

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет

имени К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации

имени А. Буркитбаева

Кафедра «Электроника, телекоммуникации и космические технологии»

Сагимбаев Дулат Нокметжанович

Анализ и компенсация потерь при передаче информационного сигнала по  
оптоволоконным линиям связи на большое расстояние

## **ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

специальность 5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникация

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет

имени К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации

имени А. Буркитбаева

Кафедра «Электроника, телекоммуникации и космические технологии»

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**  
Заведующий кафедрой ЭТиКТ  
И. Сыргабаев  
“ \_\_\_ ” \_\_\_ 2020г

## ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: Анализ и компенсация потерь при передаче информационного сигнала по оптоволоконным линиям связи на большие расстояния

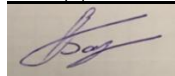
по специальности 5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникация

Выполнил

Сагимбаев Д.Н.

Рецензент

канд. техн. наук, профессор АУЭС



Байкенов А.С.

“ \_\_26\_\_ ” \_\_05\_\_ 2020г.

Научный руководитель

маг-р техн. наук



Байкенова Г.М.

“ \_\_25\_\_ ” \_\_05\_\_ 2020г.

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет

имени К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации

имени А. Буркитбаева

Кафедра «Электроника, телекоммуникации и космические технологии»

5B071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникация

**УТВЕРЖДАЮ**  
Заведующий кафедрой ЭТ и КТ  
И. Сыргабаев  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_ 2020г

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение дипломной работы**

Обучающемуся Сагимбаеву Дулату

Тема Анализ и компенсация потерь при передаче информационного сигнала по оптоволоконным линиям связи на большие расстояния

Утверждена приказом Ректора Университета № 762-б от “27” января 2020г.

Срок сдачи законченной работы “ 5 ” июня 2020г.

Исходные данные к дипломной работе: выполнить анализ передаваемых сигналов по оптоволоконным линиям связи. Принцип передачи светового сигнала по оптическому волокну. Разновидности и классификация оптических волокон. СТ РК ГОСТ Р 52266-2008 «Кабельные изделия. Кабели оптические. Общие технические условия»

Перечень подлежащих разработке в дипломной работе вопросов:

- а) Строение оптоволоконного кабеля;
- б) Принцип передачи светового сигнала по оптическому волокну;
- в) Анализ потерь при передаче сигнала по наземному оптическому кабелю;
- г) Затухание оптического волокна, определяемое потерями на поглощение;
- д) Затухание оптического волокна, определяемое потерями на рассеивание;
- е) Анализ потерь при передаче сигнала по подводному оптическому кабелю

- ж) Профиль показателя преломления сердцевины в оптическом волокне;
- з) Расчет составляющей коэффициента потерь за счет рассеяния;
- и) Расчет составляющей коэффициента потерь за счет поглощения;
- к) Расчет дополнительных потерь в оптическом волокне;
- л) Расчет суммарного затухания в кабеле;

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): Структура трансокеанического подводного кабеля. Структура подземного оптического кабеля. График потерь при передаче сигнала по оптическому кабелю. Спектр передаваемого сигнала. Окна прозрачности оптического волокна.

Рекомендуемая основная литература:

- 1) Otto Strobel Optical and microwave technologies for telecommunication networks /Sons, Ltd, 2016. – 517с
- 2) Yasuhiro Koike Fundamentals of Plastic Optical Fibers/Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2015. – 190с.
- 3) Malcolm Johnson Optical fibres, cables and systems/ Gastone Bonaventura – ITU-T Manual, 2016. – 324 с.
- 4) Sonia Boscolo Shaping Light in Nonlinear Optical Fibers/ John Wiley & Sons Ltd, 2017- 505 с.

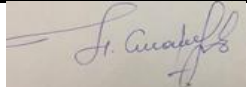
## ГРАФИК

подготовки дипломной работы


Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Принцип передачи светового сигнала по оптическому волокну	10.01.2020	выполнил
Анализ потерь в оптическом волокне	15.03.2020	выполнил
Расчет общих потерь светового сигнала в оптическом волокне	12.04.2020	выполнил

## Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу (проект) с указанием относящихся к ним разделов работы (проекта)

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтролер	Доктор PhD Смайлов Н.К.	25.05.2020	

Научный руководитель  Байкенова Г.М

Задание принял к исполнению обучающийся  Сагимбаев Д.Н.

Дата

"27" 01 2020 г.

## АННОТАЦИЯ

Дипломная работа на тему “Анализ и компенсация потерь при передаче информационного сигнала по оптоволоконным линиям связи на большие расстояния”.

Дипломная работа состоит из введения, трех глав, заключения, а также списка использованной при написании дипломной работы литературы.

Цель работы заключается в проведении анализа источников помех при передаче сигнала по оптическим линиям связи и нахождение основных методов снижения данных потерь.

Объектом дипломной работы являются оптоволоконные кабели наземной и подводной прокладки.

В целом в работе, за счет проведенного анализа, широкого перечня литературы и реализованных проектов, доказана необходимость использования предложенных вариантов для снижения потерь оптического сигнала, таких как снижение содержания примесей в сердечнике волокна, использование длин волн, соответствующих окнам прозрачности, грамотная эксплуатация, использование ретрансляторов на больших участках прокладки.

## АҢДАТПА

Дипломдық жұмыс “Ақпараттық сигналды талшықты-оптикалық байланыс желілері бойынша алыс қашықтықтарға беру кезіндегі талдау және шығындарды өтеу.”

Дипломдық жұмыс кіріспеден, үш бөлімнен, қорытындыдан, сондай-ақ дипломдық жұмысты жазу кезінде пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады.

Жұмыстың мақсаты - оптикалық байланыс желілері арқылы сигнал беру кезіндегі кедергі көздерін талдау және берілгендердің жоғалуын азайту әдістерін табу.

Дипломдық жұмыстың тақырыбы - суасты және жер оптикалық кабельдері.

Жұмыста жүргізілген анализ бен іске асқан жобалар негізінде оптикалық сигналдың жоғалуын азайту үшін ұсынылған ұсыныстарды енгізу керектігі дәлелденді. Оларға оптикалық талшықтың жүрекшесінің қоспа мөлшерін азайту, толқын ұзындығын мөлдірлік дәрежесіне байланысты қолдану, ұтымды эксплуатация, кең ауқымды төсеу жұмыстарында ретрансляторларды қолдану.

## ANNOTATION

Thesis topic is “Analysis and compensation of losses during the long distance transmission of an information signal through fiber-optic communication lines”.

Thesis consists of an introduction, three chapters, conclusion, as well as a list of literature, used in writing the thesis.

The purpose of the work is to analyze the sources of interference during signal transmission through optical communication lines and find the main methods to reduce these losses.

The object of the thesis is fiber-optic cable for land and underwater laying.

Based on an extensive list of literature, the author made recommendations for improving the efficiency of transmitting an optical signal over long distances.

In general, the work, due to the analysis of a wide list of literature and implemented projects, proved the need to use the proposed options to reduce the loss of the optical signal, such as reducing the content of impurities in the fiber core, using wavelengths corresponding to transparency windows, competent operation, and using repeaters on large areas of the gasket.



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	10
1.1 История развитие оптического волокна	11
1.2 Конструкция оптического волокна	12
1.2.1 Кабель со свободным буфером	13
1.2.2 Кабель с плотным буфером	14
1.3 Принцип распространения светового сигнала в оптическом кабеле	15
1.3.1 Распространение света в многомодовом ступенчатом волокне	17
1.3.2 Распространение света в многомодовом градиентном волокне	17
1.3.3 Распространение света в одномодовом волокне	18
1.4 Постановка задачи	19
2 Потери в оптическом волокне	20
2.1 Потери на поглощении	21
2.2 Потери на рассеянии	23
2.2.1 Рассеяние Рэлея	23
2.2.2 Вынужденное Бриллюэновское рассеяние	25
2.2.3 Вынужденное Рамановское рассеяние	27
2.3 Потери на макроизгибах	29
2.4 Потери на микроизгибах	30
2.5 Окна прозрачности оптического волокна	31
2.6 Выбор оптического волокна	32
2.6.1 Профиль показателя преломления	32
2.6.2 Условия запуска	33
2.6.3 Затухание	33
2.6.4 Пропускная способность	34
2.7 Меры по снижению потерь в оптическом кабеле	37
2.7.1 Меры по установке и эксплуатации	37
2.7.2 Воздействие ударов молний на ОК	38
2.8 Анализ подводных линий связи	39
3 Расчет общих потерь в подводном оптическом волокне	45
Заключение	46
Список использованной литературы	47

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время необходимость в передаче больших объемов данных на огромные расстояния геометрически растет за счет такого феномена, как Интернет. Активно используемые для этих целей спутниковая связь или же коаксиальные кабели ныне не дают требуемых показателей качества и скорости передачи. Спрос на большие объемы информации далеко превосходили возможности данных систем.

В промышленности росла необходимость в передаче информации с минимальным уровнем помех и большей пропускной способностью. Данные проблемы решились с появлением систем связи на основе оптического волокна, имеющего большие пропускные способности и лучшие характеристики.

Оптические линии связи имеют ряд преимуществ перед электропроводящими линиями связи. Одним из основных преимуществ является электроизоляция, которая полностью исключает взаимное влияние и уменьшает потери энергии на большие расстояния.

Но наряду с преимуществами у оптоволоконных систем связи есть свои недостатки в реализации и проектировании систем. В данной работе мы рассмотрим принцип работы передачи данных на большие расстояния с помощью оптического волокна и компенсацию возникающих при этом потерь.

Актуальность данной работы может быть обусловлена несколькими факторами. Во-первых, все приведенные источники информации обособлены друг от друга, а данная дипломная работа нацелена на объединение всех этих данных для общего анализа оптоволоконных линий связи. Во-вторых, оптическое волокно является неотъемлемой частью магистральных проводных линий связи и при проектировании таких линий связи необходимо учитывать потери и придерживаться минимальных значений на побочное излучение.

# 1 Принцип передачи светового сигнала по оптическому волокну

## 1.1 История развития оптического волокна

История развития технологии проводной передачи данных насчитывает около 100 лет, начиная с телеграфии с использованием медных проводников. Дальнейшее развитие происходило пошагово. Тупик в передаче данных через обычный медный кабель привел к возникновению коаксиального кабеля, а тот в последствии к появлению кругового волновода. Технологии телекоммуникаций развивались благодаря различным проблемам и ограничениям существующих типов связи и их последующее решение. В последствии, величайшим скачком проводной передачи данных является развитие оптического волокна, которое имеет наибольший потенциал для будущего телекоммуникации.

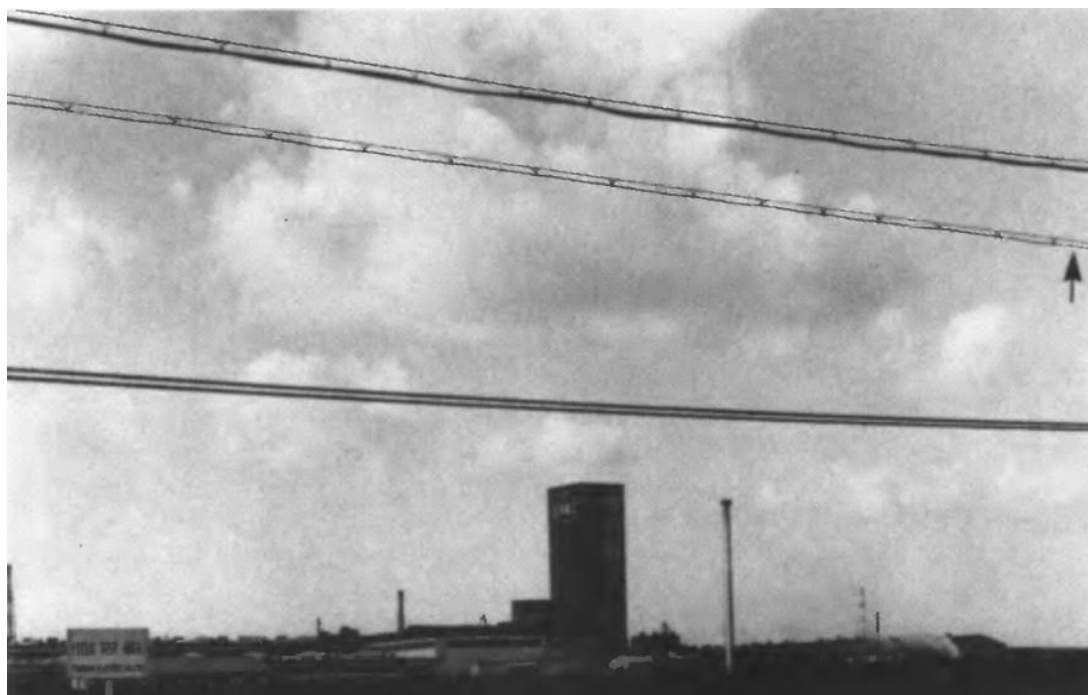


Рисунок 1.1 - Оптический кабель Furakawa Electric Company

В первые волокно в качестве кабеля было экспериментально уложено в поле в 1974 году. На рисунке 1.1 и рисунке 1.2 показан установленный оптический кабель, принадлежавший компании Furakawa Electric Company. Подобные испытания в последующем были проведены по всему миру. Параллельно с испытаниями, в небольших масштабах началась установка волоконно-оптических кабелей для коммерческого использования. Крупномасштабная установка началась в 1981 году.

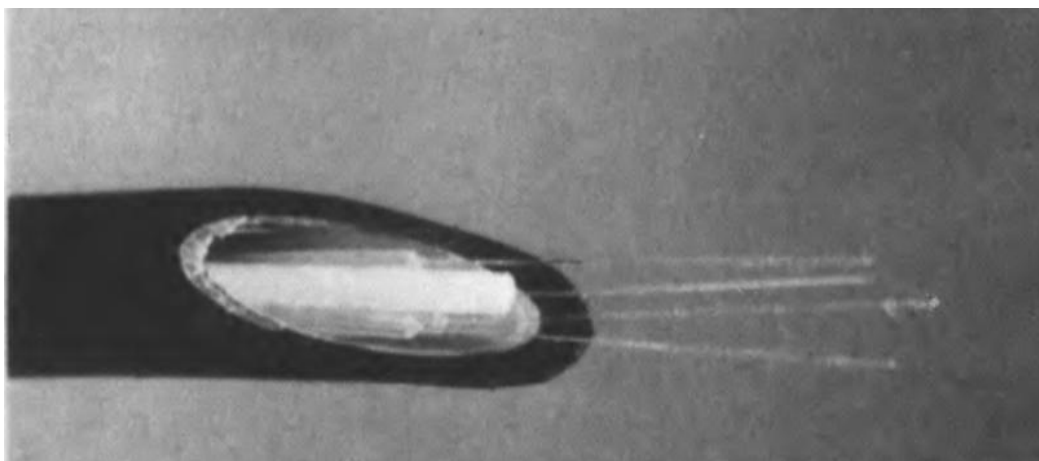


Рисунок 1.2 – Кабель компании FEC в разрезе

Данное событие можно считать отправной точкой в развитии оптоволоконных линий связи.

## 1.2 Конструкция оптического волокна

Основное назначение волоконно-оптического кабеля – защитить волоконную жилу внутри кабеля, по которой передается световой сигнал. На следующем рисунке показана структура волоконно-оптического кабеля.

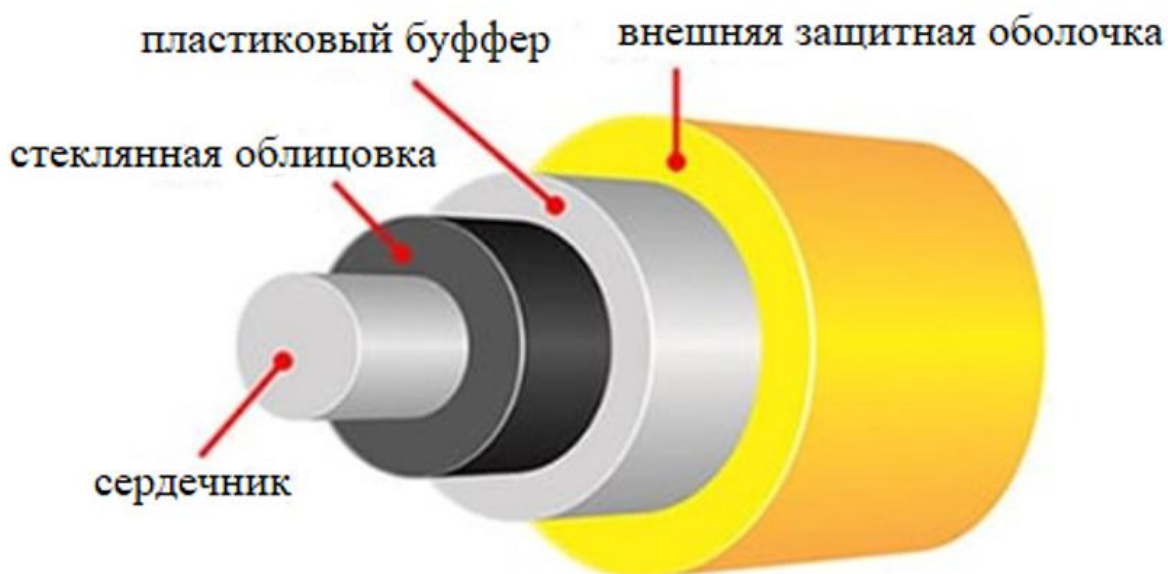


Рисунок 1.3 - Структура оптического кабеля

Вообще удобное и простое описание оптоволокна состоит в том, что волновод является волноводом, если направляющий носитель окружен носителем с более низким показателем преломления [1].

Оптоволоконный сердечник изготовлен из кварцевого стекла и является центральной частью оптоволоконного кабеля, по которому проходит световой сигнал. Сердечник имеет размер очень малый размер в диаметре.

Стеклопанная облицовка также изготовлена из стекла и представляет собой слой, который окружает сердцевину волокна. Вместе они образуют единое твердое волокно из стекла, которое используется для передачи света.

После облицовки имеется первичное покрытие, известное как первичный буфер. Этот слой обеспечивает защиту сердечника и оболочки волокна, он сделан из пластика и обеспечивает только механическую защиту. Данная оболочка не мешает светопропусканию сердечника и оболочки.

Следующий слой представляет из себя сплетенные нити из арамидной пряжки или более известной как кевлар. Данный слой позволяет предотвратить поломку оптоволоконного кабеля во время установки и эксплуатации. Когда волокно протягивается на местности, на них ложится растягивающая нагрузка. Силовые элементы предотвращают это, поскольку материал рассчитан на определенную нагрузку.

Чтобы обеспечить защиту оптического волокна от механических повреждений и влаги предусмотрено использование защитных оболочек. На основе плотного буферного волокна 900мкм и волокна с покрытием 250мкм существуют два основных типа волоконно-оптических кабельных конструкций – кабель с плотным буфером и кабель со свободным буфером [1].

### **1.2.1 Кабель со свободным буфером**

Внутренний диаметр свободного буфера намного больше, чем наружный диаметр оптического волокна. Два главных преимущества этой конструкции – идеальная изоляция волокна от механических воздействий (в заданном диапазоне) и защита от влаги. Первое преимущество связано с механической мертвой зоной. Усилие, воздействующее на буфер, не влияет на волокно, пока усилие не станет достаточно большим, чтобы выпрямить волокно внутри буфера.

Свободный буфер может быть легко заполнен водоизолирующим гелем, что обеспечивает его второе преимущество. Кроме того, свободный буфер может вместить несколько волокон, тем самым снижая стоимость кабеля. С другой стороны, этот тип кабеля не может быть установлен по вертикали, и его подготовка к соединению (сращивание и заделка) является трудоемкой. Следовательно, кабель свободного типа используется в основном в наружных установках, поскольку обеспечивает стабильную и надежную передачу в широком диапазоне температур, механических нагрузок и других условий окружающей среды.

Свободная структура трубки изолирует волокна от структуры кабеля. Это является большим преимуществом в борьбе с тепловыми и другими напряжениями, возникающими на открытом воздухе, поэтому большинство волоконно-оптических кабелей с незакрепленными трубами предназначены для

наружного применения. Одним из таких кабелей является ADSS кабель – специальный свободный кабель.

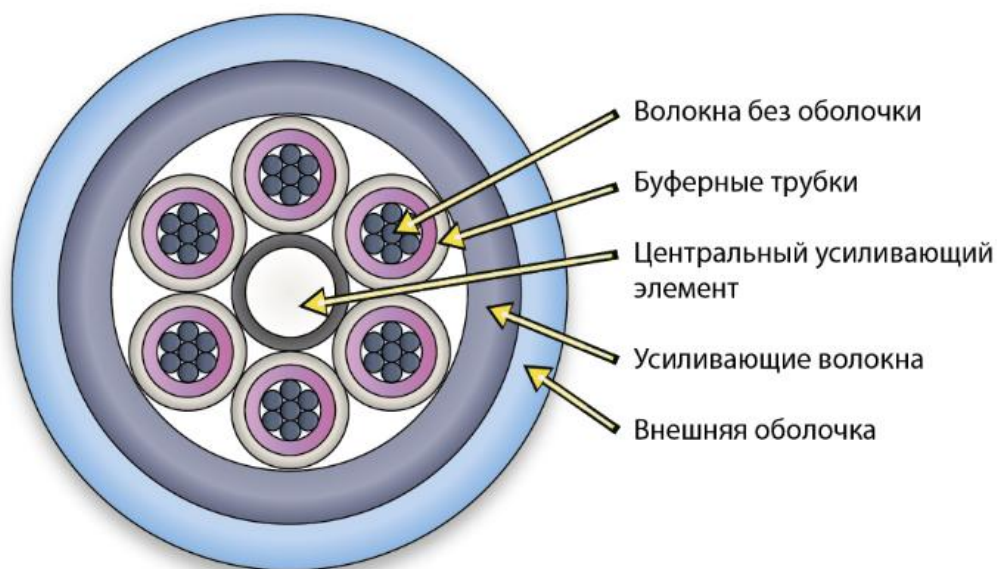


Рисунок 1.4 - Структура кабеля со свободным буфером

Элементы в кабеле со свободным буфером:

1 множественные голые волокна с покрытием 250мкм (в свободной трубке);

2 свободные буферные трубки, которые прядут вокруг центрального силового элемента;

3 водоизолирующий гель в каждой свободной трубке для блокировки поступления влаги и защиты волокон;

4 центральный силовой элемент;

5 наружная оболочка (полиэтилен наиболее распространен для наружных кабелей из-за его влагостойкости, износостойкости и стабильности в широком диапазоне температур).

### 1.2.2 Кабель с плотным буфером

Внутренний диаметр плотного буфера равен диаметру покрытия волокна, как показано на рисунке 1.5. Его основным преимуществом является способность сохранять работоспособность кабеля, несмотря на разрыв волокна.

Поскольку буфер надежно удерживает волокно, небольшое разделение концов волокна не будет полностью прерывать обслуживание, хотя и определенно ухудшит качество сигнала [1].

Вот почему военные были первым клиентом и до сих пор являются крупнейшим для этого типа волоконно-оптического кабеля. Буфер является

грубым, что позволяет уменьшить радиус изгиба. Поскольку каждый буфер содержит только одно волокно и гель для удаления отсутствует, этот кабель легко подготовить для подключения. Кабели, имеющие жесткий буфер, могут быть установлены вертикально, что является большим преимуществом на фоне кабелей со свободным буфером. В общем, жесткие буферные кабели более чувствительны к температуре, механическим воздействиям и воздействию воды, чем свободные буферные кабели: следовательно, они рекомендуются в основном для внутреннего применения. С другой стороны, жесткие буферные кабели, предназначенные для специальных применений являются самыми прочными доступными кабелями.



Рисунок 1.5 - Структура кабеля с плотным буфером

Элементы в плотном буферном кабеле:

- 1 несколько плотных буферных волокон, скрученных вокруг центрального силового элемента;
- 2 центральный силовой элемент (в центре кабеля);
- 3 наружная оболочка;
- 4 сердечник;
- 5 оболочка сердечника.

### 1.3 Принцип распространения светового сигнала в оптическом кабеле

В основе функционирования оптических волоконных сетей лежит принцип распространения световых волн по оптическим световодам на большие расстояния. При этом электрические сигналы, несущие информацию, преобразуются в световые импульсы, которые с минимальными искажениями

передаются по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС). Большое распространение подобные системы получили благодаря целому ряду достоинств, которые есть у ВОЛС по сравнению с системами передачи, использующими медные кабели или радиозфир в качестве среды передачи.

Такая полоса дает возможность передавать потоки информации в несколько терабит в секунду. Важными преимуществами ВОЛС являются такие факторы, как малое затухание сигналов, позволяющее, при использовании современных технологий, строить участки оптических систем в сто и более километров без ретрансляции, высокая помехозащищенность, связанная с малой восприимчивостью оптического волокна к электромагнитным помехам, и многие другие.

Основная часть стекловолокна состоит из сердцевины и оболочки. Материалом сердцевине служит сверхчистое кварцевое стекло, которое и является основной средой передачи оптических сигналов. Удержание светового импульса происходит вследствие того, что коэффициент преломления материала сердцевины больше чем у оболочки. Таким образом, при оптимально подобранном соотношении коэффициентов преломления материалов происходит полное отражение светового луча внутрь сердцевины. Более подробно конструкции волокон различных типов и их основные конструктивные характеристики показаны ниже.

Максимальный угол проникновения светового импульса в сердечник волокна  $\alpha_0$  называется угловой апертурой оптического волокна. Синус угловой апертуры называется числовой апертурой NA и рассчитывается по формуле:

$$N_A = \sin(\alpha_0) = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (1)$$

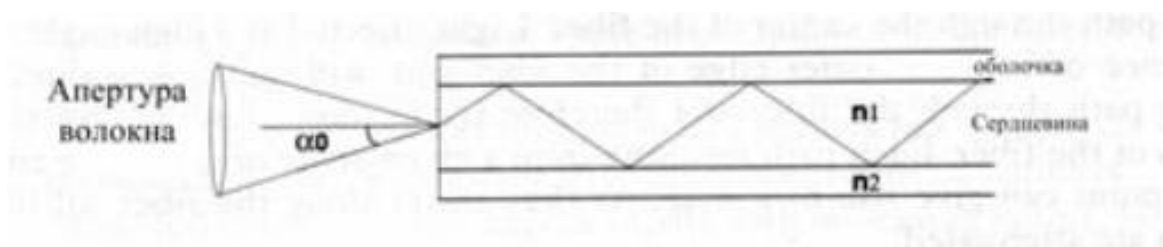


Рисунок 1.6 - Распространение света в волокне

Что касается распространения оптических волн в колонках, поляризация является фундаментальным вопросом. Строго говоря, термин “одномодовое волокно” не является правильным. В данном волокне содержатся две основные моды с вертикальной поляризацией друг к другу [1].



### 1.3.1 Распространение света в многомодовом ступенчатом волокне

Основное различие между вариантами оптического волокна состоит в свойствах применяемого в них сердечника. Самый простой вариант сердечника - это кварцевое стекло с равномерной плотностью. Если отобразить плотности распределения слоев волокна, то получится ступенчатая картина, что и отображено в названии этого типа волокна. При достаточно большом радиусе равномерно плотного световода наблюдается эффект межмодовой дисперсии. Ее влияние на производительность оптического канала оказывается много больше межчастотной и материальной. Поэтому при расчете пропускной способности канала пользуются именно ее показателями.

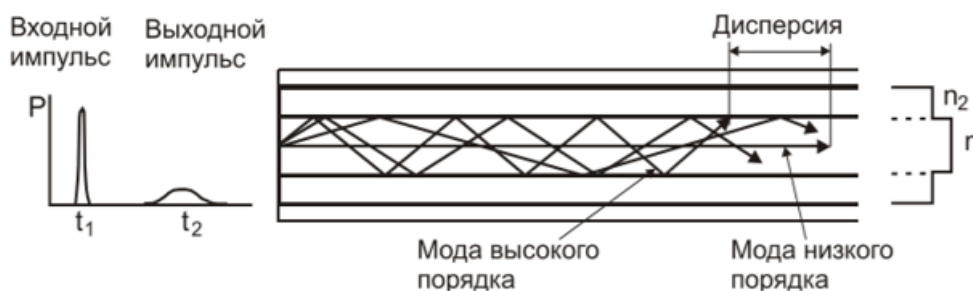


Рисунок 1.7 - Многомодовое ступенчатое волокно

В настоящее время используют три стандартных диаметра сердечника многомодового волокна: 100 микрон, 62.5 микрон и 50 микрон. Наиболее распространены световоды диаметром 62.5 микрон, однако постепенно все более прочные позиции завоевывает сердечник 50 микрон. Вследствие простых геометрических законов распространения света несложно убедиться в его большей пропускной способности, поскольку он пропускает меньшее количество мод, тем самым уменьшая дисперсию импульса на выходе. Размер световодов выбран не случайно. Он непосредственно связан с используемой частотой световой волны. На данный момент выделяют три основных длины волны: 850 нм, 1300 нм и 1500 нм.

### 1.3.2 Распространение света в многомодовом градиентном волокне

Основное отличие градиентного волокна от ступенчатого заключается в неравномерной плотности материала световода. Если отобразить плотности распределение на графике, то получится параболическая картина. Эффект межмодовой дисперсии, как и в случае ступенчатой схемы, все же проявляется, однако намного меньше. Это легко объяснимо с точки зрения геометрии. Более того интересен тот факт, что лучи проходящие дальше от оси световода хотя и преодолевают большие расстояния, но при этом имеют большие скорости, так как плотность материала от центра к внешнему радиусу уменьшается. А световая волна распространяется тем быстрее, чем меньше плотность среды.

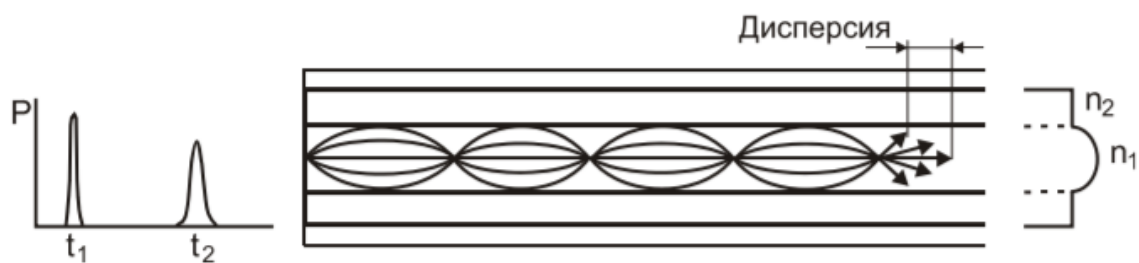


Рисунок 1.8 - Многомодовое градиентное волокно

В итоге более длинные траектории компенсируются большей скоростью. При удачно сбалансированном распределении плотности стекла возможно свести к минимуму разницу во времени распространения, за счет этого межмодовая дисперсия градиентного волокна намного меньше. Как и в случае со ступенчатым волокном, в настоящее время используют три стандартных диаметра градиентного сердечника: 100 микрон, 62.5 микрон и 50 микрон, работающих также на частотах 850 нм, 1300 нм и 1500 нм. Однако насколько не были бы сбалансированы градиентные многомодовые волокна, их пропускная способность не сравнится с одномодовыми технологиями.

### 1.3.3 Распространение света в одномодовом волокне

Согласно законам физики, при достаточно малом диаметре волокна и соответствующей длине волны через световод будет распространяться единственный луч. Вообще сам факт подбора диаметра сердечника под одномодовый режим распространения сигнала говорит о частности каждого отдельного варианта конструкции световода. Т.е. при употреблении понятий много- и одномодовости следует понимать характеристики волокна относительно конкретной частоты используемой волны.

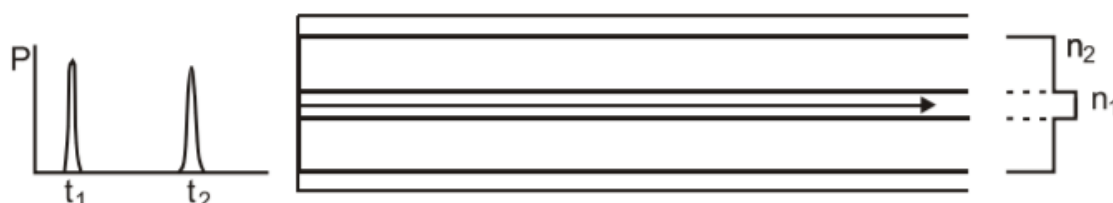


Рисунок 1.9 - Одномодовое оптическое волокно

## **1.4 Постановка задачи**

Моя дипломная работа посвящена анализу потерь при передаче информационного сигнала по оптоволоконным линиям связи, который позволяет планировать более эффективные линии связи с учетом всех нюансов, описанных в данной работе.

В работе будут предоставлены необходимые рекомендации по снижению всех основных потерь сигнала, при передаче его по ОК и методы их реализации с использованием оборудования, лидирующих в данной отрасли, компаний. Для этого надо решить следующие задачи: изучение строения оптического волокна и принципа распространения света по нему, анализ собственных и дополнительных потерь в оптическом волокне, анализ потерь при рэлеевском, бриллюэновском и рамановском рассеянии, анализ потерь на макро и микроизгибах, изучение основных характеристик оптического волокна, расчет общих потерь при передаче сигнала по оптоволокну.

## 2 Потери в оптическом волокне

Потери светового сигнала при передаче его по оптическому волокну иллюстрирует количество света, потерянного между входом и выходом. Общее затухание сигнала – это сумма всех потерь [2].

В оптическом волокне большую часть потерь составляют собственные потери (96% составляет Рэлеевское рассеивание).

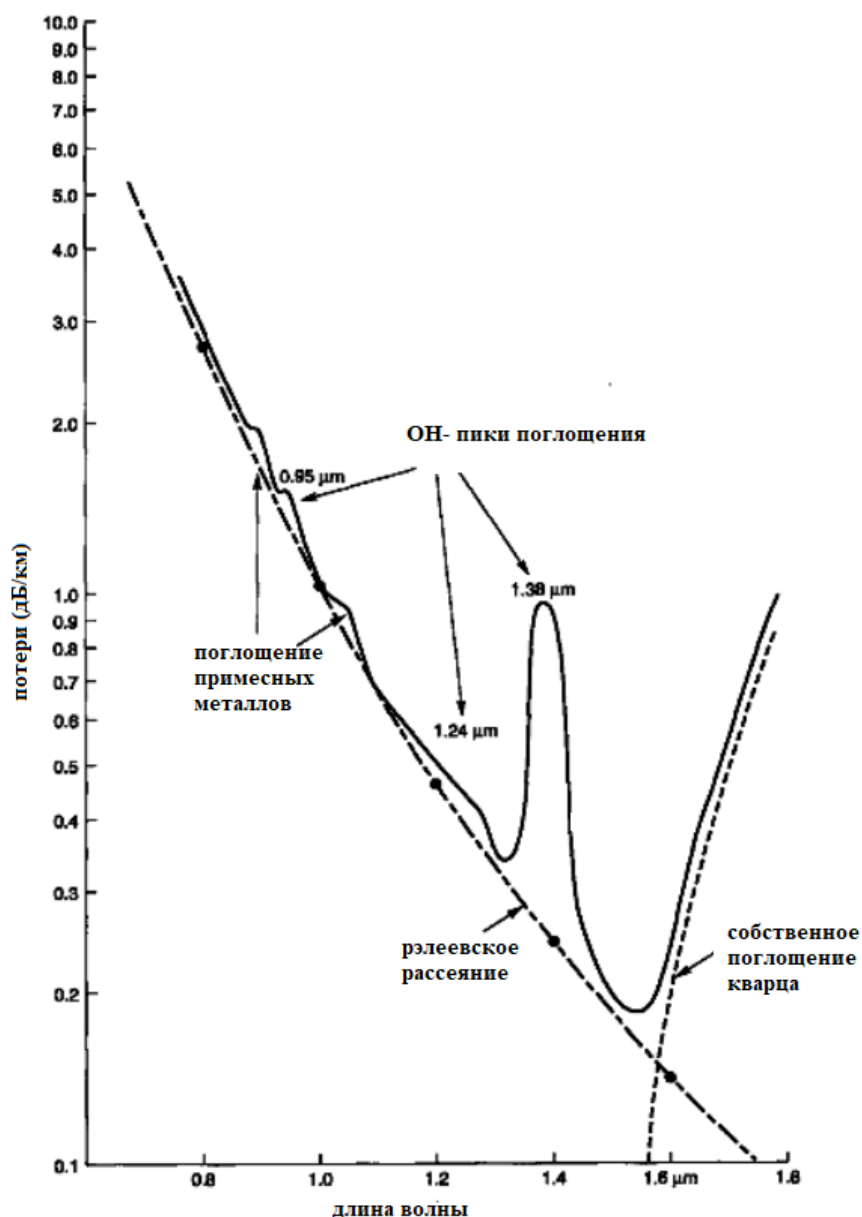


Рисунок 2.1 – Затухание в оптическом волокне

На рисунке 2.1 показан график различных видов потерь при передаче сигнала по кварцевому оптическому волокну. Из рисунка видно, что

распространение сигнала по такому волокну на практике невозможно при длинах волн равных 0,95 мкм, 1,24 мкм, 1,38 мкм, так как это обусловлено  $\text{OH}^-$  ионами содержащимися в оптическом волокне. Также можно заметить ограничение по длине волны, минимальная длина волны, используемая в оптоволокне, составляет примерно 0,8 мкм, это обусловлено рассеянием Рэлея, так как потери при меньших длинах волн значительны.

## 2.1 Потери на поглощении

Потери на поглощение состоят из собственного поглощения и поглощения из-за присутствия в материале ионов металлов переходной группы (таблица 2.1). Одинаковое количество одного и того же материала всегда поглощает одну и ту же долю света на одной и той же длине волны. То есть, если у нас есть два блока стекла одного типа и плотности, каждый толщиной 1 сантиметр, оба будут поглощать идентичную долю световой энергии, проходящей через них [2].

Поглощение является кумулятивным, в следствие этого оно зависит от всего объема материала, через который проходит свет. Если поглощение составляет 1% на сантиметр, оно поглощает 1% света в первом сантиметре и 1% оставшегося света в следующем сантиметре.

Собственное поглощение вызвано обусловлено взаимодействием распространяющейся световой волны с еще одним важным компонентом стекла, составляющим материальный состав волокна. Эти потери являются минимальным порогом, который может быть преодолен только изменением материала волокна [2].

Примером такого воздействия является инфракрасная полоса поглощения  $\text{SiO}_2$ , показанная на рисунке выше. Однако в областях длин волн, представляющих интерес для оптической связи (0,8-0,9 мкм и 1,2-1,5 мкм), пики поглощения инфракрасного излучения вносят незначительный вклад.

Абсорбция ионов примесей обусловлена присутствием незначительного количества ионов металлов (таких как  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ) и  $\text{OH}^-$  ионов из воды, растворенных в стекле. Затухание от этих примесных ионов показано в таблице 2.1.

Из приведенной таблицы видно, что 1 промилле  $\text{Fe}^{2+}$  привела бы к потере 0.15 дБ/км при длине волны 0.4 мкм. Это свидетельствует о необходимости использования сверхчистых материалов. К счастью, потери, вызванные ионами металлов, могут быть снижены до предельно низких уровней путем рафинирования смеси стекла до уровня примесей ниже 1 части на миллиард.

Ионы  $\text{OH}^-$  из водяного пара в стекле приводит к пикам поглощения в 0.72 мкм, 0.88 мкм, 0.95 мкм, 1.33 мкм, 1.24 мкм и 1.38 мкм. Широкие пики в 1.24 мкм и 1.38 мкм на рисунке 2.2 обусловлены  $\text{OH}^-$  ионом. Хорошей новостью является

то, что ОН-ионная полоса поглощения достаточно узкая, чтобы сверхчистые волокна могли достичь потерь более 0.2 дБ/км при 1.55 мкм.

Таблица 2.1 – Степень поглощения ионами примесей

Ион примеси	Потеря из-за 1промилле примесей (дБ/км)	Пик поглощения (мкм)
Fe <sup>2+</sup>	0.68	1.1
Fe <sup>2+</sup>	0.15	0.4
Cu <sup>2+</sup>	1.1	0.85
Cr <sup>3+</sup>	1.6	0.625
V <sup>4+</sup>	2.7	0.725
ОН <sup>-</sup>	1.0	0.95
ОН <sup>-</sup>	2.0	1.24
ОН <sup>-</sup>	4.0	1.38

С помощью новых технологий производства мы можем снизить содержание ионов ОН до уровня ниже 1 части на миллиард. Результатом являются волокна со сверхнизкими потерями, которые имеют более широкое окно с низкими потерями. Это улучшение позволяет использовать технологию WDM в волоконно-оптических сетях, что значительно увеличивает пропускную способность волоконно-оптических систем.

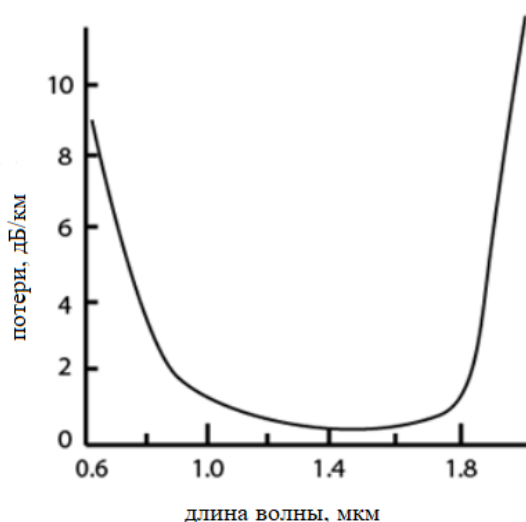


Рисунок 2.2 – Потери на волокнах со сверхнизким содержанием примесей

Так же важным является проблема с водородным эффектом на оптическое волокно. Когда плавленное кварцевое стекло подвергается воздействию газа водорода, затухание волокна также увеличивается. Водород способен взаимодействовать со стеклом непосредственно, в процессе этого образуются гидроксильные ионы, которые в последующем вносят свои потери. Водород

также может проникать в волокно и производить собственные потери около 1,2 и 1,6 мкм.

Волокна могут вступать в контакт с водородом, который образуется в результате коррозии элементом стального кабеля или воздействия определенных бактерий. Способом решения данной проблемы является покрытие волокна оболочкой, непроницаемой для водорода.

От потерь на поглощении невозможно полностью избавиться, так как, в первую очередь, это связано с содержанием примесей в материале сердечника оптического кабеля. Для снижения данных потерь необходимо снизить количество примесей в составе волокна до минимальных значений. Также при изготовлении волокна необходимо выбирать такой материал, который обладает минимальным собственным поглощением, обусловленным строением кристаллической решетки и ее поведением при разных допустимых условиях.

## **2.2 Потери на рассеянии**

Потери на рассеянии возникают, когда волна взаимодействует с частицей таким образом, что она передает энергию направленной вдоль распространения волны в другие направления. Свет не поглощается, а перераспределяется по другим направлениям [2].

Существует два основных типа рассеяния: линейное рассеяние и нелинейное рассеяние.

Для линейного рассеяния мощность пропорциональна мощности падающей волны. При это происходит частичное изменение потока энергии. Такое рассеяние характеризуется отсутствием изменения частоты в рассеянной волне.

С другой стороны, нелинейное рассеяние сопровождается частотным сдвигом рассеянного света.

### **2.2.1 Рассеяние Рэлея**

Рассеяние Рэлея является основным типом линейного рассеяния. Это вызвано мелкомасштабными (малыми по сравнению с длиной волны световых волн) неоднородностями, которые возникают в процессе изготовления волокна. Примерами неоднородностей являются флуктуации состава стекла (что приводит к незначительному изменению показателя преломления) и флуктуации плотности (фундаментальные и необъяснимые) [3].

Рэлеевское рассеяние составляет около 96% затухания в оптическом волокне.

Поскольку свет распространяется в ядре, он взаимодействует с молекулами кварцевого стекла в ядре (рисунок 2.2). Эти упругие столкновения между световой волной и молекулами кварца приводят к Рэлеевскому рассеянию. Если рассеянный свет распространяется с углом, необходимым для дальнейшего движения вдоль распространения основной изначальной волны, ослабления не происходит. Если свет рассеивается под углом, под которым дальнейшее движение невозможно, свет отклоняется от сердечника и происходит ослабление. В зависимости от угла падения, некоторая часть света продолжает распространение, а другая часть отклоняется от пути распространения и выходит из сердцевины волокна. Некоторый рассеянный свет отражается обратно к источнику света. Это свойство используется в OTDR (оптическом рефлектометре во временной области) для тестирования волокон.

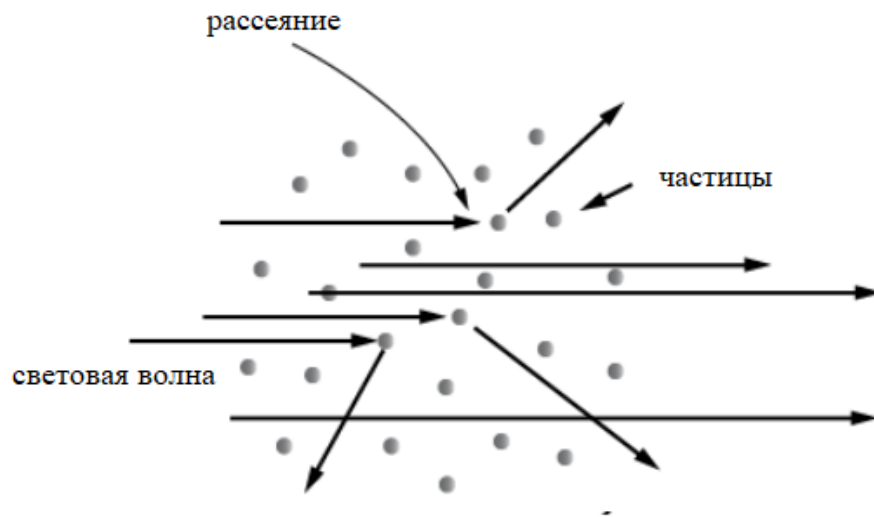


Рисунок 2.3 - Рэлеевское рассеяние

Рэлеевское рассеяние описывает упругое рассеяние света частицами, которые намного меньше длины волны света. Интенсивность рассеянного излучения определяется из формулы:

$$I = I_0 \left( \frac{1 + \cos^2 \theta}{2R^2} \right) \left( \frac{2}{\lambda} \pi \right)^4 \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left( \frac{d}{2} \right)^6, \quad (2.1)$$

- где R – расстояние между частицей и наблюдателем;
- $\theta$  – угол рассеяния;
- n – показатель преломления частицы;
- d – диаметр частицы.

Размер рассеивающей частицы параметризуется отношением  $x$ , ее характерного размера  $r$  и длины волны  $\lambda$ :



$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (2.2)$$

Рэлеевское рассеяние можно определить, как рассеяние в режиме параметра малого размера  $x \ll 1$ . Рассеяние на более крупных частицах объясняется рассеянием света сферической частицей для произвольного размера  $x$ . При малых  $x$  теория Ми сводится к приближению Рэля.

Из приведенного выше уравнения видно, что рэлеевское рассеяние сильно зависит от размера частицы и длины волны. Интенсивность рассеянного излучения Рэля быстро возрастает с увеличением отношения размера частиц к длине волны. Кроме того, интенсивность рассеянного излучения Рэля одинакова в прямом и обратном направлениях. Модель рэлеевского рассеяния разрушается, когда размер частиц становится больше, чем около 10% длины волны падающего излучения.

Рэлеевское рассеяние зависит не от конкретного типа материала, а от размера частиц относительно длины волны света. Потери из-за рассеяния Рэля пропорциональны  $\lambda^{-4}$  и, очевидно, быстро уменьшаются с увеличением длины волны [3].

Короткие волны рассеиваются больше длинных волн. Любая длина волны ниже 800 нм не подходит для оптической связи, потому что затухание из-за рассеяния Рэля слишком велико.

Использование рабочих длин волн для оптоволоконных линий связи на основе кварцевого стекла, обусловлены рэлеевским рассеянием на коротких и длинах волн и свойство поглощения материала (инфракрасного поглощения) кварцем ( $\text{SiO}_2$ ) на длинных волнах.

Рэлеевское рассеяние является основным источником затухания в оптическом волокне. В данном случае не идет привязка к определенному типу материала, из которого изготовлен сердечник оптического кабеля. Во-первых, во избежание высоких потерь на рэлеевском рассеянии, необходимо использовать длины волны намного превышающих пороговые значения, так как большая часть рэлеевского рассеяния происходит на коротких волнах. Стоит использовать волны из второго и третьего окна прозрачности, о которых мы поговорим позже. Во-вторых, стоит тщательно контролировать процесс производства оптического волокна, во избежание дефектов, различных частиц внутри волокна. Так как световой луч взаимодействует с молекулами кварцевого стекла, полностью избежать рэлеевского рассеяния невозможно, поэтому стоит придерживаться вышеуказанных правил и строго соблюдать технику эксплуатации при транспортировке и непосредственной установке оптоволоконка.

### 2.2.2 Вынужденное Бриллюэновское рассеяние

Вынужденное Бриллюэновское рассеяние обусловлено нелинейностью среды. В оптическом волокне данное рассеяние проявляется как модуляция света

в материале. В следствии чего, как было сказано ранее, происходит изменение частоты рассеянной волны [4].

Падающий фотон после рассеяния может преобразоваться в фотон с несколько меньшей энергией, который имеет преимущественно обратное направление.

При вынужденном рассеянии Бриллюэна (SBS) интенсивный пучок может взаимодействовать с акустической волной в среде, что приводит к слабому отраженному пучку. Отраженный луч, обычно называемый стоксовой волной, и исходный луч могут затем создавать помехи для усиления акустической волны. Этот процесс может начинаться с теплового шума и является самостимулирующим, благодаря положительной обратной связи. SBS может привести к отражению значительной части исходной волны на высоких уровнях мощности [4].

На примере оптического кабеля длиной 10 метров, посмотрим на разницу исходной волны и рассеянной обратной волны (рисунок 2.4).

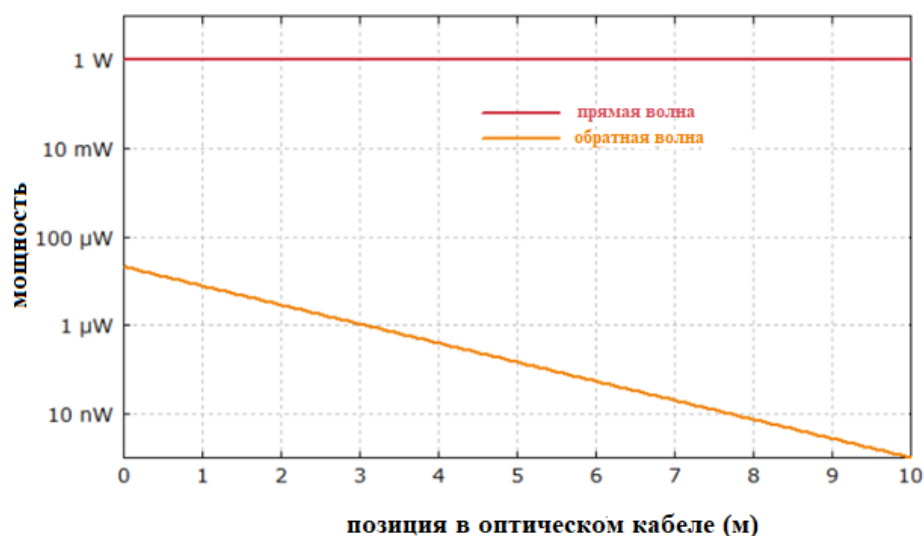


Рисунок 2.4 – Бриллюэновское рассеяние в оптическом кабеле

Бриллюэновское рассеяние проявляется в том, что оптический сигнал рассеивается и смещается в область более длинных волн. При SBS спектр стимулированного излучения составляет не более 60 МГц и смещен в длинноволновую сторону на 10-11 ГГц. На рисунке ниже предоставлен спектр стимулированного сигнала при рассеянии Бриллюэна.

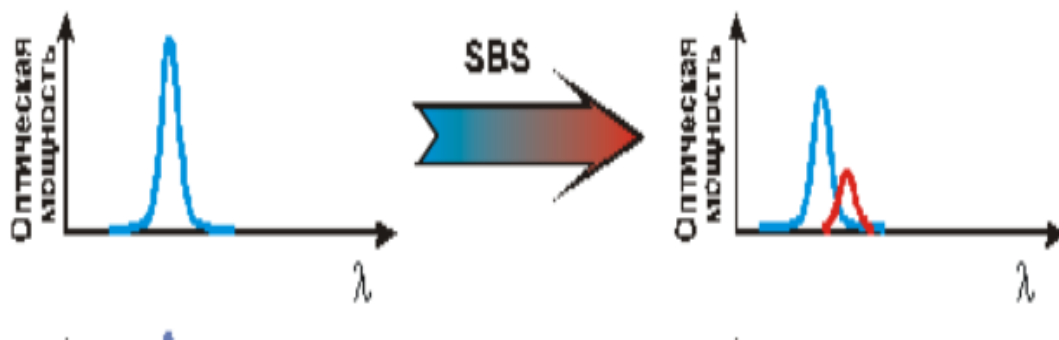


Рисунок 2.5 – Спектр при вынужденном рассеянии Бриллюэна

Выше определенной пороговой мощности, вынужденное бриллюэновское рассеяние может отражать большую часть мощности падающего луча. Уровень оптической мощности, при котором вынужденное бриллюэновское рассеяние становится значительным в одномодовом волокне, определяется по эмпирической формуле:

$$P_B = (17,6 \cdot 10^{-3}) a'^2 \lambda'^2 \alpha \Delta \nu', \quad (2.3)$$

где  $P_B$  – пороговое значение уровня оптической мощности вынужденного рассеяния Бриллюэна, Вт;

$a'$  – радиус волокна, мкм;

$\lambda'$  – длина волны источника света, мкм;

$\alpha$  – потери волокна, дБ/км;

$\Delta \nu'$  – частота источника света, Гц.

Данное вынужденное рассеяние ограничивает мощности, используемые при передаче светового сигнала по оптическому волокну, так как рассеянный сигнал после вынужденного бриллюэновского рассеяния имеют обратное относительно основного источника направление и тем самым препятствует распространению полезного сигнала. Рассеянный свет не только уменьшает полезную мощность основного сигнала, но и вносит шумы. Так как данное рассеяние происходит на больших мощностях, для уменьшения потерь при передаче желательно использовать малые мощности. Но на высокоскоростных транспортных оптических системах снижение мощности не является выходом из ситуации. В данном случае необходимо использование модулятора с внешней модуляцией и лазерные источники непрерывных колебаний.

### 2.2.3 Вынужденное Рамановское рассеяние

Вынужденное комбинационное рассеяние (рассеяние Рамана) представляет собой нелинейный отклик стеклянных волокон на оптическую интенсивность света. Это вызвано колебаниями кристаллической решетки. Вынужденное комбинационное рассеяние создает высокочастотный оптический

фонон по сравнению с бриллюэновским рассеянием, которое производит низкочастотный акустический фонон и рассеянный фотон.

Вынужденное комбинационное рассеяние (SRS) является частотно зависимым и проявляется более выражено на коротких волнах, в сравнении с длинноволновыми. В отличие от SBS, вынужденное рассеяние Рамана как для встречных волн (стоксово излучение с уровнем порядка 50-60 dB относительно интенсивности исходного излучения), так и для сонаправленных волн (антистоксово излучение с уровнем порядка 70-80 dB относительно основной волны). Стоксовая и антистоксовая волны располагаются частотно симметрично относительно основной частоты излучения.

При SRS спектр вынужденного излучения широкий, в отличие от SBS, (около 7 ТГц) и смещен в длинноволновую сторону примерно на 10-13 ТГц. На рисунке 2.6 наглядно видно различие спектра вынужденного сигнала при SBS и SRS.

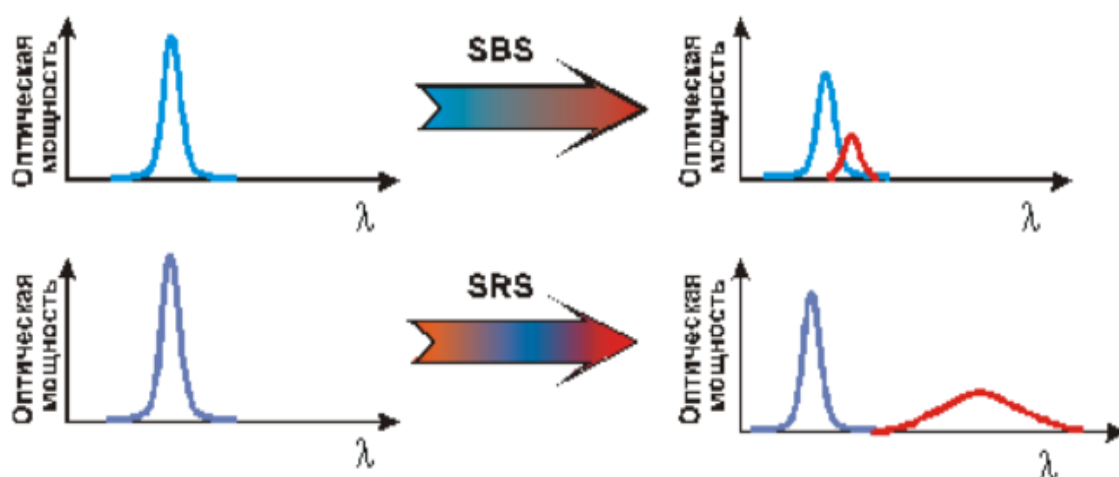


Рисунок 2.6 – Спектр сигнала при SBS и SRS

Когда два лазерных луча с разными длинами волн (обычно с одинаковой поляризацией) распространяются вместе через комбинационно активную среду, луч с большей длиной волны может испытать оптическое усиление за счет луча с более короткой длиной волны. Это явление использовалось для рамановских усилителей и рамановских лазеров.

Рассеивающая частица переходит из одного колебательного состояния в другое с самопроизвольным испусканием стоксова или антистоксова фотона при небольшой интенсивности светового сигнала (спонтанное рассеяние) [4].

При повышении интенсивности света до высоких значений происходит экспоненциальное повышение интенсивности стоксовой компоненты (вынужденное рассеяние).

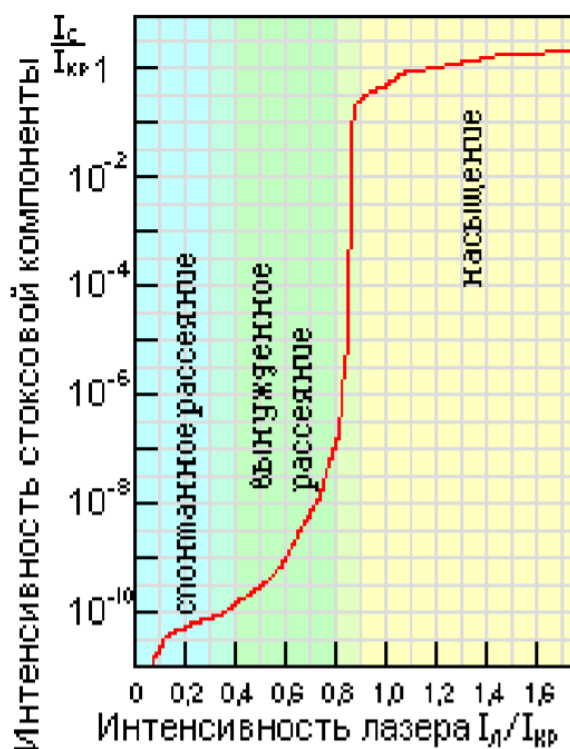


Рисунок 2.7 – Зависимость SRS от интенсивности света

В настоящее время явление рассеяния Рамана используется в усилителях и не вносит значительного эффекта при распространении длинноволновых сигналов по оптоволокну. Для предотвращения данного эффекта на оптических линиях необходимо использование длин волн из второго и третьего окна прозрачности оптического волокна.

### 2.3 Потери на макроизгибах

Макроизгибы происходят, когда волокно изгибается с большим радиусом кривизны относительно диаметра волокна (большие изгибы). Эти изгибы становятся большим источником потерь мощности, когда радиус кривизны составляет менее нескольких сантиметров [3].

При распространении света по оптоволокну с макроизгибом угол падения светового луча может достигать значений, которые будут меньше чем критический угол (рисунок 2.8). В следствие этого, часть света при преломлении покидает сердцевину волокна. Отраженная часть световой энергии в последующем так же подвергается преломлению, и при малых радиусах кривизны вся световая энергия может быть потеряна.

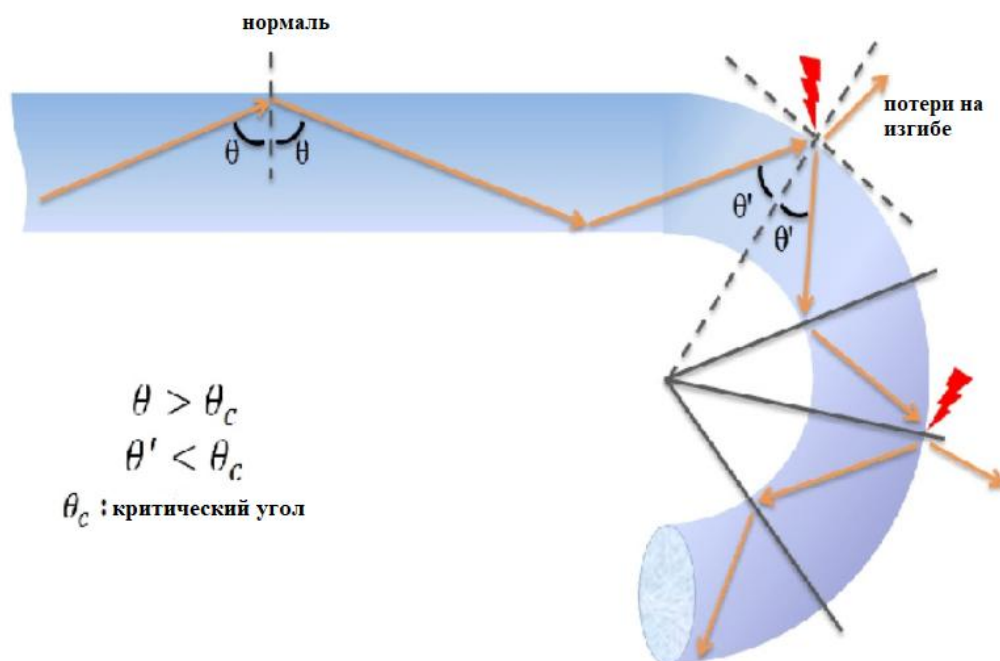


Рисунок 2.8 – Потери на макроизгибе

Потери на макроизгибах в большинстве случаев возникают при неправильной установке волокна. При установке необходимо аккуратно производить его укладку, избегая изгибов волокна с радиусом кривизны менее нескольких сантиметров. Так же данные макроизгибы могут возникать при неаккуратной транспортировке. Избежать потерь в волокнах с макроизгибами невозможно, так как часть световой энергии будет рассеиваться и поглощаться в оболочке в местах сгиба.

## 2.4 Потери на микроизгибах

В отличие от макроизгибов, при микроизгибах основные потери вносят микроскопические изгибы, которые создают локальные осевые смещения в несколько микрон и пространственные смещения на длину волны в несколько миллиметров. Одной из частых причин является продольное сокращение волоконного буфера. Но это также может быть следствием плохих методов изготовления чертежей или самих кабелей, монтажа и другое [3].

Микроизгибы часто происходят во время установки оптоволокна и обычно неизбежны. При расчете пропускной способности или затрат на установку должны учитываться микроизгибы.

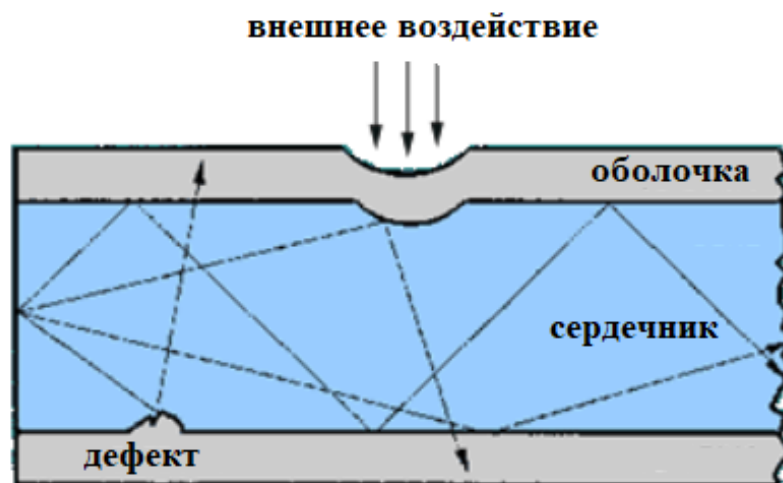


Рисунок 2.9 – Потери на микроизгибах

Микроизгибы могут вызывать потери от 1 до 2 дБ/км в процессе передачи по волоконно-оптическим кабелям. Так как внешние воздействия передаются на стекловолокно через полимерный материал покрытия, то на чувствительность волокна к изгибу непосредственно влияют свойства и размеры покрытия, а также внешние факторы, такие как температура и влажность.

Также на чувствительность к микроизгибу влияют неровности покрытия, такие как изменение размеров покрытия, наличие частиц цветных пигментов на покрытиях, и неоднородности в свойствах материалов покрытия, которые изменяются вдоль оси волокна.

## 2.5 Окна прозрачности оптического волокна

В первые годы оптоволоконных систем передач в качестве источника света использовались светодиоды. Светодиоды в основном работают на длинах волн 0,78 мкм и 0,85 мкм. Эта область называется первым окном прозрачности оптического волокна.

Светодиоды не могли быть использованы для передачи с высокой пропускной способностью на большие расстояния, из-за присущих им ограничений, и были заменены лазерами. Лазер работает в двух областях длин волн, а именно 1,3 мкм и 1,55 мкм, которые обычно называют вторым и третьим окном прозрачности оптического волокна (рисунок 2.10).

Эффекты дисперсии равны нулю в окне 1,3 мкм, тогда как потери меньше всего в окне 1,55 мкм. Современные оптоволоконные системы работают в диапазоне 1,3 мкм и 1,55 мкм, а также диапазон 1,49 мкм набирает свои обороты благодаря системам GPON.

Диапазон длин волн 1,55 мкм также особенно важен для сетей WDM, которые все чаще используются в сетях по всему миру. Эти сети используют

усилители для противодействия эффектам затухания. Обычно используемые усилители представляют собой волоконные усилители на основе эрбия (EDFA) которые обеспечивают усиление сигнала в диапазоне длин волн около 1,55 мкм и 1,625 мкм. Это окно прозрачности обычно называют окном EDFA.

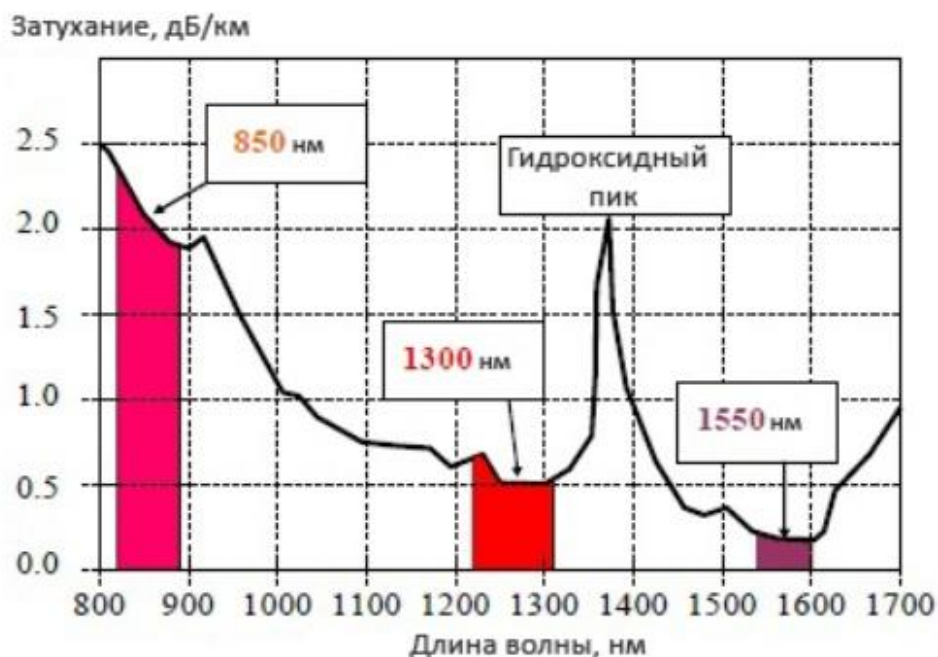


Рисунок 2.10 – Окна прозрачности ступенчатого оптического волокна

Окна прозрачности играют главную роль при выборе диапазона волн для передачи света в оптоволоконных линиях связи.

## 2.6 Выбор оптического волокна

Характеристики оптического волокна очень важны при установке или проектировании волоконно-оптических систем связи и улучшении их характеристик. Многочисленные методы измерения были разработаны для оценки различных характеристик или параметров оптических волокон. Рассмотрим несколько таких методов, выбранных для оценки оптических волокон.

### 2.6.1 Профиль показателя преломления

Ширина волны оптического волокна сильно зависит от межмодовой дисперсии. Межмодовую дисперсию можно контролировать, регулируя профиль показателя преломления, который оказывает решающее значение на полосу



пропускания. Расширение импульса, вызванное межмодовой дисперсией, серьезно ограничивает скорость передачи данных по многомодовому волокну, потому что перекрытие расширенных импульсов вызывает межсимвольные помехи и мешает правильному обнаружению сигнала, увеличивая частоту ошибок по битам.

### 2.6.2 Условия запуска

Условия запуска существенно влияют на важные показатели производительности, такие как затухание и полоса пропускания, режим работы в многомодовых оптических волокнах (МОВ). Это объясняется тем, что условие запуска определяет режимные распределения мощности в многомодовых оптических волокнах и, как правило, различные режимы имеют различные характеристики в МОВ. Следовательно, условие запуска необходимо предварительно уточнять. Обычно это указывается как угол и положение падающего света.

### 2.6.3 Затухание

Затухание, или потери при передаче, является одним из наиболее важных показателей эффективности при выборе оптического волокна. Затухание является основным фактором, определяющим максимальную дальность передачи оптических систем связи без усилителей или повторителей, а также максимальную входную мощность от источника света и минимальную чувствительность приемника [4].

Затухание в основном вызвано поглощением, рассеянием и излучением. Эти эффекты зависят как от внутренних, так и от внешних факторов оптических волокон. Общее затухание в оптическом волокне определяется отношением входной и выходной мощности.

Оптическая сила уменьшается экспоненциально с расстоянием, когда свет проходит вдоль волокна. Поэтому затухание обсуждается для заданной длины волокна и обычно описывается в децибелах на километр.

$$a = -\frac{10}{L} \log_{10} \left( \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} \right), \quad (2.4)$$

где  $a$  – общее затухание, дБ/км;

$P_{\text{ВХ}}$  – входная оптическая мощность в волокне, Вт;

$P_{\text{ВЫХ}}$  – выходная оптическая мощность в волокне, Вт;

$L$  – длина волокна, м;

## 2.6.4 Пропускная способность

Пропускная способность является одним из наиболее важных параметров при выборе оптического волокна, не считая затухание в оптическом волокне. Пропускная способность определяет максимальную скорость передачи данных или максимальное расстояние передачи данных. Большинство оптоволоконных систем связи применяют импульсную модуляцию. Если входной импульсный сигнал может быть обнаружен без искажения на другом конце волокна, за исключением уменьшения оптической мощности, то максимальная длина линии связи ограничена затуханием в волокне. Тем не менее, в дополнение к ослаблению оптической мощности, выходной импульс также будет в целом более широким во времени, чем входной импульс. Это расширение импульса ограничивает пропускную способность.

Более высокая пропускная способность дает меньшее уширение импульса и обеспечивает более высокую скорость передачи данных. Ограничение полосы пропускания также в значительной степени определяет максимум длины для данной скорости передачи данных в некоторых системах МОВ. Расширение импульса, которые теоретически пропорциональна длине волокна, обусловлена в основном межмодовой дисперсией в оптоволоконных системах связи.

Также стоит упомянуть несколько факторов, которые будут влиять на эффективность используемого оптического волокна и, в следствии, его пропускной способности.

Число Аббе описывает дисперсию материала или изменение показателя преломления в зависимости от длины волны. Он определяется как:

$$\frac{(n_d - 1)}{(n_F - n_C)}, \quad (2.5)$$

где  $n_F$  и  $n_C$  – показатели преломления при 0,486 мкм и 0,656 мкм соответственно.

Низкие числа Аббе указывают на высокую дисперсию.

Также важно учитывать плотность стекла, потому что она помогает определить вес оптического узла, что очень важно для чувствительных к весу приложений. Как правило, показатель преломления стекла увеличивается с увеличением плотности. Однако отношение между показателем преломления и плотностью не является линейным.

Коэффициент теплового расширения описывает, как размер стекла будет меняться при изменении температуры. Это свойство является ключевым фактором в приложениях, связанных с экстремальными температурами и быстрым перепадом температур.

Твердость стекла по Кнупу является мерой его стойкости к вдавливанию. Это определяется использованием внешнего воздействия на волокно и измерением результирующей глубины проникновения источника воздействия.

Следовательно, чем меньше вмятина, тем выше твердость по Кнупу. То есть, материалы с высокой твердостью по Кнупу менее хрупкие и могут выдерживать большие перепады давления, чем материалы с меньшей твердостью по Кнупу.

Качество поверхности оптического волокна – это оценка поверхностных дефектов, которые могут быть вызваны во время производства или обработки. Эти дефекты обычно приводят к небольшому снижению пропускной способности и небольшому увеличению рассеянного света, что практически не влияет на общую производительность системы в большинстве приложений для обработки изображений или сбора света. Однако некоторые поверхности более чувствительны к этим дефектам. Окна с высоким уровнем мощности также чувствительны к поверхностным дефектам, поскольку они могут вызвать повышенное поглощение энергии и повредить окно.

Таблица 2.2 –Показатели качества поверхности оптического волокна

Показатель качества поверхности	Описание
80-50 или 40-40	Наиболее часто используемые спецификации качества поверхности для применений коммерческого класса и случаев, когда качество поверхности не является критическим.
40-20	Используются в приложениях, где важно качество поверхности. Это общая спецификация для лазерных систем с низким и средним энергопотреблением и оптикой меньшего размера.
20-10 или 10-5	Эти спецификации используются почти исключительно для лазерных систем высокой мощности и систем с очень высокой точностью, где качество поверхности имеет решающее значение. Как правило, существует значительная надбавка к стоимости, связанная с этими спецификациями качества поверхности.

Качество поверхности часто описывается международной спецификацией MIL-PRF-13830B. Обозначение царапины определяется путем сравнения царапин на поверхности с набором стандартных царапин при контролируемых условиях освещения. Это не прямое измерение самих размеров царапины. Обозначение показателя качества поверхности рассчитывается путем взятия диаметра данного углубления в микронах и деления его на 10.

Плоскостность поверхности показывает отклонение окна оптического волокна от идеально ровной поверхности. Плоскостность поверхности

испытательного образца может быть измерена с использованием оптической плоскости, которая является высокоточной плоской эталонной поверхностью. Когда поверхность тестового окна располагается напротив оптической плоскости, появляются полосы, форма которых определяет плоскостность поверхности проверяемого оптического окна (рисунок 2.11).

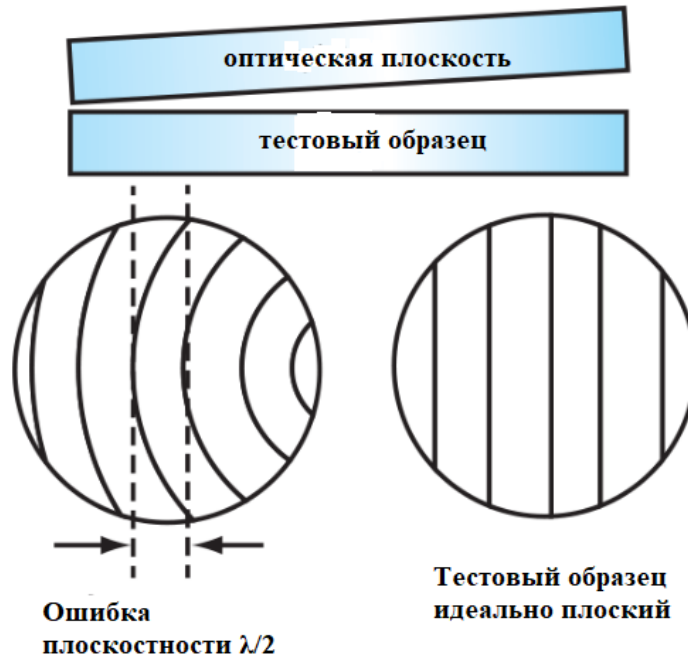


Рисунок 2.11 –Проверка на плоскостность

Поверхность оптического волокна, по крайней мере, такая же плоская, как и эталонная если полосы расположены равномерно, прямо и параллельно. Если полосы изогнуты, ошибка плоскостности указывается числом полос между двумя воображаемыми линиями: одна касательная к центру полосы, а другая – через концы этой же полосы. Отклонения в плоскостности обычно измеряются в значениях волн ( $\lambda$ ). Каждая полоса соответствует половине волны. Плоскостность  $1\lambda$  может использоваться для типичных применений, но высокоточные приложения, такие как лазерные системы большой мощности, требуют значений плоскостности вплоть до  $\lambda/20$ .

Таблица 2.3 –Спецификация показателей плоскостности

Показатель плоскостности	Описание
$\geq 1\lambda$	Обычно используется для применений коммерческого класса и в случаях, когда плоскостность поверхности не является критичной. Такой показатель плоскостности

	является экономически выгодным вариантом.
$\lambda/4$	Используется для точных применений, где важно качество поверхности. Это общая спецификация для лазерных систем с низким и средним энергопотреблением и оптикой меньшего размера.
$\leq \lambda/10$	Используется для лазерных систем высокой мощности, высокоточных систем визуализации. Является более дорогим вариантом, за счет своей точности.

## 2.7 Меры по снижению потерь в оптическом кабеле

Оптоволоконные системы связи являются передовым методом в передаче сообщений на большие расстояния, при этом сохраняя огромные, по сравнению с обычными проводными системами, скорость передачи и пропускную способность. Чтобы гарантировать, что выходная мощность может находиться в пределах чувствительности приемника и оставить достаточный запас для ухудшения производительности со временем, необходимо уменьшить потери в оптическом волокне.

К указанным выше рекомендациям по уменьшению потерь можно также добавить правильную эксплуатацию оптических линий связи и использование повторителей сигнала, увеличивающего максимальную дальность передачи при минимальных потерях.

### 2.7.1 Меры по установке и эксплуатации

При установке оптического кабеля необходимо соблюдать ряд требований для того, чтобы избежать в последующем утечки света из волокна, макроизгибов, микроизгибов и попадания влаги в оптоволоконно. Необходимые меры:

- производить соединение кабелей с максимально одинаковыми свойствами и параметрами;
- при установке желательно использовать сразу весь диск, чтобы минимизировать количество стыков;
- во время сварки строго соблюдать меры по обработке оптического волокна;

- соединения должны быть плотными и иметь замкнутую муфту, чтобы предотвратить утечку света;
- убедиться в чистоте разъемов;
- при вытягивании кабеля, не превышать максимальную растягивающую нагрузку;
- избегать чрезмерного напряжения на волокно, особенно во время установки;
- минимизировать жесткие изгибы, которые заставляют свет преломляться через оболочку волокна;
- выбрать оптимальный маршрут прокладки оптоволоконных кабелей при проектировании.

### **2.7.2 Воздействие ударов молний на оптический кабель**

Когда молния попадает в землю или в деревья возле подземной трассы оптоволоконных линий связи, частичный или весь ток молнии может попасть в металлическую оболочку кабеля. Более того, дуговой разряд, возникающий между точкой удара и кабелем, охватывает расстояние в несколько десятков метров. Влага, которая содержалась в объеме разрядного канала, испаряется практически мгновенно, так как температура в нем составляет сотни и даже тысячи градусов. Фронт расширяющихся паров и газов вблизи разряда создает давление порядка  $1000 \text{ кг/см}^2$ , которое сдавливает оболочку кабеля еще до того, как туда попадет ток молнии. В этом случае на корпусе могут даже не появиться следы оплавления. Это так называемый электрогидравлический эффект. Это сильно зависит от амплитуды тока, его мощности и влажности почвы.

При дальнейшем прохождении тока через металлическую оболочку кабеля из-за разницы в параметрах распространения импульсов вдоль земли и вдоль цепи оболочка-земля, между металлическими элементами оптического кабеля и землей возникает напряжение, амплитуда которого может достигать несколько тысяч вольт. В результате этого происходит разрыв внешней изоляции. Во время искры или разрушения дуги могут пострадать соседние волокна, и влага постепенно проникает через образовавшееся отверстие. Амплитуда возникающего напряжения зависит от двух параметров:

- электрическое сопротивление оболочки кабеля;
- удельное сопротивление окружающей земли.

Что касается воздушных оптических линий, подвешенных на деревянных или металлических опорах, повреждение их также возможно, если в сердечнике или оболочке кабеля присутствует металл. Подвесные ОК, в отличие от подземных, более открыты для внешних полей, поэтому в их металлических элементах возможны электродвижущие силы (ЭДС) и токи. Ток молнии в оболочке может вызвать пробой между оболочкой и ядром. Разрушение оптического волокна возможно, если волокно находится вблизи или на пути дуги или искрового пробоя.

Когда происходит удар молнии с большой амплитудой тока в воздушный кабель, оболочка которого не соединена с землей, значительная часть тока молнии образует дугу от металлической оболочки вдоль поверхности опоры. Если металлическая оболочка внешнего ОК в определенных местах заземлена, то возникновение повреждения зависит от двух значений:

- расстояние между заземленными точками;
- величины сопротивлений заземлений.

При малых расстояниях между заземлениями (около 100 м) и низком сопротивлении заземления (менее 20 Ом) отраженная от заземления отрицательная волна гасит потенциал на оболочке кабеля. Если расстояние между заземлениями велико (свыше 300 метров) и сопротивление заземления также большое (порядка 100 Ом), то отраженная от заземления волна не успевает погасить рост потенциала на оболочке и происходит пробой в середине участка между заземлениями.

Оптические кабели, встроенные в грозозащитный трос высоковольтных линий электропередач, обычно предварительно защищены от возможного повреждения во время грозы и нагревания при коротких замыканиях в линии высокого напряжения с использованием выбранной конструкции кабеля.

## **2.8 Анализ подводных линий связи**

При анализе подводных линий связи важно понимать основные требования к оборудованию и доступные средства для реализации таких магистралей. Рассмотрим оборудование компании Huawei Marine в качестве исходных средств для реализации подводных оптоволоконных систем связи.

Подводный кабель является ключевым носителем информации для подводных кабельных систем. Подводные кабели предназначены для передачи цифровой информации под водой и, в общем случае, на большие расстояния. Существует пять различных типов подводных кабелей с различными техническими характеристиками, которые можно использовать в зависимости от поставленной задачи и среды в которой будет прокладываться данный кабель (рисунок 2.12).

Самый легкий из них LW (Light Weight) кабель устанавливается на глубине 1000-8000 метров, в устойчивых песчаных морских глубинах. В нем обеспечивается легкая защита, центр представляет собой свободную трубчатую конструкцию, обернутую вокруг усиленной стальной проволокой. Наружный слой представляет собой плотный полиэтиленовый защитный чехол.

Следующий LWP (Light Weight Protection) кабель может быть установлен на глубине 1000-8000 метров, на морском дне с неровной поверхностью. Чтобы противостоять умеренному износу или различным повреждениям окружающей

средой и от морских животных, металлическая оболочка становится толще по сравнению с LW кабелем за счет второго слоя.

Третий тип подводного кабеля – LWA (Light Weight Armor) кабель. Он может быть установлен на глубине до 1500 метров, в зависимости от местности. Эти кабели можно использовать на глубине 2000 метров, когда они не закопаны.

Кабель SA (Single Armor) может быть установлен на глубине до 1500 метров, в сложной топографии горных пород и зоне повышенной опасности повреждения. Этот тип кабеля обеспечивает слой тяжелой бронированной проволоки на LWA кабелем.

И последний DA (Double Armor) может быть установлен на глубине менее 500 метров, в сложной топографии горных пород, а также в зонах с высокой степенью риска и высокой степенью износа. Этот тип кабеля обеспечивает на 2 слоя больше тяжелой бронированной проволоки чем LW кабель.

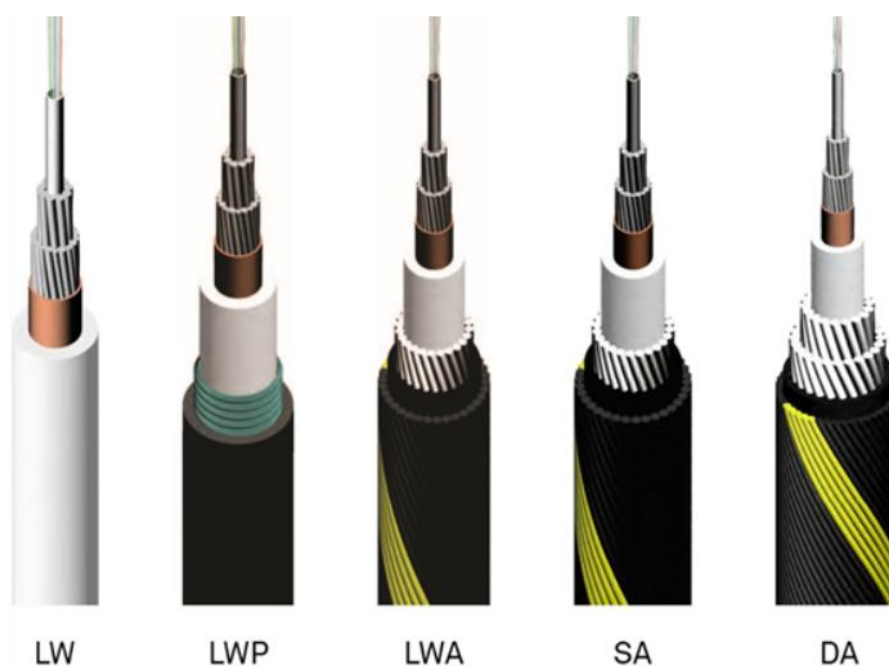


Рисунок 2.12 - Подводные оптические кабели

Подводные кабели являются основой глобальной связи. Терминальное оборудование подводных линий (SLTE) является краеугольным камнем магистрали данных, по которой передаются огромные объемы данных.

В данном случае рассмотрим SLTE продукты компании Huawei Marine, которые обеспечивают надежную, высокопроизводительную оптическую передачу большой емкости по обширным сетям подводных кабельных систем, используя передовую в отрасли технологию DWDM (рисунок 2.13).





Рисунок 2.13 – SLTE продукты компании Huawei Marine

Ключевые особенности:

- 1) поддерживают пропускную способность, до 25,6 Тбит/с;
- 2) поддерживают длину отрезков цифровых линий до 14000 км с повторителями, или 648 км в линиях без повторителей;
- 3) обеспечивают множество схем защиты на уровне сети и интеллектуальное управление сетью для обеспечения надежности;
- 4) универсальная платформа для подводных и наземных линий связи.

Также компания Huawei Marine является единственным поставщиком, который предлагает два специально разработанных повторителя, каждый из которых предназначен для использования в своих решениях (рисунок 2.14, 2.15). Так повторитель 2FP подходит для недорогих региональных кабельных систем до 2 оптоволоконных пар. А повторитель 8 FP используется для трансокеанических кабельных систем или в региональных кабельных системах до 8 оптоволоконных пар.



Рисунок 2.14 –Повторитель 8FP



Рисунок 2.15 –Повторитель 2FP

Ключевые особенности:

- 1) огромная емкость;
- 2) сверхдлинное расстояние: высокая мощность и низкий уровень шума позволяют использовать повторители до 150 километров, обеспечивая дальность передачи до 14000 км;
- 3) эффективное проектирование: тонкая и легкая конструкция облегчает обработку и одновременную укладку, уменьшая затраты на развертывание;

4) глубокое применение: высокая герметичность и устойчивость к высокому давлению воды, погружение на глубину до 8000 метров.

Для теоретического проектирования эффективной оптической линии связи будем использовать ТрансКаспийскую оптическую линию связи (ТСФО), соединяющую Казахстан и Азербайджан. Длина рассматриваемого участка составляет 200 километров, а пиковая глубина составляет 1025 метров.

В качестве терминального оборудование будет использоваться стандартное SLTE компании Huawei Marine. Для проектируемой системы больше всего подойдут повторители типа 8FP, так как необходим наибольший объем передачи в секунду. Большой интерес в нашем случае будут представлять используемые кабели.



Рисунок 2.16 –ТрансКаспийская оптоволоконная линия связи

При указанной глубине прокладки возможно использование кабелей типа LWA и SA, так как они обладают более стойкой защитной оболочкой по сравнению с более легкими кабелями. Но в выбранной зоне прокладки оптоволоконных кабелей частое явление- землетрясения. В связи с этим кабель типа SA (Single Armor) является более подходящим, так как он более устойчив в зонах с повышенной опасностью повреждения.

При передаче на большие расстояния по оптоволокну бывают потери, которые оказывают влияние на качество связи, и которые я рассматривал выше. Следовательно, можно компенсировать эти потери, применив следующие методы: снижение содержания ионов различных примесей для снижения потерь на поглощение, грамотная эксплуатация и установка оптического волокна на местности для предотвращения микро и макроизгибов, выбор подходящего окна прозрачности и основных характеристик, так как показатели преломления

одного материала на различных длинах волн могут быть различны, также необходимо учитывать внешние факторы, такие как удар молний, и для этого необходима установка грозозащитного троса для отвода мощности тока молнии.

### 3 Расчет общих потерь в оптическом волокне

Для простоты расчетов рассмотрим участок между двумя с соседними повторителями оптического сигнала.

Для начала рассчитаем потери на одном километре оптоволокна.

Общие потери найдем как сумму собственных потерь и дополнительных (кабельных) потерь.

Собственные потери состоят из потерь поглощения  $a_n$  и потерь рассеяния  $a_p$

$$a = a_{\text{соб}} + a_{\text{каб}} = a_n + a_p + a_{\text{каб}} \quad (3.1)$$

Затухание на рассеяние (Рэлеевское рассеяние) найдем по формуле:

$$a_p = 4,34 \cdot \frac{8 \cdot \pi^3 \cdot (n^2 - 1)}{3 \cdot \lambda^4} \cdot k \cdot T \cdot \beta, \quad (3.2)$$

где  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  – постоянная Больцмана, Дж/К;

$\beta=8,1 \cdot 10^{-11}$ – коэффициент сжимаемость, м<sup>2</sup>/Н;

$T=1500$ – абсолютная температура плавления стекла, К.

Рассчитаем затухание на рассеяние по формуле (3.2):

$$a_p = 4,34 \cdot \frac{8 \cdot \pi^3 \cdot (1,468^2 - 1)}{3 \cdot 1,55^4 \cdot 10^{-24}} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1500 \cdot 8,1 \cdot 10^{-11} = 0,1202 \text{ дБ/км}$$

Затухание на поглощение рассчитывается по формуле (3.3):

$$a_n = a_{\text{пи}} + a_{\text{пу}}, \quad (3.3)$$

где  $a_{\text{пу}}$  - потери на поглощение в ультрафиолетовой области;

$a_{\text{пи}}$  - потери на поглощение в инфракрасной области.

Потери на поглощение в ультрафиолетовой и инфракрасной области рассчитываются по формулам:

$$a_{\text{пу}} = \frac{10^{\frac{2}{\lambda}}}{2154} = \frac{10^{1,29}}{2154} = 0,009 \text{ дБ/км},$$

$$a_{\text{пи}} = 10^{\left(\frac{-21,6}{\lambda} + 12,4\right)} = 0,029 \text{ дБ/км}$$

Подставляя найденные значения  $a_{\text{пи}}$  и  $a_{\text{пу}}$  в формулу (3.3) получим:

$$a_{\text{п}} = a_{\text{пи}} + a_{\text{пу}} = 0,009 + 0,029 = 0,038 \text{ дБ/км}$$

Кабельные потери – из-за скрутки, деформации изгибов о ОВ, возникающих в процессе производства и прокладке, рассчитываются по формуле (10):

$$a_{\text{каб}} = 0,2 \cdot a_{\text{соб}} = 0,2 \cdot (a_{\text{п}} + a_{\text{р}}) \quad (3.4)$$

Подставляя найденные значения в формулу (3.4) получим:

$$a_{\text{каб}} = 0,2 \cdot (0,038 + 0,1202) = 0,032 \text{ дБ/км}$$

Подставляя найденные значения в формулу для общего затухания получим:

$$a = 0,032 + 0,038 + 0,1202 = 0,1902 \text{ дБ/км}$$

Рассчитанные общие потери при передаче сигнала являются теоретическими и имеют свою погрешность. При использовании на данном участке ретрансляторов на расстоянии 150 километров от терминального оборудования, общие потери на данном участке будут составлять примерно 30дБ без ретрансляции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного исследования теоретического материала и изучения всех основных аспектов передачи сигнала по оптическому волокну, были выявлены ключевые характеристики, влияющие на эффективность работы ВОЛС, а также методы, используемые для того, чтобы избежать или снизить возможные потери сигнала, при передаче его на большие расстояния.

На примере подводных оптических линий связи в процессе анализа были выбраны максимально эффективное оборудование компании Huawei Marine для данного участка прокладки и рассчитаны общие потери при передаче полезного сигнала с учетом одного оптоволоконного повторителя, необходимого для ретрансляции сигнала через 100 км водного пространства и рассчитаны общие потери сигнала на указанной длине волны.

Придерживаясь всех требований, указанных в данной работе, по снижению затуханий сигнала в оптическом волокне, остается возможным передавать оптические сигналы на огромные расстояния и избегать различных проблем связанных с искажениями.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Otto Strobel Optical and microwave technologies for telecommunication networks /Sons, Ltd, 2016. – 517 с.

2 Yasuhiro Koike Fundamentals of Plastic Optical Fibers/Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2015. – 190с.

3 Malcolm Johnson Optical fibres, cables and systems / Gastone Bonaventura – ITU-T Manual, 2016. – 324 с.

4 Sonia Boscolo Shaping Light in Nonlinear Optical Fibers/ John Wiley & Sons Ltd, 2017- 505 с.

5 Песков С.Н., Барг А.И., Колпаков И.А., Эффект бриллюэновского рассеяния в оптических сетях/ Телеспутник, 2005. – 7с.

6 Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи/ Москва, 2003. – 106 с.

7 Мария Степанова Микроизгиб оптического волокна и улучшение конструкции оптического волокна// электронная версия статьи на сайте <http://ockc.ru/?p=11249>

8 John Urban Anatomy of a Cable – Optical Fiber/ Biamp's Blog, 2013 - электронная версия статьи на сайте <https://blog.biamp.com/anatomy-of-a-cable-optical-fiber/>