волокна считаются нормированная частота ( $V$ ), относительная разность показателей преломления ( $\Delta$ ), числовая апертура ( $NA$ ), число распространяющихся

мод (M), диаметр модового поля ( $d_{мп}$ ), значение поляризационной модовой дисперсии, а также длина волны отсечки ( $\lambda_{кр}$ ).

Одной из главных характеристик, определяющих условия введения оптических сигналов в оптическое волокно и процессы их распространения по световоду, считается числовая апертура, определяемая для:

- ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (3)$$

- ОВ с градиентным профилем показателя преломления

$$NA = \sqrt{\frac{n_1^2(r) - n_2^2}{2}}. \quad (4)$$

В градиентных оптических волокнах применяется термин локальной числовой апертуры. Ее значение равно нулю на границе разделения сердцевины и оболочки, а также максимально на оси волокна.

Нормированной частотой является параметр, определяющий число мод, который равен:

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} NA, \quad (5)$$

где  $\lambda$  - длина волны.

Параметрами передачи оптических волокон являются: дисперсия одномодовых оптических волокон, коэффициент затухания и ширина полосы пропускания многомодовых оптических волокон.

Коэффициент затухания оптического сигнала. Затуханием в ОВ считается размерность уменьшения оптической мощности,

распространяющейся вдоль оптического волокна между его поперечными сечениями на заданной длине волны.

Затухание в оптических волокнах выражается в дБ. Коэффициентом затухания в оптических волокнах является затухание на единице длины волокна, которое в свою очередь выражается в дБ/км. Коэффициент затухания в оптических волокнах определяется собственными потерями волокна и находится по формуле:

$$\alpha = \alpha_{pp} + \alpha_{pm} + \alpha_{ик} + \alpha_{пр}, \quad (6)$$

где  $\alpha_{pp}$ ,  $\alpha_{пт}$ ,  $\alpha_{ик}$ ,  $\alpha_{пр}$  - составляющие коэффициента затухания за счет рэлеевского рассеяния, поглощения в материале волокна, инфракрасного поглощения и поглощения на примесях оптического волокна, соответственно.

Механическими параметрами оптических волокон являются: прочность волокна, стойкость к изгибам, динамическая прочность на разрыв, усилие снятия защитного покрытия, а также параметр нагрузки разрушения.

Проводя анализ данных параметров оптических волокон можно сделать вывод, что ОВ считается не только наилучшей физической средой для распространения информации, но и самой многообещающей средой для распространения многочисленных потоков информации на большие расстояния [4].

### **1.3 Потери в оптических волокнах**

Самыми дешевыми, популярными и распространенными приборами измерения потерь считаются измерители оптической мощности. Данные приборы обычно используются вместе с источником стабильного оптического излучения.

Применяются измерители оптической мощности обычно для измерения выходной мощности активных и пассивных компонентов волоконно-оптической системы. Многие измерители оптической мощности могут отображать именно потери на отдельных компонентах оптической кабельной системы. Для данной функции в них предустановлен режим измерения относительных уровней мощности, благодаря которому запоминается непосредственно один из опорных уровней (например, уровень мощности излучения источника света), относительно которого и производятся все следующие измерения.

Нельзя недооценивать потери при использовании ОК, ведь их размерность и определяет работоспособность волокон и возможность справляться с трансляцией потока информации, которая отправляется на нужное расстояние, включая усложнение структуры сети или увеличение работоспособности передающих систем. Способность контроля над потерями требуется для управления запасом кабельной системы на модернизацию и ремонт. При проведении кабеля необходимо знать затухание мощности передаваемого сигнала в ОВ. Данное знание играет большую роль, так как от него в дальнейшем и зависит способность среды распространять свет и отправлять сигналы на большие расстояния без искажения. По этой причине процесс проверки кабеля после его приобретения с завода-изготовителя (входной контроль) является очень важным, так же, как и контроль потерь при установке данного кабеля.

Потери оптической мощности определяются, как снижение мощности светового сигнала, при увеличении пройденного расстояния, которое включает в себя все потери, появляющиеся при передаче. По этой причине в высокоскоростных системах передачи осведомленность о точной величине затухания в кабеле и компонентах кабельной системы считается ведущим фактором для оценки его работоспособности и выявления запаса оптической среды по скорости передачи и бюджету потерь.

На определение величины оптической мощности возвратившейся к источнику излучения, а также на качественную передачу сигналов довольно сильно влияют обратные отражения, которые определяются логарифмическим отношением прямого и отраженного сигналов. Измеряются обратные отражения в децибелах с отрицательным знаком. Работоспособность источника оптического излучения будет выше, если обратное отражение будет иметь минимальное значение, так как и вернувшаяся к источнику оптическая мощность будет минимальна. Измерять затухание принято двумя методами: методом вносимых потерь, а также методом обрыва [5].

#### 1.4 Дисперсия сигналов в оптических волокнах

Дисперсия является очень значимым параметром, так как данная характеристика определяет информационную пропускную способность ОВ.

По волокну помимо световой энергии передается также полезный информационный сигнал. Информационный поток определяет последовательность импульсов света, которые, во время распространения расплываются. Импульсы начинают перекрываться, когда уширение достигает достаточно большого значения, что делает их выделение при получении нереальным (рисунок 4).



Рисунок 4 – Влияние дисперсии

Дисперсия также характеризуется рассеиванием во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала. Данное рассеивание увеличивает длительность импульса оптического излучения и выражается разностью квадратов длительностей импульсов на входе и выходе оптического волокна:

$$\tau = \sqrt{t_{\text{ВЫХ}}^2 - t_{\text{ВХ}}^2} \quad (7)$$

Таким образом, чем меньше дисперсия в волокне, тем больше информации можно по нему передать. Помимо ограничения частотного диапазона оптического волокна, дисперсия также сильно уменьшает дальность передачи сигналов, поскольку чем продолжительнее линия, тем значительнее увеличение длительности импульсов.

В целом дисперсию принято определять тремя основными факторами, такими как отличие скоростей распространения направляемых мод (межмодовая дисперсия), направляющие свойства ОВ (волноводная дисперсия) и параметры материала, из которого изготовлено ОВ (материальная дисперсия).

Виды дисперсии изображены на рисунке 5.

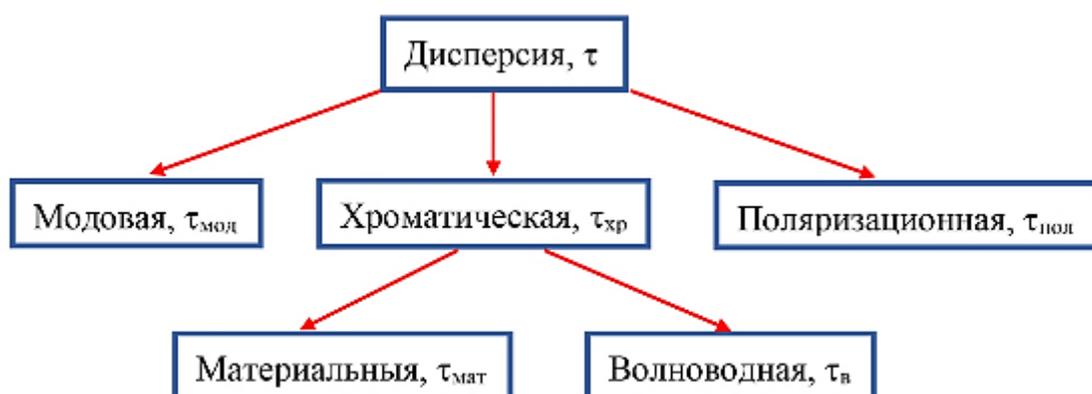


Рисунок 5 – Виды дисперсии

Дисперсия появляется в основном по причине большого числа мод в оптическом волокне (межмодовая дисперсия), либо по причине некогерентности источников излучения, которые реально работают в спектре длин волн (хроматическая дисперсия).

Стоит заметить, что при создании одномодового волокна, во время вытягивания из стеклянной заготовки кварцевой нити, в какой-то мере появляются отклонения в радиальном профиле показателя преломления, а также в геометрии оптического волокна. Помимо отклонений от идеального профиля, весомый вклад в зависимость скорости распространения сигнала от длины волны вносит непосредственно геометрия волокна. Данное явление называется волноводной дисперсией [6].

Общее влияние волноводной и материальной дисперсий принято определять хроматической дисперсией оптического волокна (рисунок 6).

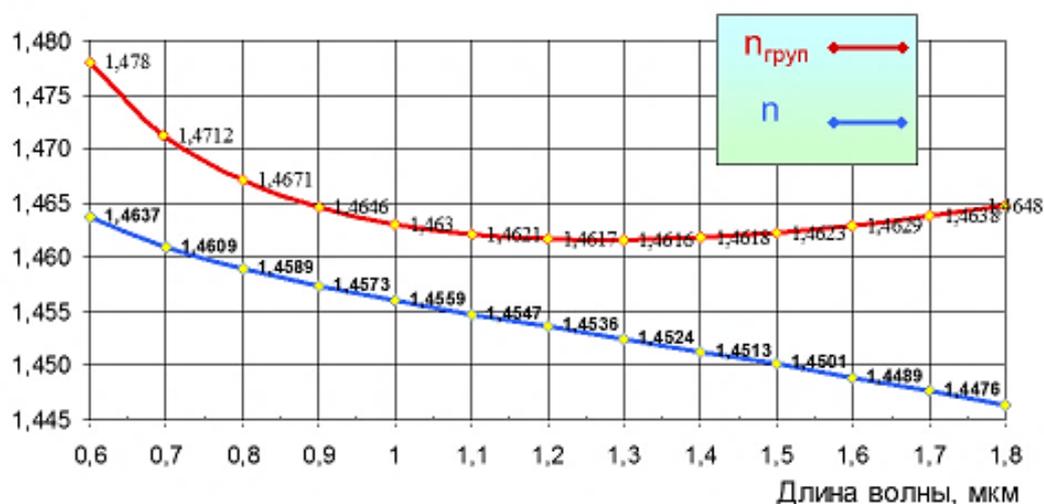


Рисунок 6 – Зависимость показателя преломления ( $n$ ) и группового показателя преломления ( $n_{\text{груп}}$ ) от длины волны

В лазере при уменьшении спектральной ширины излучения происходит ослабление явления хроматической дисперсии. Даже при использовании идеального источника монохроматического излучения с нулевой шириной линии генерации, после модуляции информационным сигналом в любом

случае произойдет спектральное уширение сигнала, причем уширение будет настолько больше, насколько будет больше и скорость модуляции. Также спектральное уширение излучения может произойти и по другим причинам, из которых можно явно выделить такую причину, как chirпирование источника излучения.

В итоге, исходный канал представлен не одной длиной волны, а несколькими длинами волн в узком спектральном диапазоне, называемым волновым пакетом. Оптический импульс, который имеет на входе линии связи прямоугольную форму, по мере распространения по волокну будет становиться все шире и шире, при условии, что разные длины волн распространяются с неодинаковыми скоростями (с разными групповыми скоростями). Если время прохождения по волокну будет большое, то импульс может перемешаться с соседними импульсами, что затруднит их точное восстановление. А если увеличится длина линии связи и скорость передачи, тогда возрастет и влияние хроматической дисперсии.

Учитывая, что хроматическая дисперсия зависит от волноводной и материальной составляющих, можно сказать, что при определенной длине волны  $\lambda_0$  хроматическая дисперсия становится нулем. Данную длину волны принято называть длиной волны нулевой дисперсии.

Нулевую дисперсию на длине волны 1310 нм имеет одномодовое кварцевое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления. Также можно сказать, что это волокно с несмещенной дисперсией.

Волноводная дисперсия в основном характеризуется профилем показателя преломления сердцевинки волокна и внутренней оболочки. Если волокно имеет сложный профиль показателя преломления, то при изменении соотношения между дисперсией среды и дисперсией волновода, смещается не только длина волны нулевой дисперсии, но и выбирается подходящая форма дисперсионной характеристики, то есть форма зависимости дисперсии от длины волны.

Можно сказать, что для систем WDM, и преимущественно, для волокна со смещенной дисперсией рекомендации G.653, форма дисперсионной характеристики является важнейшей.

Также используют параметр  $S_0$ , который описывает наклон дисперсионной характеристики на длине волны  $\lambda_0$  (рисунок 7). Наклон на длине волны нулевой дисперсии довольно заметно отличается от наклона на других длинах волн. Текущая величина наклона  $S_0$  выражает линейную составляющую дисперсии в окрестности длины волны нулевой дисперсии.

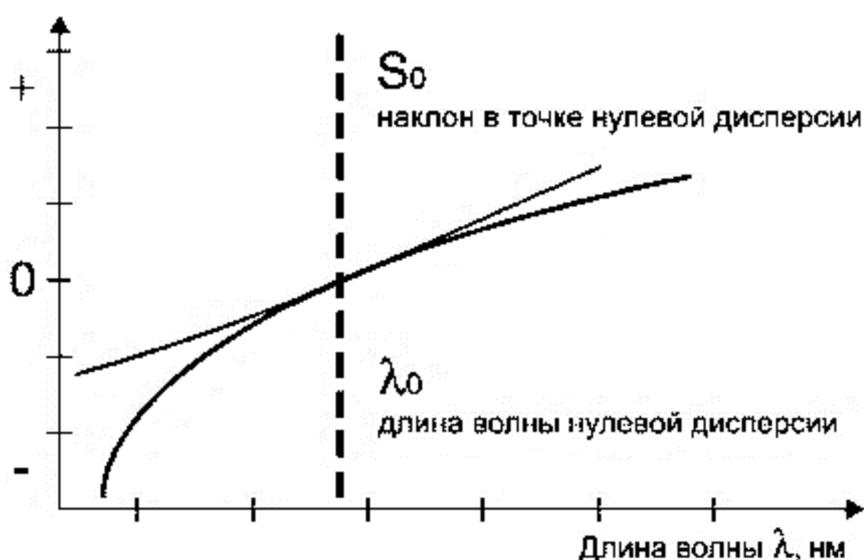


Рисунок 7 – Основные параметры зависимости хроматической дисперсии от длины волны

Хроматическая дисперсия  $\tau_{chr}$ , измеряемая в пс, определяется как:

$$\tau_{chr} = D(\lambda) \cdot \Delta\tau \cdot L \quad (8)$$

где  $D(\lambda)$  - коэффициент хроматической дисперсии (пс/(нм·км));

$L$  - протяженность линии связи (км).

При использовании ультраузкополосных источников излучения приведенная формула не будет точна.

На рисунке 8 изображены зависимости материальной дисперсии и волноводной дисперсии для волокна со смещенной и несмещенной дисперсией от длины волны.

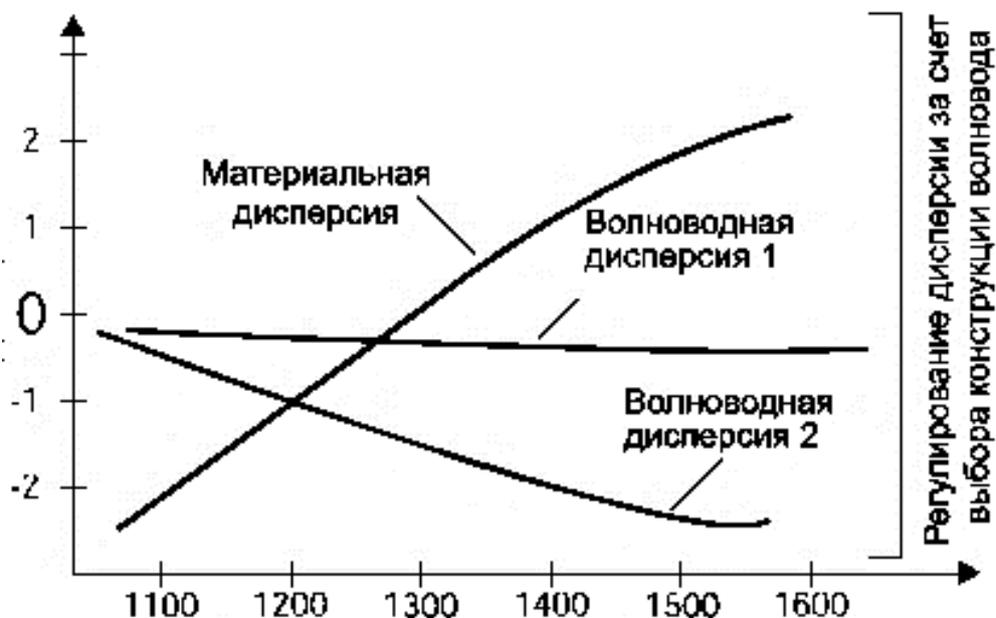


Рисунок 8 – Зависимость дисперсии от длины волны

Как известно на хроматическую дисперсию системы передачи имеют влияние не только увеличение длины и количества участков линии связи, но еще и увеличение скорости передачи. Это объясняется увеличением эффективной ширины линии генерации источника.

При уменьшении компенсации дисперсии, а также абсолютного значения хроматической дисперсии волокна, преимущественно уменьшается и хроматическая дисперсия.

Также существует поляризационная модовая дисперсия  $t_{\text{pmd}}$ , появляющаяся по причине разной скорости распространения двух взаимно перпендикулярных поляризационных составляющих моды.

Коэффициент удельной дисперсии  $T$  нормируется в расчете на один километр и выражается в  $(\text{пс}/\text{км}^{1/2})$ .

Поляризационная модовая дисперсия возрастет с увеличением расстояния по определению:

$$t_{\text{pmd}} = T \cdot L^{1/2} \quad (9)$$

В одномодовом волокне в реальности может распространяться две фундаментальные моды – перпендикулярные поляризации начального сигнала. В идеальном волокне, при отсутствии неоднородностей по геометрии, две моды протекали бы с одинаковой скоростью. Но на практике волокна не идеальны, из-за чего скорость распространения поляризационных составляющих мод различная (рисунок 9).

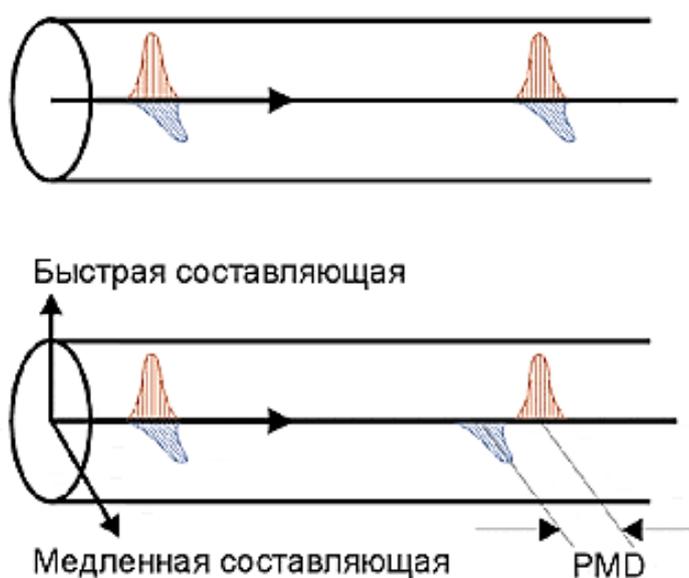


Рисунок 9 – Появление поляризационной модовой дисперсии

Важнейшей причиной появления поляризационной модовой дисперсии считается некруглость профиля сердцевинки одномодового волокна, которая появляется во время создания или использования волокна. Только тщательный контроль при изготовлении оптического волокна дает возможность добиться минимальных значений этого параметра [7].

При нормальных условиях работы одномодовых ОВ поляризационная модовая дисперсия незначительна, поэтому при расчете полной дисперсии ею можно пренебречь.

Поляризационная модовая дисперсия проявляется исключительно в одномодовых оптических волокнах с эллиптической сердцевиной и при определённых условиях становится соизмеримой с хроматической дисперсией.

Данные условия выражаются тогда, когда применяется передача широкополосного сигнала (2,5 Гбит/с и выше) с очень узкой спектральной линией излучения 0,1 нм и менее.

Проблема поляризационной модовой задержки возникает, например, при проектировании супермагистралей (более 10 Гбит/с) городского масштаба.

## **2 Свойства, характеристики и возможности оптических волокон G.657**

### **2.1 Анализ возможностей оптических волокон в сетях FTTH по скорости передачи информации**

FTTH (fiber to the home) – оптическое волокно до квартиры. В квартире устанавливается терминал, от которого проводится кабель к компьютеру. Данное определение исключает архитектуры сети, оптическое волокно в которых оканчивается до достижения жилых помещений или офисного пространства, а линия продолжается физической средой отличающейся от оптической. Данная технология построения сетей наиболее интересна, стандартизирована и перспективна, поскольку является наиболее скоростной, а также позволяет поддерживать симметричные скорости передачи данных к пользователю и от пользователя [8].

Сеть FTTH имеет массу преимуществ перед прочими архитектурами даже несмотря на то, что требует более значительных капитальных затрат при строительстве. Во-первых, она обеспечивает наибольшую полосу пропускания. Также она позволяет обеспечивать массовое обслуживание абонентов на расстоянии до 20 км от узла связи и существенно сокращать эксплуатационные расходы. Преимущественно это совершается за счет уменьшения площади технических помещений требуемых для размещения оборудования, а также снижения энергопотребления и затрат на техническую поддержку. При построении данной сети количество необходимого коммутационного и дополнительного оборудования такого как коммутаторы, коммутационные панели, коммуникационные шкафы, электрические счетчики и источники бесперебойного питания, значительно уменьшается. Все эти преимущества позволяют обеспечивать достаточно высокий уровень качества обслуживания абонентов. Но, к сожалению, в настоящее время

технология FTTH распространилась не так широко, как другие сети. Это связано с тем, что существующие реализации обладают, либо довольно большим набором ограничений, либо требуют крайне высоких капитальных затрат при строительстве.

Скорость доступа в Интернет быстро растет. Связано это не только с соответствующими требованиями приложений, но и с возможностями провайдеров и индустрии в целом. Большая часть полосы пропускания большинства современных широкополосных сетей расходуется одноранговыми приложениями и контентом с повышенной требовательностью к сетевым ресурсам. Это соперничество между запросами приложений и техническими возможностями похожа на ту, которая имела место в отрасли производства программных компьютеров, когда на каждом этапе увеличения скорости процессора и объема памяти моментально появлялись приложения, полностью поглощающие новые ресурсы, например системы обработки приложений или видеомонтажа. И все же развертывание новых широкополосных сетей стимулируется в основном требованиями современных приложений, а не будущими потребностями. Наиболее емкими с точки зрения использования полосы пропускания являются приложения по передаче потокового видео. Может показаться, что для использования потокового телевидения высокого разрешения и просмотра страниц в Интернете полосы пропускания в 20-25 Мбит/с хватит надолго. Однако данные за прошлый период и прогноз на ближайшую перспективу показывают, что рост требований к полосе пропускания имеет экспоненциальный характер. В настоящее время сервис-провайдеры уже предлагают для абонентов доступ со скоростью 1 Гбит/с, и подключение к обширным сетям со скоростью 100 Мбит/с. Такие скорости подключения абонентов возможны только на базе технологии FTTH [9].

## **2.2 Рассмотрение особенностей оптических волокон G.657 различных модификаций**

Официальное название данной рекомендации «Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля, не чувствительного к потерям на макроизгибе, для использования в сетях доступа». Волокна G.657 оптимально подходят для использования внутри помещений. Это связано с тем, что они допускают довольно небольшие радиусы изгибов. Что касается многих других характеристик данного волокна, они аналогичны оптическим волокнам G.652. Но в то же время и волокна G.657 имеют вдвое меньший допустимый радиус изгиба при укладке.

В настоящее время происходит стремительное развитие технологий для транспортных сетей общего назначения и сетей широкополосного доступа. К ним относится технология применения одномодового волокна, обеспечивающая среду передачи с высокой пропускной способностью, удовлетворяющая возрастающему спросу на высокоскоростные и широкополосные услуги. На базе одномодового волокна набран обширный опыт монтажа и эксплуатации сетей, и в соответствии с этим опытом обновляются рекомендации G.652 и G.657, в которых описаны его характеристики. Вместе с тем специфика использования в оптических сетях доступа обуславливает разнообразные требования по отношению к волокну и кабелю, оказывающие влияние на его наилучшие эксплуатационные свойства и характеристики. Высокая плотность распределительных и ответвительных кабелей в сети доступа в общем объясняет отличия от использования в транспортных сетях основного назначения. Эксплуатационные характеристики волокна и низкой чувствительностью к изгибу способствуют удобству оператора в условиях ограниченной площади и большого числа операций. Помимо этого, надлежащим образом должна улучшаться укладка

кабеля в тесных помещениях оборудования связи, где площадь является ограничивающим фактором.

Цель рекомендации G.657 заключается в поддержке такой оптимизации путем рекомендации усовершенствованных эксплуатационных свойств и характеристик на изгибе в сравнении с характеристиками существующих одномодовых волокон G.652. Решение этой задачи достигается введением двух категорий ОВ – категории А, которая полностью соответствует рекомендации G.652 и волокна которой могут использоваться во всей сети основного назначения, а также сети доступа, и категории В, волокна которой необязательно соответствуют рекомендации G.652, но обеспечивающие малые значения потерь на макроизгибе при очень небольших радиусах изгиба и предназначены для применения в сети доступа внутри или около. Волокна категории В системно совместимы с волокнами G.657.A, а также G.652.D, применяемыми в сетях доступа. В последнее издание рекомендации G.657 внесены изменения, которые касаются применения ОВ категории А для всех сетей доступа, а также транспортных сетей основного назначения, используемых волокна G.652.D, с усовершенствованными характеристиками на изгибе волокна.

Возможности оптического волокна предназначенного для сетей FTTH вызывают постоянно растущий интерес. И это неудивительно, поскольку для широкомасштабного перехода на него требуется научиться производить его укладку такой же легкой, как и укладку медножильных кабелей, без снижения его работоспособности и надежности. Учитывая изменения запросов и требований к укладке ОВ и была разработана рекомендация G.657 для определения и стандартизации двух классов одномодового оптического волокна [10].

ОВ категории А оптимизированы на снижение потерь на макроизгибах в сравнении с волокнами G.652.D и могут применяться во всей сети доступа. Эти волокна подходят для применения во всем диапазоне от 1260 до 1625 нм.

Волокна и требования, которые относятся к данной категории, считаются подмножеством G.652.D и, таким образом, соответствуют волокнам G.652.D и имеют те же характеристики и свойства соединения и передачи. Следовательно, волокна G.657.A применяются во всех сетях, определяющих волокна G.652.D. ОВ категории G.657.A1 подходят для минимального расчетного радиуса 10 мм, а ОВ категории G.657.A2 подходят для минимального расчетного радиуса 7,5 мм.

ОВ категории В оптимизированы для большего уменьшения помех на макроизгибах и, таким образом, применяются при крайне низких значениях радиуса изгиба. Предназначены данные волокна для небольших расстояний досягаемости в оконечной части сетей доступа, особенно внутри или около зданий, а также в стояках, которые расположены вне зданий. Расстояние использования волокна G.657.B зависит от стратегии развертывания сетевого оператора. Эти ОВ подходят для применения во всем диапазоне от 1260 до 1625 нм. ОВ категории В необязательно будут соответствовать G.652.D по спецификациям поляризационной модовой дисперсии и коэффициента хроматической дисперсии. Тем не менее, данные волокна системно совместимы с волокнами G.657.A в сетях доступа. ОВ категории G.657.B2 подходят для минимального расчетного радиуса 7,5 мм, а ОВ категории G.657.B3 подходят для минимального расчетного радиуса 5 мм [11].

Проводя укладку межэтажного кабеля и кабеля абонентской разводки разрешается применять кабель с волокном стандарта G.657.A1, G.657.A2. Соединительный оптический кабель от абонентской розетки до абонентского терминала должен принадлежать стандарту G.657.B3, иначе в будущем могут возникнуть проблемы с качеством изображения при передаче телевизионного сигнала, при условии того, что соединительный ОК будет пережат или сильно изогнут.

Свойства характеристики и особенности оптических волокон G.657 разнообразных модификаций, существующих в данный момент приведены в таблице 2 [12].

Таблица 2 – Характеристики волокон G.657 различных классов

Характеристика	G.657.A1	G.657.A2	G.657.B2	G.657.B3
Длина волны, нм	1310	1310	1310	1310
Диаметр модового поля, мкм	8,6–9,5±0,4	8,6–9,5±0,4	6,3–9,5±0,4	6,3–9,5±0,4
Диаметр оболочки, мкм	125,0±0,7	125,0±0,7	125,0±0,7	125,0±0,7
Эксцентриситет сердцевины, мкм	0,5 максимум	0,5 максимум	0,5 максимум	0,5 максимум
Сплюснутость оболочки	1,0% максимум	1,0% максимум	1,0% максимум	1,0% максимум
Длина волны отсечки кабеля, нм	1260 максимум	1260 максимум	1260 максимум	1260 максимум
Потери на макроизгибе, дБ: радиус, мм количество витков макс. при 1550 нм макс. при 1625 нм	15 10 10 1 0,25 0,75 1,0 1,5	15 10 7,5 10 1 1 0,03 0,1 0,5 0,1 0,2 1,0	15 10 7,5 10 1 1 0,03 0,1 0,5 0,1 0,2 1,0	10 7,5 5 1 1 1 0,03 0,08 0,15 0,1 0,25 0,45
Проверочное напряжение, ГПа	0,69 минимум	0,69 минимум	0,69 минимум	0,69 минимум
Коэффициент хроматической дисперсии, пс/(нм·км), не более, в интервале длин волн: 1285 - 1330 1525 - 1575	3,5 18	3,5 18	Не является определяющей	Не является определяющей
Коэффициент затухания max, дБ/км; / на длинах волн, нм	0,4 / 1310-1625	0,4 / 1310-1625	0,5 / 1310	0,5 / 1310
	0,4 / 1383	0,4 / 1383	0,3 / 1550	0,3 / 1550
	0,3 / 1550	0,3 / 1550	0,4 / 1625	0,4 / 1625
Коэффициент PMD, пс/√км	0,20	0,20	Не является определяющей	Не является определяющей

Категория G.657A обеспечивает минимальный радиус изгиба 10 мм. Остальные его свойства в большой степени напоминают категорию G.652.D со сглаженным водным пиком (рисунок 10). Это дает неплохую возможность уменьшения потерь при сочетании волокон типов G.652 и G.657.

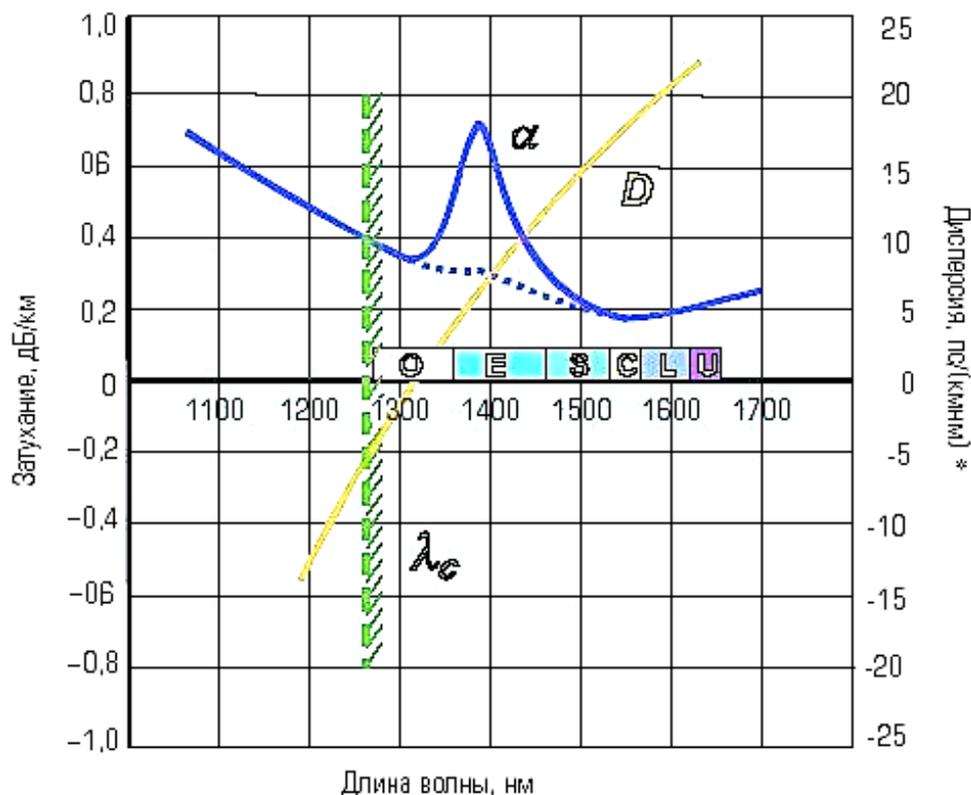


Рисунок 10 – Спектральные зависимости коэффициента затухания и коэффициента хроматической дисперсии ООВ типа G.657

Вторая категория G.657.B хоть и позволяет уменьшить минимальный радиус изгиба до 7,5 мм, но не является совместимой со стандартным одномодовым ОВ категории G.652. Данный факт очень важен для укладки ОК с небольшими радиусами изгибов при их близком размещении в кроссовом оборудовании друг к другу.

В настоящее время проходят работы по сотворению принципиально новых конструкций, которые будут сочетать в себе малые потери на изгибах и совместимость с традиционными типами одномодовых волокон [13].

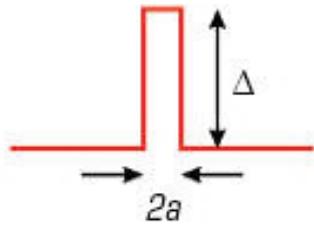
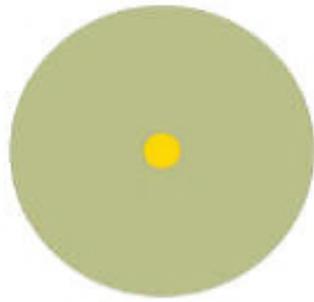
## 2.3 Потери излучения на изгибе оптического волокна

Стоит заметить, что при распространении света в ОВ применяется принцип полного внутреннего отражения лучей от границы раздела сердцевины и оболочки. Данный принцип соблюдается в полной мере, если, угол падения луча достаточно большой, то есть свет падает полого к плоскости отражения. Если радиус изгиба волокна достаточно небольшой, то нарушается угловое условие, и часть излучения проникает в оболочку, где позже и высвечивается.

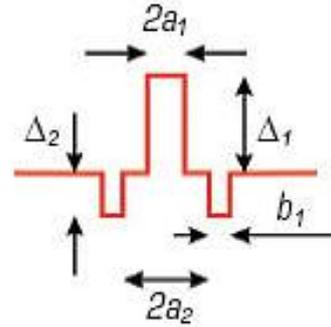
Тот же самый процесс можно объяснить используя точку зрения электродинамики, но в других терминах. Поле передающегося излучения, концентрируясь в сердцевине, частично проникает в оболочку, затухая по экспоненциальному закону. По этой причине диаметр модового поля всегда чуть больше, чем диаметр сердцевины. В месте изгиба волокна эта периферийная часть моды передается с фазовой скоростью, которая превышает скорость света в оболочке и, наконец, излучается.

Помимо этого, случаются частичные потери энергии при переходе от прямолинейного участка к изогнутому и от изгиба к прямому волокну. Это объясняется тем, что модовые пятна криволинейного и прямого участков волокна не совпадают, и часть мощности основной моды передается модам оболочки.

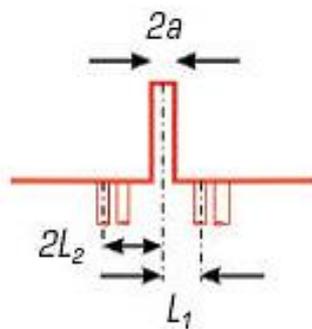
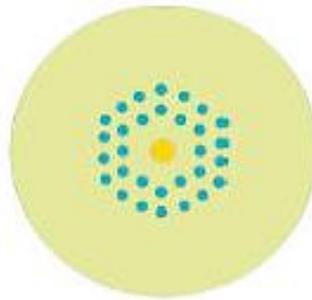
На рисунке 11 показан принцип уменьшения потерь на изгибах с помощью отражающих структур, формирующихся вокруг сердцевины [14].



а) Волокно с уменьшенным показателем преломления оболочки



б) Волокно с кольцевой траншеей в оболочке

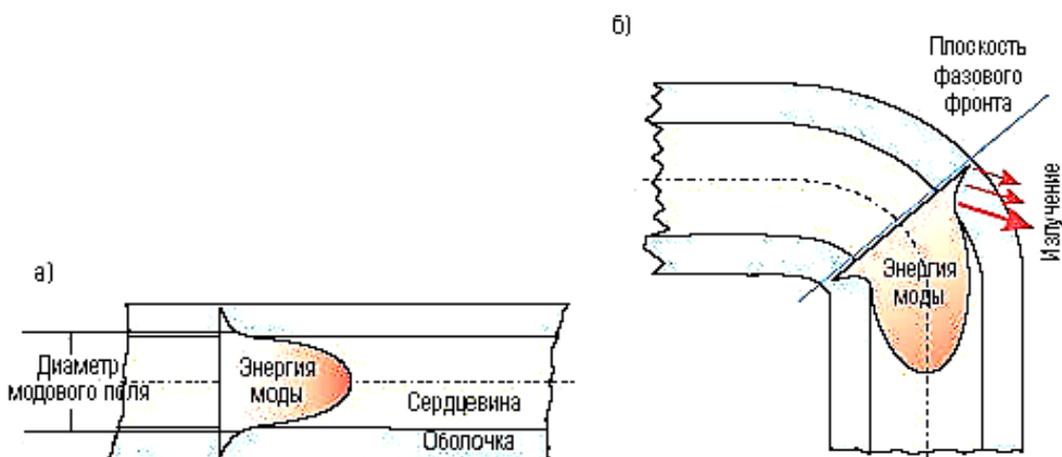


в) Микроструктурированное волокно с HAF (Holed Assisted Fiber) с уменьшенными потерями на изгибах

Рисунок 11 – Принцип уменьшения потерь на изгибах

Также следует отметить достаточно интересный момент спектральной зависимости потерь на изгибах.

Потери на изгибах с точки зрения геометрической оптики изображены на рисунке 12.

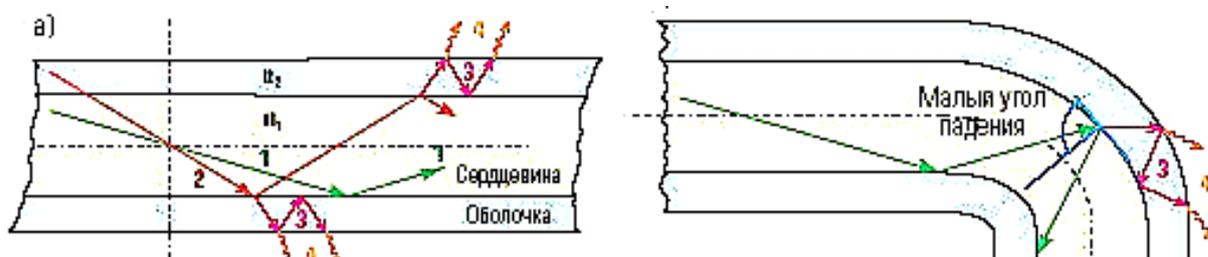


а) Полное внутреннее отражение на прямолинейном участке

б) Части излучения на изгибах из-за нарушения углового условия

Рисунок 12 – Потери на изгибах с точки зрения геометрической оптики

Потери на изгибах с точки зрения электроники изображены на рисунке 13.



а) Распространение моды в сердцевине волокна

б) Излучение части энергии моды на изгибе

Рисунок 13 – Потери на изгибах с точки зрения электроники

На практике, при исследовании специалистами компании OFS величины потерь на изгибе волокон типов G.652 и G.657A, выяснилось, что в стандартных одномодовых волокнах категории G.652 с увеличением длины волны сравнительно сильно увеличиваются вносимые потери (рисунок 14) (1 виток,  $d = 15$  мм) [15].

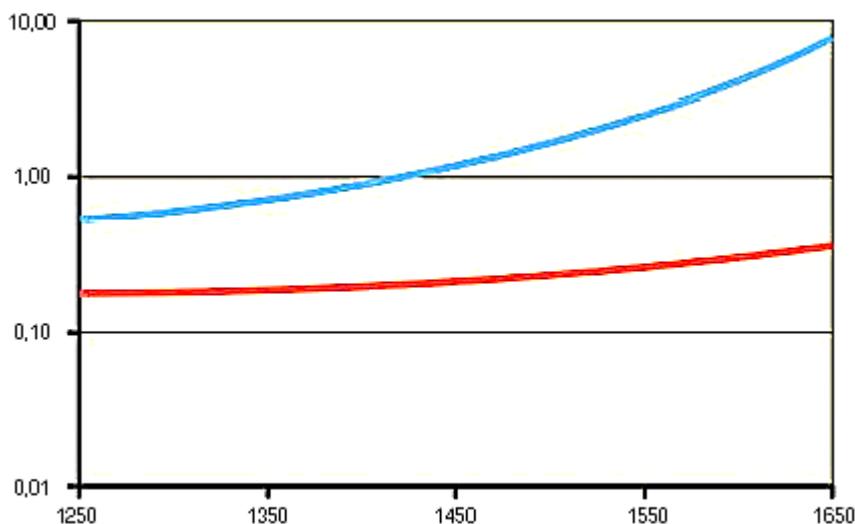


Рисунок 14 – Сравнение зависимостей вносимых потерь от длины волны на изгибе для волокон G.652 и G.657A

Исходя из этого можно сделать вывод, что чем дальше от длины волны отсечки (1260 нм) происходит излучение, тем больше оно уходит в оболочку, увеличивая при этом диаметр модового поля (рисунок 15).

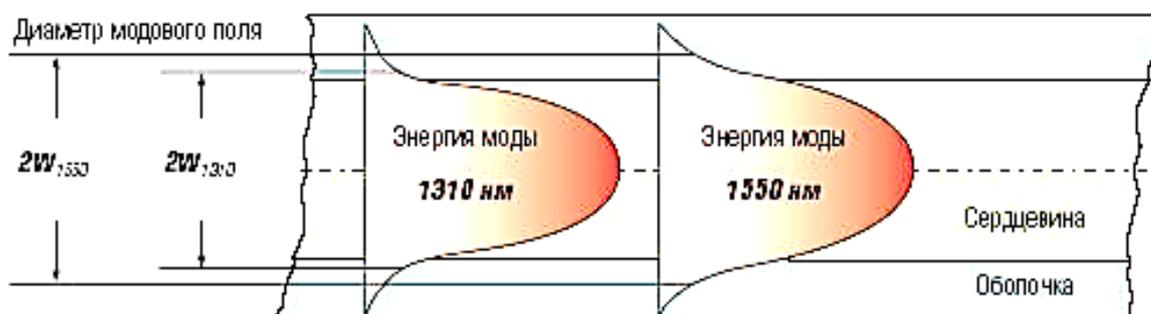


Рисунок 15 – Зависимость модового поля от длины волны

Именно по этой причине, при возникновении проблем эксплуатации ОК, связанных с вероятными деформациями волокон, их лучше тестировать на длинах волн 1550 нм и 1625 нм.

Результат исследований потерь на изгибе волокон типа G.657 показал чрезвычайно слабую зависимость от длины волны, что очень подходит, в частности, для систем со спектральным уплотнением разнообразного типа.

Анализируя качества разъемных соединений можно сделать вывод, что теоретически некоторое уменьшение диаметра модового поля и более сложный многослойный профиль волокон с уменьшенным изгибом должны были бы сделать стыковку таких волокон более сложной. Однако испытания, которые провели специалисты организации ADC, обнаружили, что важнейшие свойства и параметры разъемов такие как вносимые потери и потери на отражение, которые используют волокна рекомендации G.657, почти не отличаются от разъемов с волокнами рекомендации G.652. Это объясняет малые допуски и высокий уровень соблюдения геометрических свойств и характеристик ОВ [16].

### 3 Измерение потерь на изгибах и на соединениях в различных оптических волокнах

#### 3.1 Экспериментальный стенд

Измерения потерь в основном проводятся для оценки качества ВОЛС. В большинстве случаев потери излучения являются основным фактором, который ограничивает длину ретрансляционного участка линии связи. При применении высококачественного оборудования и соблюдении правильных технологий монтажа, полные потери в линии получаются близкими к их номинальному значению.

Для измерения потерь на изгибах использовался рефлектометр AQ7270 (рисунок 16).

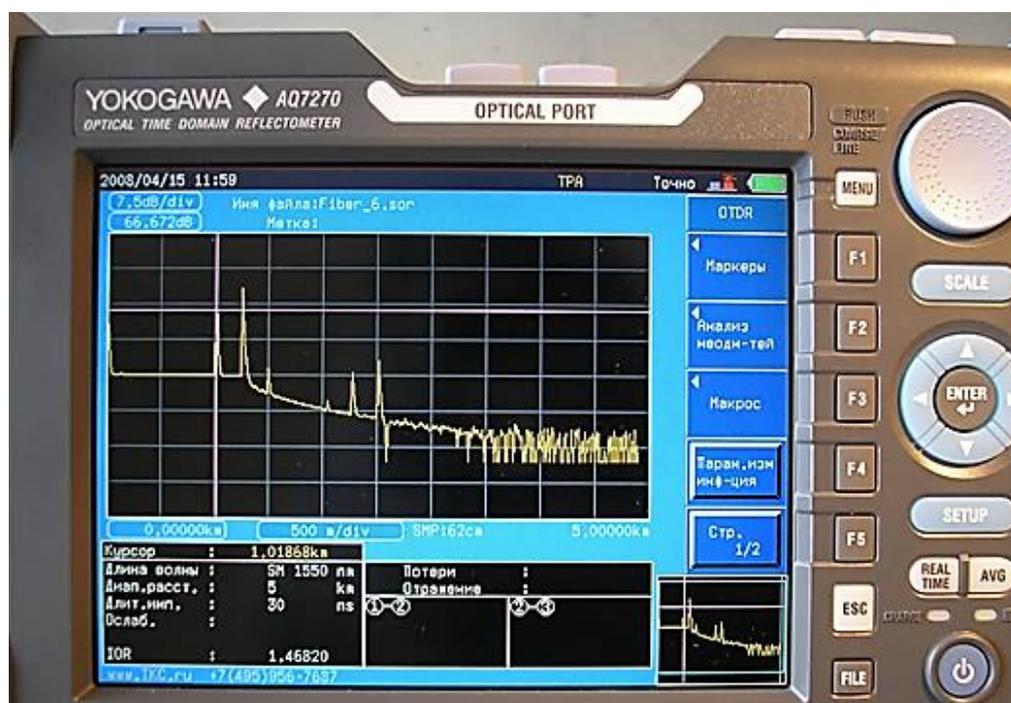


Рисунок 16 – Рефлектометр AQ7270

Компактный оптический рефлектометр в полевом исполнении AQ7270 FiberXplorer, является разработкой японской организации Yokogawa. Создан он специально для проведения измерений оптических характеристик при укладке и эксплуатации оптических линий связи FTTX, оптических сетей доступа, а также городских оптических структурированных кабельных системах. В данном приборе значительно сокращено время, требуемое для подготовки оборудования к работе, проведения измерения оптических характеристик линии связи, анализа полученных результатов и подготовки отчетов требуемых образцов. Его конструкция позволяет применять этот рефлектометр как на коротких трассах городских СКС, в оптических шкафах для проверки коммутационно-кроссового оборудования, так и для протяженных магистральных линий. На рисунке 17 представлена блок-схема экспериментального стенда.

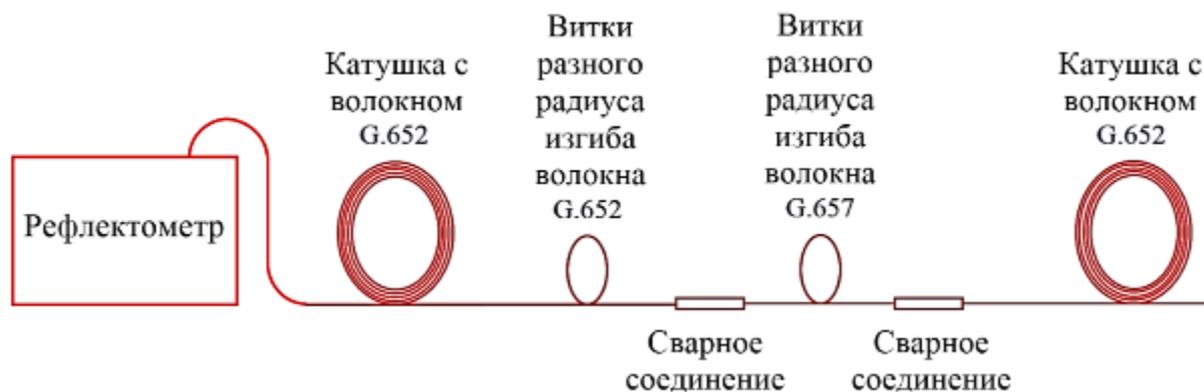


Рисунок 17 – Схема тестирования оптическим рефлектометром линии с волокнами типа G.657A и G.652

На рисунке 18 представлен непосредственно экспериментальный стенд, собранный для тестирования оптическим рефлектометром и изучения потерь на изгибах в линии. В измерениях используется рефлектометр AQ7270 и две катушки стандартного волокна G.652 с короткой вставкой волокна G.657 класса A1.



Рисунок 18 – Экспериментальный стенд для тестирования оптическим рефлектометром линии с волокнами типа G.657A и G.652

В экспериментальной части работы были использованы оптические волокна G.657.A1 фирмы Инкаб и G.652 фирмы Corning (рисунок 19).



Рисунок 19 – Оптические кабели G.657.A1 и G.652

Кабель универсальный, содержащий несколько волокон. Применяется в качестве распределительного кабеля для прокладки внутри зданий, в кабельной канализации, а также для наружной прокладки по внешним фасадам зданий. Оболочка кабеля изготавливается из полимерной композиции, не распространяющей горение, не содержащей галогенов, с низким дымовыделением.

### 3.2 Экспериментальное сравнение потерь на изгибах различных волокон

С помощью экспериментального стенда были измерены потери на изгибах волокон типов G.657A и G.652 на длинах волн 1310 нм и 1550 нм при разном количестве витков и разном радиусе изгиба на витке (таблица 3).

Таблица 3 – Сравнение потерь на изгибах в волокнах G.657.A1 и G.652

Рекомендация ITU-T	Длина волны, нм	Количество витков	Радиус изгиба, мм	Потери, дБ	Потери на одном витке, дБ
G. 657.A1	1310	10	7,5	0,35	0,035
	1550	10	7,5	3,8	0,38
	1310	20	10	0,302	0,015
	1550	20	10	0,704	0,035
	1310	20	15	0,294	0,015
	1550	20	15	0,682	0,034
G. 652	1310	1	7,5	0,312	0,312
	1550	1	7,5	1,9	1,9
	1310	3	10	0,314	0,105
	1550	3	10	0,7	0,233
	1310	10	15	0,314	0,031
	1550	10	15	0,35	0,035

На рисунке 20 представлена рефлектограмма одного из измерений волокна G.657.A1 на длине волны  $\lambda = 1550$  нм, при радиусе витка  $r = 10$  мм и количестве витков  $n = 20$ . Потери в данном измерении составили 0,035 дБ на один виток.

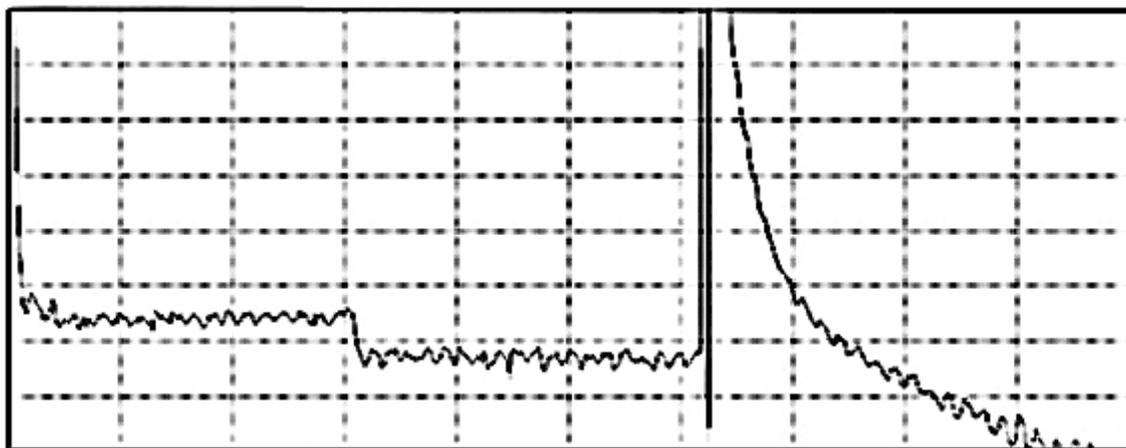


Рисунок 20 – Рефлектограмма измерений на изгибах волокна G.657.A1

На рисунке 21 представлена рефлектограмма потерь на изгибах оптического волокна G.652 на длине волны  $\lambda = 1550$  нм, при радиусе витка  $r = 10$  мм и количестве витков  $n = 3$ . Соответственно на тех же условиях волокно G.652 имело потери 0,233 дБ на один виток.

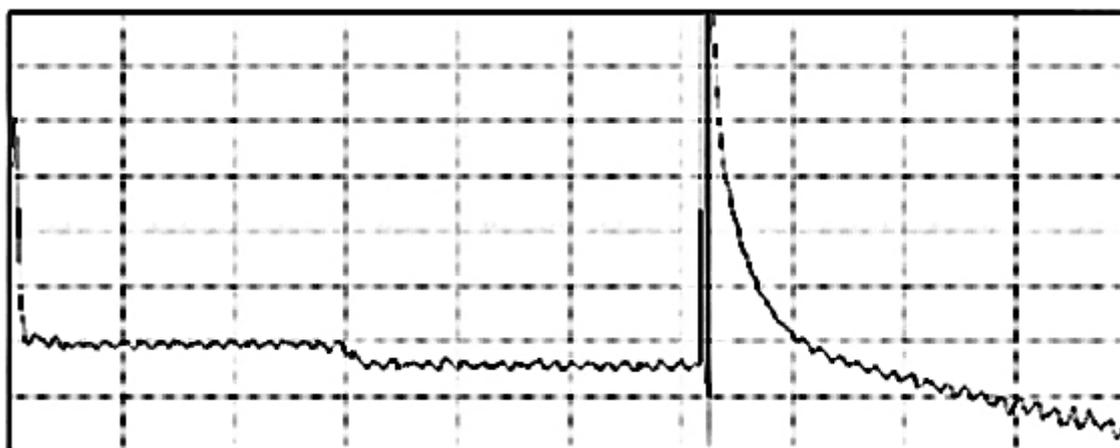


Рисунок 21 – Рефлектограмма измерений на изгибах волокна G.652

В результате проведенного сравнения потерь на изгибах на различных длинах волн, можно сделать вывод, что полученные результаты не превышают допустимые потери, приведенные в официальных рекомендациях, а оптические волокна рекомендации ITU G.657, с уменьшенной чувствительностью к изгибам, являются наиболее оптимальными для передачи в сетях FTTH. Данный тип волокон оптимально подходит для применения во внутренних помещениях, так как при прокладке в ограниченном пространстве, а также при необходимости осуществлять разнообразные ответвления оптического кабеля не будет происходить существенного ухудшения оптических характеристик волокон, а именно увеличения потерь из-за множества сильных изгибов оптического кабеля.

Также при оценке полученных результатов можно сделать вывод, что с увеличением длины волны, также увеличиваются и потери в оптических волокнах. Это объясняется тем, что на изгибах оптических волокон световая мода проникает в оболочку на порядок длины волны, соответственно, чем больше длина волны, тем больше света проникает в оболочку. Именно по этой причине и появляются потери.

## 4 Разработка учебно-методических материалов

### 4.1 Разработка презентации

На основе составленного обзора разработана презентация по возможностям оптических волокон G.657 в сетях FTTH.

В презентации представлены свойства, характеристики и возможности оптических волокон G.657, а также допустимые потери и потери полученные с помощью экспериментального стенда на изгибах волокна G.657 при разном количестве витков и разном радиусе изгиба на витке.

Обращено внимание на тенденцию к уменьшению потерь на изгибах.

На рисунке 22 показан принцип уменьшения потерь на изгибах с помощью отражающих структур, формирующихся вокруг сердцевины.



Рисунок 22 – Принцип уменьшения потерь на изгибах

На рисунке 23 представлены допустимые потери в волокнах G.657.

## Допустимые потери на изгибах в волокнах G.657

Рекомендация ИТУ-T	Радиус изгиба, м	Число витков	Длина волны, нм	Максимально допустимые потери, дБ
G.657A	10	1	1550	0,75
	15	10		0,25
G.657B	7,5	1	1550	0,5
	10	1		0,1
	15	10		0,03
«Сверх класса B»	5	1	1550	0,1 (нет стандарта)

Рисунок 23 – Допустимые потери на изгибах в волокнах G.657

На рисунке 24 показана фотография одного из экспериментов сравнения потерь в волокнах G.652 и G.657 с помощью визуального определителя повреждений волокна фирмы Fujikura.



Рисунок 24 – Свечение волокна G.652 на изгибе

Разработанная презентация предназначена для использования на лекционных и семинарских занятиях.

## 4.2 Разработка тренировочного обучающего теста

На основе программы Microsoft Office PowerPoint составлен учебно-тренировочный тест по возможностям оптических волокон G.657 в сетях FTTH, состоящий из 14 вопросов, ответов и теории. На каждый вопрос тест содержит 3 варианта ответа, один из которых правильный. Для получения зачета по данной тематике студент должен ответить на 12 и более вопросов.

На рисунке 25 представлен пример тестового вопроса.

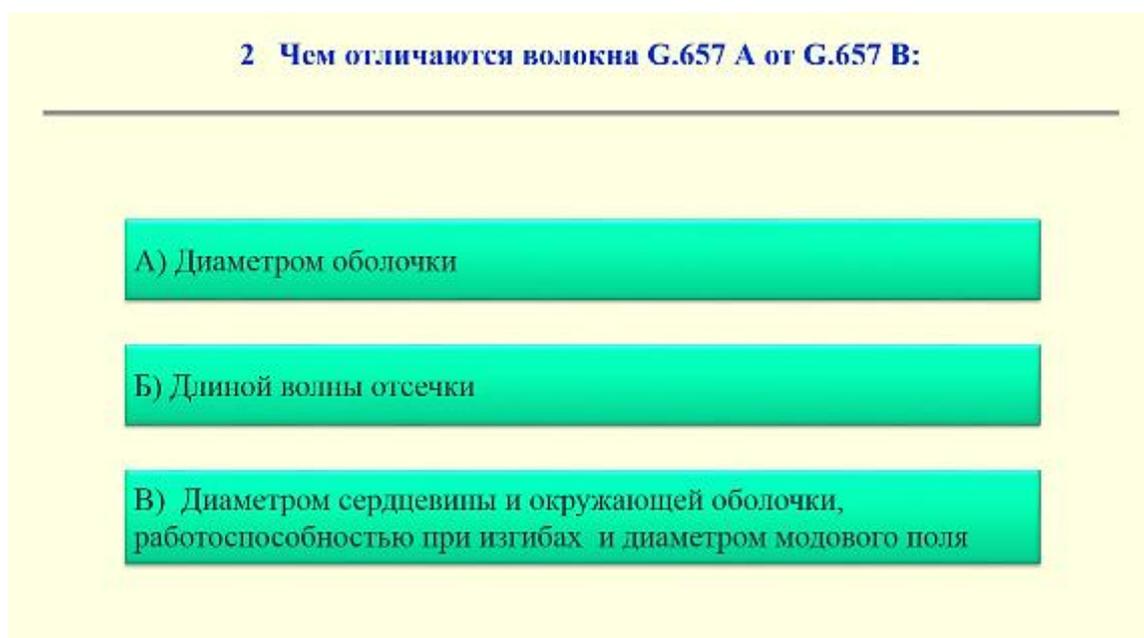


Рисунок 25 – Пример вопроса из теста

В случае правильного ответа даётся пояснение, показанное на рисунке 26.

## 2 Чем отличаются волокна G.657 А от В:

Существуют две подкатегории волокна G.657: А и В, которые **различаются диаметром сердцевины и окружающей оболочки, работоспособностью при изгибах и диаметром модового поля**. Для волокон типа G.657.A он составляет от 8.6 до 9.5 мкм, а для волокон типа G.657.B - от 6.3 до 9.5 мкм.

Волокна категории А оптимизированы для снижения потерь на макроизгибе и могут использоваться во всей сети доступа. Волокна подкатегории G.657.A2 подходят для минимального расчетного радиуса 7,5 мм. Волокна категории В оптимизированы для большего снижения помех на макроизгибе и, следовательно, могут использоваться при весьма малых значениях радиуса изгиба. Эти волокна предназначены для малых расстояний досягаемости в окопешной части сетей доступа, в особенности внутри зданий или около зданий, то есть укладка кабеля в стояках, расположенных вне зданий. Волокна подкатегории G.657.B2 подходят для минимального расчетного радиуса 7,5 мм. Волокна подкатегории G.657.B3 подходят для минимального расчетного радиуса 5 мм.



Рисунок 26 – Пояснение к правильному ответу

На рисунке 26 представлен другой пример тестового вопроса.

## 9 Почему оптические потери на изгибах в волокнах G.657 значительно меньше, чем в стандартных?

А) Из-за использования сердечника большего диаметра

Б) Из-за присутствия вокруг сердцевины отражающих структур

В) Из-за применения повышенных добавок  $\text{GeO}_2$  в сердцевину

Рисунок 26 – Пример вопроса из теста

В случае правильного ответа даётся пояснение, показанное на рисунке 27.



Рисунок 27 – Пояснение к правильному ответу

Разработанный тест предназначен для проверки и закрепления знаний по данной теме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выпускной работы состоят в следующем:

1 Проведен анализ свойств, характеристик и возможностей оптических волокон разных типов, проанализированы свойства и характеристики (диаметр светопроводящей сердцевины и оболочки, скорость передачи, оптимальная дистанция передачи данных), а также проведено их сравнение для различных волокон. В результате проведенного анализа сделан вывод, что волокна G.657 всех типов наиболее пригодны для использования в сетях FTTH. Проанализированы возможности рассматриваемых нами оптических волокон по скорости передачи информации, вследствие чего был сделан вывод, что уже в настоящее время в сетях FTTH используются скорости порядка 10 Гбит/с.

2 Изучены особенности оптических волокон рекомендации G.657 различных модификаций. С помощью данных особенностей сделан вывод, что волокна G.657 имеют широкую рабочую область длин волн от 1300 нм до 1650 нм, что обеспечивает высокую информационную пропускную способность с применением систем DWDM.

3 Проведено экспериментальное сравнение потерь на изгибах в стандартных волокнах и волокнах G.657 и G.652. Волокна G.657 с изгибами до 10 мм имеют оптимальные потери до 0,1 дБ. В волокне G.652 такие изгибы не допустимы. Проведено сравнение потерь на изгибах на различных длинах волн. Полученные результаты не превышают допустимые потери.

4 Собранный экспериментальный стенд позволяет с помощью рефлектометра проводить измерения потерь на изгибах различных оптических волокон (типа G.652 и G.657) на длинах волн 1310 нм и 1550 нм.

5 Составлены учебная методическая презентация, состоящая из 26 слайдов по теме «Возможности оптических волокон G.657 в сетях FTTH», а также тренировочный обучающий тест, содержащий 14 вопросов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Родина О. В. Волоконно-оптические линии связи. Практическое руководство. - М.: Горячая линия – Телеком, 2014. - 400 с.
- 2 Портнов Э. Л. Оптические кабели связи, их монтаж и измерения: Уч. пособие для вузов. - М.: Горячая линия – Телеком, 2012.
- 3 Андреев В. А. Направляющие системы электросвязи. Том 2 - Проектирование, строительство и техническая эксплуатация: учеб. для вузов / В. А. Андреев, А. В. Бурдин, Л. Н. Кочановский, В. Б. Попов - М.: Горячая линия - Телеком, 2010. - 424 с.
- 4 Скляров О. К. Волоконно-оптические системы связи. - СПб.: Лань, 2010, 272 С.
- 5 Портнов Э. Л. Оптические кабели связи и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи. Уч. пособие для вузов. - М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
- 6 Портнов Э. Л. Перспективы развития кабельных линий связи в третьем тысячелетии / Э. Л. Портнов // Телекоммуникации и транспорт. - 2010. -№8. - С. 4 - 6.
- 7 Дианов Е. М. Волоконная оптика: 40 лет спустя /Е.М. Дианов// Квантовая электроника - 2010. - № 1. - С.40
- 8 Глущенко А. Г. Физические основы волоконной оптики. Конспект лекций - Самара.: ГОУВПО ПГУТИ, 2012. - 144 с.
- 9 Портнов Э. Л. Принципы построения первичных сетей и оптические кабельные линии связи. Учебное пособие для вузов/ Э.Л. Портнов - М.: Горячая линия - Телеком, 2013.- 544 с.
- 10 Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи, 4-е дополненное издание/ Р. Фриман. - М.: Техносфера, 2011. - 512 с.
- 11 Иоргачев Д. В. Волоконно-оптические кабели и линии связи / Д. В. Иоргачев, О. В. Бондаренко. - М.: Эко-Трендз, 2012. - 282 с.

12 Центр дистанционного образования Дальневосточного Государственного Университета Путей Сообщения. - (Рус.). - URL: <http://edu.dvgups.ru/> [24 декабря 2017].

13 Физика твердого тела. 20 декабря 2017 // (Рус.). - URL: <http://dssp.petrstu.ru/> [27 декабря 2017].

14 Решения для операторов связи и телекоммуникаций. 29 декабря 2017 // (Рус.). - URL: <http://www.teralink.ru/> [5 января 2018].

15 D-Link Building Networks for People. February 10, 2018 (Engl.). - URL: <http://www.dlink.ru/> [19 February 2018].

16 ИЦТелеком-Сервис. Информационные технологии. Искусство интеграции. - (Рус.). - URL: <http://www.tls-group.ru/> [25 февраля 2018].