

Электронный научный журнал «Век качества» ISSN 2500-1841 <http://www.agequal.ru>

2017, № 3 [http://www.agequal.ru/pdf/2017/AGE\\_QUALITY\\_3\\_2017.pdf](http://www.agequal.ru/pdf/2017/AGE_QUALITY_3_2017.pdf)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Зубилевич А.Л. Анализ методик расчета потерь в оптическом кабеле // Электронный научный журнал «Век качества». 2017. №3. С. 103-114. Режим доступа: <http://www.agequal.ru/pdf/2017/317007.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**УДК 621.315.23; 681.7.068.2**

## **Анализ методик расчета потерь в оптическом кабеле**

*Зубилевич Александр Львович,  
профессор, к.т.н., МТУСИ, 111024 г.Москва, ул. Авиамоторная, 8а  
[zal51@rambler.ru](mailto:zal51@rambler.ru)*

**Аннотация.** Для волоконно-оптических линий связи существует два основных передаточных параметра, которые ограничивают её длину без применения повторителей. Этими наиболее важными параметрами являются потери и дисперсия. Затухание волоконного световода является важным фактором при проектировании кабельных сетей для передачи информации. В настоящее время в технике связи, в основном, применяются кварцевые коаксиальные оптические волокна, область эффективного применения которых находится в диапазоне длин волн до 2 мкм, и использующие, как правило, слабонаправляющие световоды, у которых показатели преломления сердцевин и оболочки отличаются менее чем на 1%. В работе показана разница между затуханием оптического волокна, изготовленного на заводе, и потерями в оптическом кабеле находящемся в эксплуатации. Коэффициент затухания кварцевого оптического волокна обуславливается, так называемыми, собственными потерями волокна. Потери мощности сигнала в оптическом кабеле складываются из собственных потерь волокна и дополнительных кабельных потерь. В работе подробно описан механизм появления основных потерь, возникающих при распространении по волокну электромагнитной энергии, а также дополнительных потерь в оптическом кабеле. В работе дан подробный анализ причин возникновения основных и дополнительных потерь в оптических кабелях, а также путей снижения этих значений, таких как, выбор соответствующего типа оптического волокна и рабочей длины волны. Данная работа посвящена исследованию возможности расчета потерь в оптических кабелях связи, использующих, как правило, одномодовые волокна.

Рассмотрены наиболее распространенные методики расчета коэффициента затухания оптических кабелей находящихся в эксплуатации. На основании детального анализа, выполненных по известным методикам результатов расчета потерь в оптических кабелях, выбрана оптимальная, обеспечивающая наиболее близкие значения к данным, полученных экспериментальным путем.

**Ключевые слова.** Волоконно-оптическая линия связи; оптический кабель связи; оптическое волокно; методика расчета потерь; собственные потери; дополнительные кабельные потери.

С появлением первых волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) особое внимание всегда уделялось важнейшим передаточным параметрам оптического кабеля (ОК) – затуханию и дисперсии.

Знание величины потерь в оптических кабелях, особенно на линиях большой протяженности, трансокеанских и международных, необходимо для обеспечения бюджета потерь, особенно при переходе на более современные системы передачи (СП) или при изменении структуры сети.

При этом особое внимание следует уделять выбору типа волокна для кабелей, прокладываемых на междугородних линиях связи [1], учитывая не только передаточные параметры оптического волокна (ОВ), но и экономическую целесообразность их применения [2,3], что имеет также важное значение при определении оптимальной марки используемого оптического кабеля [4,5].

Однако, всегда нужно различать километрический коэффициент затухания оптического волокна изготовленного на заводе и потери в оптическом кабеле находящемся в эксплуатации. А именно последнее значение и будет определять в дальнейшем возможность ВОЛС к необходимому усовершенствованию и ремонту.

Затухание в оптическом кабеле – это снижение мощности светового сигнала при прохождении по волокну и содержащее все виды потерь, сопутствующие передаче на дальний конец линии связи. Естественно, что затухание кабеля

является особенно важным фактором при использовании гигабитных и выше скоростей передачи. Скорость передачи и бюджет потерь определяют работоспособность оптического кабеля и пассивных компонентов ВОЛС в высокоскоростных системах передачи.

В сетях небольшой протяженности (структурированные кабельные системы и локальные вычислительные сети) при расчете параметров кабельной системы также очень важно правильно оценить воздействие транслируемого сигнала на приемопередающую аппаратуру, и, следовательно, необходимо точное знание величины потерь в направляющей среде передачи.

Потери в оптическом кабеле можно разделить на две основные группы – это прямые и возвратные потери.

Прямые потери - это ослабление сигнала при прохождении от источника излучения к фотоприемнику, расположенному на дальнем конце оптического кабеля. Прямые потери разделяют на потери поглощения и потери рассеяния. Потери на поглощение, в свою очередь, делятся на потери на инфракрасное (ИК) поглощение и ультрафиолетовое (УФ) поглощение. Потери на рассеяние делятся на потери за счет рассеяния Релея, рассеяния Мандельштамма-Бриллюэна и вынужденное комбинационное рассеяние [6].

Возвратные потери имеют большое значение для качественной передачи сигналов и определяют величину возвратившейся к источнику излучения оптической мощности. Чем больше величина возвратных потерь по абсолютному значению, тем меньше вернувшаяся к источнику оптическая мощность и, следовательно, лучше условия работы источника оптического излучения. При этом снижается мощность фонового шума и увеличивается отношение сигнал/шум на дальнем конце линии, что приводит к более устойчивой работе приемно-передающей аппаратуры, что особенно важно для одномодовых систем передачи, в которых большая величина вернувшейся в

источник оптической мощности может вызвать перескок моды, а также и для систем кабельного телевидения [6].

В данной работе рассматриваются методики расчета только прямых потерь.

Для определения потерь в оптическом кабеле рассмотрим более подробно из каких составляющих складывается километрический коэффициент затухания кварцевых волокон.

Итак результирующий коэффициент затухания ОК состоит из шести независимых компонентов:

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_{ик} + \alpha_{уф} + \alpha_{пр} + \alpha_v + \alpha_k,$$

где:  $\alpha_p$ -потери на рэлеевское рассеяние;

$\alpha_{ик}$ - потери на инфракрасное (ИК) поглощение;

$\alpha_{уф}$ - потери на ультрафиолетовое (УФ) поглощение;

$\alpha_{пр}$ - потери на поглощение атомами примесей, прежде всего ионами ОН;

$\alpha_v$ - волноводные потери;

$\alpha_k$ - кабельные потери;

$\alpha_m = (\alpha_{ик} + \alpha_{уф})$ - потери в материале SiO<sub>2</sub>.

Ослабление, вносимое в ОК связано с наличием собственных и дополнительных потерь энергии. Собственные потери состоят из потерь поглощения и потерь на рэлеевское рассеяние. Дополнительные потери энергии называют кабельными  $\alpha_k$ . Они обусловлены скруткой, деформациями и изгибами ОВ, возникающими в процессе производства ОК, а также в процессе его прокладки при строительстве ВОЛС. Условиями снижения дополнительных потерь являются грамотный выбор способа прокладки оптических кабелей [7,8], а также соблюдение технологии строительного-монтажных работ при строительстве волоконно-оптических линий связи [ 9 ] .

Потери на рэлеевское рассеяние  $\alpha_p$  связаны с наличием в стекле микроскопических неоднородностей, приводящих к флуктуации показателя

преломления ( $ПП=n=\sqrt{\epsilon}$ ), на расстояниях меньших длины световой волны (рэлеевских центров), а так же локальные микроскопические изменения в составе материала волокна. Рассеяние света на этих неоднородностях приводят к выходу части его энергии из сердцевины в оболочку, а следовательно и к потерям. Именно рэлеевское рассеяние является главной причиной возникновения потерь почти во всех оптических диапазонах.

Потери на поглощение примесями проявляют себя в виде резонансных всплесков затухания на определенных длинах волн, отчего их часто называют ионно-резонансными. Эти потери невозможно оценить путем элементарного расчета, хотя бы потому, что они зависят и от вида примеси, и от ее концентрации. Наиболее заметный всплеск известный как «водяной пик» расположен в окрестности длины волны  $\lambda=1383$  нм. Такое название связано с его происхождением: он порожден вредной примесью - ионами гидроксидов  $OH^-$ , источниками которого являются молекулы воды, попавшие в стекло в процессе его изготовления. Потери на резонансной волне могут достигать 2 дБ/км и даже больше.

Учесть влияние примесей разумным образом не удастся. В современных качественных ОВ примесей очень мало  $10^{-6}$ , ионы во многих случаях не оказывают заметного влияния на величину коэффициента затухания, поэтому в большинстве случаев принимают  $\alpha_{np} \approx 0$ .

Волноводные потери  $\alpha_v$  обусловлены небольшими плавными изменениями диаметра сердцевины ОВ, которые неизбежно появляются при его вытягивании в процессе изготовления. Как правило, в расчетах принимают  $\alpha_v \approx 0.02$  дБ/км.

Потери на ИК и УФ поглощения существенно зависят от длины волны  $\lambda$ . Для их приближенной оценки можно использовать следующие эмпирические формулы [ 12 ] :

$$\alpha_{ик} \approx 10^{12} \exp(-49/\lambda) \quad (1)$$

$$\alpha_{\text{yf}} \approx \frac{\text{dec}(2/\lambda)}{2154} \quad (2)$$

где:  $\lambda$  в мкм;  $\alpha$  в дБ/км.

Кабельные потери не зависят от длины волны  $\lambda$ , их определяют, учитывая, что при соблюдении технических условий на изготовление и прокладку ОК их номинальный вклад составляет не более 12% от собственных потерь ОВ.

Рассмотрим три наиболее известных метода определения потерь в оптических кабелях и сравним результаты расчета. Расчеты выполним на длине волны 1,55 мкм.

Рассмотрим метод расчета потерь в ОК изложенный в [ 10 ]:

Потери на релеевское рассеяние определим по выражению:

$$\alpha_p = K_p / \lambda^4, \text{ дБ/км}$$

где  $K_p$  – коэффициент рассеяния, для кварца равный  $(0,8 \text{ мкм}^4 \cdot \text{дБ/км})$ .

Из расчета получаем:

$$\alpha_p = 0,14 \text{ дБ/км.}$$

Потери на поглощение рассчитываются по формуле:

$$\alpha_{\text{п}} = 8,69 \frac{\pi \cdot n_1}{\lambda} \cdot \text{tg } \delta \cdot 10^9, \text{ дБ/км}$$

где  $n_1$  - показатель преломления сердцевины волокна; 1,51

$\text{tg } \delta$  - тангенс угла диэлектрических потерь в световоде, для нашего

случая возьмём  $\text{tg } \delta = 7 \cdot 10^{-12}$ , тогда по расчету получим

$$\alpha_{\text{п}} = 8,69 \frac{3,14 \cdot 1,51}{1,55} \cdot 7 \cdot 10^{-12} \cdot 10^9 = 0,19 \text{ дБ/км.}$$

Собственные потери в волокне определяются по выражению:

$$\alpha = \alpha_{\text{п}} + \alpha_p.$$

Добавив к собственным потерям ОВ кабельные потери ( $\alpha_k = 0,05 \text{ дБ/км}$ ),

получим общее затухание оптического кабеля:

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_n + \alpha_k = 0,19 + 0,14 + 0,05 = 0,38 \text{ дБ/км.}$$

Рассмотрим способ расчёта потерь в ОК по методу профессора Портнова Э.Л. [ 11 ].

Составляющая коэффициента затухания за счёт материальных потерь на поглощение рассчитывается по формуле:

$$\alpha_{пт} = 2,55 \cdot 10^{-3} \exp \left[ \frac{4,63 \cdot 10^3}{\lambda} \right], \text{ дБ/км}$$

$$\alpha_{пт} = 2,55 \cdot 10^{-3} \exp \left[ \frac{4,63 \cdot 10^3}{1,55 \cdot 10^3} \right] = 0,05 \text{ дБ/км.}$$

Составляющая коэффициента затухания в ОВ за счёт релеевских потерь рассчитывается по формуле:

$$\alpha_{pp} = \frac{6,3 \cdot 10^{11}}{\lambda^4} \cdot (1 + 215\Delta), \text{ дБ/км}$$

Для  $\Delta = 0,003$  - относительная разность показателей преломления сердцевины и оболочки ОВ, имеем

$$\alpha_{pp} = \frac{6,3 \cdot 10^{11}}{(1,55 \cdot 10^3)^4} \cdot (1 + 215 \cdot 0,003) = 0,18 \text{ дБ/км.}$$

Составляющая коэффициента затухания за счёт потерь в инфракрасной области рассчитывается по формуле:

$$\alpha_{ик} = 7,81 \cdot 10^{11} \exp \left[ \frac{-4,85 \cdot 10^4}{\lambda} \right], \text{ дБ/км}$$

$$\alpha_{ик} = 7,81 \cdot 10^{11} \exp \left[ \frac{-4,85 \cdot 10^4}{1,55 \cdot 10^3} \right] = 0,02 \text{ дБ/км.}$$

Величина собственных потерь в волокне равна:

$$\alpha = \alpha_{пт} + \alpha_{pp} + \alpha_{ик} = 0,05 + 0,18 + 0,02 = 0,25 \text{ дБ/км.}$$

Добавим сюда кабельные потери  $\alpha_{каб} = 0,02$  дБ/км и получим общий коэффициент затухания ОК

$$\alpha = 0,27 \text{ дБ/км.}$$

Рассмотрим вариант расчета коэффициента затухания одномодовых ОВ по методике, изложенной в [12]. При этом учитываются следующие компоненты

потерь в оптическом кабеле:  $\alpha_p$  - потери на релеевское рассеяние,  $\alpha_{ик}$  - потери на ИК поглощение,  $\alpha_{уф}$  - потери на УФ поглощение,  $\alpha_в$  – волноводные потери,  $\alpha_к$  - кабельные потери.

Потери на релеевское рассеяние:

$$\alpha_p = \frac{0,75}{\lambda^4} = 0,13 \text{ дБ/км.}$$

Потери на инфракрасное поглощение определим по формуле ( 1 ):

$$\alpha_{ик} = 0,018 \text{ дБ/км.}$$

Потери на ультрафиолетовое поглощение определим по формуле ( 2 ):

$$\alpha_{уф} = 0,009 \text{ дБ/км.}$$

Значение волноводных потерь примем

$$\alpha_в = 0,02 \text{ дБ/км.}$$

Рассчитаем собственные потери ОВ:

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_{ик} + \alpha_{уф} + \alpha_в = 0,13 + 0,018 + 0,009 + 0,02 = 0,177 \text{ дБ/км.}$$

Определим теперь кабельные потери:

$$\alpha_к = 0,12 \cdot \alpha = 0,12 \cdot 0,177 = 0,021 \text{ дБ/км.}$$

Добавив к собственным потерям ОВ кабельные, получаем коэффициент затухания одномодового ОК равным

$$\alpha_{рез} = 0,177 + 0,021 = 0,2 \text{ дБ/км.}$$

Аналогичным путем рассчитаем коэффициент затухания в оптических кабелях во втором окне прозрачности на длине волны 1,31 мкм.

Сведем полученные результаты расчетов в таблицу и добавим значения потерь в реальных оптических кабелях, полученные экспериментальным путем [ 13 ].

Таблица

Результаты расчетов и измерений коэффициента затухания в оптических кабелях в дБ/км



Методика	Ксенофонтова	Портнова	Чёткина	Эксперимент
□□□□□□мкм	0,54	0,48	0,33	0,45
□□□□□□мкм	0,38	0,27	0,20	0,25

Работа выполнена на кафедре «Направляющие телекоммуникационные среды МТУСИ [ 14 ].

На основе проведенного численного анализа табличным способом, можно сформулировать следующие выводы.

#### **ВЫВОДЫ:**

Анализ результатов расчета потерь в оптических кабелях по рассмотренным методикам показывает их существенное расхождение. Наиболее близкие результаты расчета к значениям, полученных экспериментальным путем, дает методика профессора Портнова Э.Л. [11].

#### **Литература**

1. Зубилевич А.Л., Колесников В.А. К вопросу о выборе оптических волокон // Т-Comm-Телекоммуникации и транспорт,2010, т.4, №8,-С.7-9.
2. Сиднев С.А., Зубилевич А.Л. Экономический показатель – основа выбора типа волокон для ВОЛС // Кабель-news,2012, №2,-С.46-48.
3. Сиднев С.А., Зубилевич А.Л. Обобщенный параметр NPV- критерий выбора типа волокон для оптических кабелей // Т-Comm- Телекоммуникации и транспорт,2012, т.6, №8,-С.59-61.
4. Сиднев С.А., Зубилевич А.Л., Колесников О.В., Царенко В.А. Влияние основных факторов неопределенности и их учет при выборе грозостойкого кабеля // Век качества,2014, №4,-С.76-79.

5. Сиднев С.А., Зубилевич А.Л., Царенко В.А. Выбор грозостойкого кабеля по экономическим критериям в условиях неопределенности // Т-Comm-Телекоммуникации и транспорт, 2014, т.8, №9, -С.77-79.
6. Волоконно-оптическая техника: Современное состояние и перспективы. - 2-е изд. под. ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. –М.: ООО «Волоконно-оптическая техника», 2005,-576с.
7. Зубилевич А.Л., Колесников В.А. Прокладка оптических кабелей с применением защитных пластмассовых труб // Т-Comm-Телекоммуникации и транспорт, 2009, № S1, -С.150-152.
8. Сиднев С.А., Зубилевич А.Л., Колесников О.В., Царенко В.А. Выбор способа прокладки оптического кабеля с учетом грозоповреждаемости // Кабели и провода, 2015, №6, -С.14-15.
9. Казакова Н.Е. Повышение квалификации как фактор обеспечения компетентности персонала при строительстве телекоммуникационных объектов и сооружений связи // Век качества, 2016, №3, -С.112-119.
10. Ксенофонов С.Н., Портнов Э.Л. Направляющие системы электросвязи. Сборник задач. –М.: «Горячая линия – Телеком», 2009,-268с.
11. Портнов Э.Л. Оптические кабели связи их монтаж и измерение. Учебное пособие для вузов. –М.: «Горячая линия-Телеком», 2012,-448с.
12. Чёткин С.В. “Методические указания по курсовому и дипломному проектированию оптических систем передачи” для студентов-заочников 5 и 6 курсов (спец. 200900 и 201000). -М.: «МТУСИ», 2002,-42с.
13. Власов И.И., Новиков Э.В., Птичников М.М., Сладких Д.А. Техническая диагностика современных цифровых сетей связи.-М.: «Горячая линия-Телеком», 2015,-436с.
14. Зубилевич А.Л. Здесь готовят связистов-линейщиков // Кабель-news, 2013, №3, -С.48-50.

## Analysis of methods of calculation of losses in optical cables

*Zubilevich Alexander L.,  
Professor, PhD, MTUCI,  
111024, Moscow, Aviamotornaya St.,8A  
zal51@rambler.ru*

**Abstract.** For fiber-optic communication there are two basic transmission parameters that limit its length without the use of repeaters. These most important parameters are the loss and dispersion. The attenuation optical fiber is an important factor when designing cable networks for the transmission of information. Currently in communications technology, mainly used quartz coaxial optical fiber, the effective area of application of which is in the range of wavelengths up to 2 microns, and using, as a rule, slaborebristaya waveguides where the refractive indices of the core and shell differ by less than 1%. The paper shows the difference between the attenuation of the optical fiber, manufactured at the plant, and losses in optical cables currently in use. Attenuation coefficient of quartz optical fiber is caused by the so-called private losses of the fiber. The loss of signal power in the optical cable consists of a private fiber loss and the additional cable losses. The article describes in detail the mechanism of occurrence of the major loss occurring during the propagation along the fiber of the electromagnetic energy, and additional losses in the optical cable. The paper presents a detailed analysis of the causes of the main and supplementary losses in the optical cables, as well as ways to reduce these values, such as selecting the appropriate type of optical fiber and the operating wavelength. This work examines the possibility of calculation of losses in the optical cables using the typically single-mode fibre. The most common method of calculating the attenuation coefficient of the optical cables in use. On the basis of detailed analysis carried out by known methods of calculation results of losses in the optical cables, the selected optimal, providing the closest values to the data received experimentally.

**Keywords:** fiber-optic communication line; optical cable; optical fiber; the method of calculation of losses; losses; additional cable losses.

### REFERENCES

1. Zubilevich A. L., Kolesnikov V.A. To the question of the choice of optical fiber // T-Comm-telecommunications and transport, 2010, vol. 4, №8,-Pp. 7-9.
2. Sydney S. A., Zubilevich A.L. Economic indicator – the basis of selection of the type of fibers for fiber optic / Cable-news,2012, №2, Pp. 46-48.

3. Sydney S. A., Zubilevich A. L. The Generalized parameter NPV - criterion of choosing the type of fibre optic cables // T-Comm - telecommunications and transport, 2012, vol. 6, №8, Pp. 59-61.
4. Sydney S. A., Zubilevich A. L., Kolesnikov, O. V., Tsarenko V. A. The influence of the main factors of uncertainty and taking them into account when choosing gronostajowa cable // Century quality, 2014, No. 4, Pp. 76-79.
5. Sydney S. A., Zubilevich A. L., Tsarenko V. A. Choice gronostajowa cable according to economic criteria in conditions of uncertainty // T-Comm-telecommunications and transport, 2014, vol. 8, No. 9, Pp. 77-79.
6. Fiber-optic technology: current status and prospects. -2nd ed. under. edited by S. A. Dmitriev, Slepov N. N. –M.: ООО "Fiber-optic technology", 2005,-576 p.
7. Zubilevich A. L., Kolesnikov V. A. Laying of optical cables with the use of protective plastic pipe, // T-Comm-telecommunications and transport, 2009, no. S1, Pp. 150-152.
8. Sydney S. A., Zubilevich A. L., Kolesnikov, O. V., Tsarenko V. A. Choice of method of laying the optical cable, taking into account gruzopererabotki // Cables and wires, 2015, №6, Pp. 14-15.
9. Kazakova N. E. Professional development as a factor of ensuring the competence of personnel in the construction of telecommunications facilities and structures of communication // Century of quality, 2016, No. 3, Pp. 112-119.
10. Ksenofontov S. N., Portnov E. L. Guides telecommunications system. A collection of tasks. –M.: "Hot line – Telecom", 2009,-268p.
11. Portnov E. L. Optic cables installation and measurement. Textbook for high schools. –M.: "Hot line-Telecom", 2012, 448p.
12. Chetkin, S. V. “Methodological guidelines for course and diploma design of optical transmission systems” for part-time students 5 and 6 courses (spec. And 200900 201000). -M.: "MTUCI", 2002, 42p.
13. Vlasov I. I., Novikov E. V., Ptichnikov, M. M., Sladkich, D. A. Technical diagnostics of modern digital communication networks.-M.: "Hot line-Telecom", 2015, 436p.
14. Zubilevich A. L. Served Here signalers-linesmen // Cable-news, 2013, №3, Pp. 48-50.