

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО СВЯЗИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ  
им. проф. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»

---

*М.С.Былина, В.С. Иванов, Г.М. Смирнов*

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

# **ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ И СЕТЕЙ ДОСТУПА**

для студентов, обучающихся по направлению 11.03.02

«Инфокоммуникационные системы и сети связи»

**Рукопись**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2020

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>4</b>
1. Начальные сведения об оптической связи. Особенности построения ВОЛС, их элементы ..	4
2. Физические основы процессов распространения света в оптических волокнах .....	4
3. Конструкции и производство оптических волокон и кабелей .....	4
4. Затухание в оптических волокнах .....	4
5. Многомодовые оптические волокна.....	4
6. Одномодовые оптические волокна .....	4
7. Пассивные оптические компоненты .....	5
8. Передающие устройства ВОЛС.....	5
9. Фотоприемные устройства .....	5
10. Измерения параметров ВОЛС .....	5
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>6</b>
<b>КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЮ.....</b>	<b>8</b>
Задание 1. Расчет зависимости коэффициента затухания оптического волокна от длины волны. ....	8
Исходные данные к заданию 1 .....	8
Методические указания к выполнению задания 1 .....	8
Порядок выполнения задания 1 .....	10
Задание 2. Расчет зависимости уширения оптических импульсов в одномодовом ОВ, обусловленного хроматической дисперсией, от длины волны. ....	11
Исходные данные к заданию 2 .....	11
Методические указания к выполнению задания 2 .....	12
Порядок выполнения задания 2 .....	14

## ВВЕДЕНИЕ

Особое значение оптических и оптоэлектронных технологий для науки и техники, в том числе и для инфокоммуникаций, признано мировым сообществом. Одной из целей деятельности Министерства связи и массовых коммуникаций, делегированной Правительством РФ, является равный доступ к услугам связи и Интернету. Для достижения этой цели инвестиции операторов и Фонда универсальной услуги связи направляются на создание инфраструктуры оптоволоконных линий по всей стране.

Волоконно-оптические сети и системы быстро развиваются, на сегодняшний день уже достигнуты терабитные скорости передачи по одному волокну на расстояния сотни и тысячи километров без регенерации. На повестке дня стоят вопросы широкого внедрения:

- когерентных систем приема сигналов со скоростями 100 Гбит/с, по каждому из десятков каналов, передаваемых по одному оптическому волокну,
- передачи информации на тысячи километров без промежуточной регенерации с помощью оптических солитонов,
- использования отдельных мод в многомодовом волокне для передачи многоканальных сигналов

и многие другие вопросы.

Поэтому студенты, обучающиеся в СПбГУТ по направлению 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» должны иметь современные базовые знания в области оптических и оптоэлектронных технологий.

Целью преподавания дисциплины «Высокоскоростные оптические системы связи для транспортных сетей и сетей доступа» является изучение физических процессов излучения и приема оптического излучения, распространения излучения по современным оптическим волокнам, ознакомление с конструкциями и параметрами оптических волокон и кабелей, пассивных и активных оптических компонент, с методами и приборами для измерения параметров волоконно-оптических линейных трактов.

Основные задачи дисциплины заключаются в изучении методов проектирования и строительства волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), в ознакомлении с особенностями эксплуатации ВОЛС, получении навыков теоретических исследований, умения работать с технической литературой и специальной измерительной аппаратурой.

По дисциплине предусмотрены лабораторные и практические занятия, а также выполнение контрольной работы. Защита контрольной работы, а также сдача зачета по лабораторным и практическим занятиям предшествуют сдаче экзамена по дисциплине.

## **ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

### **1. Начальные сведения об оптической связи. Особенности построения ВОЛС, их элементы**

Особенности оптической передачи сигналов по направляющим системам связи. Преимущества и недостатки ВОЛС по сравнению с металлическими линиями связи. Элементы волоконного тракта: оптический кабель, соединительные муфты, оконечные пункты, регенераторы, источники и приемники излучения, оптические усилители. Спектральное уплотнение.

### **2. Физические основы процессов распространения света в оптических волокнах**

Геометрическая и волновая оптика. Поляризация света. Отражение и преломление света на границе раздела двух сред. Формулы Френеля, явление полного внутреннего отражения. Направляемые и вытекающие моды (лучи).

### **3. Конструкции оптических волокон и кабелей**

Классификация кабелей, маркировка, элементы конструкции, используемые материалы.

### **4. Затухание в оптических волокнах**

Затухание в оптическом волокне. Единицы измерения затухания. Собственные и дополнительные потери. Коэффициент затухания, его зависимость от длины волны. Окна прозрачности. Влияние затухания на длину регенерационного участка. Влияние затухания на минимальную длину сегмента сети.

### **5. Многомодовые оптические волокна**

Траектории лучей в ступенчатых и градиентных оптических волокнах. Понятие моды. Нормированная частота. Количество мод. Межмодовая дисперсия. Широкополосность. Равновесное распределение мод. Ввод излучения в оптическое волокно. Числовая апертура. Потери на вводе излучения. Влияние широкополосности на максимальную длину сегмента сети. Многомодовые волокна с усеченным степенным профилем. Рекомендация МСЭ G.651. Многомодовые волокна для высокоскоростных сетей.

### **6. Одномодовые оптические волокна**

Условие одномодового режима распространения излучения. Длина волны отсечки. Хроматическая дисперсия. Материальная и волноводная дисперсия. Длина волны нулевой дисперсии. Диаметр модового поля. Влияние хроматической дисперсии на длину регенерационного участка. Рекомендации МСЭ. Классификация и параметры современных одномодовых оптических волокон.

## **7. Пассивные оптические компоненты**

Особенности и параметры пассивных компонентов. Разъемные и неразъемные соединения оптических волокон. Вносимые и возвратные потери в соединениях. Конструкции и параметры разъемных соединителей. Механические соединители. Оптические разветвители. Оптические интерференционные фильтры. Устройства WDM. Оптические изоляторы. Оптические аттенюаторы.

## **8. Передающие устройства ВОЛС**

Требования к передающим устройствам. Источники излучения. Светоизлучающие диоды, их параметры и конструкции. Спонтанная люминисценция. Лазерные диоды, их параметры и конструкции. Вынужденная люминисценция. Внутренняя и внешняя модуляция. Структурная схема передающего устройства. Модуляторы.

## **9. Фотоприемные устройства**

Фотодиоды, их параметры, конструкции, схемы включения. Лавинный фотодиод. Источники шума в фотоприемных устройствах. Параметры фотоприемных устройств.

## **10. Измерения параметров ВОЛС**

Задачи технической эксплуатации. Измерение основных параметров волоконно-оптических трактов с помощью оптических тестеров и рефлектометров. Плановые и аварийные измерения. Определение расстояний до мест повреждений и неоднородностей.

## ЛИТЕРАТУРА

### *Основная*

1. Андреев, В. А. Направляющие системы электросвязи : учебник : в 2 т. / В. А. Андреев, Э. Л. Портнов, Л. Н. Кочановский. - 7-е изд., перераб. и доп. - М. : Горячая линия –Телеком, 2009. – Т. 1 : Теория передачи и влияния. - 424 с.
2. Андреев, В. А. Направляющие системы электросвязи [Электронный ресурс] : учебник : в 2 т. / В. А. Андреев, Э. Л. Портнов, Л. Н. Кочановский. - 7-е изд., перераб. и доп. - М. : Горячая линия–Телеком, 2011. - Т. 1 : Теория передачи и влияния. - 424 с.

### *Дополнительная*

1. Былина, М. С. Физические основы оптических направляющих систем [Электронный ресурс] : метод. указ. к лаб. работам / М. С. Былина, С. Ф. Глаголев ; ред. С. Ф. Глаголев ; Федер. агентство связи, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «С.-Петерб. гос. ун-т телекоммуникации им. проф. М. А. Бонч-Бруевича». - СПб. : СПбГУТ, 2010. - 84 с. - Имеется печ. аналог.
2. Волоконно-оптическая техника : современное состояние и новые перспективы : сб. ст. / ред.: С. А. Дмитриев, Н. Н. Слепов. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Техносфера, 2010. - 607 с.
3. Гитин, В. Я. Волоконно-оптические телекоммуникационные системы и сети : учеб. пособие / В. Я. Гитин, С. Ф. Глаголев, Л. Н. Кочановский ; Федер. агентство связи, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «С.-Петерб. гос. ун-т телекоммуникации им. проф. М. А. Бонч-Бруевича». - СПб. : СПбГУТ, 2006. - 175 с.
4. Глаголев, С. Ф. Передаточные характеристики оптических волокон [Электронный ресурс] : учеб. пособие / С. Ф. Глаголев, В. С. Иванов, Л. Н. Кочановский ; Федер. агентство связи, С.-Петерб. гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. - СПб. : СПбГУТ, 2005. - 79 с. – Имеется печ. аналог.
5. Иванов, В. С. Физические основы оптических направляющих систем [Электронный ресурс] : метод. указ. к контр. работе (спец. 201000) / В. С. Иванов, Г. М. Смирнов ; М-во информ. технологий и связи Рос. Федерации, С.-Петерб. гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. - СПб. : СПбГУТ, 2005. - 12 с. - Имеется печ. аналог.
6. Измерение параметров волоконно-оптических линейных трактов [Электронный ресурс] : учеб. пособие / М. С. Былина [и др.] ; ред. С. Ф. Глаголев ; М-во Рос. Федерации по связи и информатизации, С.-Петербург. гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. - СПб. : СПбГУТ, 2002. - 78 с. – Имеется печ. аналог.
7. Иоргачев, Д. В. Волоконно-оптические кабели и линии связи / Д. В. Иоргачев, О. В. Бондаренко. - М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2002. - 282 с.

8. Скляров, О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи : учеб. пособие / О. К. Скляров. - 2-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2010. - 265 с.
9. Скляров, О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи [Электронный ресурс] : учеб. пособие / О. К. Скляров. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2009. - 266 с.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЮ

Номер варианта контрольной работы определяется двумя последними цифрами номера зачетной книжки.

### Задание 1. Расчет зависимости коэффициента затухания оптического волокна от длины волны.

Рассчитать зависимости коэффициента затухания  $\alpha_a(\lambda)$ , обусловленного поглощением, коэффициента затухания  $\alpha_s(\lambda)$ , обусловленного релеевским рассеиванием, а также результирующий коэффициент затухания  $\alpha(\lambda)$  оптического волокна (ОВ) в заданном диапазоне длин волн  $\lambda$ .

Построить графики зависимостей  $\alpha_a(\lambda)$ ,  $\alpha_s(\lambda)$  и  $\alpha(\lambda)$ .

#### *Исходные данные к заданию 1*

Верхняя  $\lambda_{\max}$  и нижняя  $\lambda_{\min}$  границы диапазона длин волн, в пределах которого следует провести расчеты  $\alpha_a(\lambda)$ ,  $\alpha_s(\lambda)$  и  $\alpha(\lambda)$ , определяются выражениями:

$$\lambda_{\min} = 1100 + 40 \cdot (m - 5) + 30 \cdot (k - 5) \text{ нм}, \quad (1)$$

$$\lambda_{\max} = 1400 + 10 \cdot (m - 5) + 25 \cdot (k - 5) \text{ нм}, \quad (2)$$

где  $m$  и  $k$  – первая и вторая цифра в номере варианта соответственно.

Значения длин волн в соседних точках, на которых будут проводиться расчеты, должны отличаться не более чем на 5 нм.

#### *Методические указания к выполнению задания 1*

Затухание в оптическом волокне характеризует ослабление оптической мощности, распространяемой вдоль ОВ, и выражается в дБ. Величина затухания, отнесенная к единице длины волокна, называется коэффициентом затухания и выражается в дБ/км.

Потери, возникающие при распространении сигнала по однородному кварцевому ОВ, объясняются в основном двумя причинами:

- поглощением оптического излучения частицами материала – самого кварцевого стекла и вредных примесей,
- релеевским рассеянием оптического излучения.

Поэтому результирующий коэффициент затухания  $\alpha(\lambda)$  можно представить в виде суммы коэффициентов затухания, обусловленных поглощением  $\alpha_a(\lambda)$  и рассеянием  $\alpha_s(\lambda)$ :

$$\alpha(\lambda) = \alpha_a(\lambda) + \alpha_s(\lambda). \quad (3)$$

Коэффициент затухания  $\alpha_a(\lambda)$ , обусловленный поглощением, в свою очередь складывается из:



- коэффициентов остаточных потерь из-за резонансного поглощения кварца в инфракрасной  $\alpha_{inf}(\lambda)$  и ультрафиолетовой  $\alpha_{ult}(\lambda)$  областях спектра;
- коэффициентов потерь  $\alpha_{OH}(\lambda)$  из-за резонансного поглощения на ионах гидроксильных групп ОН<sup>-</sup>, которые обуславливают мощные резонансы на длинах волн 1.29 и 1.383 мкм, а также более слабые пики в области длин волн 1.13, 0.95, 0.875, 0.825 и 0.725 мкм;
- коэффициентов потерь  $\alpha_{imp}(\lambda)$  из-за резонансного поглощения на других вредных примесях, в том числе, на ионах металлов переходной группы (Fe, Cu, Cr, Ni, Mn), которые вызывают ряд полос поглощения в диапазоне длин волн 0.5–1.5 мкм.

Перечисленные коэффициенты потерь могут быть рассчитаны по приведенным ниже формулам.

Для коэффициентов остаточных потерь из-за резонансного поглощения кварца в инфракрасной  $\alpha_{inf}(\lambda)$  и ультрафиолетовой  $\alpha_{ult}(\lambda)$  областях спектра справедливы соотношения

$$\alpha_{inf}(\lambda) = A_{inf} \cdot \exp\left(-\frac{\lambda_{inf}}{\lambda}\right), \quad (4)$$

$$\alpha_{ult}(\lambda) = A_{ult} \cdot \exp\left(\frac{\lambda_{ult}}{\lambda}\right), \quad (5)$$

где  $A_{inf} = 7.81 \cdot 10^{11}$  дБ/км,  $\lambda_{inf} = 48.5$  мкм,  $A_{ult} = 2.55 \cdot 10^{-3}$  дБ/км,  $\lambda_{ult} = 4.63$  мкм.

Для расчета коэффициентов потерь  $\alpha_{OH}(\lambda)$  из-за резонансного поглощения на ионах гидроксильных групп ОН<sup>-</sup> можно использовать выражение:

$$\alpha_{OH}(\lambda) = \sum_{i=1}^K \frac{\Delta\lambda_i \cdot g_i}{2\pi \left[ (\lambda - \lambda_i)^2 + \left(\frac{\Delta\lambda_i}{2}\right)^2 \right]}, \quad (6)$$

где  $K$  – число учитываемых при расчете резонансов,  $\lambda_i$  – центральная длина волны  $i$ -го резонанса,  $\Delta\lambda_i$  – спектральная ширина  $i$ -го резонанса,  $g_i$  – амплитуда  $i$ -го резонанса.

В контрольной работе предлагается учесть только два основных резонанса, вызванных гидроксильными группами ОН<sup>-</sup>, параметры которых приведены в табл. 1.

Коэффициенты потерь  $\alpha_{imp}(\lambda)$  из-за резонансного поглощения на других вредных примесях при современном уровне технологии производства ОВ практически сведены к нулю в широком диапазоне длин волн (0.7–1.6 мкм), поэтому в контрольной работе их расчет не предполагается.

Таблица 1. Параметры для расчета  $\alpha_{OH}(\lambda, \lambda_{OH})$ 

Номер резонанса	Резонансная длина волны, мкм	Спектральная ширина резонанса, нм	Амплитуда резонанса, дБ·нм/км
1	1.290	30	2.0
2	1.383	30	10

Таким образом, коэффициент затухания  $\alpha_a(\lambda)$ , обусловленный поглощением, можно рассчитать по выражению:

$$\alpha_a(\lambda) = \alpha_{inf}(\lambda) + \alpha_{ult}(\lambda) + \alpha_{OH}(\lambda). \quad (7)$$

Коэффициент затухания  $\alpha_s(\lambda)$ , обусловленный релеевским рассеянием, можно рассчитать по выражению:

$$\alpha_s(\lambda) = \frac{k_s}{\lambda^4}, \quad (8)$$

где  $k_s$  – коэффициент рассеивания, зависящий от технологии производства ОВ. В данной контрольной работе примем его равным  $0,8 \text{ мкм}^4 \cdot \text{дБ/км}$ . Потери на релеевское рассеивание определяют нижний предел потерь, присущих ОВ.

### **Порядок выполнения задания 1**

1. Определить по выражениям (1) и (2) диапазон длин волн, в пределах которого нужно провести расчеты.
2. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент остаточных потерь  $\alpha_{inf}(\lambda)$  из-за резонансного поглощения кварца в инфракрасной области по формуле (4).
3. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент остаточных потерь  $\alpha_{ult}(\lambda)$  из-за резонансного поглощения кварца в ультрафиолетовой области по формуле (5).
4. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент потерь  $\alpha_{OH}(\lambda)$  из-за резонансного поглощения на ионах гидроксильных групп ОН по выражению (6), считая, что  $K = 2$ . Параметры резонансов взять из табл. 1.
5. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент затухания  $\alpha_a(\lambda)$ , обусловленный поглощением, по выражению (7). Построить график  $\alpha_a(\lambda)$ .
6. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент затухания  $\alpha_s(\lambda)$ , обусловленный релеевским рассеянием, по выражению (8). Построить график  $\alpha_s(\lambda)$ .
7. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн результирующий коэффициент затухания  $\alpha(\lambda)$  по выражению (3). Построить график  $\alpha(\lambda)$ .
8. Сформулировать выводы.

**Задание 2. Расчет зависимости уширения оптических импульсов в одномодовом ОВ, обусловленного хроматической дисперсией, от длины волны.**

Рассчитать зависимости показателей преломления сердцевины  $n_1(\lambda)$  и оболочки  $n_2(\lambda)$  ОВ от длины волны. Построить графики зависимостей  $n_1(\lambda)$  и  $n_2(\lambda)$ .

Рассчитать зависимости коэффициентов материальной  $D_{mat}(\lambda)$ , волновой  $D_w(\lambda)$  и результирующей хроматической  $D_{chr}(\lambda)$  дисперсии ОВ от длины волны. Построить графики зависимостей  $D_{mat}(\lambda)$ ,  $D_w(\lambda)$  и  $D_{chr}(\lambda)$ .

Рассчитать зависимость уширения оптических импульсов  $\Delta t(\lambda)$  за счет хроматической дисперсии в стандартном одномодовом ОВ (ОМ ОВ) от длины волны. Построить график зависимости  $\Delta t(\lambda)$ .

**Исходные данные к заданию 2**

Диапазон длин волн для проведения расчетов определен в исходных данных к заданию 1.

В табл. 2 приведены исходные данные для расчета зависимости показателя преломления оболочки ОВ от длины волны. Смысл приведенных коэффициентов будет пояснен ниже.

Таблица 2. Параметры для расчета показателей преломления оболочки

Вариант	Состав стекла	Тип коэффициента	<i>i</i>		
			1	2	3
0-9, 50-59	100% SiO <sub>2</sub>	$A_i$ $\lambda_i$ , мкм	0.6961663	0.4079426	0.8974794
			0.0684043	0.1162414	9.896161
10-19, 60-69	1.0% F 90.9% SiO <sub>2</sub>	$A_i$ $\lambda_i$ , мкм	0.691116	0.399166	0.890423
			0.068227	0.116460	9.993707
20-29, 70-79	3.0% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 97.0 SiO <sub>2</sub>	$A_i$ $\lambda_i$ , мкм	0.6935408	0.4052977	0.9111432
			0.0717021	0.1256396	9.896154
30-39, 80-89	3.5% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 96.5% SiO <sub>2</sub>	$A_i$ $\lambda_i$ , мкм	0.6929642	0.4047468	0.9154064
			0.0604843	0.1239609	9.896152
40-49, 90-99	13.3% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 86.7% SiO <sub>2</sub>	$A_i$ $\lambda_i$ , мкм	0.690618	0.401996	0.898817
			0.061900	0.123662	9.098960

В работе предполагается, что сердцевина волокна изготовлена из кварцевого стекла с легирующей добавкой оксида германия GeO<sub>2</sub> (варианты 0-9, 20-29, 40-49, 60-69, 80-89) или пентоксида фосфора (варианты 10-19, 30-39, 50-59, 70-79, 90-99). Концентрацию легирующей добавки  $p$  в молярных процентах рассчитайте по выражению:

$$p = 9.5 - (N - 50) \cdot 0.15, \tag{9}$$

где  $N$  – номер варианта.

Ширину спектра оптического сигнала  $\Delta\lambda$  рассчитайте по формуле:

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_0 + \Delta\lambda_1(N - 50), \quad (10)$$

где  $N$  – номер варианта,  $\Delta\lambda_0 = 1$  нм,  $\Delta\lambda_1 = 0.01$  нм.

Длину ОВ  $L$  рассчитайте по формуле:

$$L = L_0 + L_1(N - 50), \quad (11)$$

где  $N$  – номер варианта,  $L_0 = 100$  км,  $L_1 = 0.5$  км.

Диаметр сердцевины оптического волокна  $d_{core}$  рассчитайте по формуле:

$$d_{core} = d_0 + d_1(N - 50), \quad (12)$$

где  $N$  – номер варианта,  $d_0 = 8$  мкм,  $d_1 = 0.05$  мкм.

### **Методические указания к выполнению задания 2**

1. Расчет зависимостей показателей преломления сердцевины  $n_1(\lambda)$  и оболочки  $n_2(\lambda)$  ОВ от длины волны и построение графиков этих зависимостей.

Спектральная зависимость показателей преломления стекол, используемых для изготовления ОВ, в диапазоне 0.6–2 мкм хорошо описывается дисперсионной формулой Селлмейера:

$$n^2(\lambda) - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}. \quad (13)$$

В (9) входят резонансные длины волн  $\lambda_i$  и безразмерные коэффициенты  $A_i$ . Значения  $\lambda_i$  и  $A_i$  для расчета  $n_2(\lambda)$  приведены в табл. 2.

Для расчета  $n_1(\lambda)$  используем выражение:

$$n_1(\lambda) = n_{Si}(\lambda) + A_d p, \quad (14)$$

где  $n_{Si}(\lambda)$  – зависимость показателя преломления чистого плавленого кварца от длины волны,  $p$  – содержание легирующей примеси в молярных процентах,  $A_d$  – коэффициент аппроксимации, равный  $1.4145 \cdot 10^{-3}$  для оксида германия и  $1.6520 \cdot 10^{-3}$  для пентоксида фосфора. Зависимость  $n_{Si}(\lambda)$  рассчитать по выражению (13) с использованием коэффициентов, приведенных в табл. 2 (100% SiO<sub>2</sub>).

2. Расчет зависимостей коэффициентов материальной  $D_{mat}(\lambda)$ , волноводной  $D_w(\lambda)$  и результирующей хроматической  $D_{chr}(\lambda)$  дисперсии стандартного ОМ ОВ от длины волны и построение графиков этих зависимостей.

Дисперсией ОВ называют явление уширения (увеличения длительности) оптических импульсов при распространении их по этому ОВ. Дисперсия ограничивает дальность и скорость оптической связи.

В ОМ ОВ основным видом дисперсии является *хроматическая дисперсия*, обусловленная различием групповых скоростей спектральных составляющих оптического сигнала.

Хроматическая дисперсия складывается из материальной и волноводной дисперсий. *Материальная дисперсия* обусловлена зависимостью показателя преломления сердцевины ОВ от длины волны. *Волноводная дисперсия* зависит от конструкции и размеров волновода.

Коэффициент хроматической дисперсии  $D_{chr}(\lambda)$  можно рассчитать по формуле:

$$D_{chr}(\lambda) = D_{mat}(\lambda) + D_w(\lambda). \quad (15)$$

Величины  $D_{chr}(\lambda)$ ,  $D_{mat}(\lambda)$  и  $D_w(\lambda)$  принято выражать в пс / (нм·км).

Коэффициент материальной дисперсии  $D_{mat}(\lambda)$  для стандартного ОМ ОВ можно рассчитать по формуле:

$$D_{mat} = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}, \quad (16)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме. Для расчета второй производной показателя преломления сердцевины по длине волны  $n_1(\lambda)$  необходимо дважды продифференцировать (13), в результате получим:

$$\frac{dn_1(\lambda)}{d\lambda} = -\lambda \left( \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda_i^2}{(\lambda^2 - \lambda_i^2)^2} \right) / n_1(\lambda), \quad (17)$$

$$\frac{d^2 n_1(\lambda)}{d\lambda^2} = \left[ \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda_i^2 (3\lambda^2 + \lambda_i^2)}{(\lambda^2 - \lambda_i^2)^3} - \left( \frac{dn_1(\lambda)}{d\lambda} \right)^2 \right] / n_1(\lambda). \quad (18)$$

Коэффициент волноводной дисперсии  $D_w(\lambda)$  для стандартного ОМ ОВ можно рассчитать по формуле:

$$D_w = \frac{\Delta(\lambda) n_1(\lambda)}{c \cdot \lambda} \cdot D(V(\lambda)) \cdot V(\lambda), \quad (19)$$

где  $V(\lambda)$  – нормированная частота,  $\Delta(\lambda)$  – высота профиля, которые рассчитываются по выражениям:

$$V(\lambda) = \frac{\pi d_{core}}{\lambda} \sqrt{n_1^2(\lambda) - n_2^2(\lambda)}, \quad (20)$$

$$\Delta(\lambda) = \frac{n_1^2(\lambda) - n_2^2(\lambda)}{2n_1^2(\lambda)}. \quad (21)$$

Безразмерный параметр  $D(V)$ , входящий в (14), называют параметром искажения. На рис. 1 представлена зависимость произведения  $D(V) \cdot V$  от  $V$ .

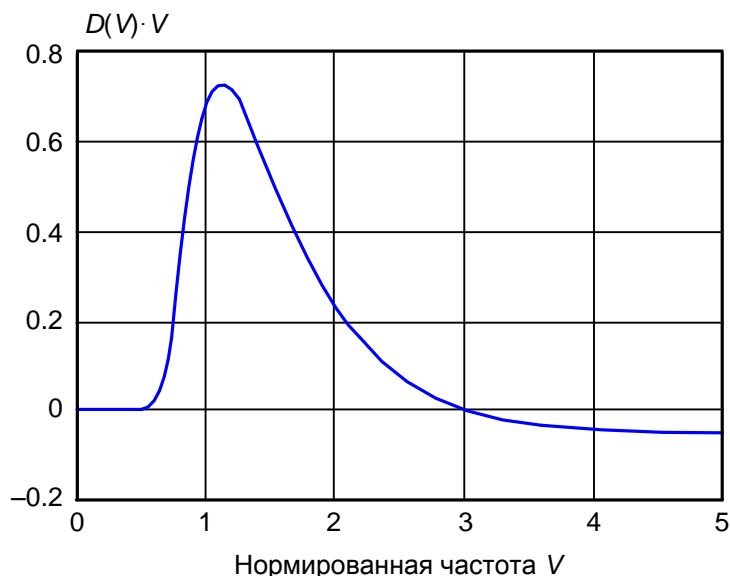


Рис. 1. Зависимость  $D(V) \cdot V$  от  $V$

Необходимые для проведения расчетов значения  $D(V) \cdot V$  можно определить непосредственно по графику или воспользоваться следующей функцией, аппроксимирующей  $D(V) \cdot V$ :

$$D(V) \cdot V \approx \begin{cases} \frac{1.41}{(V - 0.55)^{1.5}} \exp\left(-\frac{0.86}{V - 0.55}\right) & \text{при } V \leq 1.1 \\ 0.82 \left(1 - \exp\left(-\frac{4.9}{V^{3.6}}\right)\right) - 0.056 & \text{при } V > 1.1 \end{cases} \quad (22)$$

3. Расчет зависимости уширения оптических импульсов  $\Delta t(\lambda)$  за счет хроматической дисперсии в ОМ ОБ от длины волны и построения графика этой зависимости.

Уширение импульса  $\Delta t(\lambda)$ , обусловленное хроматической дисперсией, можно рассчитать по выражению:

$$\Delta t(\lambda) = |D_{chr}(\lambda)| \cdot \Delta\lambda \cdot L, \quad (23)$$

где  $\Delta\lambda$  – ширина спектра оптического сигнала,  $L$  – длина ОБ.

### **Порядок выполнения задания 2**

1. Определить по табл. 3 параметры оптических стекол сердцевины и оболочки стандартного ОМ ОБ.

2. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн показатели преломления сердцевины  $n_1(\lambda)$  и оболочки  $n_2(\lambda)$  ОМ ОВ от длины волны по формулам (13), (14) и (9). Построить графики  $n_1(\lambda)$  и  $n_2(\lambda)$ .
3. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент материальной дисперсии  $D_{mat}(\lambda)$  ОМ ОВ по формулам (16–18). Построить график  $D_{mat}(\lambda)$ .
4. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн высоту профиля  $\Delta(\lambda)$  ОМ ОВ по формуле (21).
5. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн нормированную частоту  $V(\lambda)$  по формулам (20) и (12).
6. Для каждого рассчитанного значения  $V(\lambda)$  по формуле (22) определить значение произведения  $D(V) \cdot V$ .
7. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент волноводной дисперсии  $D_w(\lambda)$  ОМ ОВ по формуле (19). Построить график  $D_w(\lambda)$ .
8. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн коэффициент хроматической дисперсии  $D_{chr}(\lambda)$  по формуле (15). Построить график  $D_{chr}(\lambda)$ .
9. Определить по формулам (10) и (11) длину волокна  $L$  и ширину спектра оптического сигнала  $\Delta\lambda$ .
10. Рассчитать в заданном диапазоне длин волн уширение импульса  $\Delta t(\lambda)$ , обусловленное хроматической дисперсией, по выражению (23). Построить график  $\Delta t(\lambda)$ .
11. Сформулировать выводы.