

УДК 628.953

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ИЗЛУЧЕНИЯ НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ИЗОГНУТОГО ОДНОМОДОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Ю. В. Малых, В. В. Шубин  
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области)

Представлена методика расчета потерь оптического излучения на начальном участке изогнутого одномодового оптического волокна в зависимости от угла изгиба. Рассмотрены известные методики и формулы расчета потерь излучения в изогнутых оптических волокнах с точки зрения их использования. Из-за неспособности проанализированных методик к описанию потерь на начальном участке изгиба разработана новая методика расчета. Проведен расчет зависимости потерь излучения от угла изгиба для оптического волокна типа SMF-28 по разработанной методике. Полученные расчетные результаты сравниваются с экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* изгиб одномодового оптического волокна, переходные потери излучения, потери излучения на изгибе, метод конформного отображения, длина и угол изгиба.

### Введение

При проведении мониторинга оптических волокон (ОВ) магистральных волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) и разработке мультиплексоров ввода/вывода информации возникает необходимость отвода части мощности оптического сигнала через боковую поверхность одномодового волокна без разрыва передачи сигналов. При этом необходимо отвести достаточную для регистрации мощность сигнала при минимально вносимых в линию дополнительных потерях. В современных высокоскоростных ВОСП (со скоростями передачи 0,5 Гбит/с и более) для регистрации маломощных сигналов наиболее эффективна схема с использованием волоконно-оптического усилителя, узкополосного оптического фильтра и приемного устройства на основе pin-фотодиода [1]. Поэтому надо осуществлять ввод выведенного через боковую поверхность излучения на входной полюс оптического усилителя, который представляет собой стандартный одномодовый оптический соединитель.

Для разработки эффективных устройств вывода с минимальными дополнительными потерями необходимо провести расчетную оптимизацию следующих характеристик: зависимости потерь излучения на изгибе оптического волокна от угла изгиба при постоянном радиусе изгиба и зависимости коэффициента передачи бокового излучения на выходной оптический соединитель приемного ОВ от отводимой мощности. В данной статье представлено решение первой части поставленной задачи.

### Методика расчета переходных потерь излучения и потерь излучения на изгибе волокна

Потери излучения (далее просто *потери*), возникающие в изогнутом ОВ, принято делить на две составляющие: переходные потери и потери на изгибе [2]. Считается, что переходные потери возникают в начале изгиба и обусловлены смещением поля основной моды одномодового ОВ относительно оси (см., например, [3]). Потери на изгибе обусловлены тем, что в изогнутом ОВ фрагменты волны, распространяющиеся по его внешнему краю, для сохранения фронта должны двигаться с большей

скоростью, чем часть излучения, распространяющаяся по внутреннему краю изгиба. Это означает, что часть излучения по внешнему краю должна распространяться со скоростью, превышающей скорость света в среде, что невозможно. Поэтому данная часть излучения отстает и составляет потери на изгибе.

В статье [2] показано, как определить обе составляющие потерь при изгибе ОВ. На рис. 1 в соответствии со статьей [2] двумя прямыми  $AB$  и  $BC$  схематично показана зависимость потерь от длины изгиба  $L$ . Переходные потери  $A_{\text{п}}$ , соответствующие прямой  $AB$ , возникают сразу в начальной точке изгиба при переходе ОВ из прямого в изогнутый. Потери на изгибе  $A_{\text{и}}$ , соответствующие прямой  $BC$ , при  $L = 0$  равны нулю и накапливаются линейно с коэффициентом  $2\alpha$  с увеличением длины изгиба  $L$ .

В статье [2] указывается, что переходные потери  $A_{\text{п}}$  при изгибе ОВ возникают как в начале, так и в конце секции изгиба, поэтому общие потери изогнутого ОВ предлагается записать в виде суммы:

$$A_{\text{д}} = 2A_{\text{п}} + A_{\text{и}} = 2A_{\text{п}} + 2\alpha L,$$

где  $A_{\text{п}}$  [дБ] — переходные потери;  $A_{\text{и}}$  [дБ] — потери на изгибе;  $2\alpha$  [дБ/м] — коэффициент потерь на изгибе;  $L$  [м] — длина изгиба.

На самом деле переходные потери возникают не в начальной точке изгиба, а на некотором его участке (кривая  $AD$  на рис. 1), что подтверждается результатами эксперимента [2] (рис. 2). Пунктирный отрезок  $BD$  на рис. 1 строится путем продолжения линейного участка  $DC$  до пересечения с вертикальной осью  $A_{\text{д}}$ .

В работе [2] приведены формулы для расчета переходных потерь:

$$2A_{\text{п}} = (2R^2)^{-1} (k_0 n_c w_{02})^2 (k_0 n_c w_{01}^2)^2 \quad (1)$$

и коэффициента потерь на изгибе:

$$2\alpha = 0,5 \left( \frac{\pi}{R\rho W^3} \right)^{0,5} \left( \frac{U}{VK_1(W)} \right)^2 \times \exp \left( -\frac{2W^3}{3V^2} \left[ 1 - \left( \frac{n_o}{n_c} \right)^2 \right] \frac{R}{\rho} \right), \quad (2)$$

где  $R$  — радиус изгиба ОВ;  $k_0$  — волновое число в свободном пространстве;  $n_c$ ,  $n_o$  — показатели преломления в сердцевине и оболочке ОВ;  $w_{01}$ ,  $w_{02}$  — радиусы модовых пятен в сердцевине и оболочке ОВ;  $\rho$  — радиус сердцевины ОВ;  $V$  — волноводный параметр ОВ [3];  $U$ ,  $W$  — параметры основной моды ОВ [3];  $K_1(W)$  — модифицированная функция Хенкеля.

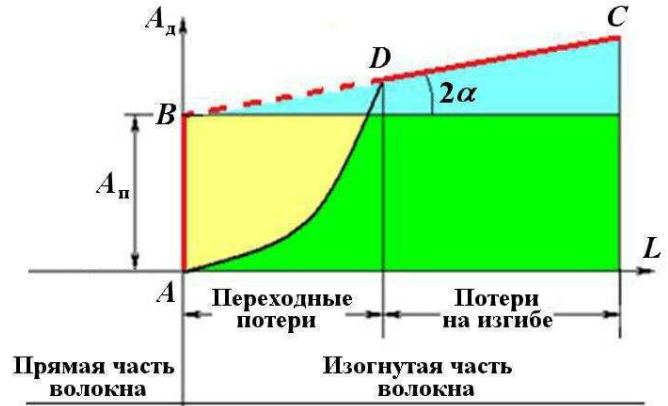


Рис. 1. Зависимость потерь от длины изгиба

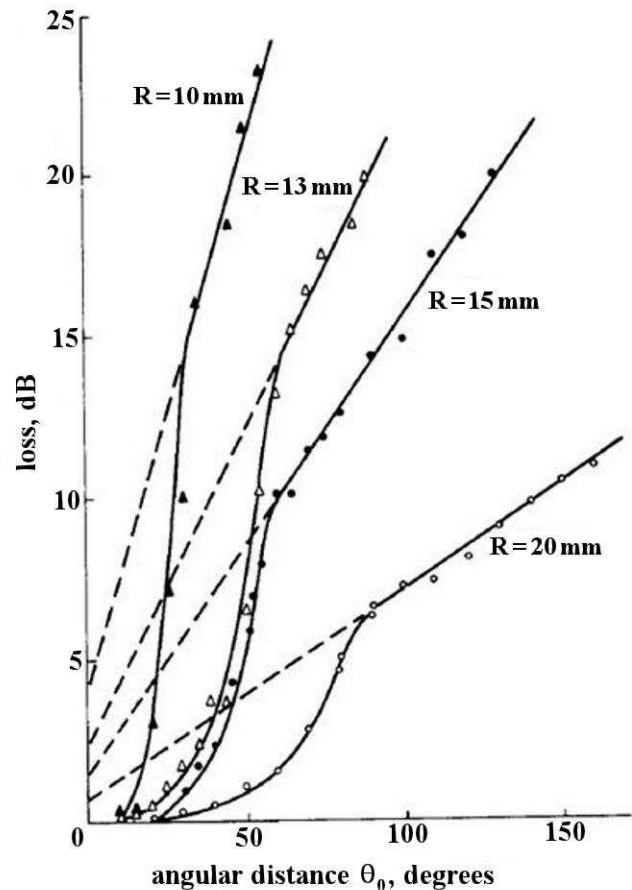


Рис. 2. Экспериментальные зависимости потерь от угла изгиба при различных радиусах изгиба [2]

Интерес представляет зависимость внесенных потерь на начальном участке кривой, приведенной на рис. 1, от длины или угла изгиба. Зависимости (1) и (2), предложенные в статье [2], для описания начального участка изгиба ОВ не подходят.

### Методика расчета потерь с использованием теории волноводов

Согласно теории оптических волноводов [3] переходные потери обусловлены смещением  $r_d$  распределения интенсивности основной моды относительно оси ОВ. Часть мощности излучения, соответствующую переходным потерям, при условии  $r_d \ll \rho$  предлагается считать по формуле

$$\frac{W_{\text{пп}}}{W_o} \approx 1 - \exp\left(-\frac{r_d^2}{2w_0^2}\right) \approx \left(\frac{\rho}{R}\right)^2 \left(\frac{2w_0}{\rho}\right)^6 \frac{V^4}{8\Delta}, \quad (3)$$

где  $W_{\text{пп}}$  — мощность излучения, соответствующая переходным потерям;  $W_o$  — общая мощность моды;  $w_0$  — радиус пятна моды;  $\rho$  — радиус сердцевины ОВ;  $R$  — радиус изгиба;  $V$  — волноводный параметр ОВ [3];  $\Delta$  — высота профиля ОВ.

Смещение  $r_d$  (при  $R \gg \rho$ ) предлагается определять по формуле [3]

$$r_d = \frac{V^2 \rho^2}{2\Delta R} \left(\frac{2w_0}{\rho}\right)^4. \quad (4)$$

Рассчитаем  $r_d$  по формуле (4) для обычного ОВ типа SMF-28 с радиусом изгиба 2 мм при длине волны 1,55 мкм. Для номинальных параметров волокна типа SMF-28 ( $V = 2,131$ ;  $\Delta = 0,0039$ ;  $\rho = 4,15$  мкм;  $w_0 = 4,98$  мкм) получаем смещение  $r_d = 166$  мкм. Дальнейший расчет по формуле (3) невозможен, так как условие  $r_d \ll \rho$  не выполняется.

Потери на изгибе в [3] предлагается рассчитывать по формуле

$$A_n = 10 \lg \exp(\gamma L),$$

где  $\gamma$  — коэффициент затухания основной моды ступенчатого одномодового ОВ, который может быть вычислен по формуле [3]

$$\gamma = \frac{\pi^{0,5}}{2\rho} \left(\frac{\rho}{R}\right)^{0,5} \frac{U^2}{V^2 W^{1,5}} (K_1^2(W))^{-1} \exp\left(-\frac{4RW^3\Delta}{3\rho V^2}\right). \quad (5)$$

Формула (5), предложенная в [3], совпадает с формулой (2), предложенной в [2]. Но как считать потери на начальном участке изгиба ОВ, в [3], как и в [2], не объясняется.

### Эмпирическая формула расчета коэффициента потерь

В работе [4] коэффициент потерь на изгибе  $\alpha$  предлагается рассчитывать по эмпирической формуле

$$\alpha = \exp\left(8,5 - 519 D_{mm} \left(\frac{1}{\lambda MAC}\right)^3\right) \text{ [дБ/м]}, \quad (6)$$

где  $D_{mm}$  — диаметр изгиба в миллиметрах;  $MAC = 2w_0/\lambda_{\text{отс}}$ ,  $w_0$  — радиус модового пятна,  $\lambda_{\text{отс}}$  — длина волны отсечки;  $\lambda$  — рабочая длина волны.

Для типовых параметров волокна SMF-28 ( $\lambda_{\text{отс}} = 1,2$  мкм;  $w_0 = 4,98$  мкм;  $D_{mm} = 4$  мм;  $\lambda = 1,55$  мкм) получаем  $\alpha = 1745$  дБ/м, а для  $w_0 = 4,3$  мкм и  $\lambda = 1,31$  мкм получаем  $\alpha = 902$  дБ/м.

Например, при изгибе ОВ по радиусу  $R = 2$  мм на угол  $\Phi = 13^\circ$  длина изгиба равна  $L = 453,5$  мкм ( $L = \pi R \Phi / 180$ ). Потери на длинах волн 1,55 и 1,31 мкм составят 0,79 и 0,41 дБ соответственно. Полученные данные сильно отличаются от экспериментальных результатов (например, представленных

ниже на рис. 9). Поэтому предлагаемой в [4] эмпирической формулой на начальном участке изгиба пользоваться нельзя.

Известно достаточное количество работ, посвященных исследованию потерь на изгибе при больших длинах изгиба (от полувитка и более) на больших радиусах изгиба (5 мм и более). Приведенные данные имеют значительный разброс. Например, расчетные и экспериментальные результаты, взятые из статьи [5], отличаются от результатов, рассчитанных по формуле (6) (рис. 3). Так, при длине волны 1,55 мкм и радиусе изгиба 2 мм потери в соответствии с рис. 3 составляют 3 000 дБ/м, что почти в 2 раза больше потерь, рассчитанных по формуле (6), которые равны 1 745 дБ/м.

Все данные, полученные на больших длинах изгибов, не могут быть использованы для расчета потерь на начальном участке изгиба ОВ.

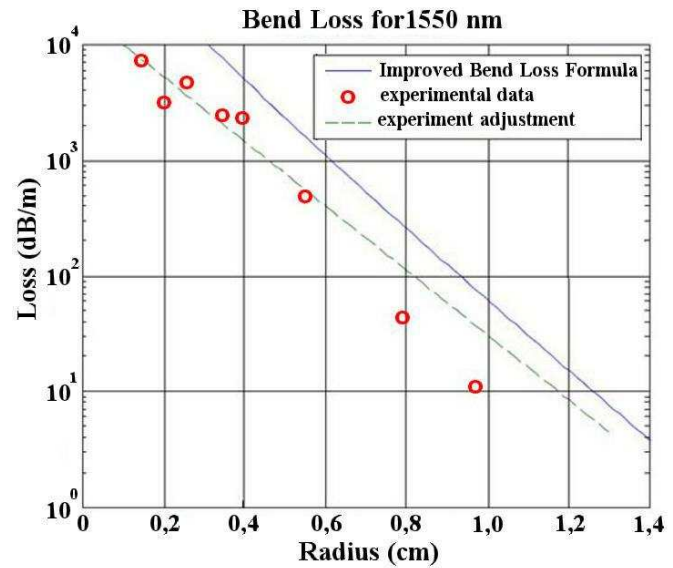


Рис. 3. Зависимости потерь на изгибе от его радиуса [5]

### Метод конформного отображения

Наиболее наглядно механизм возникновения потерь на изгибе описывается с использованием метода конформного отображения (МКО), в котором изогнутое ОВ преобразуется в прямое ОВ, но с перекошенным профилем показателя преломления. Использование этого метода часто встречается в литературе (см., например, [6–9]). МКО позволяет понять механизм выхода излучения из сердцевины изогнутого ОВ на начальном участке.

На рис. 4 (см. также цветную вкладку) представлены профили показателя преломления ОВ: исходный и преобразованный с помощью МКО [7]. Красная прямая на рисунке показывает эффективный показатель преломления ОВ, который равен постоянной распространения фронта оптического излучения в ОВ. После того как эффективный показатель преломления становится равным эквивалентному показателю преломления изогнутого ОВ, возможен переход части излучения основной моды ОВ из сердцевины в оболочку. Распределение интенсивности излучения показано синим цветом: часть излучения основной HE<sub>11</sub>-моды из сердцевины переходит в оболочку ОВ. Такое описание механизма выхода излучения из сердцевины изогнутого ОВ подтверждается экспериментальными диаграммами распределения интенсивности излучения, которые приводятся в ряде работ [6, 7].

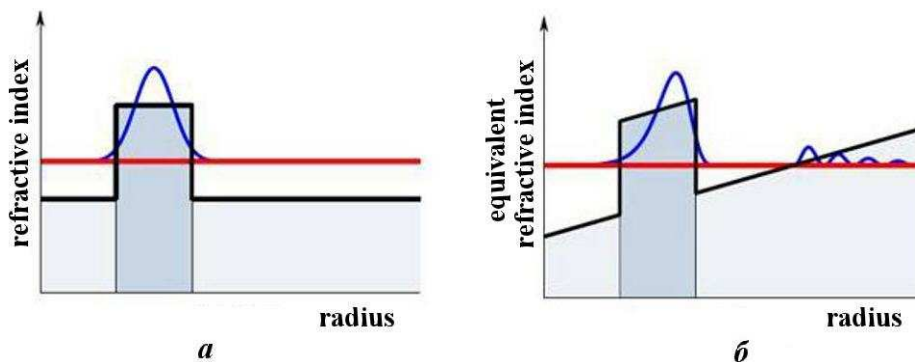


Рис. 4. Профили показателя преломления ОВ: *a* — исходный; *б* — преобразованный с помощью МКО [7]

**Методика расчета потерь на изгибе  
с использованием вероятности преодоления переходного барьера**

Наиболее подробное описание МКО для изогнутых ОВ представлено в работе [8]. Кроме того, расчеты потерь на изгибе ОВ, проведенные с помощью этого метода авторами работы для угла изгиба  $\pi/2$ , достаточно хорошо согласуются с результатами, полученными ими экспериментально.

В [8] потери на изгибе ОВ предлагается вычислять по формуле

$$A_d(\Phi, R) = 10 \lg \left( \exp \left( \frac{\Phi R D}{\Delta L} \right) \right) = \frac{5 \Phi R \lg e D}{2 (\rho R)^{0,5}} = 1,086 D \Phi \left( \frac{R}{\rho} \right)^{0,5}, \quad (7)$$

где  $\Phi$  — угол изгиба в радианах;  $R$  — радиус изгиба;  $D$  — вероятность выхода излучения из сердцевины ОВ;  $\rho$  — радиус сердцевины ОВ;  $\Delta L = 4(\rho R)^{0,5}$  — расстояние между точками столкновения луча с границами барьера;  $e = 2,71828$ .

Суть формулы (7), как утверждают авторы [8], состоит в том, что рассчитывается вероятность  $D$  выхода излучения через переходной барьер из сердцевины в оболочку (рис. 4), которая умножается на количество столкновений распространяющегося излучения с барьером. Количество столкновений определяется как отношение длины изгиба ( $\Phi R$ ) к расстоянию между точками столкновения  $\Delta L$ . Вероятность выхода излучения предлагается вычислять по формуле

$$D = \exp \left( - \frac{k_0 R f_0^2 n_b^2}{n_o - \eta f_0} \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin K - K \sqrt{1 - K^2} \right) \right). \quad (8)$$

Здесь  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ;  $\lambda$  — рабочая длина волны;  $f_0 = 1 - r/R$ ;  $r$  — радиус оболочки ОВ;  $n_b^2 = (\beta/k_0)^2 = n_o^2 + (\nu/V)^2 (n_c^2 - n_o^2)$  — квадрат эффективного показателя преломления;  $\beta$  — константа распространения моды;  $n_o$  и  $n_c$  — показатели преломления оболочки и сердцевины ОВ соответственно;  $\nu$  — константа, определяющая затухание волны в оболочке;  $V = (\lambda_{отс}/\lambda) V_{отс}$  — волновое число;  $\lambda_{отс}$  — длина волны отсечки;  $V_{отс}$  — волновое число отсечки;  $\eta = \frac{n_o^4 + n_o^2 - 2}{4n_o^3 + 2n_o}$ ;

$$K = \frac{n_o (1 - r/R + \rho/R) - (\eta \rho/R) (1 - r/R)}{(\beta/k_0) (1 - r/R)}.$$

Параметры  $V_{отс}$  и  $\nu$  зависят от показателя  $m$  в степенной функции, описывающей профиль показателя преломления в сердцевине ОВ по формуле

$$n(x) = n_c - \Delta n (x/\rho)^m \quad \text{для} \quad x < \rho,$$

и представляют собой решения волнового уравнения. В табл. 1 приведены решения волнового уравнения для профилей показателей преломления с различными степенями  $m$  [8].

Для того чтобы вышепредложенные формулы действовали, радиус изгиба  $R$  должен находиться в пределах между критическим  $R_{кр}$  и начальным  $R_0$  радиусами [8]:

$$R_{кр} < R < R_0, \quad (9)$$

где  $R_{кр} = r + \frac{\rho(n_o - \eta)}{\beta/k_0 - n_o}$ ;  $R_0 = \frac{r(\beta/k_0 - \eta)}{\beta/k_0 - n_o}$ .

Таблица 1

**Решения волнового уравнения для профилей показателей преломления с различными степенями  $m$**

$m$	$V_{отс}$	$\nu$
$\infty$	2,405	1,1428V - 0,996
7	2,753	1,120V - 1,180
4	3,001	1,100V - 1,180
3	3,182	1,080V - 1,220
2	3,520	1,040V - 1,300
1	4,386	0,925V - 1,460

Проведем проверочный расчет по вышеприведенному алгоритму для ОВ типа SMF-28 с параметрами  $\rho = 4,15$  мкм;  $r = 62,5$  мкм;  $n_o = 1,4447$ ;  $n_c = 1,4504$ ;  $\lambda = 1,55$  мкм;  $\lambda_{отс} = 1,20$  мкм;  $m = 7$ ;  $R = 2000$  мкм:

- 1) из табл. 1 для  $m = 7$  выбираем  $V_{отс} = 2,753$  и соответственно формулу  $\nu = 1,12V - 1,18$ ;
- 2) определяем  $V = 2,131$ ;
- 3) по выбранной из табл. 1 формуле определяем  $\nu = 1,207$ ;

- 4) находим  $\eta = 0,2792$ ;  $(\beta/k_0)^2 = 2,0965$  и, следовательно,  $\beta/k_0 = 1,4479$ ;
- 5) определяем  $R_{кр} = 1574 \text{ мкм} \approx 1,6 \text{ мм}$  и  $R_0 = 22826 \text{ мкм} \approx 23 \text{ мм}$ ;
- 6) проверяем выполнение условия (9):  $2 \text{ мм} > 1,6 \text{ мм}$  ( $R > R_{кр}$ ), т. е. условие (9) выполнено;
- 7) находим  $K = 0,9957$ ;
- 8) вычисляем  $k_0 = 4,0516$ ,  $f_0 = 0,9687$ ;
- 9) по формуле (8) определяем  $D = \exp(-13578 \cdot (1,5707 - \arcsin 0,9957 - 0,0922)) = 0,9997$ ;
- 10) по формуле (7) находим  $A_d = 1,0860 \cdot 0,9997 \Phi \left(\frac{2000}{4,15}\right)^{0,5} = 23,83 \Phi$ .

На рис. 5 приведена зависимость  $A_d = f(\Phi)$ , построенная по предлагаемой в статье [8] методике. Полученная зависимость на начальном участке не соответствует экспериментальным результатам, представленным ниже на рис. 9. Если начать отсчет угла  $\Phi$  от начального угла изгиба, который соответствует началу выхода излучения за оболочку ОВ, то прямая сместится на начальный угол  $\Phi_{уп}$ .

Но и в этом случае рассчитанная зависимость не описывает потери на начальном участке ОВ. При больших углах изгиба, использованных авторами модели, например  $\pi/2$ , количество столкновений,

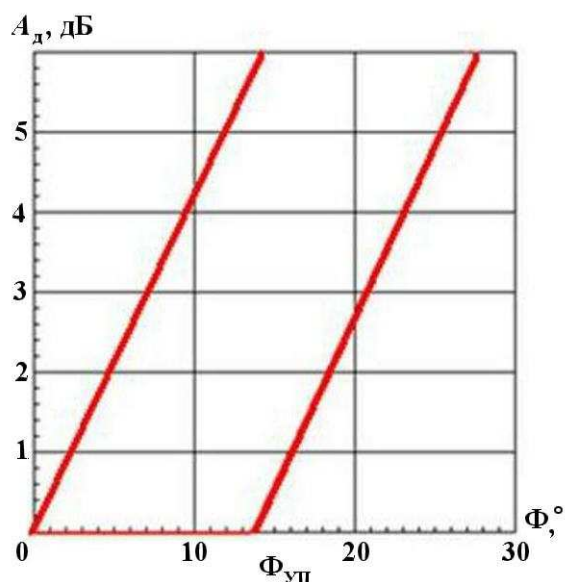


Рис. 5. Зависимость потерь от угла изгиба на радиусе 2 мм для ОВ SMF-28 при  $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$

учитываемых в расчете при  $R = 2 \text{ мм}$ , будет 8,6, т. е. реально (целое число) 8 или 9. Ошибка при учете числа столкновений составит не более  $\pm 6\%$ . При малых же углах ( $\pi/20 - \pi/12$ ), соответствующих началу изгиба, количество столкновений получается 0,86—1,44. Реально это число от 0 до 2, что дает ошибку уже  $\pm 100\%$ . При этом при нуле столкновений потери должны равняться нулю. Отсюда следует, что для малых углов изгиба формула (7) не применима. Кроме того, вероятность выхода излучения из сердцевины при одном столкновении практически равна 1 ( $D = 0,9997$ ), т. е. все излучение должно выходить из сердцевины ОВ. А это не подтверждается экспериментальными результатами, представленными ниже на рис. 9. Таким образом, пользоваться предложенной в [8] математической моделью для описания выхода излучения на начальном участке изгиба также нельзя.

### Предлагаемая методика расчета потерь на начальном участке изогнутого одномодового оптического волокна

Выход излучения из изогнутого ОВ, по мнению авторов настоящей работы, происходит следующим образом. В начале изгиба часть излучения выходит из сердцевины ОВ и распространяется по отражающей оболочке. После достижения границы раздела с защитным покрытием часть излучения выходит за пределы ОВ и представляет собой потери на начальном участке изгиба. Опишем этот физический процесс математически.

Известно, что в одномодовом режиме по ОВ распространяется одна  $HE_{11}$ -мода, которая имеет распределение интенсивности в поперечном сечении ОВ, описываемое законом Гаусса [3]. Рассмотрим выход излучения из сердцевины ОВ с использованием МКО. На рис. 6 представлены профили показателей преломления в прямом и преобразованном изогнутом ОВ. На рисунке также приведены распределение интенсивности излучения и интенсивность вышедшего из сердцевины ОВ излучения  $I_{п}$ .

Расстояние  $x_0$  (см. рис. 6) от оси ОВ до места, где эффективный показатель преломления  $n_B$  становится равным преобразованному показателю оболочки, можно определить по формуле, приведенной в работе [8]:

$$x_0 = \rho + \left( \frac{\beta}{k_0} - n_o \right) f_0 \frac{R}{n_o} \quad (10)$$

с ранее указанными обозначениями. Волновые числа  $V$ ,  $\nu$  определяются по табл. 1.

Радиус гауссова луча (модового пятна) в сердцевине вычисляется по формуле [10]

$$w_0 = \rho \left( 0,65 + \frac{1,619}{V^{1,5}} + \frac{2,879}{V^6} \right). \quad (11)$$

Рассчитаем  $x_0$  и  $w_0$  по формулам (10), (11) для ОВ SMF-28 с параметрами  $\rho = 4,15$  мкм;  $r = 62,5$  мкм;  $n_o = 1,4447$ ;  $n_c = 1,4504$ ;  $\lambda = 1,55$  мкм;  $\lambda_{отс} = 1,20$  мкм;  $m = 7$ ;  $R = 2000$  мкм. При  $f_0 = 0,969$ ;  $\beta/k_0 = 1,4465$  получаем  $x_0 = 6,60$  мкм. При  $V = 2,131$   $w_0 = 4,98$  мкм.

Потери излучения в сердцевине ОВ можно рассчитать с использованием интеграла Лапласа по формуле

$$A_{dc} = -10 \lg \left( 1 - \left[ 0,5 - F \left( \frac{x_0}{w_0} \right) \right] \right). \quad (12)$$

При полученных ранее параметрах по таблице (например, [11]) определяем значение интеграла Лапласа  $F(x_0/w_0) = F(1,325) = 0,4074$ . Соответственно потери излучения в сердцевине ОВ по формуле (12) составят  $A_{dc} = 0,42$  дБ.

Далее вышедшее из сердцевины ОВ излучение начинает распространяться по оболочке ОВ. Известно (см., например, [10]), что при распространении излучения по оболочке радиус гауссова луча увеличивается. При изгибе на угол  $\Phi$  квадрат его значения составит

$$w_{\Phi}^2 = w_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda R \operatorname{tg} \Phi}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]. \quad (13)$$

Смещение вектора Умова—Пойтинга гауссова луча от оси ОВ можно определить по простой формуле:

$$x_{\Phi} = R \left( \frac{1}{\cos \Phi} - 1 \right). \quad (14)$$

При достижении излучением границы раздела *отражающая оболочка — защитное покрытие* излучение покидает ОВ. Выход излучения за пределы отражающей оболочки изогнутого ОВ представлен на рис. 7 (см. также цветную вкладку).

Угол до точки пересечения вектора Умова—Пойтинга с границей отражающей оболочки ОВ может быть вычислен по формуле, предложенной в [12]:

$$\Phi_{УП} = \arccos \left( \frac{R + \rho}{R + r} \right).$$

Например, для  $\rho = 4,15$  мкм,  $r = 62,5$  мкм и  $R = 2$  мм получаем  $\Phi_{УП} = 13,7^\circ$ .

Поскольку радиус гауссова луча отличен от нуля, излучение начнет выходить за пределы ОВ при угле изгиба, меньше чем  $\Phi_{УП}$ . За начальный угол отсчета  $\Phi_0$  можно принять угол, при котором

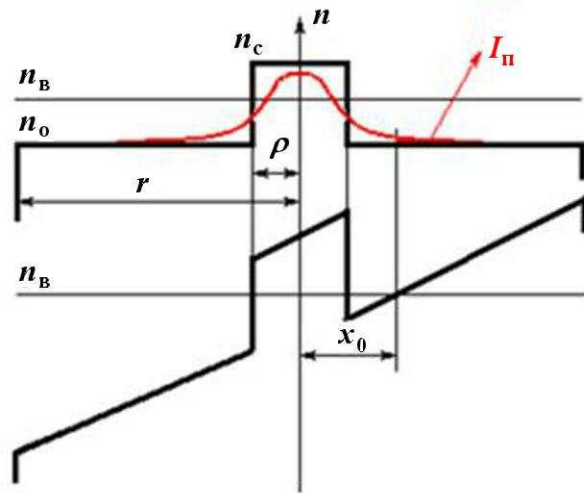


Рис. 6. Профили показателей преломления в прямом и преобразованном ОВ и распределение интенсивности излучения  $I_p$

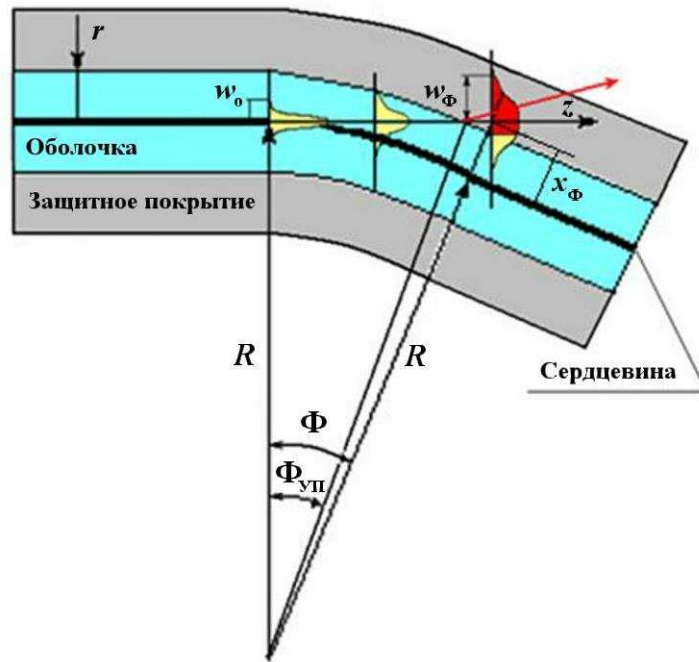


Рис. 7. Выход излучения за пределы отражающей оболочки

потери пренебрежимо малы по сравнению с максимальными потерями, вычисленными по формуле (12). Примем  $\Phi_0 = \Phi_{уп} - 0,9^\circ$ . Тогда, например, для максимальных потерь  $A_{дс} = 0,42$  дБ малые потери составят 0,002 дБ.

Часть излучения, которая выходит за пределы отражающей оболочки на всей длине изгиба  $R(\Phi - \Phi_0)$ , может быть описана по предлагаемой формуле:

$$\frac{I_{п}}{I_0} = 1 - \exp\left(-K_{\lambda}R(\Phi - \Phi_0)^2\right).$$

Таким образом, полные потери на начальном участке изогнутого ОВ можно вычислить по формуле

$$A_{д} = -10 \lg\left(1 - \left[0,5 - F(t)\right] \left[1 - \exp\left(-K_{\lambda}R(\Phi - \Phi_0)^2\right)\right]\right), \quad (15)$$

где  $F(t)$  — интеграл Лапласа от аргумента  $t = x_0/w_0$ ;  $K_{\lambda}$  — коэффициент, зависящий от длины волны (для  $\lambda = 1,55$  мкм выбираем  $K_{\lambda} = 0,217 \text{ мкм}^{-1} \text{ рад}^{-2}$ , для  $\lambda = 1,31$  мкм выбираем  $K_{\lambda} = 0,045 \text{ мкм}^{-1} \text{ рад}^{-2}$ ).

### Сравнение расчетных и экспериментальных результатов

В табл. 2 представлены параметры изогнутого ОВ типа SMF-28 (смещение от оси, радиус моды, потери) для разных углов изгиба  $\Phi$ , рассчитанные по формулам (13)–(15) для двух длин волн:  $\lambda = 1,55$  мкм и  $\lambda = 1,31$  мкм.

Для проверки правильности предлагаемой методики расчета потерь были проведены экспериментальные исследования. На рис. 8 приведена структурная схема стенда для измерения параметров вывода изогнутого ОВ. Волокно вкладывалось в устройство с начальным углом изгиба  $13^\circ$ .

Экспериментально измерялись мощности оптического излучения на выходе оптического передатчика и входе оптического приемника при различных углах изгиба, которые задавались с помощью линейной подвижки (см. рис. 8). По измеренным значениям мощностей вычислялся коэффициент дополнительных потерь при угле изгиба  $\Phi$  по формуле

$$A_{д}(\Phi) = W_{опм} - W_{опм}(\Phi) \text{ [дБ]}, \quad (16)$$

где  $W_{опм}$ ,  $W_{опм}(\Phi)$  [дБм] — оптическая мощность на входе ОПМ без изгиба ОВ и при угле изгиба  $\Phi$ .



Значения параметров для различных углов изгиба

$\lambda$ , мкм	Параметр	$\Phi$ , °									
		12,8	13,0	13,2	13,5	13,8	14,0	14,2	14,5	14,8	15,0
1,55	$x_{\Phi}$ , мкм	51,0	52,6	54,3	56,8	59,4	61,2	63,0	65,8	68,6	70,6
	$w_{\Phi}$ , мкм	45,3	46,0	46,7	47,8	48,9	49,6	50,3	51,4	52,5	53,3
	$2A_{д}$ , дБ	0,000	0,003	0,010	0,028	0,054	0,074	0,097	0,135	0,173	0,199
1,31	$w_{\Phi}$ , мкм	43,1	43,8	44,5	45,5	46,5	47,2	47,9	49,0	50,0	50,7
	$2A_{д}$ , дБ	0,000	0,000	0,001	0,003	0,006	0,008	0,011	0,016	0,022	0,026

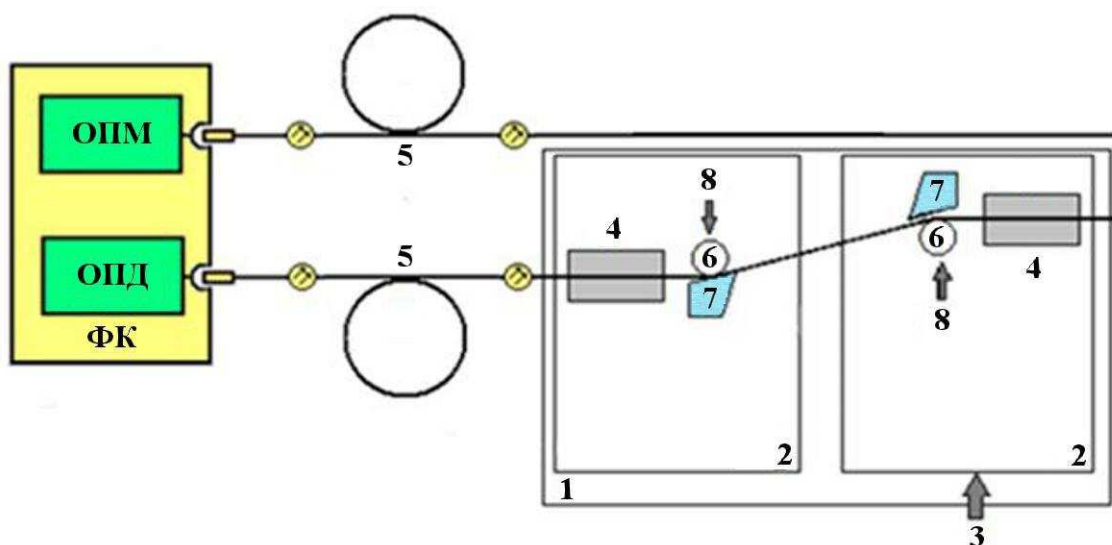


Рис. 8. Структурная схема экспериментальной установки для проведения измерений: ФК — фрейм-контроллер AQ2212; ОПД — оптический передатчик AQ 2200-111 ( $\lambda = 1,31$  мкм) или AQ 2200-131 ( $\lambda = 1,55$  мкм); ОПМ — оптический приемник AQ 2200-211; 1 — основание; 2 — пластина; 3 — подвижка, 4 — держатель ОВ; 5 — ОВ; 6 — изгибная втулка; 7 — оптическая деталь; 8 — прижим втулки

На рис. 9 приведены зависимости для ОВ SMF-28, рассчитанные по предлагаемой методике по формуле (15) и полученные расчетом по формуле (16) из экспериментальных данных. Видно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов при потерях, превышающих 0,01 дБ для  $\lambda = 1,55$  мкм и 0,002 дБ для  $\lambda = 1,31$  мкм. Различия между расчетными и экспериментальными кривыми на начальных участках связаны с тем, что в эксперименте присутствуют начальные потери, обусловленные изгибом на начальный угол  $13^\circ$  и прижимом ОВ (5) к оптической детали (7) с помощью изгибной втулки (6) (см. рис. 8). Формула (15) эти потери не учитывает.

### Заключение

На основании проведенного анализа разработана новая методика расчета потерь оптического излучения на начальном участке изогнутого одномодового ОВ в зависимости от угла изгиба. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает хорошее совпадение результатов. На основе методики реализована программа, которая применяется для расчета потерь в одномодовых ОВ при малых углах изгиба. Используя описанную методику и реализованную по ней программу, можно провести расчеты потерь в различных типах ОВ в зависимости как от параметров самого волокна (радиусов оболочки  $r$  и сердцевины  $\rho$ , показателей преломления оболочки  $n_o$  и сердцевины  $n_c$ , степени профиля показателя преломления  $m$ ), так и от параметров изгиба (радиуса  $R$  и угла  $\Phi$ ).

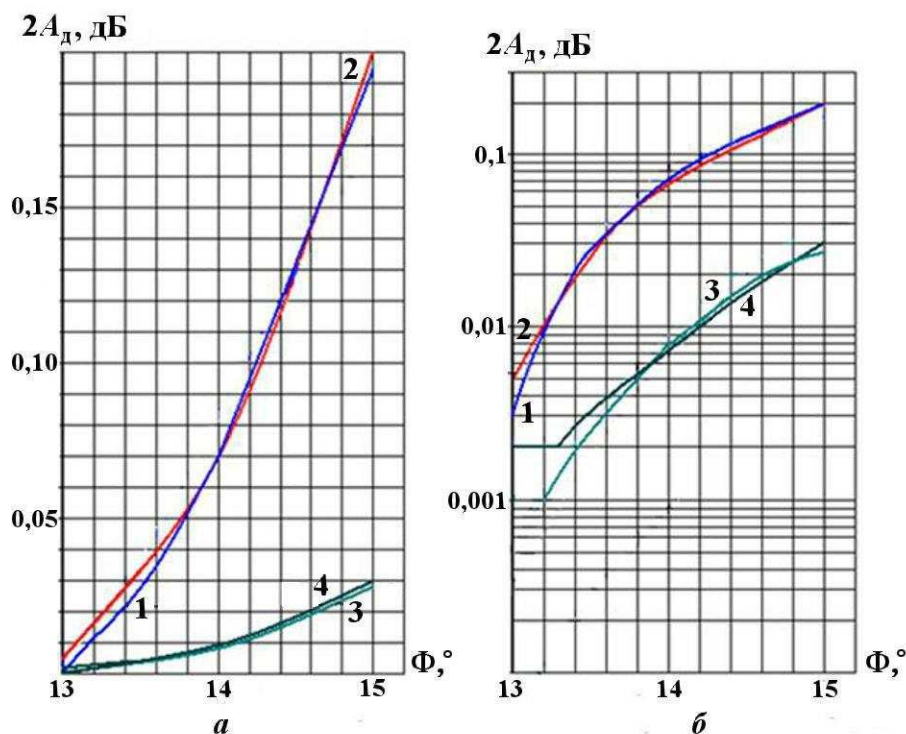


Рис. 9. Зависимость дополнительных потерь от угла изгиба для ОВ SMF-28 в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах: 1 — расчет,  $\lambda = 1,55 \mu\text{м}$ ; 2 — эксперимент,  $\lambda = 1,55 \mu\text{м}$ ; 3 — расчет,  $\lambda = 1,31 \mu\text{м}$ ; 4 — эксперимент,  $\lambda = 1,31 \mu\text{м}$

Полученные расчеты позволят провести оптимизацию параметров для разработки эффективных устройств вывода с минимальными дополнительными потерями.

### Список литературы

1. Шубин В. В. Информационная безопасность волоконно-оптических систем. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015.
2. Gambling W. A., Matsumura H., Ragdale C. M., Sammut R. A. Measurement of radiation loss in curved single-mode fibres // *Microwave, Optics and Acoustics*. 1978. Vol. 2, No 4. P. 134–140.
3. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987.
4. Optical Communication Systems. Bending Loss and Reliability in Optical Fibres. School of Electrical and Communications Engineering. [www.electronics.dit.ie](http://www.electronics.dit.ie).
5. Martins A., Rocha A. M., Neto B. et al. Modeling of Bend Losses in Single-Mode Optical Fibers. Instituto de Telecomunicacoes, Portugal, 2009. [www.academia.edu](http://www.academia.edu).
6. Iodicicco A., Paladino D., Moccia M. et al. Mode coupling and field distribution in sub-mm permanently bent single mode optical fibers // *Optical & Laser Technology*. 2013. Vol. 47. P. 292–304.
7. Schulze C., Lorenz A., Flamm D. et al. Mode resolved bend loss in few-mode optical fibers // *Optics Express*. 2013. Vol. 21, No 3. P. 3 170–3 181.
8. Аксенов В. А., Волошин В. В., Воробьев И. Л. и др. Потери в одномодовых волоконных световодах на однократных изгибах по малому радиусу. Прямоугольный профиль показателя преломления // *Радиотехника и электроника*. 2004. Т. 49, № 6. С. 734–742.

9. Моршнев С. В. Оптические свойства изогнутых волоконных световодов: Автореф. дис. ... доктора физ.-мат. наук. Фрязино Московской обл.: Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова, 2009.
10. Saruwatary M., Nawata K. Semiconductor laser to single-mode fiber coupling // Appl. Optics. 1979. Vol. 11(18). P. 1847—1856.
11. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М.: Наука, 1980.
12. Патент США US4889403. Distribution Optical Fiber Tap. www.patents.com.

Статья поступила в редакцию 05.05.16.

A TECHNIQUE FOR CALCULATING RADIATION LOSSES IN THE INITIAL SECTION OF A BENT SINGLE-MODE OPTICAL FIBER / Yu. V. Malykh, V. V. Shubin (FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov, Nizhny Novgorod region).

A technique for calculating optical radiation losses in the initial section of a bent single-mode optical fiber as a function of the bending angle is presented. Known loss analysis techniques and formulas for bent optical fibers are discussed in terms of their applications. As far as the techniques considered cannot describe the losses in the initial bend section, we have developed a new approach. The resulting technique was used to calculate losses as a function of the bending angle for an SMF-28 optical fiber. The results are compared with experimental data.

*Keywords:* bend of single-mode optical fiber, transition radiation losses, bending radiation losses, conformal mapping method, length and angle of bending.

---