

**Федеральное агентство связи**

**Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования**

**ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ**

**ЭЛЕКТРОННАЯ  
БИБЛИОТЕЧНАЯ СИСТЕМА**

**Самара**

Федеральное агентство связи РФ  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Поволжский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики»

Кафедра «Линии связи и измерения в технике связи»

Методическая разработка к лабораторной работе  
**«Исследование вносимого затухания  
на макроизгибах оптического волокна»**

Составители: доц. Никулина Т.Г.  
к.т.н. Дашков М.В.  
асс. Гаврюшин С.А.

Рецензент: к.т.н. Трошин А.В.

Самара  
2011

**ББК 621.391.63**

**Д 21**

**Исследование вносимого затухания на макроизгибах оптического волокна:** учебно-методическая разработка / Т.Г. Никулина, М.В. Дашков, С.А. Гаврюшин. Самара: ИНУЛ ПГУТИ. 2011 – 16 с.

**Рецензент:** к.т.н. А.В. Трошин

В учебно-методической разработке приводится систематизированный материал по методу и средствам измерения вносимого затухания ОВ на макроизгибах. Рассмотрены физические механизмы возникновения потерь на макроизгибах и методика теоретического расчета.

*Рекомендовано Методическим советом ГОУ ВПО ПГУТИ в качестве учебно-методического пособия для студентов, обучающихся по специальностям 210401, 210404, 210406, 200600.*

*Протокол заседания Методического совета ПГУТИ  
№ 20 от 15.04.2011 г.*

## **Цель работы**

Изучение теоретических основ расчета прироста затухания оптического волокна (ОВ) на макроизгибах и исследование зависимости прироста затухания от параметров изгиба.

## **Литература**

1. Гроднев И.И. Волоконно-оптические линии связи. – М.: Радио и связь, 1990. – 224 с.
2. Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи – М.: Эко-Трендз, 2002. – 238 с.
3. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
4. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи – М.: Лесар-арт, 2003. – 288 с.
5. Marcuse D. Curvature loss formula for optical fibers // J. Opt. Soc. Amer. – 1976. – vol. 66. – pp. 216-220.
6. Андреев В.А., Бурдин А.В. Многомодовые оптические волокна. Теория и приложения на высокоскоростных сетях связи. – М.: «Радио и связь», 2004. – 248 с.
7. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами – М.: «Наука», 1979. – 831 с.
8. Андреев В.А., Андреев Р.В. и др. Технология строительства ВОЛП. Оптические кабели и волокна. – Самара: «СРТТЦ ПГУТИ», 2011. – 370 с.

## **Подготовка к работе**

1. Ознакомиться с инструкцией по технике безопасности.
2. Изучить физические механизмы возникновения потерь на макроизгибах.
3. Изучить методы измерения вносимого затухания ОВ.
4. Изучить порядок выполнения лабораторной работы.
5. Подготовить бланки протоколов измерений.

## **Контрольные вопросы**

1. Физические причины возникновения потерь на изгибе ОВ.
2. Механизм возникновения *переходных потерь*. Механизм возникновения *потерь на изгибе*. Сравнительный анализ вклада каждой составляющей потерь.
3. Алгоритм измерения прироста затухания ОВ на макроизгибе.
4. Понятие диаметра поля моды. Типовые значения.
5. Зависимость показателя преломления от длины волны. Формула Селмейера.
6. Влияние изгибов на стойкость ОВ. Зависимость механических напряжений в ОВ от радиуса изгиба.
7. Причины возникновения макро- и микроизгибов ОВ при строительстве и эксплуатации ВОЛП.

8. Допустимый радиус изгиба оптического кабеля (ОК). Допустимый радиус изгиба стандартного ОВ. Влияние нарушения допустимого радиуса изгиба ОВ и ОК на характеристики ОВ.

9. Оптические волокна с пониженной чувствительностью к изгибам. Область применения, конструкции, технические характеристики.

10. Стандартные одномодовые ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления. Область применения, конструкция, технические характеристики.

11. Зависимость вносимого затухания ОВ от радиуса макроизгиба.

12. Зависимость вносимого затухания ОВ на макроизгибе от длины волны.

### Техника безопасности

При выполнении лабораторных работ, связанных с использованием когерентных лазерных источников излучения, необходимо соблюдать следующие правила техники безопасности:

1. Не смотреть в выходной порт источника и на торцы коннекторов патч-кордов или оптических адаптеров.

2. Контроль качества оптического коннектора или адаптера допускается только при отсутствии в волокне излучения.

3. Для определения активности оптического волокна рекомендуется использовать измеритель оптической мощности или специальный индикатор излучения.

**Внимание!** Излучение, используемое в телекоммуникационных системных и измерительных приборах, невозможно обнаружить визуально.



### Материалы, инструменты и оборудование для выполнения работы

1. Безворсовые салфетки



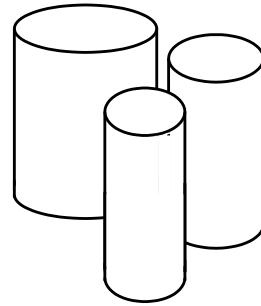
2. Спирт в дозаторе



3. Оптический патч-корд (FC/UPC-FC/UPC)



4. Набор оправок различного диаметра



5. Источник оптического излучения FOD 2112

6. Измеритель оптической мощности FOD 1024



### Порядок выполнения работы

1. Произведите калибровку комплекта оптического тестера.

1.1. Соедините источник излучения и измеритель мощности оптическим патч-кордом в соответствии со схемой рис. 1.



Источник оптического излучения FOD 2112

Измеритель оптической мощности FOD 1012

Рис. 1. Схема калибровки оптического тестера

1.2. При подключениях к измерительному и кроссовому оборудованию предварительно протирайте оптические коннекторы безворсовой салфеткой, смоченной небольшим количеством изопропилового спирта.

Для подключения разъемов типа FC/PC совместите ключ на коннекторе с пазом на оптическом адаптере, зафиксируйте круглой накладной гайкой. **Не прикладывайте чрезмерных усилий!**

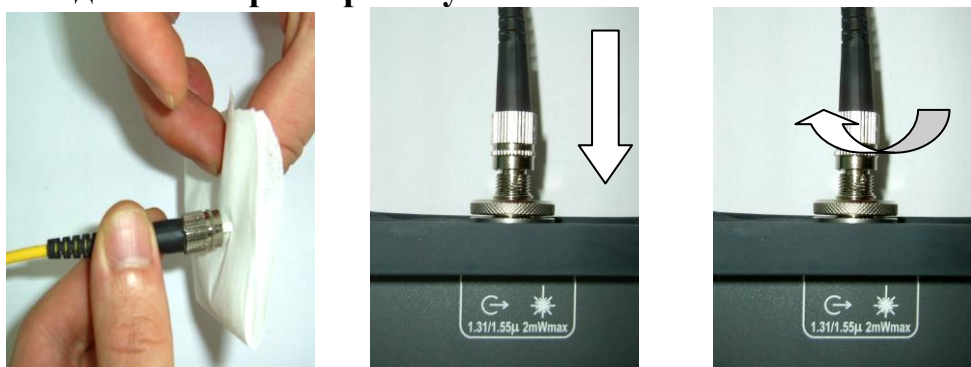


Рис. 2. Этапы подключения разъемов типа FC/PC

1.1. Включите источник излучения и выберите длину волны излучения  $\lambda = 1310$  нм.

1.2. Включите измеритель оптической мощности и выберите длину волны  $\lambda = 1310$  нм нажатием на клавишу SET  $\lambda$ .

1.3. Прогрейте источник и приемник излучения в течение 5-15 мин.

1.4. Занесите полученное значение в память измерителя оптической мощности, для чего нажмите на измерителе оптической мощности кнопку **REF**. Значение на дисплее должно обнулиться и единица измерения переключится в **dB** (дБ).

2. Произведите измерение вносимого затухания на макроизгибах ОВ.

2.1. Создайте макроизгиб ОВ патч-корда. Для этого, намотайте 5 витков патч-корда на оправке с заданным радиусом (рис. 3).



Рис. 3. Схема измерения вносимых потерь ОВ на макроизгибе

2.2.Снимите показания вносимых потерь  $A$  на 5 витках ОВ патч-корда с дисплея измерителя мощности.

2.3.Для снижения погрешности измерения произведите измерение вносимых потерь на макроизгибе  $A$  три раза, снимая патч-корд с оправки и снова наматывая 5 витков. При каждом снятии патч-корда с оправки обнуляйте значения потерь при помощи кнопки **REF**.

2.4.Выполните измерения вносимых потерь  $A$  оптического волокна патч-корда на пяти витках оправки в соответствии с пунктами 2.1 – 2.3, для оправок различного диаметра.

2.5.Рассчитайте среднее значение вносимых потерь на пяти витках  $\bar{A}$  по формуле:

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_i^N A_i, \quad (1)$$

где  $N$  – количество измерений;  $A_i$ - вносимые потери на пяти витках при  $i$ -ом измерении.

3. Произведите измерение вносимых потерь на длине волны  $\lambda = 1550$  нм выполнив все пункты раздела 2.

4. Выполните расчет вносимых потерь на одном витке ОВ патч-корда по формуле:

$$\alpha = \bar{A}/5 \quad (2)$$

5. Занесите полученные результаты в табл. 1.

Табл. 1. Результаты измерения вносимых потерь на макроизгибе ОВ патч-корда

Радиус оправки $R$ , мм	$\lambda = 1550$ нм					$\lambda = 1310$ нм				
	$A_i$ , дБ			$\bar{A}$ , дБ	$\alpha$ , дБ	$A_i$ , дБ			$\bar{A}$ , дБ	$\alpha$ , дБ
	1	2	3			1	2	3		
•										
•										
•										

5. По формуле (3) приложения 1, выполните теоретический расчет прироста затухания  $\alpha_p$  на макроизгибе для тех же радиусов, для которых выполнялись измерения. Полученные данные запишите в табл. 2.



Табл. 2. Результаты расчета вносимых потерь на макроизгибе ОВ патч-корда

Радиус оправки $R$ , мм	$\alpha_p$ , дБ	
	$\lambda = 1550$ нм	$\lambda = 1310$ нм
·		
·		
·		

7. Постройте графики зависимости вносимых потерь  $\alpha$  и  $\alpha_p$  от радиуса макроизгиба.

8. Сравните измеренные значения прироста затухания  $\alpha$  с расчетными  $\alpha_p$ . Сделайте выводы о зависимости вносимых потерь от радиуса макроизгиба для исследованных длин волн. Обозначить область радиусов макроизгиба для которых применима расчетная формула (3).

### Приложение 1. Методика расчета вносимых потерь ОВ на макроизгибе

Известно, что потери ОВ на макроизгибе возникают по двум различным причинам.

Во-первых, это потери, обусловленные резким изменением радиуса изгиба и как следствие – рассогласованием модовых полей. Такие потери называют *переходными*, они возникают в месте соединения прямого и изогнутого волокна. В изогнутом волокне центр модового поля смещен относительно оси волокна на некую величину  $d$ , зависящую от радиуса изгиба волокна. В результате модовые поля (диаметры модовых полей  $W$ ) прямого и изогнутого волокон в месте их соединения оказываются смещенными друг относительно друга также на величину  $d$ . Поэтому только часть мощности моды «прямого» волокна передается моде изогнутого волокна, а остальная же мощность преобразуется в оболочечные моды и теряется (рис. 4).

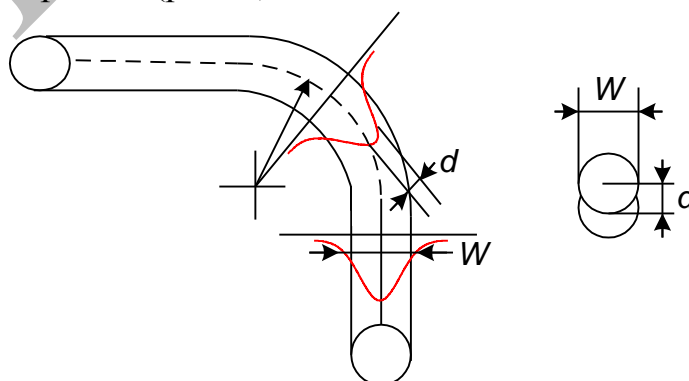


Рис. 4. Схема возникновения *переходных* потерь в изогнутом волокне

Другой вид потерь возникает непосредственно на изгибе ОВ и называется *потерями на излучение* на изогнутом участке ОВ. В данном случае мощность теряется непосредственно в изогнутом волокне из-за того, что на изгибе периферийная часть моды распространяется со скоростью, большей скорости света в среде (в оболочке). Эта часть моды излучается в оболочку волокна и теряется. Величина этих потерь тем больше, чем больше число витков волокна и чем меньше радиус изгиба ОВ.

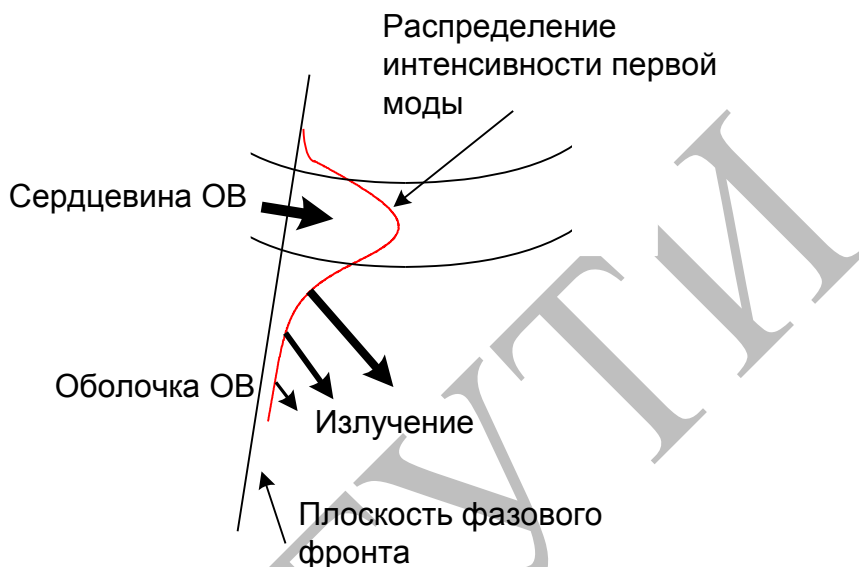


Рис. 5. Схема возникновения *потерь на излучение* в изогнутом волокне

Таким образом, потери в изогнутом волокне возникают из-за двух различных механизмов и рассчитываются, как сумма двух составляющих:

$$\alpha_p = \alpha_{\text{пер}} + \alpha_{\text{и}}, \text{ дБ} \quad (3)$$

Расчет *переходных потерь* на макроизгибе радиуса  $R$  можно выполнить по формуле [1]:

$$\alpha_{\text{пер}} = 0,271 \cdot \frac{V^4 n_2^2}{(R/a)^2 (n_1 - n_2)^2} \cdot \left(0,65 + \frac{1,62}{\sqrt{V^3}} + \frac{2,88}{V^6}\right)^6, \text{ дБ},$$

где  $a$  – радиус сердцевины ОВ;  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления сердцевины и оболочки ОВ, соответственно;  $V$  – нормированная частота.

Значение показателя преломления ОВ зависит от длины волны. Ниже в табл. 3 приведены значения показателей преломления сердцевины и оболочки ОВ на длинах волн 1310 нм и 1550 нм.

Табл. 3. Значения показателей преломления сердцевины и оболочки ОВ на длине волны 1310 и 1550 нм

Показатель преломления, $n$	Длина волны, $\lambda$ , нм	
	1310	1550
Сердцевины ОВ, $n_1$	1,453	1,4504
Оболочки ОВ, $n_2$	1,447	1,4447

Нормированная частота, рассчитывается по формуле:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

где  $\lambda$  – длина волны.

Расчет *потерь на изгибе* можно выполнить по формуле, предложенной Маркузе [3,5]:

$$\alpha_{\text{и}} = 4,343 \cdot l \cdot \frac{A}{\sqrt{R}} \exp(-BR) \text{ дБ}; \quad (4)$$

где  $l = 2\pi R$  – длина изогнутого участка ОВ, м.

Параметры  $A$  и  $B$  в формуле (4) рассчитываются следующим образом:

$$A = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{aW^3}} \cdot \left( \frac{U}{V \cdot K_1(W)} \right)^2; \quad B = \frac{4\Delta W^3}{3aV^2};$$

здесь:  $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$  – относительная разность показателей преломления сердцевины и оболочки ОВ;

$U = \sqrt{((2\pi/\lambda)^2 n_1^2 - \beta^2) a^2}$  – параметр моды в сердцевине ОВ;

$\beta$  – постоянная распространения ОВ.

$W = \sqrt{V^2 - U^2}$  – параметр моды в оболочке ОВ;

$W = \sqrt{V^2 - U^2}$  – параметр моды в оболочке ОВ;

Значение параметра моды в сердцевине ОВ определяют из характеристического уравнения:

$$\frac{U \cdot J_1(U)}{J_0(U)} = \frac{W \cdot K_1(W)}{K_0(W)},$$

где:

$J_0(U)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка;

$J_1(U)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода первого порядка;

$K_0(W)$  – модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка;

$K_1(W)$  – модифицированная функция Бесселя второго рода первого порядка;

Для ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления расчет значения параметра моды в сердцевине ОВ  $U$  можно выполнить по упрощенной формуле [6]:

$$U = \sqrt{2 \ln(V) + V^2 \exp(-2 \ln(V))}.$$

Значение модифицированной функции Бесселя второго рода первого порядка можно определить, воспользовавшись справочной литературой [7] или по графику рис. 6.

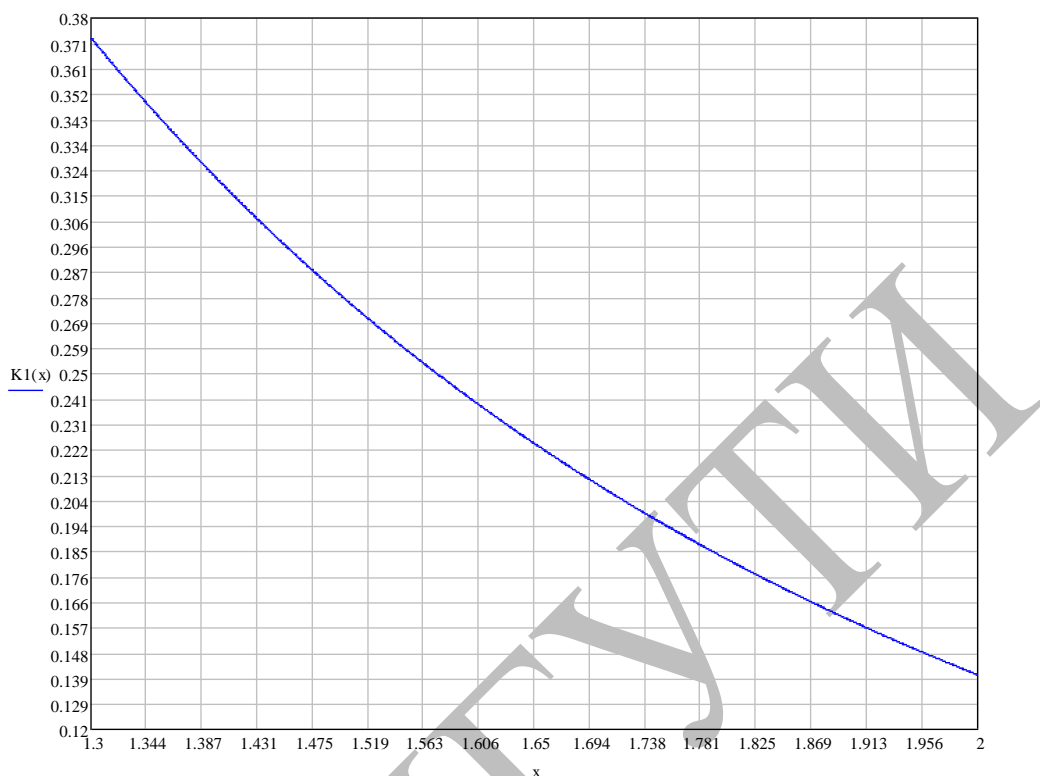


Рис.6. Значения модифицированной функции Бесселя второго рода первого порядка

## Приложение 2. Влияние изгибов на стойкость ОВ

При изгибе ОВ в нем возникает механическое напряжение, которое может значительно сократить срок службы.

Расчет механического напряжения на поверхности изогнутого кварцевого волокна можно выполнить по формуле:

$$\sigma_0 = \frac{E_0 \cdot b}{R}, \quad (5)$$

где  $E_0$  - величина модуля упругости кварцевого стекла, ГПа;

$R$  - радиус изгиба волокна;  $b$  - радиус волокна.

Для стандартных оптических волокон диаметром 125 мкм рекомендуется минимально допустимый радиус изгиба не более 32 мм. Согласно расчетам по формуле (5) это соответствует механической нагрузке 132 МПа.

Прочность ОВ после производства заводом-изготовителем составляет 0,7 ГПа (0,7 ГПа – это уровень нагрузки при испытаниях оптического волокна на разрыв, которые обязательно выполняются заводами-изготовителями ОВ). После производства ОК и его установки на ВОЛП уровень прочности ОВ становится меньше, указанного значения (рис. 7).

Ниже в табл. 4 приведены значения срока службы ОВ SMF28e+ производства фирмы Corning при снижении прочности ОВ от первоначального уровня, со-

ответствующего уровню нагрузки при испытании ОВ на разрыв и в зависимости от радиуса изгиба волокна. Здесь  $\sigma_0=0,7$  ГПа - уровень нагрузки при испытаниях оптического волокна на разрыв.

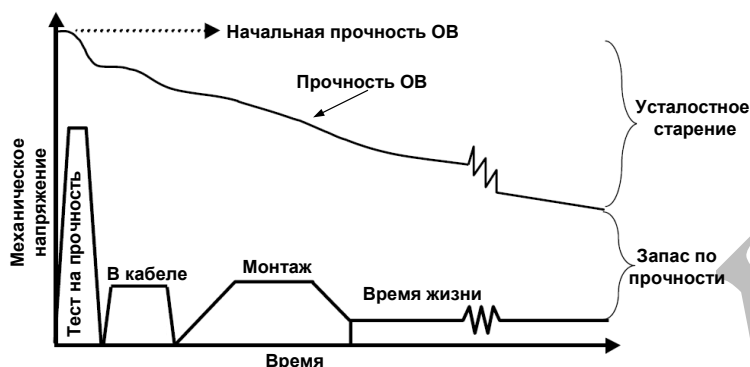


Рис. 7. Диаграмма механических напряжений и прочности ОВ

Табл. 4. Значения срока службы ОВ от степени снижения его прочности

Срок службы ОВ	Степень снижения прочности ОВ от первоначального значения $\sigma_0 = 0,7$ ГПа	Значение мех. напряжения, МПа
40 лет	$\sigma_0/5$	140
4 часа	$\sigma_0/3$	233
1 секунда	$\sigma_0/2$	350

На рис. 8 представлены графики зависимости вероятности разрушения ОВ от радиуса его изгиба.

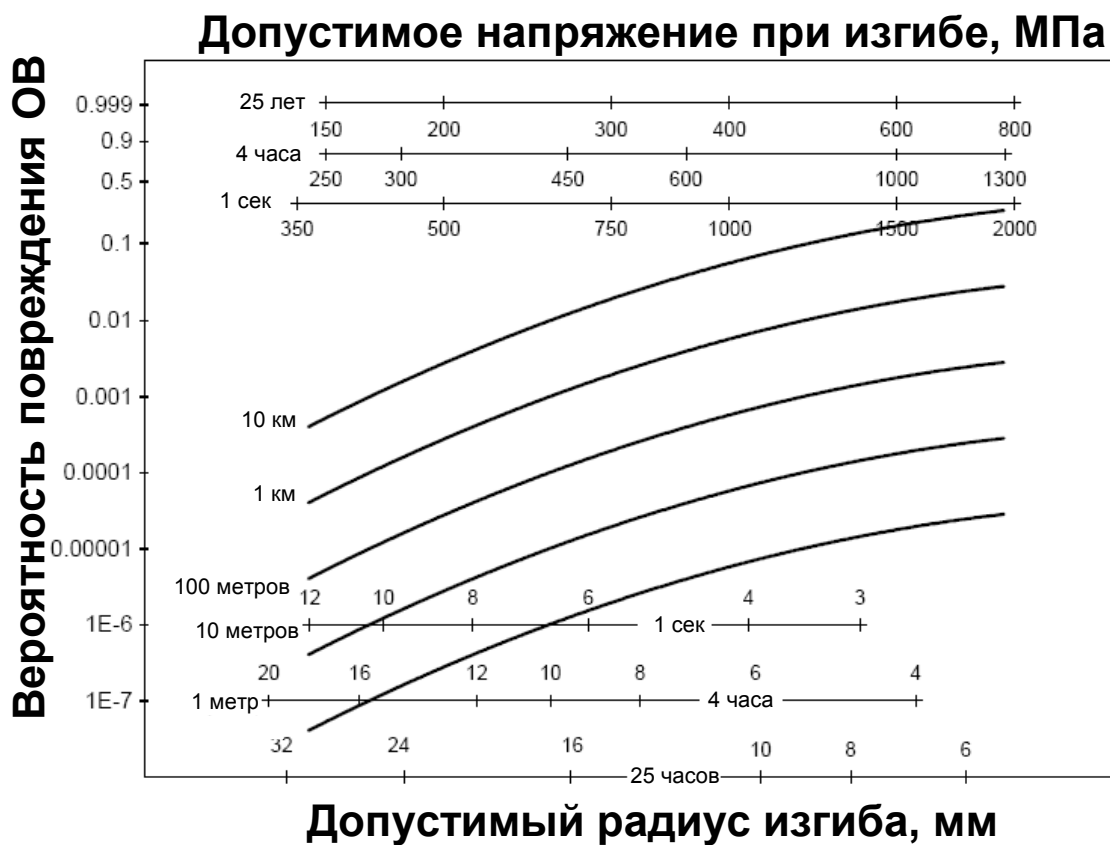


Рис. 8. Графики зависимости вероятности разрушения ОВ от механического напряжения и радиуса изгиба ОВ

**Исследование вносимого затухания  
на макроизгибах оптического волокна**

**Никулина Татьяна Геннадьевна  
Дашков Михаил Викторович  
Гаврюшин Сергей Александрович**