

## Лабораторная работа №1

# Исследование видов не критичных к изгибу оптических ВОЛОКОН

**1 Цель работы:** Изучение не критичных к изгибу оптических волокон, получение навыков моделирования и исследования параметров волокон.

## **2 Литература:**

- [1] Статья «Можно ли волокна завязывать в узел?»
- [2] Алексис Мендес, Т.Ф. Морзе Справочник по специализированным оптическим волокнам
- [3] Рекомендация ITU-T G.657
- [4] Мануал OptiBPM <https://optiwave.com/OptiBPM-manuals/fdtd-wave-setup-introduction/>

## **3 Подготовка к занятию:**

- 3.1 Повторить виды одномодовых волокон по спецификациям ITU-T.
- 3.2 Прочитать материал из [1] и приложения.

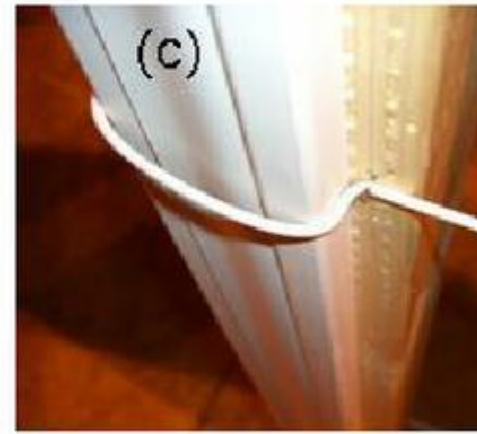
## **4 Содержание отчета:**

- 1. Титульный лист и цель работы.
- 2. Классификация волокон G.657
- 3. Рисунки моделей волокон в программе OptiBPM.
- 4. Графики результатов исследования
- 5. Ответы на контрольные вопросы

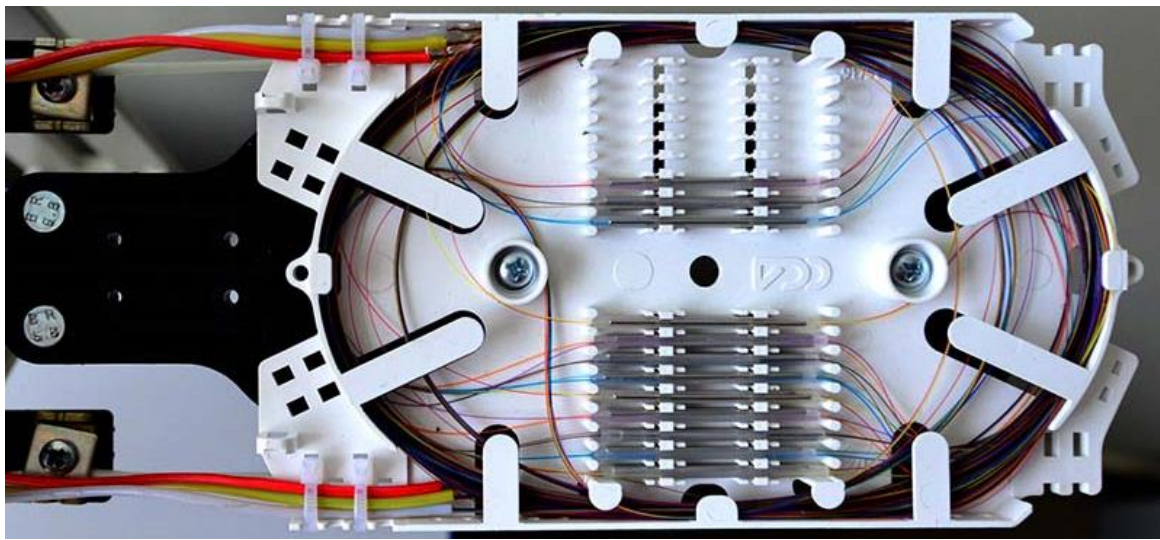
## **5 Выполнение задания:**

Существует следующая интересная задача: насколько сильно можно изогнуть волокно, чтобы не возникло больших потерь мощности (сильного затухания светового сигнала на изгибе).

Эта задача имеет широкое практическое значение, как в оптических сетях доступа, когда надо проложить кабель по дому, квартире (по плинтусу, косяку двери), так и в транспортных сетях, когда например, в магистральной муфте из-за перепадов температуры волокна выдавливаются из кабеля и образуют критические изгибы.



Рисунки событий критического изгиба волокна в сети доступа: (а) изгибы на углах плинтуса; (б) кольца волокна малого радиуса в распределительной абонентской коробке; (в) и кабель, согнутый скобами.



ОМЗКГМ-10-01-0,22

Из-за понижения температуры полиэтиленовая оболочка кабеля сжимается и волокна могут выдавливаются из модулей кабеля, как результат критические изгибы волокна, поэтому рационально в магистральных сетях применять волокно G.657.A

**Задание 1.** На сегодняшний день придумано несколько модификаций конструкции оптического волокна (ОВ) для уменьшения потерь на изгибе (см. [1] и приложение). Необходимо исследовать какой подход наиболее эффективный в отношении критериев сложность реализации / степень уменьшения потерь на изгибе.

Используя программную среду OptiBPM необходимо построить компьютерные модели волокна G.652 и волокна G.657 (по варианту). С помощью

моделирования вычислить значения потерь на изгибах волокна (при разных радиусах изгиба). Построить график зависимости потерь от радиуса изгиба ОВ, а также от изменения значения какого-либо ключевого параметра ОВ, определяющего его конструктивную особенность (число или диаметр воздушных отверстий, изменение показателя преломления, радиус области с иным показателем преломления, расстояние от сердцевины до полостей и т.д.).

Вариант	Тип волокна
1.	Оптическое волокно с уменьшенным диаметром сердцевины
2.	Оптическое волокно с уменьшенным показателем преломления оболочки
3.	Оптическое волокно с двухслойной оболочкой
4.	Оптическое волокно с воздушными полостями в оболочке
5.	Оптическое волокно с кольцевой неоднородностью показателя преломления

Методика моделирования волокон G.657 в программной среде OptiBPM представлена в файле «Методические указания к OptiBPM», представленном на сайте.

**Задание 2.** Из литературы найдите формулу расчета вносимых потерь в волокне на изгибах для волокна G.652. Сравните полученные результат с помощью формулы и с помощью компьютерного моделирования.

### Контрольные вопросы:

1. Какой допустимый радиус изгиба волокон G.657A1?
2. Каким изменением в конструкции волокна можно добиться результата, удовлетворяющего G.657A1?
3. Какой допустимый радиус изгиба волокон G.657B?
4. Какие виды волокон удовлетворяют этим значениям?
5. Целесообразно ли применять волокна G.657 на магистральных линиях?
6. Каким образом работает программа моделирования OptiBPM? Как определяется распределения поля?
7. Возможно ли смоделировать в программе OptiBPM многосердцевинное волокно?



## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Можно ли волокна завязывать в узел?



<https://nag.ru/material/30576>

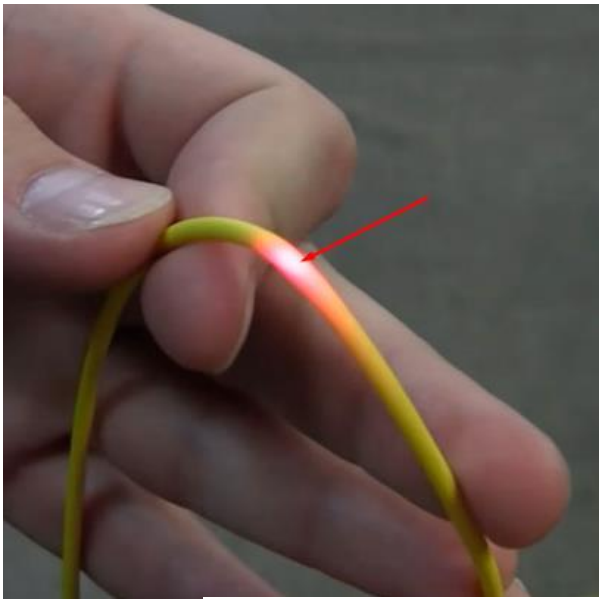
#### 1 Оптические волокна с уменьшенными потерями на макроизгибах

##### 1.1 Причины возникновения потерь на изгибах оптических волокон

При прокладке и монтаже оптического кабеля невозможно избежать изгибов ОВ. Радиус изгиба оптического кабеля при его стационарной прокладке существенно влияет на его эксплуатационные характеристики. Уменьшение радиуса изгиба приводит к появлению дополнительных растягивающих напряжений в наружной части волокна и образованию сжимающей нагрузки на внутренней части волокна. Этому способствует и заметное распространение оптических волокон, некритичных к изгибам.

Следующий вопрос связан с возникающими в результате изгибов изменениями характеристик волокна, выявление этих изменений и, желательно, их предотвращение. Поскольку изгибы обычно вызывают дополнительные потери, то этот эффект будет обнаружен только при вводе кабельной трассы в эксплуатацию после прокладки.

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 оставшая же мощность преобразуется в оболочечные моды и теряется (рисунок 1).

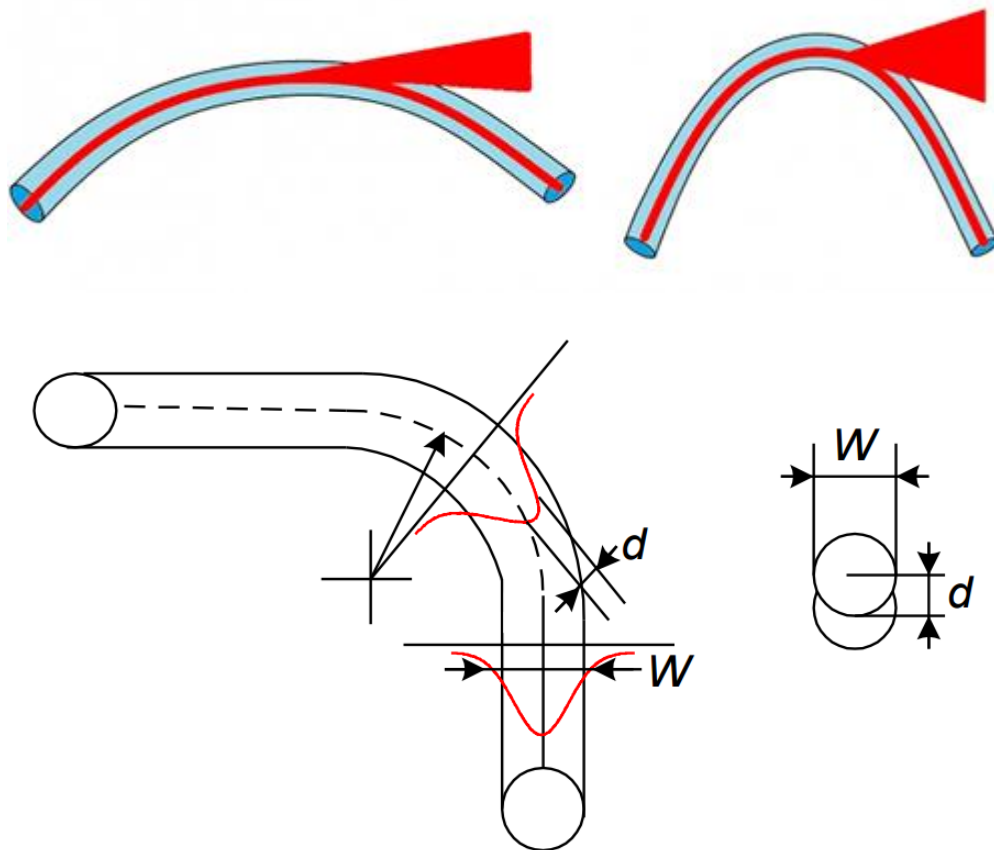


Рисунок 1 – Потеря мощности сигнала в изогнутом волокне

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. На рисунке 2 приведена схема возникновения потерь на излучении в изогнутом волокне.

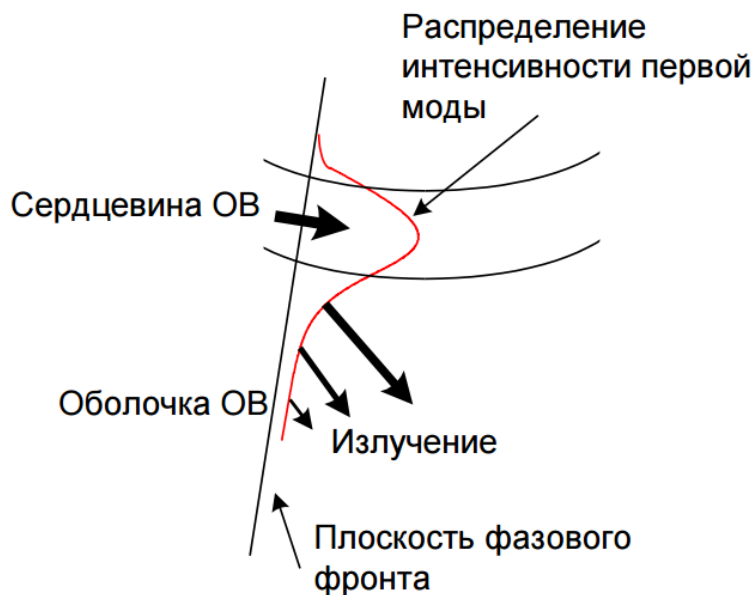


Рисунок 2 – Схема возникновения потерь на излучение в изогнутом волокне

Таким образом, потери в изогнутом волокне можно найти по формуле:

$$\alpha_{\text{макро}} = \frac{33 \cdot \Delta^{0,25} \cdot \lambda_0^{1,5}}{R^{0,5} - \lambda^2} \cdot \exp(K \cdot R), \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{макро}}$  – потери на макроизгибе, дБ;

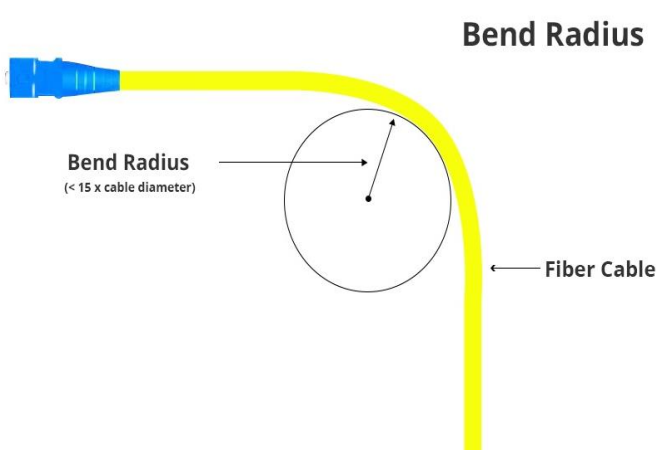
$\lambda$  – длина волны, нм;

$\Delta$  – относительная разница показателей преломления оболочка/сердцевина;

$R$  – радиус изгиба в волокне, мкм;

Параметр  $K$  определяется по формуле

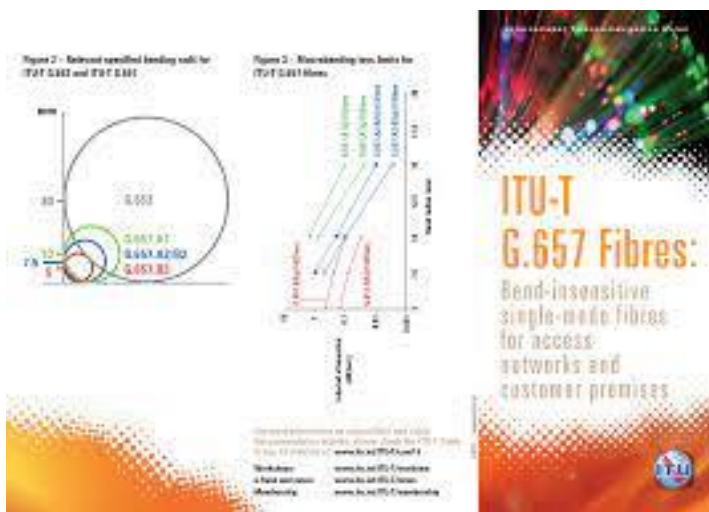
$$K = 1,244 \cdot \frac{\Delta^{1,5}}{\lambda} \cdot \left( 2,748 - \frac{0,996 \cdot \lambda}{\lambda_0} \right)^3.$$



Таким образом, потери в изогнутом волокне возникают из-за двух различных механизмов. В первом случае потери зависят только от радиуса изгиба волокна и не зависят от числа витков. А во втором – они зависят и от радиуса изгиба, и от числа витков.

Для решения данной проблемы были разработаны волокна с уменьшенными потерями на изгибах с малыми радиусами. Международный союз электросвязи ITU–T в конце 2006 года разработал рекомендацию G.657, для стандартизации и определения такого класса ОВ. Данные ОВ получили название «волокна

нечувствительные к изгибу» (от англ. *Bend Insensitive Fibre, BIF*). Оптические волокна G.657 позволяют увеличить плотность размещения компонентов в кроссовом оборудовании, а также в случае использования усовершенствованной системы укладки волокон снизить массу и размер устанавливаемых распределительных шкафов примерно на 40 и 75% соответственно.



## 2 Виды волокон с уменьшенными потерями на макроизгибах

Использование волокон с низкими потерями на изгибе или нечувствительных к изгибу волокон позволяет уменьшить требование к минимальному радиусу изгиба. За счет этого потребуются использование меньших размеров кроссового оборудования и менее квалифицированных мастеров, работающих более быстрыми темпами в процессе установки. Использование новых типов волокон нечувствительных к изгибу позволит упростить технологии монтажа при плотной прокладке ОВ в углах и труднодоступных местах .

В таблицах А и В в рекомендации ITU–T G.657 описываются спецификации для двух классов волокон, не чувствительных к изгибу. Волокна, ITU–T G.657A, также полностью соответствуют рекомендациям ITU–T G.652, то есть стандартным одномодовым волокнам (SSMF), но с улучшенными параметрами потерь на изгибе на изгибе относительно стандартных одномодовых волокон. Кроме того, волокна, ITU–T G.657B, имеют меньшие значения потерь на изгибе и, хотя они могут быть совместимы со стандартными одномодовыми волокнами, они не соответствуют рекомендации ITU–T G652.

Существуют различные способы проектирования и изготовления волокон, которые используются для уменьшения потерь нечувствительных к изгибу волокон. Некоторые волокна имеют сердцевину с показателем преломления как у стандартного одномодового волокна с нелегированной оболочкой из диоксида кремния и уменьшают чувствительность к изгибу за счет изменения параметров оптического волокна (диаметр поля моды, длина волны отсечки и длина волны с нулевой дисперсией). Для достижения значительного уменьшения потерь на изгибе, часто эти свойства волокна имеют нестандартные значения. Однако, добавив в структуру оболочки, либо путем легирования фтором, либо путем введения



воздушных отверстий, были разработаны волокна с более улучшенными значениями потерь на изгибе .

Одним из важных аспектов нечувствительных к изгибу волокон является надежность, когда оно подвергается изгибам малого радиуса в течение длительного периода времени. Когда волокно согнуто, напряжение на внешней радиальной поверхности изгиба усиливается, в то время как на внутренней радиальной поверхности увеличивается напряжение сжатия. Это напряжение изгиба может привести к ускоренному росту дефектов на поверхности стекла, которые могут сократить срок его службы.

Волокна, отвечающие требованиям Рекомендации МСЭ–Т G.657A, также соответствуют требованиям стандарта G.652 и предназначены для использования в телекоммуникационной сети, с повышенной чувствительностью на макроизгибах. К волокнам ITU–Т G.657A применяются более жесткие требования относительно волокон G.652, поэтому эти волокна подходят для применений по всей телекоммуникационной сети, из–за малого диаметра сердцевины. Изгибы волокна возможны, например, при прокладке в углах квартиры, в узких помещениях, при укладке запаса в телекоммуникационный шкаф, при соединении волокон и т. д. Существует несколько подходов, уменьшить потери на макроизгибах:

1) добавление в структуру волокна материалов с различными показателями преломления, которые могут обеспечить лучшую чувствительность на макроизгибе, одновременно поддерживая другие свойства волокна, близкие к значениям типичных одномодовых волокон (SSMF);

2) использование уменьшенного размера либо сердцевины, либо оболочки, что позволяет улучшить чувствительность на макроизгибе и стандартную длину волны отсечки, но значительно уменьшить диаметр модового поля (MFD) по сравнению со стандартными одномодовыми волокнами (SSMF);

3) использование материала вокруг сердцевины с другим показателем преломления, что позволяет повысить чувствительность к макроизгибу, но значительно уменьшить MFD и длину волны отсечки по сравнению со стандартными одномодовыми волокнами (SSMF) .

В таблице 1 приведены требования к макроизгибу волокон, стандартов с ITU–Т G652 и G657A,B.

Таблица 1 – Требования к макроизгибу волокон, стандартов с ITU–Т G652 и G657A,B.

	G.652D	G.657A	G.657B
Диаметр модового поля	8,6–9,5	8,6–9,5	6,3–9,5
$\lambda_0$	1300–1324	1300–1324	NA
$\lambda_c$ , кабель	$\leq 1260$	$\leq 1260$	$\leq 1260$
1x15 мм (1550)	NA	NA	$\leq 0,5$ дБ
1x15 мм (1625)	NA	NA	$\leq 1,0$ дБ
1x20 мм (1550)	NA	$\leq 0,75$ дБ	$\leq 0,1$ дБ
1x20 мм (1625)	NA	$\leq 1,5$ дБ	$\leq 0,2$ дБ

10x30 мм (1550)	NA	≤0,25 дБ	≤0,03 дБ
10x30 мм (1625)	NA	≤1,0 дБ	≤0,1 дБ
100x60 мм (1625)	≤0,1 дБ	≤0,1 дБ	NA

Волокна, отвечающие требованиям рекомендации МСЭ–Т G.657В имеют более низкие значения потерь на изгибе, чем волокна, которые соответствуют стандарту G.652. Поскольку в рекомендацию G.657В включены волокна с уменьшенным значением MFD, могут возникнуть повышенные потери при соединении таких волокон со стандартными одномодовыми волокнами, из-за больших несоответствий MFD. Как и в случае с волокнами G.657А, в волокнах G.657В существует несколько подходов, для уменьшения потерь на изгибе:

- 1) изменения размеров сердцевины или оболочки;
- 2) добавление кольцевой неоднородности показателя преломления оболочки вокруг сердцевины;
- 3) добавление воздушных полостей в оболочку;
- 4) добавление материала в оболочку с более низким показателем преломления.

Конструкции волокон G.657В, могут:

- 1) иметь характеристики волокна, подобные одномодовым стандартным волокнам SSMF;
- 2) изготавливаться по современной технологии для масштабного производства;
- 3) сращиваться и соединяться со стандартными одномодовыми волокнами.

Конструкции волокон G.657.В, реализованные с помощью кольцевой неоднородности вокруг сердцевины с отличным показателем преломления, могут иметь параметры, сходные со стандартными одномодовыми волокнами (SSMF), однако, толщина и расположение кольца делают изготовление больших заготовок сложной задачей и могут потребовать точечной настройки при сварке и соединении волокна. Волокно с воздушными полостями в оболочке (HAF) и с наноструктурированным кольцом – это новые технологии, которые могут обеспечить снижение потерь на макроизгибе, они могут значительно превышать значения указанные в рекомендации G.657В. Волокна HAF, как правило, являются дорогостоящими, поскольку для их получения требуется специальная технология изготовления заготовок, которая также может ограничить размер продукта. Кроме того, для контроля размеров отверстий в вытянутом волокне HAF требуется специальная технология вытяжки. Волокна с наноструктурированным кольцом могут быть сконструированы так, чтобы использовать уникальные дисперсионные свойства наноструктурированного кольца. Однако случайность местоположения и размера отверстий может приводить к изменениям чувствительности на макроизгибе вдоль оси волокна и к азимутальной ориентации волокна относительно плоскости макроизгибов. Кроме того, для волокон с воздушными полостями в оболочке и наноструктурированным кольцом может потребоваться специальная технология сварки таких волокон, оконечивание и методы очистки разъемов.

Оценка поставщиков услуг производителей волокон G.657В показала, что некоторые конструкции приводят к чрезмерным потерям в условиях жестких

изгибов волокна (радиус  $\sim 5$  мм), возникающих при сгибании оптических кабелей на резких поворотах. Проблема с этим приложением заключается в разработке недорогого оптоволоконного решения, обеспечивающего малые потери на изгибе и высокую механическую надежность.

### 3 Анализ ключевых параметров некритичных к изгибу волокон

Волокна категории G.657A идентичны по характеристикам ОВ класса G.652D, за исключением более низких потерь на макроизгибе. Эти волокна подходят для использования в O-, E-, S-, C- и L- диапазонах (т.е., во всем рабочем диапазоне длин волн стандартных одномодовых волокон – от 1260 нм до 1625 нм). ОВ категории G.657A могут использоваться для всех сетей, где определено применение волокна ITU-T G.652.D. Из этого следует полная совместимость ОВ G.657A со стандартным одномодовым волокном.

Согласно рекомендации ITU-T волокна класса G.657B предназначены для сетей небольшой протяженности (менее 1000 м), т.е. для сетей доступа. Эти волокна подходят для работы в O-, E-, S-, C- и L- диапазонах (т.е., во всем диапазоне длин волн от 1260 нм до 1625 нм). На волокна категории B не накладывается требование полного соответствия стандартными одномодовыми волокнами ITU-T G.652.D в плане значений коэффициента хроматической дисперсии и поляризационной модовой дисперсии. Волокна класса G.657B имеют примерно от 15 до 30 раз меньшие потери на макроизгибе по сравнению с традиционными волокнами стандарта G.652.

В настоящее время существует множество типов оптических волокон с уменьшенными потерями на макроизгибах:

- оптическое волокно с уменьшенным диаметром сердцевины;
- оптическое волокно с уменьшенным показателем преломления оболочки (по отношению к значению показателя преломления стандартного одномодового ОВ);
- оптическое волокно с двухслойной оболочкой;
- оптическое волокно с воздушными полостями в оболочке;
- оптическое волокно с кольцевой неоднородностью показателя преломления оболочки;
- наноструктурированное оптическое волокно;
- фотонно-кристаллическое оптическое волокно;
- оптическое волокно с фотонной запрещенной зоной.

Рассмотрим далее особенности каждого из представленных типов ОВ.

3.1 Оптическое волокно с уменьшенным диаметром сердцевины. Значение диаметра сердцевины ОВ данного класса составляет от 6 до 8,5 мкм. По своим параметрам данное волокно соответствует классу B2 стандарта G.657. Практическая совместимость этих волокон со стандартными одномодовыми волокнами класса G.652 сильно затруднена вследствие высоких потерь на сварном соединении из-за значительной разницы диаметров сердцевины.

Существует также исполнение оптических волокон с диаметром сердцевины 8,6 мкм. По своим параметрам, оно соответствует классу A1 стандарта G.657. Эти волокна хорошо совместимы со стандартными одномодовыми волокнами. На рисунке 4 представлено оптическое волокно с уменьшенным диаметром сердцевины.

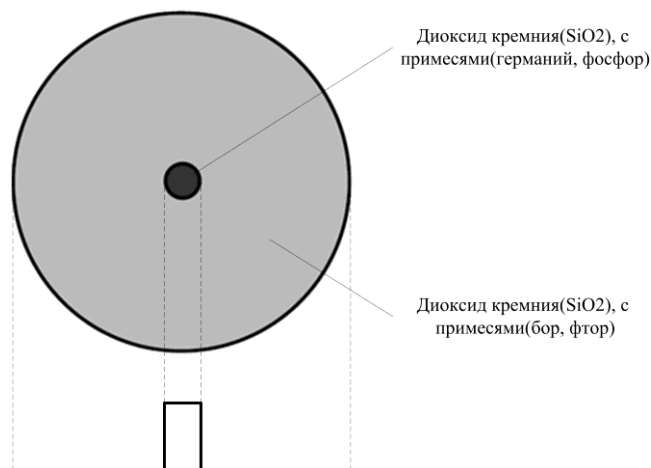


Рисунок 4 – Оптическое волокно с уменьшенным диаметром сердцевины

3.2 Оптическое волокно с уменьшенным показателем преломления оболочки. Для изготовления такого класса волокон оболочка легируется фтором с целью получения в сравнении со стандартным ОВ более низкого показателя преломления. Конструкция оптического волокна позволяет использовать их в оптической системе в сочетании со стандартными одномодовыми волокнами. Недостаток данного типа волокон заключается в том, что уже при радиусе изгиба 15 мм наблюдаются значительные потери. На рисунке 5 представлено оптическое волокно с уменьшенным показателем преломления оболочки

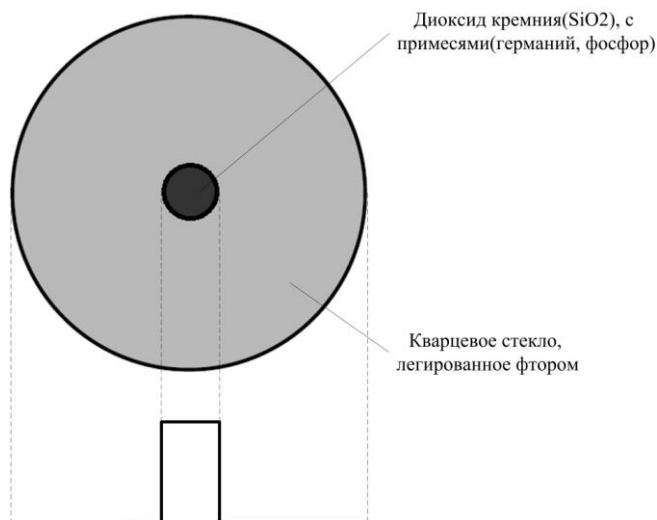


Рисунок 5 – Оптическое волокно с уменьшенным показателем преломления оболочки

3.3 Оптическое волокно с двухслойной оболочкой. Также как у ранее рассмотренного типа ОВ уменьшение потерь на макроизгибе достигается путем

уменьшения показателя преломления оболочки. Однако в данном случае легируется фтором только внутренняя часть оболочки вблизи сердцевины. В результате получается оптическое волокно с двухслойной оболочкой. Этот тип волокна также называют волокном W-профиля (поскольку график профиля показателя преломления напоминает букву W). Достоинством данного ОВ является то, что на двух длинах волн оно имеет нулевую дисперсию. Кроме того дисперсия имеет малое значение в достаточно широком диапазоне длин волн. Имея такие замечательные свойства, данные волокна могут использоваться для компенсации дисперсии в ВОЛС. На рисунке 6 представлено оптическое волокно с двухслойной оболочкой.

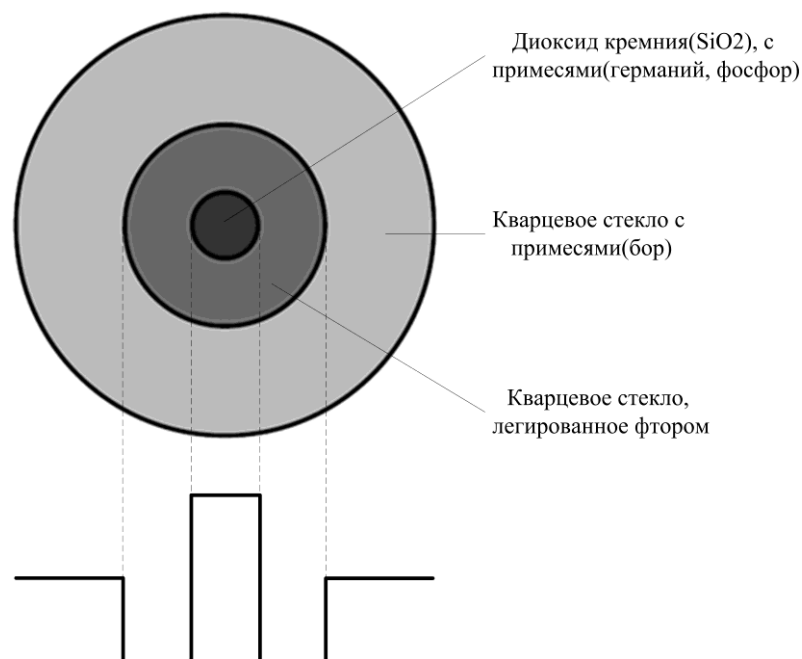


Рисунок 6 – Оптическое волокно с двухслойной оболочкой

3.4 Оптическое волокно с воздушными полостями в оболочке. При изготовлении данных волокон вокруг сердцевины располагают воздушные полости в форме кольца. Граница раздела стекло/воздух обеспечивает в местах макроизгиба ОВ более благоприятный режим для эффекта полного внутреннего отражения, соответственно потерь энергии сигнала становится меньше. Наряду с оптическими волокнами с кольцевой неоднородностью показателя преломления оболочки, волокна с воздушными полостями являются полностью совместимыми с волокнами стандарта G.652D . На рисунке 7 представлено оптическое волокно с воздушными полостями в оболочке.

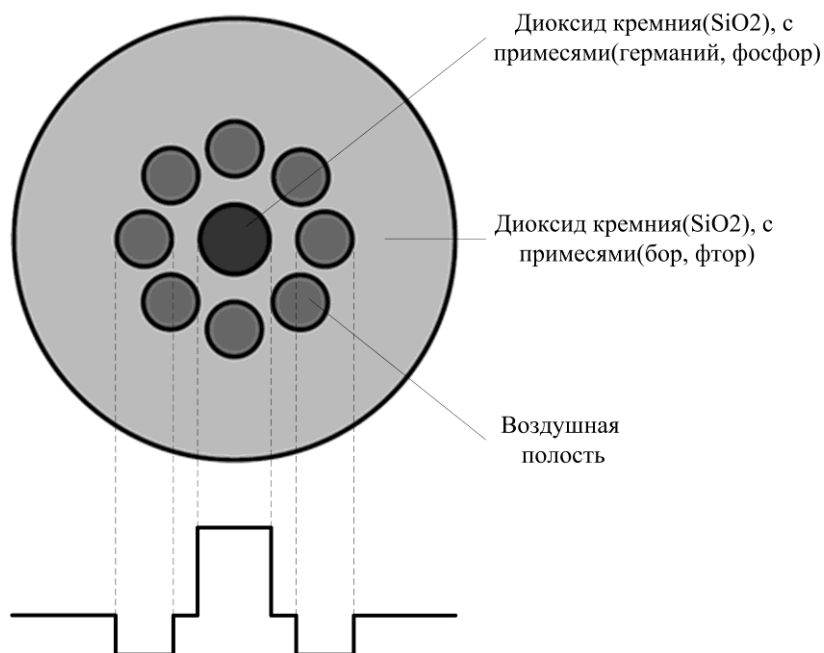


Рисунок 7 – Оптическое волокно с воздушными полостями в оболочке

Недостаток данных волокон заключается в том, что воздушные полости могут осложнить монтаж коннекторов: попадание пыли и грязи в полости приведет к ухудшению оптических характеристик разъемных соединений .

3.5 Оптическое волокно с кольцевой неоднородностью показателя преломления оболочки. Данный тип волокна соответствует классу В2 стандарта G.657 и является совместимым с волокнами стандарта G.652. Как видно из рисунка 7, при изготовлении данных ОВ кольцевая область оболочки дополнительно легируется присадками, понижающими показатель преломления .

Исследования показали, что с увеличением ширины кольца происходит уменьшение потерь на изгибе. Однако при значительном увеличении ширины кольца или количества колец увеличивается критическая длина волны. Данное обстоятельство может привести к несовместимости таких волокон со стандартными серии G.652 . На рисунке 8 представлено оптическое волокно с кольцевой неоднородностью показателя преломления оболочки.

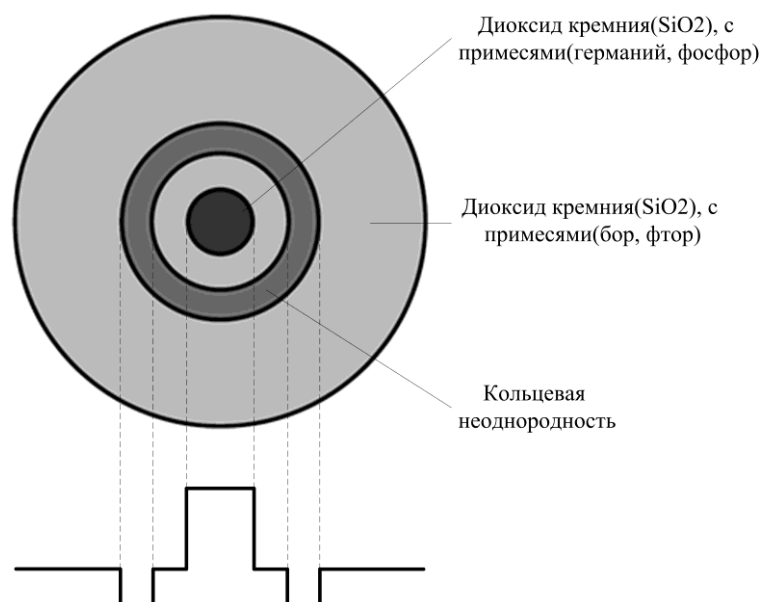


Рисунок 8 – Оптическое волокно с кольцевой неоднородностью показателя преломления оболочки

3.6 Наноструктурированные волокна. В структуру данного волокна входит сердцевина, легированная германием, и оболочка, содержащая наноструктурированную область в форме кольца. В отличие от рассмотренных выше волокон с кольцевой неоднородностью показателя преломления оболочки, имеющих кольцевую область шириной 1 мкм воздушных полостей, наноструктурированные волокна имеют воздушные полости диаметром менее 200 нм, которые при этом расположены хаотически.

Данные ОВ имеют ряд преимуществ по сравнению с другими рассмотренными видами волокон. Показатель преломления наноструктурированной стеклянной оболочки значительно отличается от кварцевого стекла с традиционными примесями стандартных ОВ. Для данных волокон зависимость значения показателя преломления наноструктурированной оболочки от длины волны имеет более ярко выраженный характер, в сравнении с ОВ с оболочкой легированной фтором. Таким образом, в волокнах наблюдается следующая закономерность: при увеличении длины волны оптического излучения значительно увеличивается отношение коэффициента преломления сердцевины к коэффициенту преломления оболочки. В результате на длине волны 1550 нм потери энергии сигнала в местах макроизгибов становятся минимальными в сравнении с другими типами ОВ.

Наноструктуры позволяют получать очень высокое значение отношения коэффициента преломления сердцевины к коэффициенту преломления оболочки. Такой же результат очень трудно получить с помощью обычной технологии легирования оболочки фтором.

Степень рассеяние света при прохождении наноструктурированной области также имеет сильную зависимость от длины волны. В коротковолновой области потери энергии сигнала вследствие рассеяния более высокие, чем в длинноволновой. Представленные возможности могут быть использованы для

разработки ВГФ-волокон нового поколения с лучшими параметрами. На рисунке 9 представлено оптическое волокно с наноструктурированным кольцом.

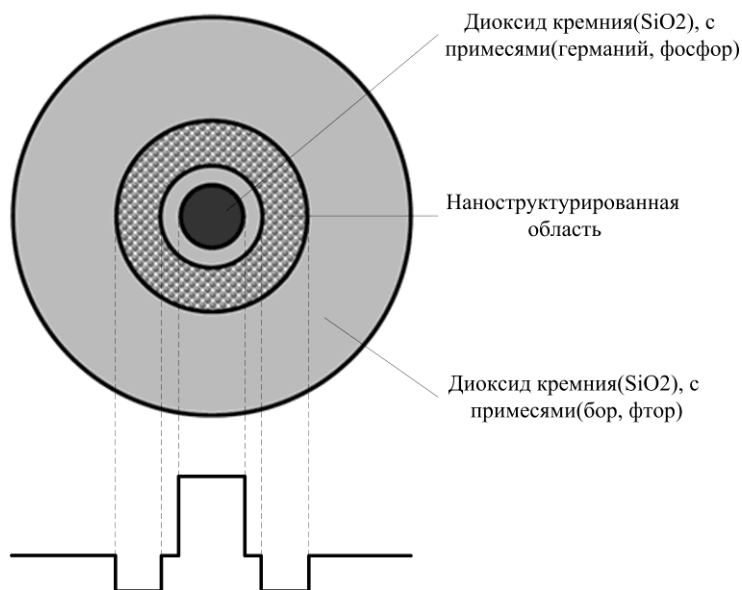


Рисунок 9 – Оптическое волокно с наноструктурированным кольцом

На рисунке 10 представлен график зависимости потерь на макроизгибе от радиуса изгиба для различных типов волокон. Измерение потерь проводилось при длине волны 1550 нм.

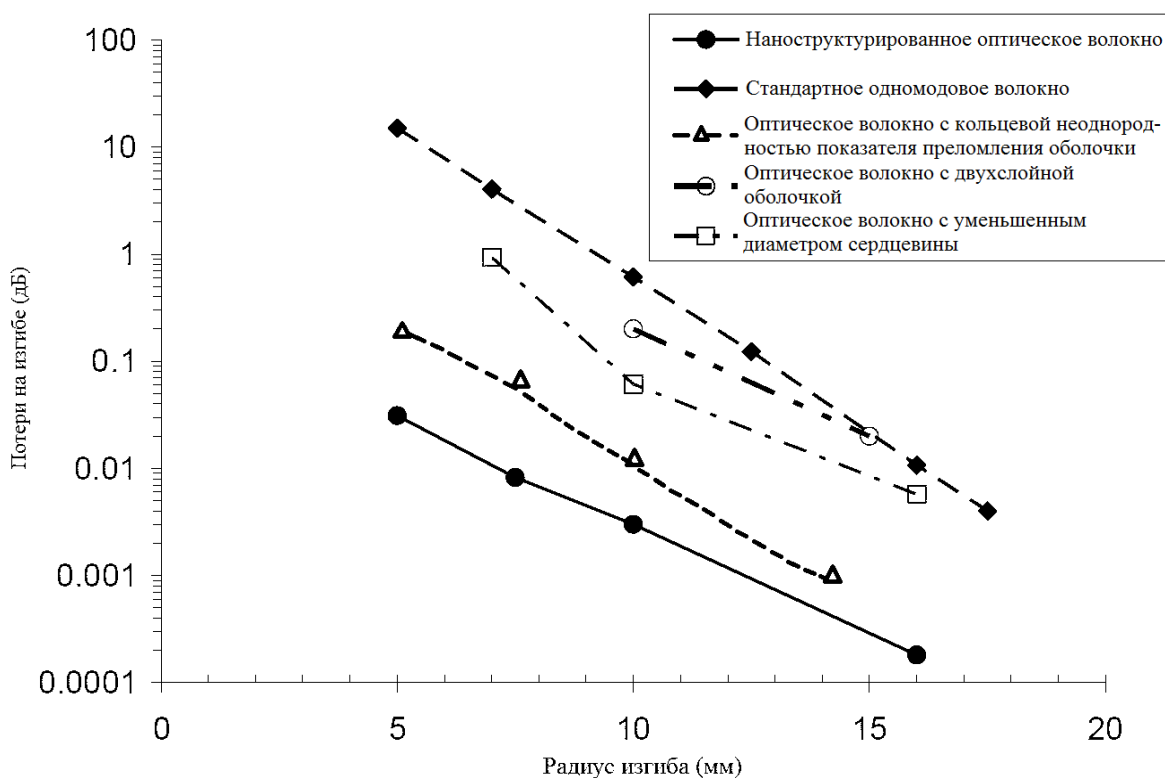


Рисунок 10 – График зависимости потерь на макроизгибе от радиуса изгиба для различных типов волокон



Из рисунка видно, что наноструктурированное волокно имеет в 500 раз меньшие потери на микроизгибе, чем стандартное одномодовое волокно, в 100 раз меньшие потери, чем волокно с двойной оболочкой, и приблизительно в 10 раз меньшие потери, чем оптическое волокно с кольцевой неоднородностью показателя преломления оболочки .

3.7 Фотонно–кристаллическое волокно (Photonic crystal fiber, PCF). Как видно из рисунка 11, в фотонно–кристаллическом волокне нет традиционной сердцевины с более высоким показателем преломления; оптическая направляющая система образуется за счет наличия в структуре волокна нескольких десятков отверстий. Фотонно–кристаллическое волокно способно передавать оптическое излучение в одномодовом режиме в очень широком диапазоне длин волн – от видимой части спектра до инфракрасной области спектра. Изменяя размер и расположения воздушных отверстий, можно добиваться различных дисперсионных характеристик волокна .

Еще одной особенностью данного волокна является то, что оно может быть сформировано с использованием только одного материала – кварцевого стекла. Несмотря на отсутствие сердцевины, значение коэффициента затухания фотонно–кристаллических волокон находится на уровне значений стандартных одномодовых волокон SMF . На рисунке 11 представлено фотонно–кристаллическое волокно

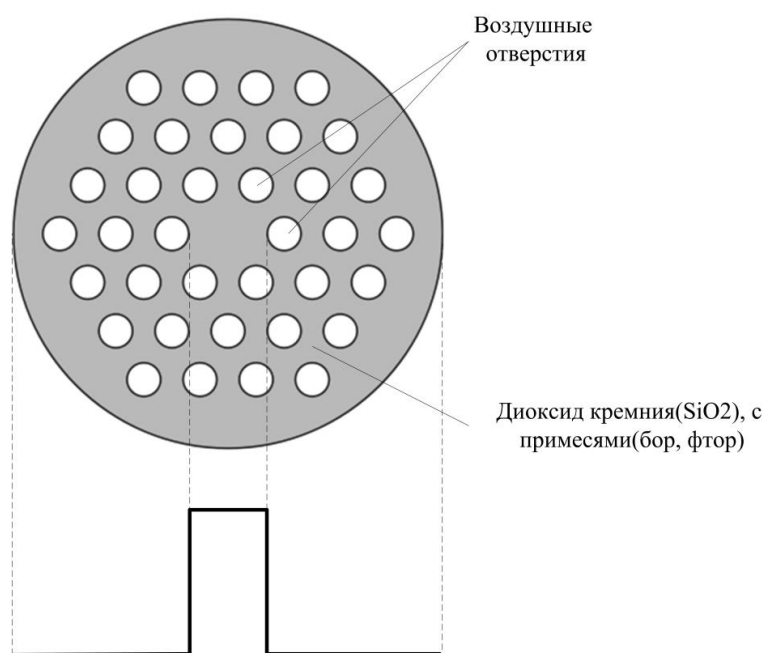


Рисунок 11 – Фотонно–кристаллическое волокно

3.8 Оптическое волокно с фотонной запрещенной зоной (Photonic band-gap fiber, PBGF). Оптическое волокно с фотонной запрещенной зоной по своему физическому принципу работы принципиально отличается от стандартных одномодовых волокон. Способность передавать свет в заданном направлении в данных волокнах основана не на эффекте полного внутреннего отражения, а на эффекте брэгговского отражения. Данные волокна практически нечувствительны к изгибу – даже при очень малом радиусе изгиба возникающие потери незначительны.

Например, при радиусе изгиба 5 мм стандартное ОВ имеет потери более 10 дБ, в то время как PBGF волокно – менее 0.01 дБ . На рисунке 12 представлено Фотонное волокно с запретной зоной

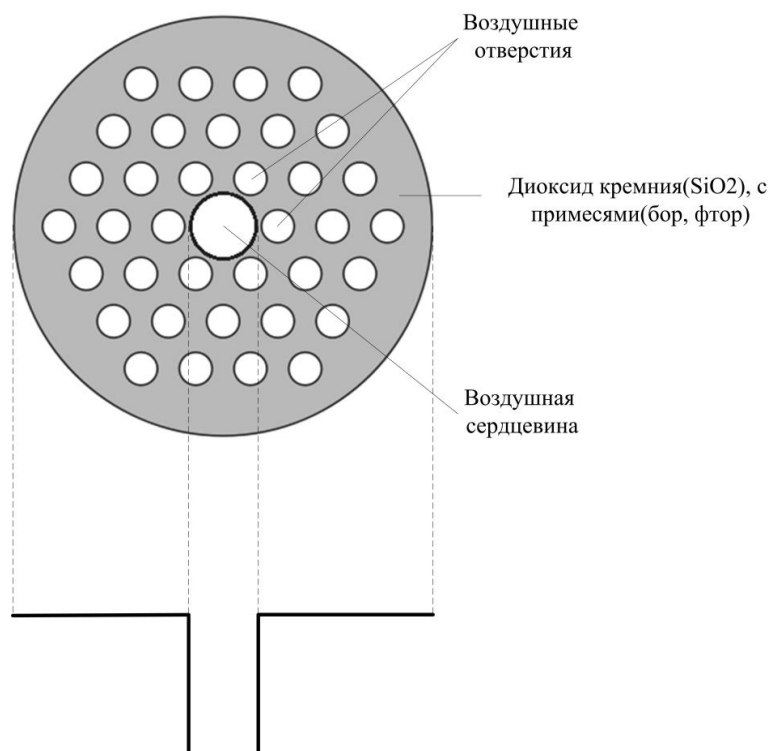


Рисунок 12 – Фотонное волокно с запретной зоной

#### 4 Срок службы микроструктурированных волокон

Укладка волокна с уменьшенным радиусом в системе организации волокон и в муфтах может оказывать воздействие на ожидаемый срок службы. Важными параметрами, определяющими ожидаемый срок службы, является уровень прикладываемого проверочного напряжения во время производства волокна. Требуемые значения этих параметров следует перерасчитывать с учетом допустимой интенсивности отказов в сети. При оценке результатов этого основным является вопрос о том, удовлетворяют ли одномодовые волокна требованиям длительности ожидаемого срока службы, указанного в характеристиках волокон. Кроме характеристик истинной силы волокна и условий эксплуатации волокна основными параметрами, определяющими интенсивность отказов в одной кассете, являются длина уложенного волокна и радиус изгиба  $R$  в укладке. Меньшая длина укладки будет иметь положительное воздействие, а уменьшенный радиус – отрицательное воздействие. Применяя модель срока службы [b-IEC/TR 62048] с использованием более подробной информации [b-OFT] по современным волокнам со стандартной установкой проверочного напряжения и нормальным режимом проверочных испытаний, получены показанные на рисунке 15 значения максимальной длины укладки для 20-летнего срока службы как функция радиуса изгиба волокна для различных значений коэффициента  $n$  чувствительности к коррозии при статическом напряжении (параметр усталости).

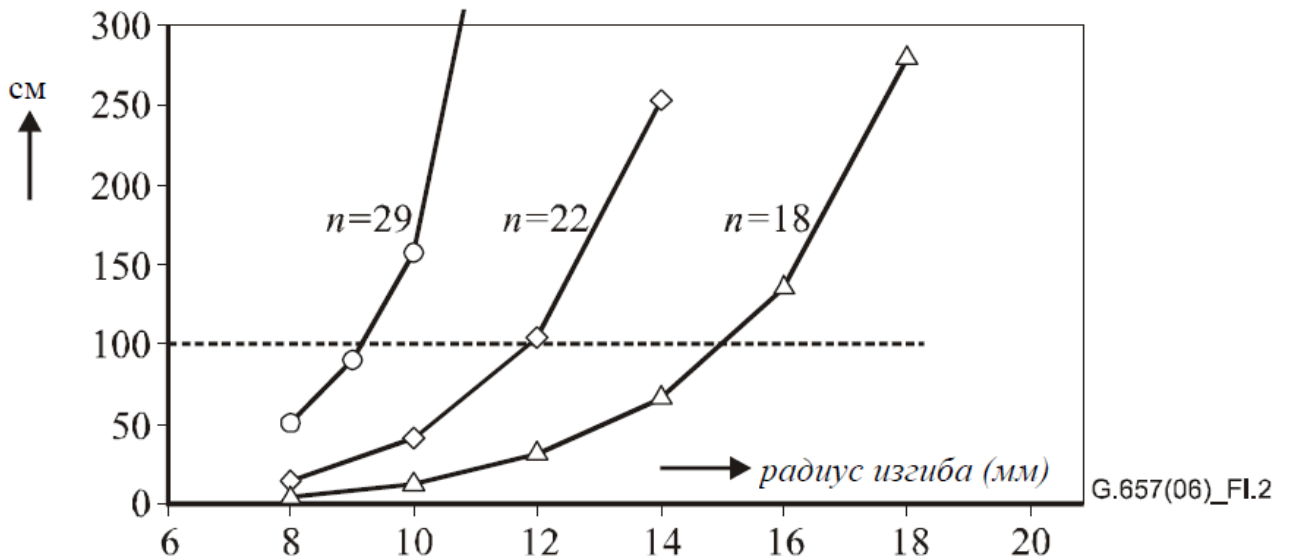


Рисунок 15 – Максимальная длина укладки для волокна с изгибом и различные значения параметра n усталости

Следует отметить, что значение  $n = 18$  является минимальным значением, объявленным в [b–IEC 60793–2–50] и общих требованиях Telcordia GR–20–CORE. Для длины укладки волокна в одной кассете, равной, например 100 см, то есть  $2 \times 50$  см на одно одиночное волокно, радиус изгиба может уменьшаться с текущего значения 30 мм до 15 и даже 9 мм в зависимости от гарантированного значения  $n$  при условии не ухудшения уровня интенсивности отказов, равного 0,001% на одну кассету в течение 20 лет. Вторым вопросом укладки являются порты входа и выхода в системе организации волокон. Требуемые малые размеры оптических компонентов сети доступа обуславливаются не только областью укладки, но и минимальным радиусом укладки во входных и выходных портах. Также принимается, что дополнительное значение интенсивности отказов за счет этих дополнительных изгибов должно быть ограничено и не превышать 10% от допустимого значения интенсивности отказов, которое составляет 0,001% для кассеты. В результате определяются минимальные значения, показанные в среднем столбце таблицы 2.

Таблица 2 – Минимальные значения радиусов изгибов кабеля не в укладке

Значение n	четыре 90° изгиба	один 180° изгиб
18	Rmin = 15,0 мм	Rmin = 12,6 мм
22	Rmin = 11,1 мм	Rmin = 9,2 мм
29	Rmin = 8,0 мм	Rmin = 6,6 мм

В правом столбце показаны минимальные значения радиуса в случае одного 180° градусного ложного изгиба. Также для этой ситуации принимается максимальная дополнительная интенсивность отказов для отдельной кассеты,

составляющая  $0,1 \times 0,001\%$ . Все цифры относятся к организации одного волокна и приведены для трех различных значений параметра  $n$  усталости.

## 5 Классификация типов волокон нечувствительных к изгибу

На рисунке 13 представлена классификация рассмотренных выше типов оптических волокон с уменьшенными потерями на макроизгибах.



Рисунок 13 – Классификация оптических волокон с уменьшенными потерями на макроизгибе по типу реализации

Как видно из рисунка 13, большинство подходов реализации волокна с уменьшенными потерями на макроизгибах основано на изменении структуры оболочки. Важным критерием возможности использования данного класса волокон в современных оптических сетях является совместимость со стандартными ОВ серии G.652.

На рисунке 14 изображена классификация оптических волокон с уменьшенными потерями на макроизгибе по классам рекомендации G.657A и B.

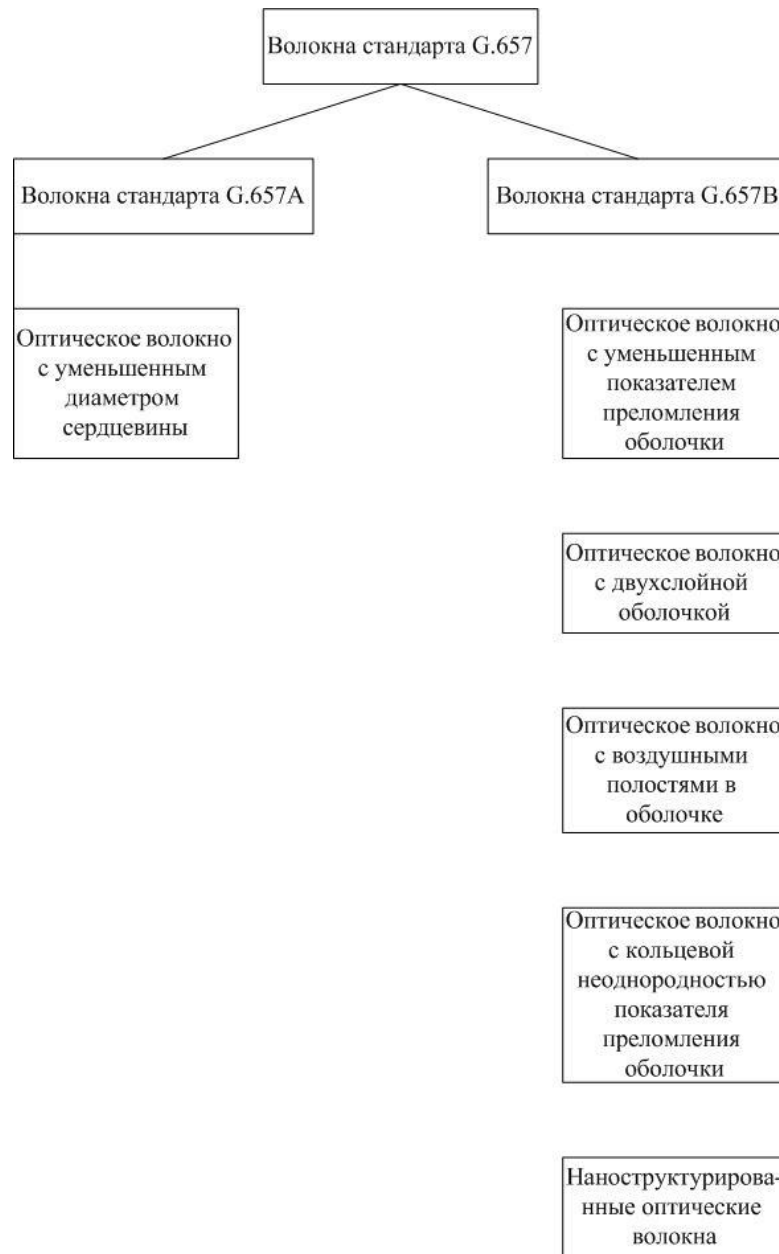


Рисунок 14 – Классификация оптических волокон с уменьшенными потерями на макроизгибе по классам рекомендации G.657