

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тихоокеанский государственный университет»

На правах рукописи



Резак Елена Владимировна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ИЗГИБА И
ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ
ОДНОМОДОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА**

Специальность 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических
наук, доцент
Вихтенко Эллина Михайловна

Хабаровск – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ПАРАМЕТРЫ ОДНОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ...	15
1.1 Ортогональные моды, возникающие в одномодовых оптических волокнах	15
1.2 Двулучепреломление в оптическом волокне	20
1.3 Поляризация излучения и природа ее возникновения в оптических волокнах	21
1.4 Факторы, воздействующие на передачу сигнала в одномодовом оптоволокне.....	23
1.4.1 Деформация растяжения и сжатия.....	27
1.4.2 Деформация изгиба.....	31
1.4.3 Деформация кручения	33
1.4.4 Возникновение оптической анизотропии при	
деформации	35
1.5 Одномодовое оптическое волокно, сохраняющее поляризацию, и его особенности	39
ГЛАВА 2 МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИИ ИЗГИБА ВОЛОКНА	43
2.1 Численное моделирование деформации изгиба одномодового .. оптического волокна	43
2.2 Расчет составляющих показателя преломления одномодового оптического волокна с помощью компьютерного пакета Mathcad и реализованного программного комплекса	47
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА ВНУТРИ СЕРДЕЧНИКА ВОЛОКНА	70

3.1 Влияние относительного изменения показателя преломления сердечника одномодового оптического волокна на погрешность измерения его длины	70
3.2 Исследование влияния деформационного изменения показателя преломления волокна на возникновение поляризационных явлений.....	76
ГЛАВА 4 ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС	82
4.1 Описание алгоритма работы программного комплекса	82
4.2 Описание структуры программного комплекса	82
4.3 Создание 3D модели оптического волокна.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	102
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	104
ПРИЛОЖЕНИЕ А_Охранные документы на результат интеллектуальной деятельности.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Интерфейс программного средства	126
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертационной работы.....	127

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования определяется резким ростом информатизации, которая выражается в цифровизации всех сфер человеческой жизни от экономики до образования, приобретает глобальный характер. Цифровая глобализация требует увеличения скорости доступа к получению информации, который зависит от разработки новых телекоммуникационных линий связи. Это нашло отражение в послании Президент Российской Федерации Федеральному собранию 29 февраля 2024 года [1]. Не менее важным является, модернизация действующих телекоммуникационных линий связи, так как полная замена подобных линий требует не только значительных денежных средств, но и временных затрат [2].

Увеличение объема передаваемой информации требует создания высокоскоростных телекоммуникационных линий [3]. В настоящий момент таковыми являются волоконно-оптические линии [4], где наибольшую скорость передачи обеспечивают одномодовые оптические волокна (ОВ) [3]. Однако, постоянное увеличение скорости передачи информации, даже в подобных сетях, невозможно. Это связано с некоторой спецификой оптических волокон [5].

Во-первых, существуют ограничения, связанные с эффектом «уширения длительности бит». Это обусловлено различной скоростью распространения составляющих импульсов светового излучения, поляризационными [5] и, возможно, иными составляющими, которые в телекоммуникации относятся к такому параметру передачи сигнала как «дисперсия» [4].

При этом нужно учитывать, что если задача обеспечения равенства скорости распространения различных спектральных составляющих –исключение, так называемой, хроматической дисперсии [6], научно и технически решена, то решение задачи выравнивания скорости распространения световых импульсов различной поляризации, или устранения поляризационно-модовой

дисперсии, является «камнем преткновения» в современных волоконно-оптических линиях связи [7].

Во-вторых, для дальнейшего увеличения скорости передачи информации необходимо учитывать внешние факторы влияния среды [8], в которую помещается волокно в процессе эксплуатации. К ним можно отнести: механические вибрации, температуру, давление и влажность окружающей среды, различного вида деформации, электромагнитное поле.

В-третьих, необходимо учитывать физические свойства самого волокна [9-10]. В реальных оптических волокнах нарушение круговой симметрии приводит к возникновению анизотропии [11-13], которая влияет на передачу сигнала по волокну. Контроль нарушения круговой формы сердцевинки, происходит на стадии производства волокна, следовательно, отследить нарушение круговой симметрии в процессе эксплуатации не представляется возможным. Возникновение анизотропии может быть результатом наведенного двулучепреломления вещества, например, из-за наличия несимметричных напряжений в материале самого волокна, или из-за геометрического несовпадения центров сердцевинки волокна и его оболочки [5]. Данные факторы, можно отследить в реальных условиях эксплуатации, а в некоторых случаях провести компенсацию или корректировку погрешности.

И те и другие специфические особенности волокна оказывают влияние на затухание сигнала в нем, изменение показателя преломления самого волокна, что препятствует дальнейшему увеличению скорости передачи информации [14-15].

Помимо этого, необходимо отметить, что ОВ широко используется в создании волоконной техники (генераторы излучения светового диапазона, различные датчики и др.) [16-21]. Следовательно, наличие высокочувствительных волоконно-оптических датчиков напряженности электрических и магнитных полей (эффекты Керра [6] и Фарадея [22-24]), вибрации [11], температуры [12, 16, 18, 21, 25], давления [26], деформации (фотоупругий эф-

фект) [16, 27] являются подтверждением влияния на волокно параметров среды.

Наиболее часто встречающиеся изменения сигнала, проходящего по оптическому волокну, сопряжены с деформацией волокна [5, 17-19, 21, 28-32]. При этом потери сигнала в волокне, проявляющиеся в результате внешней деформации (растяжение, изгиб, кручение) изучались и продолжают изучаться, как наиболее часто оказывающие воздействие на распространение сигнала в процессе эксплуатации. Данную проблему освещают такие зарубежные исследователи как Chen S., Farrell G., Freir T., Funnell A. C., Gambling W. A., Ghaffar A., Iadicicco A., Liao K., Matsumura H., Mukhtar W. M., Ragdale C. M., Shyh-Lin T., Sun X., Tian H. A., Thomas P. J., Tong Y., Wang Q., Wen-Ming C., Wang Z., Zheng Y.

Среди российских авторов данная тема освещена менее значительно, что, вероятно связано, с относительно молодой отраслью научных исследований, связанных с деформированным оптическим волокном. Можно выделить работы авторов Азанова И. С., Денисов И. В., Ниценко А.В., Оборневой И. В., Дмитриевой А.Д., Гладких В. А., Власенко В. Д., Овчаренко А. Б., Таранов М. А., Федотов М. Ю., Будадин О. Н., Козельская С. О., Терентьев В. С., Борисенков И. Л., Крутов А. Ф., Козлов Н. П., Лесникова, Ю.И., Аксенов В. А., Мосунова И. Д., Селезнёв Д. А., Ременникова М. В., Хисамов Д. В., Смирнова А. Н.

Не так распространены исследования связанные с воздействием температуры окружающей среды на волокно и сигналы в нем. И, наконец, менее всего изучена область, связанная с возникновением деформации волокна, как результата воздействия температуры [8].

Особенности сферы связи:

- большая протяженность линий (тах длина оптической трассы без активного оборудования до 100 км);
- малые поперечные размеры оптических волокон;

— высокая стоимость материалов и работ по прокладке кабеля, усложняющих процесс исследования последнего в реальных условиях; приводят к необходимости предварительного численного моделирования [8, 31, 35], для изучения влияния различных факторов, таких как температура и деформация, на потери сигнала в волокне. В связи с этим, все больше авторов активно изучают оптическое волокно посредством моделирования [36, 37]. (Здесь и далее под численным моделированием физических процессов будем понимать построения и исследования математических моделей [38], изучение которых будет происходить с помощью пакетов для математического моделирования и/или систем компьютерной математики и специально разработанных программных продуктов).

Таким образом, можно сказать, что нерешенность некоторых задач, связанных с поведением сигнала на изгибе линии связи, возникающего, не только в результате действия внешней деформации, но и как результат влияния на оптическое волокно температуры, позволяет говорить о необходимости исследования данной области.

Целью исследования является построение модели одномодового оптического волокна (ООВ) и ее исследование под влиянием деформация изгиба и температурной деформации.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

1. Создание новой математической модели, описывающей распространение света в одномодовом оптическом волокне, подвергшемся механическим деформациям.
2. Разработка вычислительных алгоритмов, позволяющих рассчитать влияние указанных факторов на характеристики ООВ.
3. Проведение численных расчетов, подтверждающих адекватность предложенной модели.

Объектом исследования являются внешние факторы (деформация изгиба и температурная деформация), влияющие на параметры одномодового

оптического волокна, и их воздействие на качество передачи сигнала по волокну.

Предметом исследования выступают математические модели и вычислительные процедуры, описывающие изменения параметров одномодового оптического волокна под воздействием указанных факторов (деформация изгиба и температурной деформации).

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, в пунктах:

1. разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений;
4. реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента;
5. комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента;
8. разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

Методы исследования включали совокупность системного и комплексного подходов к теоретическому материалу исследуемой темы, математического моделирования, методы теории дифференциальных уравнений, численного дифференцирования, вычислительного эксперимента. При разработке вычислительных алгоритмов использовалась система компьютерной математики Mathcad, реализация вычислительных алгоритмов осуществлялась в виде программного комплекса.

Основные положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся следующие результаты, полученные впервые в настоящей работе.

- 1 Математическая модель деформации изгиба одномодового оптического волокна.

2 Алгоритмы расчетов приращений показателей преломления и показателей преломления в направлении координатных осей.

3 Программный комплекс для проведения расчетов параметров оптического волокна.

4 Параметры деформированного оптического волокна, полученные в результате математического моделирования.

Научная новизна работы.

В ходе исследований получены следующие результаты.

1 Построена новая математическая модель, описывающая процессы распространения света в деформированном (изогнутом) одномодовом оптическом волокне. В модели учтены все составляющие относительных деформаций и квадратичные составляющие координаты относительно центральной оси волокна, в отличие от классической теории, что приводит к потере полной картины, происходящей в оптическом волокне под действием деформации изгиба.

2 Разработаны вычислительные алгоритмы для расчетов влияния таких факторов, как изгиб и температурная деформация на оптическое волокно.

3 Создан программный комплекс, на основе которого проведены вычислительные расчеты при различных условиях использования волокна.

4 Уточнена зависимость длины оптического волокна от температуры.

5 В результате моделирования поведения сигнала в деформированном оптическом волокне обнаружено, что волокна при изгибе проявляют себя как оптически двухосная анизотропная среда. Найдены точки, в которых изогнутое оптическое волокно является оптически одноосным анизотропным «кристаллом».

6 Определено значение предельного угла изгиба, для которого потери сигнала будут отсутствовать, при любом радиусе изгиба.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в обосновании применимости уточненной модели деформации изгиба одномодового оптического волокна в связи с особенностью отрасли связи, дополнении

погрешности при измерении длины волокна в волоконно-оптической линии связи рефлектометрическими методами, определении начального угла изгиба волокна возникновения потерь сигнала.

Разработанные алгоритмы и их реализация в системе инженерной компьютерной математики и в виде программного комплекса на языке программирования C# (программа), XAML (интерфейс) можно использовать при исследовании более сложных моделей деформации оптического волокна при решении практических задач.

Результаты научного исследования позволяют оптимизировать конструкцию кабельных сборок, учитывая влияние изгиба и температурных деформаций, что снижает потери сигнала и повышает надежность системы; выбрать оптимальные материалы и конструктивные решения для обеспечения стабильной работы оптического волокна в заданных условиях эксплуатации; установить ограничения на радиус изгиба оптического волокна при монтаже, гарантирующие отсутствие потерь сигнала, что внедрено и используется при планировании и проектировании телекоммуникационных систем связи, разрабатываемых в АО «Хабаровский завод промышленного и гражданского домостроения» (акт внедрения результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук № 172 от 31.03.2025).

Помимо этого, результаты проведенного исследования будут полезны при реализации образовательных программ в рамках технологии проектирования и разработки программного обеспечения и математического моделирования.

Публикации и личный вклад автора

По результатам диссертационной работы лично автором и в соавторстве опубликовано 16 работ [5, 8, 29-31, 39-46, 48, 49, 134], 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [47, 50]. Общий объем публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК, составляет 3,2 п. л., из которых 2,7 п. л. принадлежит лично соискателю.

Получение основных теоретических и экспериментальных результатов, их обработка, анализ и интерпретация проведены автором лично, либо при его определяющем участии.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 127 страниц, включая 51 рисунок, 8 таблиц, 3 приложения. Список литературы содержит 134 наименования.

Основное содержание работы

Введение содержит: актуальность исследуемой темы, научную и практическую значимость работы, цели и основные задачи диссертационного исследования, методы исследования, краткое изложение основного содержания работы. В данном разделе сформулированы ключевые положения, предлагаемые к защите.

В первой главе проведен анализ литературы. Рассмотрены составляющие сигнала, проходящего по оптическому волокну.

Предложена классификация основных факторов, оказывающих серьезные влияния на параметры оптических волокон, которые, в свою очередь, способствуют возникновению потерь сигнала. Они разделяются на две группы. К первой группе (статических факторов) относятся такие физические воздействия на волокно как: деформация растяжения и сжатия, деформация изгиба и кручения. Вторая группа (динамические факторы) охватывает внешние воздействия и условия эксплуатации волоконно-оптических линий связи. К ним относятся разнообразные природные и техногенные факторы: электромагнитные помехи, радиационное воздействие, температурные флуктуации, механические вибрации, гидродинамическая турбулентность, снегопады и гололёд, приводящие к изменению геометрических характеристик волокон и ухудшению качества сигнала.

Вторая глава посвящена теоретическим исследованиям деформации изгиба. Представлено влияние подобного вида деформации на параметры волокна, и как результат, потери, возникающие при передаче светового сигнала, по нему. Разработана уточненная модель, учитывающая специфику деформации изгиба сердцевины и оболочки оптического волокна.

Представлены алгоритм и методика для вычисления составляющих показателя преломления одномодового оптического волокна с помощью системы компьютерной инженерной математики Mathcad и с помощью разработанного программного комплекса. Показаны изменения значений показателей преломления в зависимости от координаты x .

Выполнен расчёт расположения оптических осей сердцевины изогнутого волокна относительно заданной координаты x . Определена их форма поведения в пространстве.

Найден вид разности показателей преломления для двух ортогональных поляризаций n_x, n_y .

Показано существенное влияние изгиба волокна на электродинамику.

В третьей главе исследуется влияние деформационного изменения показателя преломления на параметры ООВ и распространение света внутри сердечника оптического волокна.

Рассматривается влияние относительного изменения показателя преломления сердечника волокна на погрешность измерения длины оптического волокна. Предлагается уточнение для измерения длины волокна, зависимое от температуры, вызывающей температурное деформирование волокна. Получено численное значение относительного изменения показателя преломления сердцевины оптического волокна, обусловленное изгибом вследствие теплового расширения.

Определён максимальный допустимый угол изгиба, при котором отсутствие потерь гарантировано вне зависимости от величины радиуса изгиба, при условии, что деформация волокна остаётся в пределах упругой (линей-

ной) зоны. Расчеты значений проведены с помощью компьютерного пакета системы компьютерной математики Mathcad.

В четвертой главе приводится подробное описание алгоритма, структуры и назначения, реализованного программного комплекса; представлен процесс создания комплекса; предлагается основная схема его функционирования; кратко описан процесс тестирования комплекса, а также рассмотрены этапы создания трехмерной модели визуализации изгиба волокна.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

В приложениях А, Б и В представлены охранные документы на результат интеллектуальной деятельности, основной интерфейс программы и акт о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертационной работы соответственно.

Апробация работы.

Работа над диссертацией велась более 15 лет. Основные результаты докладывались на всероссийских и международных научных конференциях с 2009 по 2025 года, перечень которых приведён ниже.

- 1 Международной научно-практической конференции «Современные проблемы гуманитарных и естественных наук», Москва.
- 2 XVI международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва.
- 3 XVI всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых, Екатеринбург.
- 4 Научно-практической конференции ТОГУ-Старт: фундаментальные и прикладные исследования молодых, Хабаровск.
- 5 Всероссийской научно-практической студенческой конференции «Математические модели техники, технологий и экономики», Санкт-Петербург.

6 II Всероссийской (национальной) научной конференции с международным участием «Российская наука, инновации, образование», Красноярск.

7 III Международной научно-практической конференции «Актуальные аспекты научных исследований», Москва.

8 Национальной научной конференции «Far East Math», Хабаровск.

9 XXII всероссийской научной конференции «ФИЗИКА: фундаментальные и прикладные исследования, образование» и The IVth International School and Workshop on Few-Body Systems, Хабаровск.

10 IV Международная научная конференция «Вычислительные технологии и прикладная математика», Владивосток.

11 VII, VIII Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления», Хабаровск.

ГЛАВА 1 ПАРАМЕТРЫ ОДНОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

1.1 Ортогональные моды, возникающие в одномодовых оптических волокнах

Исследования оптических волноводов в мире ведется более 80 лет. Так, например, в Японии первые патенты, связанные со стеклянными волноводами, датируются 30-ми годами прошлого столетия [32]. В СССР подобные исследования начались значительно позже, только в конце 50-х годов прошлого века.

Современное оптическое волокно состоит как минимум из двух компонентов: сердечника (core), по которому распространяется свет и оболочки (cladding) (рисунок 1.1) [14, 15, 32].

Оболочка волокна, заключена в оплетку [51], которая защищает поверхность волокна, повышает его прочность и тем самым упрощает эксплуатацию. Коэффициент преломления n сердечника лишь незначительно (в пределах 1%) превышает коэффициент преломления оболочки $n_{об}$, поэтому свет, введенный в сердечник с торца волокна, полностью отражается от границы сердечника и оболочки, как бы запирается в сердечнике и распространяется только в нем.

Оптические лучи внутри волокна распространяются, многократно испытывая полное отражение (направление распространения излучения на рисунке 1.1. показано стрелками). Но распространение этих лучей возможно лишь в том случае, когда они проходят под определенными углами. Подобное распространение луча характеризуется модой, которая определяется типом распределения электромагнитного поля [52].

В общем случае понятие мода, связанное с процессом распространения электромагнитных волн в среде, объясняется с математической и физической точек зрения [53].

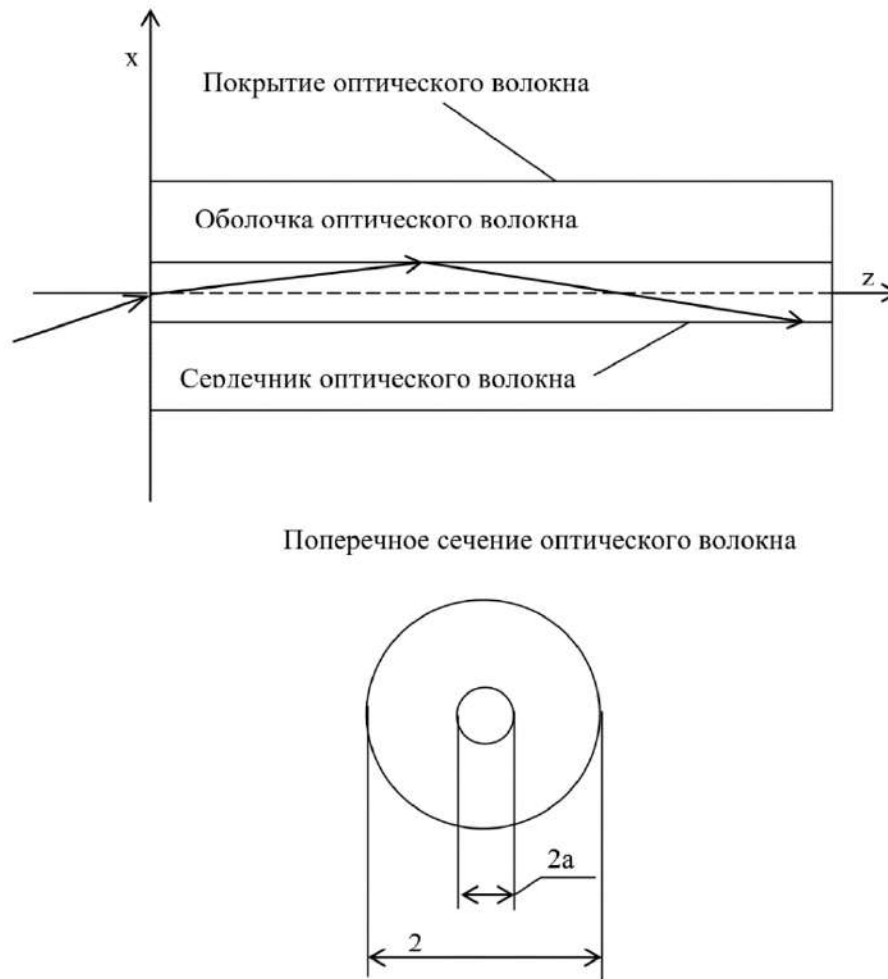


Рисунок 1.1 – Типовая структура оптического волокна (продольный и поперечный разрезы) и распространение света в нем.

В своей математической формулировке модовая теория рассматривается в рамках классической волноводной теории излучения [14, 15, 54]. Любая волна, которая распространяется вдоль волокон, должна удовлетворять уравнениям Максвелла [32, 54], который первым получил математическое выражение для соотношения между электрическим и магнитным полями. Поэтому мода есть возможное решение уравнений Максвелла, подробно рассмотренное в достаточно большом количестве источников.

Физическое понятие мода разбивается на два основных момента [14, 15, 32]. С одной стороны – это тип распределения передаваемого электромагнитного поля, возбуждающееся в сложных колебательных системах, которое характеризуется пространственной конфигурацией колеблющейся

системы, определяемой положением ее узловых точек (линий или поверхностей), а также собственной частотой. С другой стороны, это вид траектории, вдоль которой может распространяться свет.

Согласно источникам [14, 15, 32] распространение оптических лучей в волноводе происходит следующим образом. Распространяющаяся световая волна является горизонтально поляризованной и имеет относительно оси волновода наклон φ . Волновой фронт перпендикулярен направлению света. Горизонтально поляризованная волна в вакууме имеет длину λ . В сердечнике с коэффициентом преломления n длина волны уменьшается до λ/n , а постоянная распространения волны kn ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число), наоборот, увеличивается. Постоянная распространения вдоль оси выражается формулой:

$$\beta = kn \cos \varphi \quad (1.1)$$

В центральной части сердечника интенсивность электрического поля увеличивается и достигает максимума вследствие сложения положительных (или отрицательных) фазовых фронтов световых лучей. И, наоборот, вблизи границы сердечник-оболочка положительный и отрицательные фазовые фронты взаимно компенсируются, и электрическое поле стремится к нулю. При таких условиях распределение электрического поля света вдоль вертикальной оси представляет собой стоячую волну [14, 32, 52]. Это распределение многократно повторяется вдоль горизонтальной оси с периодом $T = \frac{2\pi}{\beta}$.

При описании характеристик волокна одним из важных параметров является нормированная частота. По ее значению судят о том, насколько много мод может распространяться в волокне. Нормированная частота обозначается v и вычисляется по следующей формуле [55]:

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} N = \frac{2\pi}{\lambda} a n \sqrt{2\Delta} \quad (1.2)$$

где $\Delta = \frac{n^2 - n_{o\bar{o}}^2}{2n^2} \approx \frac{n - n_{o\bar{o}}}{n_{o\bar{o}}}$ – относительная разность показателей преломления сердечника волокна n и его оболочки $n_{o\bar{o}}$.

Для ООВ со ступенчатым изменением показателей преломления значение $v = v_c = 2,405$ является граничным (v_c – нормированная частота среза), то есть если действительное значение v волокна хотя бы немного меньше, распространяется одна мода, а если больше – распространяется множество мод. Величина v_c определяет условие существования в волокне одной моды, или условие границы среза мод более высоких порядков [15, 32, 55, 56].

Величина λ_c называется длиной волны среза. Оптические волокна в области с длиной волны, большей λ_c , работают в одномодовом режиме [32, 56].

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{v_c} a n \sqrt{2\Delta} \quad (1.3)$$

Представления видов существующих мод в волоконном световоде, вытекает из решения уравнений Максвелла, которые подробно рассмотрены в литературе [14, 15, 32, 54].

Основной моде волновода соответствуют наименьшие значения индексов мод $v = 0$ и $m = 1$. Такой тип колебаний возможен при любых (исключая $a = 0$) размерах сердцевин волновода. При $v = 0$ распределение амплитуды поля моды в сечении волновода радиально-симметрично (здесь нет зависимости амплитуды поля от азимута ϕ) и проекции векторов электрического и магнитного полей на ось Z для этой моды равны нулю. Эти моды называют поперечными электрическими (тип TE_{vm} при $E_z = 0$) либо поперечными магнитными (тип TM_{vm} , при $H_z = 0$). Основная мода ассоциируется с лучом света, распространяющимся строго вдоль оси волновода, обозначается символом HE_{11} . Картины векторов электрического поля в поперечном сечении сердцевин волновода показаны на рисунке 1.2 [32, 56].

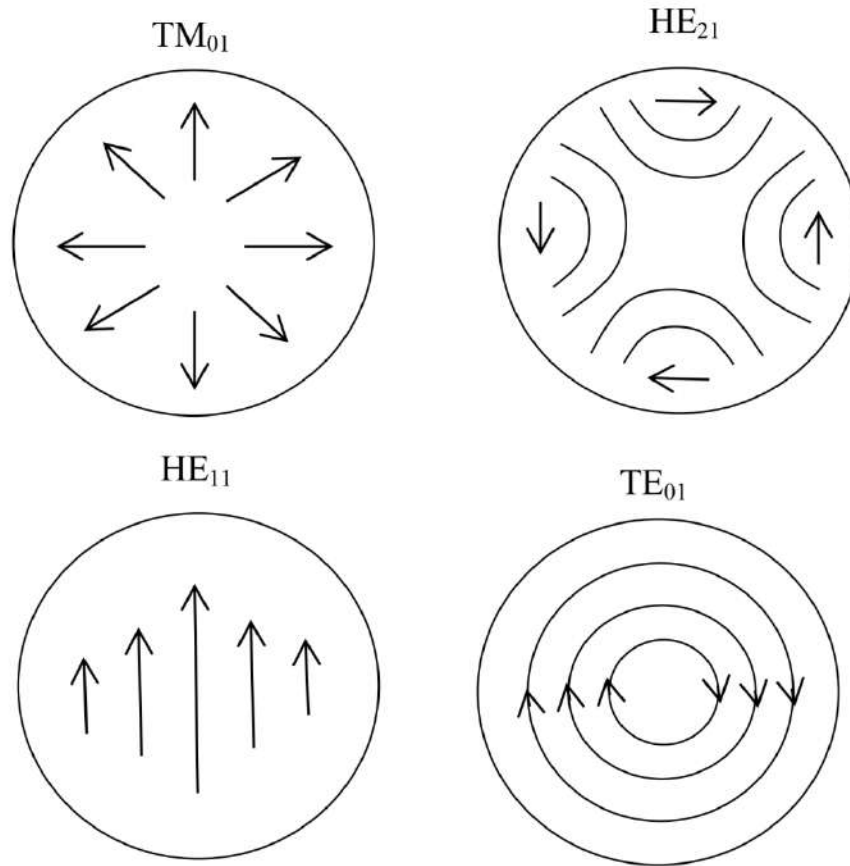


Рисунок 1.2 – Распределение силовых линий и векторов электрического поля в поперечном сечении волновода для мод низших порядков.

При сравнительно больших значениях v – параметра в волноводе могут распространяться несколько волноводных мод с разными величинами постоянных распространения. Можно показать, что общее число M мод в волноводе вычисляется по формуле (при условии $(n_1 - n_2) \ll n_1$) [32, 56]

$$M = \frac{v^2}{2} \quad (1.4)$$

В этой формуле учтены два ортогональных состояния поляризации каждой из мод [14, 32, 56].

В источниках [15, 32, 57] говорится, что в одномодовом оптическом волокне симметричной относительно оси формы (см. рисунок 1.1) практически существует две отдельные моды с поляризацией по двум ортогональным направлениям в плоскости поперечного сечения волокна [57]. Моды в этих

направлениях поляризации обозначаются HE_{11}^x и HE_{11}^y (рисунок 1.2) [36]. Однако необходимо отметить, что в одномодовом ОВ практически существует лишь одна мода, рассмотрение которой ведется с позиции двух ортогональных составляющих [33-35, 37, 38].

1.2 Двулучепреломление в оптическом волокне

При идеальных условиях совершенной цилиндрической геометрии и изотропии вещества, мода, которая возбуждена с поляризацией в направлении X , не будет возбуждать ортогональную y -поляризованную моду. Однако в реальных условиях малые отклонения от цилиндрической геометрии, вследствие эллиптичности и эксцентриситета сечения сердечника, или малые флуктуации в анизотропии вещества приводят к смешиванию двух поляризационных состояний, снимая вырождение мод [57].

В условиях реальной эксплуатации оптического волокна, при воздействии на него внешних факторов возникают преобразования одной моды HE_{11}^x в другую HE_{11}^y , что вызывает изменения состояния поляризации распространяющегося света [57, 58].

Постоянные распространения β становятся несколько различными для мод, поляризованных в x - и y -направлениях. Это свойство называется двулучепреломлением мод. Степень модового двулучепреломления, в различных источниках [33, 56, 57] определяется как

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{k_0} = |n_x - n_y|, \quad (1.5)$$

где n_x и n_y – эффективные показатели преломления мод в двух ортогональных поляризационных состояниях [57].

В обычных одномодовых волоконных световодах величина B не постоянна вдоль световода, а изменяется случайным образом из-за флуктуации в

форме сердцевины и анизотропии, вызываемой статическими напряжениями. Поэтому линейно-поляризованный свет, вводимый в волоконный световод, быстро теряет первоначальное состояние поляризации [57].

1.3 Поляризация излучения и природа ее возникновения в оптических волокнах

Как известно, только поперечные волны обладают изначальным, свойством – поляризация волн [37, 38, 54]. По отношению к световым волнам применяется термин «поляризация света». Под этим понимается пространственное соотношение между направлением распространения светового луча и направлением его электрического (или магнитного) вектора [57, 61, 62].

Экспериментально впервые обнаружил явление, в котором проявляется поляризация света – двойное преломление в кристаллах [14, 54], Э. Бартолин в 1669 году. Теоретическое представление этого нового явления принадлежит Х. Гюйгенсу (1690 год). А уже понятие «поляризация света» в оптику введено И. Ньютоном в 1704 году.

Поляризация света, как физическое понятие введено в 1808 году Э. Малюсом [14, 15, 54, 56]. Помимо него исследования эффектов, в основе которых лежит поляризация света связано с именами Ж. Био, О. Френеля, Д. Араго, Д. Брюстера и др.

Существенное значение для понимания поляризации света имело ее проявление в эффекте интерференции света, изучаемой О. Френелем, Д. Араго и Т. Юнгом [54]. Именно тот факт, что два световых луча, линейно поляризованных под прямым углом друг к другу, при простейшей постановке опыта не интерферируют, явился решающим доказательством поперечности световых волн. Поляризация света нашла естественное объяснение в электромагнитной теории света Дж. К. Максвелла (1865-1873 гг.).

Естественный свет есть совокупность световых волн со всевозможными направлениями колебания вектора $\vec{E}$, перпендикулярными к лучу света, быстро и беспорядочно сменяющими друг друга [54, 63].

Свет, направление колебаний в котором упорядочены каким-либо образом, называют поляризованным.

Поляризация – это характеристика поведения одного из ортогональных (плоскости которых всегда взаимно перпендикулярны) векторов E (напряженности электрического поля электромагнитной волны) или H (напряженности магнитного поля электромагнитной волны) [57, 58].

При линейной поляризации вектор E (рисунок 1.3) распространяется вдоль оси Z (направления распространения), находясь строго в плоскости XOZ . P – плоскость поляризации световой волны в оптическом волноводе [64-67].

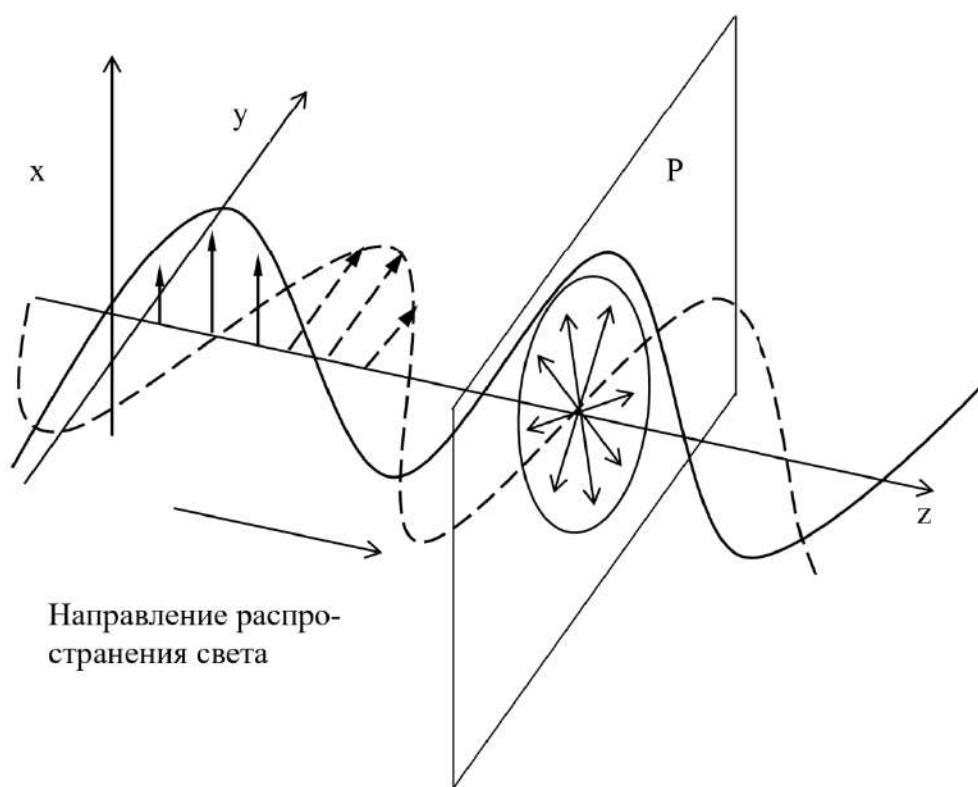


Рисунок 1.3 – Состояние поляризации световой волны.

При круговой поляризации $\vec{E}$, распространяясь вдоль оси Z вращается также и вокруг этой же оси, не изменяясь по величине [68-70]. При эллипти-

ческой поляризации $\vec{E}$ распространяясь вдоль оси Z , вращается вокруг нее и постоянно меняет свое значение по определенному закону [68, 69]. Колебания вектора напряженности магнитного поля электромагнитной волны происходят перпендикулярно вектору напряженности электрического поля волны при любом типе поляризации [67].

Наиболее общим является эллиптическая поляризация, при этом линейная и круговая поляризации являются частными случаями эллиптической.

1.4 Факторы, воздействующие на передачу сигнала

В одномодовом оптоволокне

Векторные характеристики (поляризация) оптического излучения необходимо учитывать при построении систем когерентной оптической связи, нелинейно-оптических систем и при создании различных измерительных волоконно-оптических устройств [32, 56].

Реальные оптические волокна могут иметь нарушение круговой симметрии, вследствие которой, происходит возникновение анизотропии в волокне. При этом, учитывая, что энергия излучения распределена между состояниями поляризации, различие констант распространения вызывает уширение длительности импульса на выходе из оптического волокна [5].

Анизотропия (двулучепреломление) оптического волокна может быть связано с нарушением идеальной круговой формы сердцевины (см. рисунок 1.4) [71-72] Или с наведенным двулучепреломлением вещества, например, из-за несимметричных напряжений в материале [72] волокна. Такие напряжения могут иметь как внешний, так и внутренний характер, за счет различных видов деформации (см. рисунок 1.4) или из-за несовпадения геометрических центров сердцевины и оболочки [73].

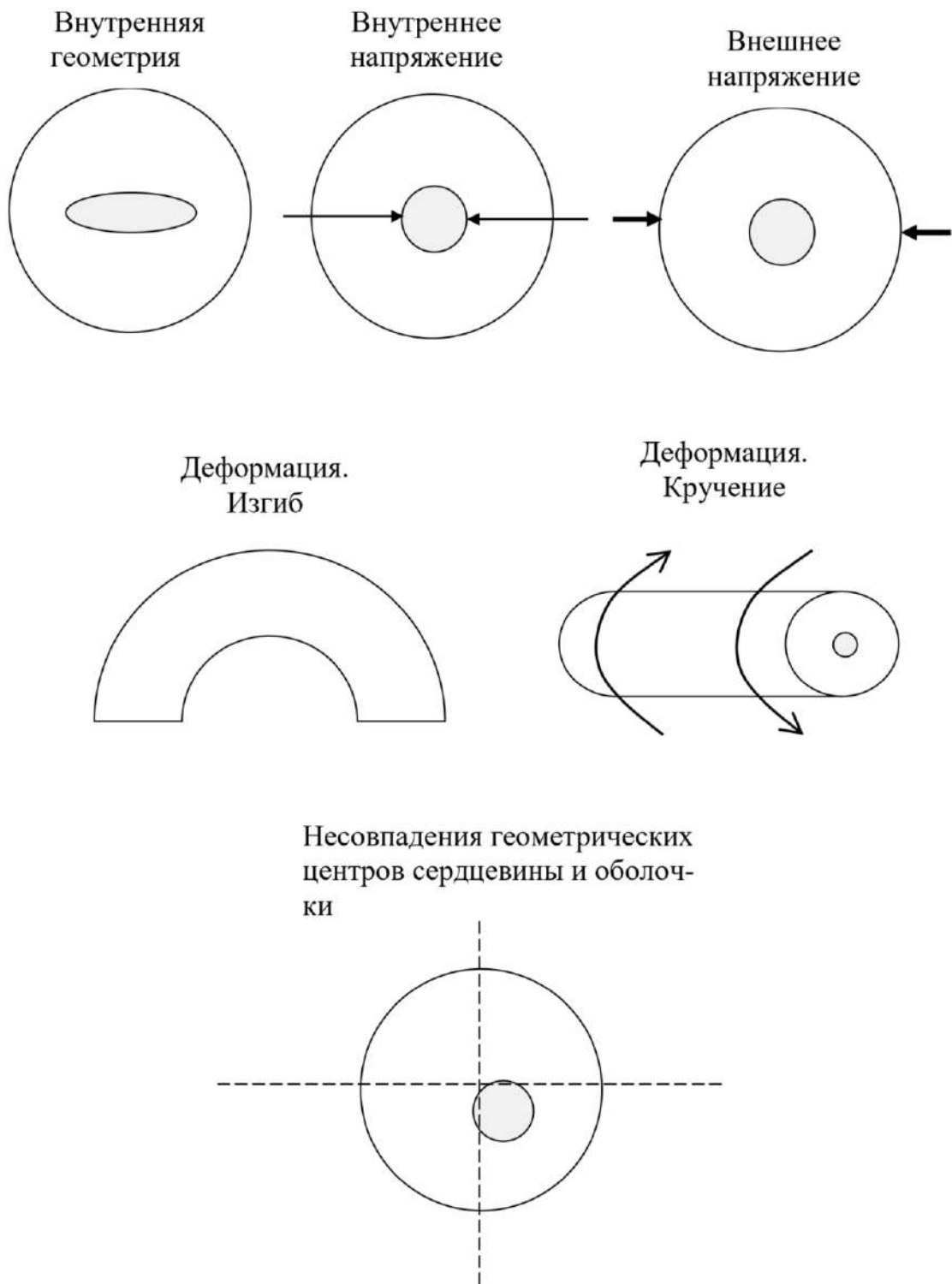


Рисунок 1.4 – Основные причины появления анизотропии волокна.

Потеря круговой симметрии может быть вызвана появлением случайных неоднородностей, возникающих в процессе изготовления волокна из заготовок [14, 22, 74, 75] и приводит к появлению анизотропии, при этом, в оп-

тическом волокне распространяются две ортогонально поляризованные моды с различными фазовыми и групповыми скоростями.

Авторы источников [15, 32, 75] разделяют факторы роста анизотропии профиля волокна на две группы: статические и динамические (рисунок 1.5).

1 Статические факторы обусловлены несовершенством заводского процесса изготовления ОВ и ВОК волокон [18, 21, 33] и монтажа волоконно-оптических кабелей. К ним относятся:

- неравномерности внутреннего строения волокон, возникшие на стадии изготовления [14, 32];
- скрученность волокон, возникающая на заключительном этапе сборки кабеля [34, 76];
- механические деформации, появляющиеся при укладке кабеля в траншеи или подвешивании на опоры [11, 77].

2 Динамические факторы, вызванные изменениями внешних условий окружающей среды, включают:

- колебания магнитных и электрических полей вокруг кабеля [11, 77];
- воздействия солнечного и иного излучения [51];
- температурные изменения грунта (для подземных кабелей) [13, 18, 21];
- механические воздействия ветра, температура окружающего пространства и последствия оледенения кабеля (для воздушных линий) [25, 36].



Рисунок 1.5 – Факторы роста анизотропии волокна.

Рассмотрим каждый из представленных факторов в отдельности.

Первый фактор возникновения поляризационных явлений может быть произвольным, поэтому просчитать возникающие при изготовлении несим-

метричность заготовок и неоднородность материала достаточно сложно. Уменьшение этих факторов возможно лишь при применении более совершенных технологий и сырья для изготовления оптического волокна.

Одним из наиболее интересных факторов является влияния деформации на параметры оптического волокна. Это связано с возможностью предсказания поведения поляризации на изгибе (деформация изгиба) волокна и ее компенсации [6, 10, 13, 32].

1.4.1. Деформация растяжения и сжатия

В различных элементах конструкций волоконно-оптического кабеля возникают только продольные усилия, которые вызывают в них деформацию растяжения или сжатия [78].

Волокно в общем виде можно представить в качестве стержня цилиндрической формы [79].

В простейшем случае растянутый или сжатый стержень – это стержень с силами, приложенными к его концам и направленными вдоль его оси (рисунок 1.6) [78, 80].

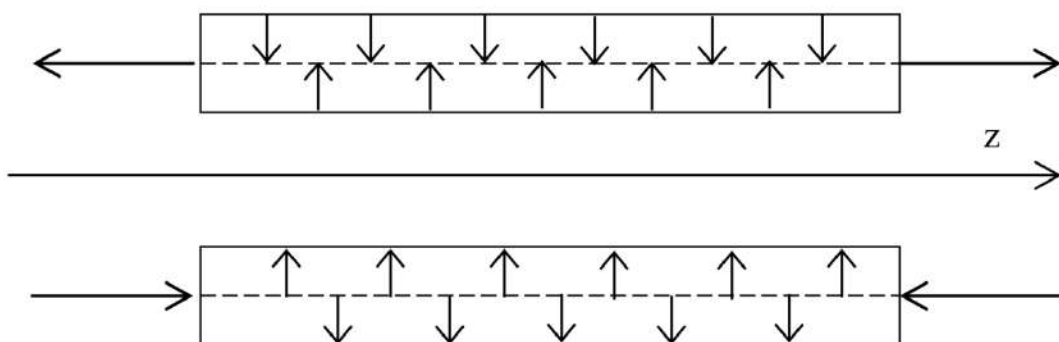


Рисунок 1.6 – Деформация растяжения и сжатия волокна.

Согласно некоторым источникам [78-81], если растягивающие силы достаточно точно совпадают с осью стержня, то удлинения прямых линий, проведенных на поверхности стержня параллельно его оси, будут одинаковы.

Лишь у концов стержня, там, где происходит непосредственная передача сил на стержень, растяжение распределяется неравномерно между отдельными участками сечения. Участки, к которым непосредственно приложена сила P , перегружаются, но уже на небольшом расстоянии от концов работа материала выравнивается, и наступает равномерное распределение напряжений по сечению, перпендикулярному к оси.

Эти напряжения направлены параллельно силе P , то есть нормально к сечению; поэтому их называют нормальными напряжениями и обозначают σ [82] Согласно [78-81] $N = \sigma F$ и $N = P$ отсюда

$$\sigma = \frac{P}{F}. \quad (1.6)$$

В реальных условиях, при действии продольных сил стержень деформируется. Если стержень растянут, то длина его увеличивается и становится равной $l + \Delta l$, где Δl – это абсолютная продольная деформация (удлинение) стержня от силы P . Поперечные размеры его уменьшаются и принимают значения $b - \Delta b$, где Δb – это абсолютные поперечные деформации стержня.

Как известно, отношение абсолютной продольной деформации стержня к его первоначальной длине есть относительная продольная деформация.

$$\varepsilon_{\text{прод}} = \varepsilon_z = \frac{\Delta l}{l} \quad (1.7)$$

Стержни, работающие на растяжение или сжатие, испытывают помимо продольных деформаций, еще и поперечные [78-81]. Отношение абсолютной поперечной деформации стержня к его первоначальному поперечному размеру называется относительной поперечной деформацией.

$$\varepsilon_{\text{попер}} = \varepsilon_x = \varepsilon_y = -\frac{\Delta b}{b} \quad (1.8)$$

Здесь знак «+» у деформации вдоль оси Z и знак «-» у деформаций ε_x и ε_y поставлены потому, что при растяжении продольные размеры стержня увеличиваются, а поперечные размеры уменьшаются. Для изотропных материалов поперечные деформации равны между собой $\varepsilon_x = \varepsilon_y$ [78-81].

Анализ опытных данных приводит к заключению, что пока нагрузка на исследуемый образец не достигла известного предела, удлинение прямо пропорционально растягивающей силе P , длине образца l и обратно пропорционально площади поперечного сечения F . Обозначая через Δl приращение длины образца от силы P , можно записать закон Гука [78-81], связывающий между собой опытные данные:

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF} \quad (1.9)$$

где E – коэффициент пропорциональности, различный для разных материалов.

Зависимость (1.9) можно представить в ином виде. Разделив обе части этой формулы на первоначальную длину стержня l и подставив (1.7), получаем:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \text{ или } \sigma = \varepsilon E. \quad (1.10)$$

Нормальное напряжение при растяжении или сжатии прямо пропорционально относительному удлинению или укорочению стержня.

Абсолютная величина отношения относительной поперечной деформации ε_x и ε_y к относительной продольной ε_z называется коэффициентом поперечной деформации или коэффициентом Пуассона μ :

$$\mu = \frac{\varepsilon_{\text{прод}}}{\varepsilon_{\text{попер}}}. \quad (1.11)$$

Коэффициент поперечной деформации μ , так же, как и модуль упругости E , является одной из характеристик упругих свойств материала [78-81]. В различных источниках указывается значение коэффициента поперечной деформации для стекла равное 0,25 [32].

Таким образом, для изотропного материала, каким является ОВ при растяжении (сжатии) деформация в направлении оси Z и деформации вдоль осей X и Y на основании формулы закона Гука (1.11) при условии (1.10) равны [78-81]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= -\mu\varepsilon_z = -\mu\frac{\sigma_z}{E}, \\ \varepsilon_y &= -\mu\varepsilon_z = -\mu\frac{\sigma_z}{E}, \\ \varepsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E}.\end{aligned}\tag{1.12}$$

В общем случае зависимости между деформациями и напряжениями при центральном растяжении стержня из изотропного материала выглядят следующим образом [14, 32, 78].

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)], \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)].\end{aligned}\tag{1.13}$$

Зависимости (1.13) являются аналитическим выражением обобщенного закона Гука для изотропного тела. В выражения (1.13) растягивающие напряжения подставляются со знаком плюс, а сжимающие – со знаком минус.

1.4.2 Деформация изгиба

Рассмотрим изменение показателей преломления при изгибе волокна (рисунок 1.7) [32].

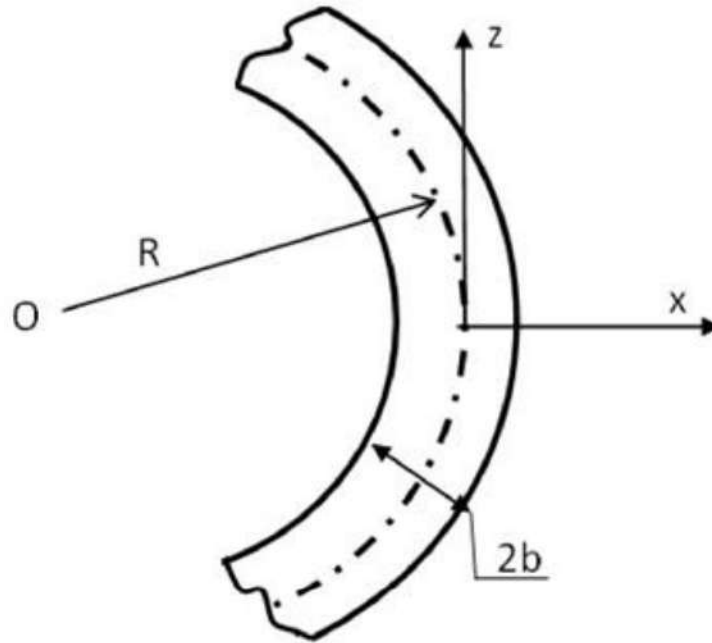


Рисунок 1.7 – Деформация изгиба оптического волокна.

Диаметр оболочки оптического волокна равен $2b$, радиус его изгиба R . Согласно [32] Механические напряжения внутри изогнутого волокна определяются следующими соотношениями. При этом изменения учитываются исключительно по оси X , поскольку при изгибе волокна значения по оси Y остаются неизменными в пределах сердцевины волокна.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{2R^2}(x^2 - b^2), \\ \sigma_y &= 0, \\ \sigma_z &= \frac{E}{R}x,\end{aligned}\tag{1.14}$$

где E – модуль Юнга,

b – радиус ополоски волокна;

R – радиус изгиба волокна;

x – координата по оси X относительно центральной оси волокна.

Подставив выражения (1.11) и (1.12) в (1.13), получаем формулы для вычисления составляющих относительных деформаций в изогнутом волокне:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{2R^2}(x^2 - b^2) - \frac{\mu}{R}x \\ \varepsilon_y &= -\mu \left[\frac{1}{2R^2}(x^2 - b^2) + \frac{1}{R}x \right] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{R}x - \frac{1}{2} \frac{\mu}{R^2}(x^2 - b^2) \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

С другой стороны, некоторые авторы [15, 32, 82, 83] утверждают, так как $|x| \ll b$, то значениями x^2 можно пренебречь и формула (1.15) примет вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= -\frac{1}{2R^2}b^2 - \frac{\mu}{R}x, \\ \varepsilon_y &= \mu \left(\frac{b^2}{2R^2} - \frac{x}{R} \right), \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{R}x + \frac{1}{2} \frac{\mu}{R^2}b^2. \end{aligned} \quad (1.16)$$

Данное утверждение не является верным, так как происходит потеря данных или их изменение при моделировании, в ходе вычислительных экспериментов и/или измерений, проводимых как на оптическом волокне, так и с помощью измерителей чувствительным элементом которых является тоже оптическое волокно.

1.4.3 Деформация кручения

В источниках [84-86] кручением называется такой вид деформации, при котором в поперечном сечении стержня возникает лишь один силовой фактор – крутящий момент M_z . Он равен сумме моментов внутренних сил относительно продольной оси стержня [67, 68].

Рассмотрим цилиндрический стержень (рисунок 1.8), боковые поверхности которого свободны от нагрузок [69].

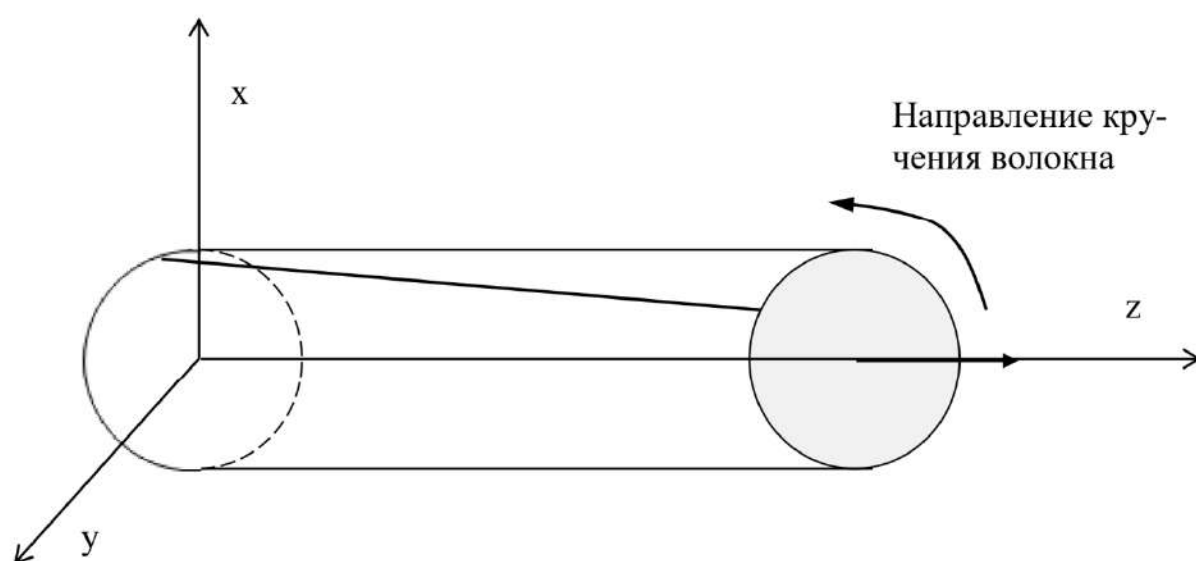


Рисунок 1.8 – Деформация кручения стержня.

На боковой поверхности силы не действуют: $\vec{\sigma}_n = 0$ вектор напряжений равен нулю [78-80].

Таким образом, можно воспользоваться уравнениями равновесия упругой среды при отсутствии массовых сил (1.17).

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} &= 0, \\
\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} &= 0, \\
\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= 0.
\end{aligned} \tag{1.17}$$

Уравнения (1.17) необходимо решить с однородными (вектор напряжений равен нулю) граничными условиями на боковой поверхности, где вектор нормали $\vec{n} = (0; n_y; n_z)$

$$\begin{aligned}
\sigma_{xy}n_y + \sigma_{xz}n_z &= 0, \\
\sigma_{yy}n_y + \sigma_{yz}n_z &= 0, \\
\sigma_{zy}n_y + \sigma_{zz}n_z &= 0.
\end{aligned} \tag{1.18}$$

Согласно [79] нормальные сечения стержня остаются плоскими и лишь поворачиваются на угол пропорциональный расстоянию между ними

$$\begin{aligned}
u_x &= 0, \\
u_y &= -\alpha x z, \\
u_z &= \alpha x y.
\end{aligned} \tag{1.19}$$

Отличные от нуля деформации будут равны:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xz} &= \frac{1}{2} \alpha y, \\
\varepsilon_{xy} &= -\frac{1}{2} \alpha z.
\end{aligned} \tag{1.20}$$

Отличные от нуля напряжения будут выражаться:

$$\begin{aligned}\sigma_{xz} &= \sigma_{zx} = G\alpha y, \\ \sigma_{xy} &= \sigma_{yx} = -G\alpha z.\end{aligned}\tag{1.21}$$

Напряжения тождественно удовлетворяют уравнениям равновесия (1.19) и последним двум граничным условиям (1.20), а их подстановка в первое условие (1.18) дает соотношение, представленное ниже.

$$\begin{aligned}-G\alpha z_0 n_y + G\alpha y_0 n_z &= 0 \text{ или} \\ n_z y_0 &= n_y z_0 \Rightarrow n_z : n_y = z_0 : y_0,\end{aligned}\tag{1.22}$$

где (y_0, z_0) – произвольная точка боковой поверхности цилиндра.

Из представленного обзора следует, что оптическое волокно испытывает различные виды деформаций под воздействием внешних факторов: спиральная укладка в кабель, поворот [80], изгиб, растяжение или сжатие. Каждое из указанных воздействий неизбежно провоцирует появление поляризационных эффектов в волокне. Учитывая недостаточную изученность и проработанность данных механизмов, существует необходимость в дальнейшем более детальном исследовании данного вопроса.

1.4.4 Возникновение оптической анизотропии при деформации

Большая часть оптически изотропных сред демонстрирует лишь условную, «статистическую» изотропию. Наблюдаемая равномерность возникает благодаря усреднению случайных направлений колебаний молекул. Частицы или их группы могут проявлять анизотропию, однако на макроуровне она компенсируется хаотичностью взаиморасположения и проявляется как полная изотропия [75].

Внешнее направленное воздействие способно вызвать перераспределение анизотропных структур, формируя ярко выраженную макроскопическую анизотропию. Следовательно, механические напряжения вызывают измене-

ние показателя преломления вещества, приводящее к эффекту двулучепреломления [87-88]. Первым эффект фотоупругости (двулучепреломление при механических деформациях) открыл Зеебек в начале XIX века (1813 год). Детально описал Брюстер в 1815 году [89].

Аналогичные изменения происходят в различных прозрачных материалах, таких как жидкости, пластмассы и стекло, под воздействием ряда внешних факторов (см. таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Факторы, влияющие на возникновение двойного лучепреломления.

Фактор	Результат воздействия фактора
1	2
Механическое напряжение	Создаются внутренние деформации в материале [78-81]
Электрическое поле	Вызывает смещение зарядов и изменение показателей преломления [6, 22-24].
Мощные лазерные импульсы	Временно изменяют структуру материала и вызывают нелинейные оптические эффекты [91-93].
Термические нагрузки (нагрев или охлаждение)	Приводят к локальному изменению плотности и, соответственно, показателя преломления [12, 16, 18, 21, 25].
Электрооптические эффекты, включая эффект Поккельса и эффект Керра	Приводят к изменению прозрачности материала под действием сильного электрического поля [6].
Магнитные поля	Вызывают изменение поляризации света при прохождении через вещество (эффект Фарадея) [22, 23].

Перпендикулярное попадание светового луча на поверхность кристалла, ведет к расщеплению луча на две части (два луча). При этом один луч – идет без преломления, как в изотропной среде, другой луч претерпевает отклонение в сторону, при этом происходит нарушение закона преломления света. Лучи первого вида, идущего без преломления, получили название обыкновенных, а второго – необыкновенных.

При воздействии односторонних нагрузок, таких как растяжение или сжатие в определенном направлении [14, 32], данное направление выделяется и приобретает статус оптической оси. Подобное состояние аналогично поведению одноосного кристалла, где деформированная среда распространения

проявляет анизотропию оптических свойств [56, 57]. При этом показатели преломления обыкновенного луча (движущегося перпендикулярно выделенному направлению) и необыкновенного луча (движущегося параллельно выделенному направлению) максимально отличаются.

Разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей, которая характеризует анизотропию, пропорциональна величине силы, приложенной на единицу площади (выражение 1.23) или значению механического напряжения (выражение 1.24).

$$n_o - n_e = \chi P, \quad (1.23)$$

$$P = \frac{F}{S} = \frac{F}{lh}, \quad (1.24)$$

где n_o – показатель преломления для обыкновенного луча;

n_e – показатель преломления для необыкновенного луча;

P – механическое напряжение;

χ – коэффициент пропорциональности или упругооптическая постоянная, (для стекол 10^{-12} – 10^{-11} м²/Н);

F – сила, действующая на площадь;

S – площадь приложения силы.

При прохождении вещества разность хода этих лучей составляет

$$\delta = l(n_o - n_e) = \chi Pl. \quad (1.25)$$

Выразим разность хода лучей в длинах волн

$$\delta_1 = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{\chi}{\lambda} Pl = CPl, \quad (1.26)$$

где C — величина, которая характеризует вещество.

Разница в значениях показателей преломления может варьироваться как положительно, так и отрицательно, что определяется свойствами исполь-

зуемого вещества. Оба показателя преломления подвержены влиянию длины световых волн, вследствие чего искусственно созданные анизотропные объекты приобретают характерное цветовое разнообразие при наблюдении через пересекающиеся поляроиды в условиях белого освещения [32, 56].

Измерение искусственной анизотропии является высокоэффективным методом обнаружения скрытых механических нагрузок внутри прозрачных материалов. Этот прием активно используется специалистами для контроля качества стекла – особенно изделий, полученных путем пайки или литья, когда нарушение температурного режима остывания вызывает внутренние дефекты структуры [14, 32, 56].

Авторы научной публикации [32] детально изучили взаимосвязь изменений фазы света с уровнем деформации оптоволокна. Изменение показателя преломления вещества, из которого состоит сердцевина волокна, описано формулой:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_{\rho} \Delta T + \frac{\delta n}{n}, \quad (1.27)$$

Первая часть выражения (1.29) говорит об изменении плотности материала волокна (подробные значения приведены в источниках [32, 56]), а второе слагаемое описывает фотоупругий эффект, связанный с деформацией оптического волокна, возникающей в результате растяжения или сжатия под воздействием механических усилий или температурных изменений.

В свою очередь, изменения показателя преломления, вносимое фотоупругим эффектом, выражается формулой

$$\delta n = -\frac{n^3}{2} (p_{11}\varepsilon_1 + p_{12}\varepsilon_2 + p_{12}\varepsilon_z), \quad (1.28)$$

где p_{ij} – коэффициенты Поггеля, описывающие линейный электрооптический эффект;

ε_1 и ε_2 – относительная деформация в поперечном сечении волокна;

ε_z – относительная деформация вдоль оси волокна.

Для расчета уровня чувствительности волокна важно учитывать суммарную деформацию материала вдоль оси волокна, вызванную совместным влиянием изгиба и температурных изменений. Дополнительная деформация также появляется непосредственно под воздействием изменения температуры окружающей среды.

Эффект фотоупругости активно применяется в различных областях техники – от датчиков и модуляторов до фильтров [17, 20, 32, 90–94].

1.5 Одномодовое оптическое волокно, сохраняющее поляризацию и его особенности

В п.1.2 уже упоминалось, что в реальных условиях применения одномодовых оптических волокон при возникновении изгибов и/или возмущений из-за перепадов температуры происходит взаимное преобразование мод HE_{11}^x и HE_{11}^y (рисунок 1.2), поляризация света, проходящего по волокну.

Применение одномодового волокна в оптических измерительных системах характеризуется нестабильным выходом светового пучка, вызванным внешними факторами, что негативно сказывается на точности проводимых измерений. Решение проблемы заключается в увеличении различия постоянных распространения волн, что приводит к созданию одномодового волокна с высоким уровнем стабильности поляризации – волокна с двойным лучепреломлением (с устойчивой поляризацией) [32].

Одномодовые волокна, поддерживающие стабильность поляризации, требуют значительной разницы в постоянных распространения ортогональных мод. Этого достигают двумя способами: созданием одномодовых световодов с несимметричной сердцевинной или использованием двулучепреломляющих волокон. Примеры конструкций сердцевинной волокон, стабилизирующих поляризацию, представлены на рис. 1.9.

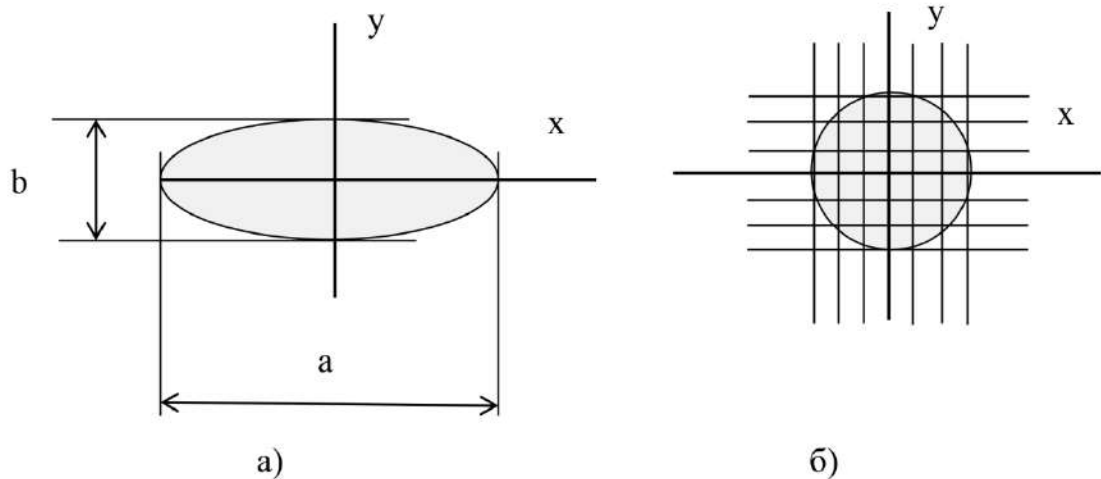


Рисунок 1.9 – Поперечное сечение сердцевины волоконных световодов с сохранением поляризации:

a – с эллиптической сердцевиной,

b – с круглой сердцевиной и анизотропией механических напряжений.

На рисунке 1.9 а представлено поперечное сечение одномодового волновода с эллиптической сердцевиной. Размеры большой и малой полуосей которой составляют значения a и b по осям X и Y соответственно. На втором рисунке 1.9.б представлено волокно с круглой сердцевиной, при этом анизотропия возникает из-за неоднородных механических напряжений по различным направлениям ($\sigma_x \neq \sigma_y$) [14, 32, 78].

Световоды первого вида, на практике, применяются довольно редко. Чаще используют волокна с круглым профилем сердцевин, специально спроектированные для поддержания поляризации. Такие волокна характеризуются искусственным созданием механических напряжений разной интенсивности вдоль осей X и Y , перпендикулярных оптической оси Z .

Для линейно-поляризованных вдоль осей X и Y световых волн, показатели преломления выражаются следующим образом:

$$n_{x,y} = n - \frac{n^3}{2} p_{11,12} \frac{\sigma_{x,y}}{E}, \quad (1.29)$$

где n_x и n_y – показатель преломления сердцевины волокна вдоль осей X и Y ;

n – средний показатель преломления сердцевины волокна;

p_{11}, p_{12} – упругооптические коэффициенты;

σ_{xy} – механические напряжения;

E – модуль Юнга.

Авторы источников [14, 32, 56] для вычисления значения разности показателей преломления изогнутого волокна приводят следующее выражение:

$$\Delta n_{xy} = \frac{n^3}{4} (p_{11} - p_{12})(1 + \nu) \left(\frac{r}{R}\right)^2, \quad (1.30)$$

где ν – коэффициент Пуассона (отношение относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению при одноосной деформации);

r – радиус сердцевины волокна;

R – радиус изгиба.

Следует подчеркнуть, что выведенное уравнение представляет собой упрощённую модель, которая сознательно опускает ряд существенных факторов, влияющих на дифференциальные показатели преломления. Это обстоятельство способно вызывать дополнительные отклонения и погрешности во время экспериментальных исследований. Подробный анализ данного аспекта будет проведён во второй главе настоящей работы.

Выводы по первой главе

На основе анализа предметной области исследования можно сделать следующие выводы.

1 Эффективность передачи излучения по одномодовому оптическому волокну определяется множеством факторов и условий.

2 Факторы, влияющие на параметры передачи излучения, условно делятся на две группы: статистические и динамические.

3 Статические факторы включают: отклонения внутренней геометрии волокна, возникающие при производстве; наличие крутящих моментов, создаваемых при сборке кабеля; механические деформации, вносимые при монтаже кабеля, что в совокупности порождает поляризационные аномалии в волокне.

4 Динамическими факторами выступают временные изменения внешних воздействий, среди которых выделяются деформации волокна, вызванные давлением, изгибами, температурой и прочими видами воздействия.

5 Таким образом, исследование параметров одномодовых оптических волокон, на изменение которых влияют внешние факторы; построение новых и уточнение уже существующих математических моделей, описывающих процессы распространения света по деформированному (изогнутому) волокну; разработка вычислительных алгоритмов расчетов и проведение вычислительного эксперимента по исследованию влияния таких факторов, как изгиб и температурная деформация волокна на изменение показателя преломления оптического волокна и другие параметры, зависящие от него, являются базой, которая позволит в дальнейшем провести разработку методов компенсации вносимых потерь, а значит будет способствовать улучшению качества сигнала связи.

ГЛАВА 2 МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИИ ИЗГИБА ВОЛОКНА

2.1 Численное моделирование деформации изгиба одномодового оптического волокна

Оптическое волокно или волоконно-оптический элемент, предназначенный для передачи одного основного режима распространения света. Это диэлектрически направляющая среда, в обобщенном виде представляет собой тонкую нить (длинный, тонкий, прозрачный, однородный сплошной цилиндр) из стекла или пластика (прозрачных материалов), применяемого для распространения электромагнитных волн оптического и инфракрасного диапазонов внутри себя посредством полного внутреннего отражения [32, 34, 95, 96]. Оптическое волокно состоит из сердцевины и оптической оболочки, изготовленных из специальных материалов для возможности распространения оптического излучения по волокну [14, 32, 83]. Показатель преломления сердцевины волокна варьируется в пределах от 1,4 до 1,5, при этом показатель преломления оптической оболочки немного меньше (в пределах 1%), что обеспечивает полное внутреннее отражение света от границ раздела сердцевина-оболочка.

В результате внешних воздействий, на ОВ начинают действовать силы, приводящие к его деформации. При этом с волокном происходят различные изменения, такие как удлинение и/или укорочение по различным направлениям.

Рассмотрим деформацию изгиба одномодового оптического волокна. При этом необходимо учитывать следующее, что деформации волокна по различным осям происходят неодинаково, так как при изгибе происходят пространственные изменения структуры ОВ по трем направлениям, в отличие от простого растяжения или сжатия.

На рисунке ниже представлена модель изгиба оптического волокна (см. рисунок 2.1). На модели показаны: $2b$ – диаметр оболочки оптического волокна, R – радиус изгиба волокна, φ – угол изгиба волокна [49].

Оси координат на рисунке расположены следующим образом:

- на осях X и Y расположено поперечное сечение волокна,
- ось Z направлена вдоль всей длины ООВ.

При этом во время изгиба волокна одновременно удлиняется и укорачивается. Для оптимизации модели оптическое волокно разместим таким образом, чтобы подобные деформации происходили вдоль одной оси X , таким образом, составляющая механического напряжения вдоль оси Y будет отсутствовать, волокно не будет менять свои параметры за счет компенсации по оси X .

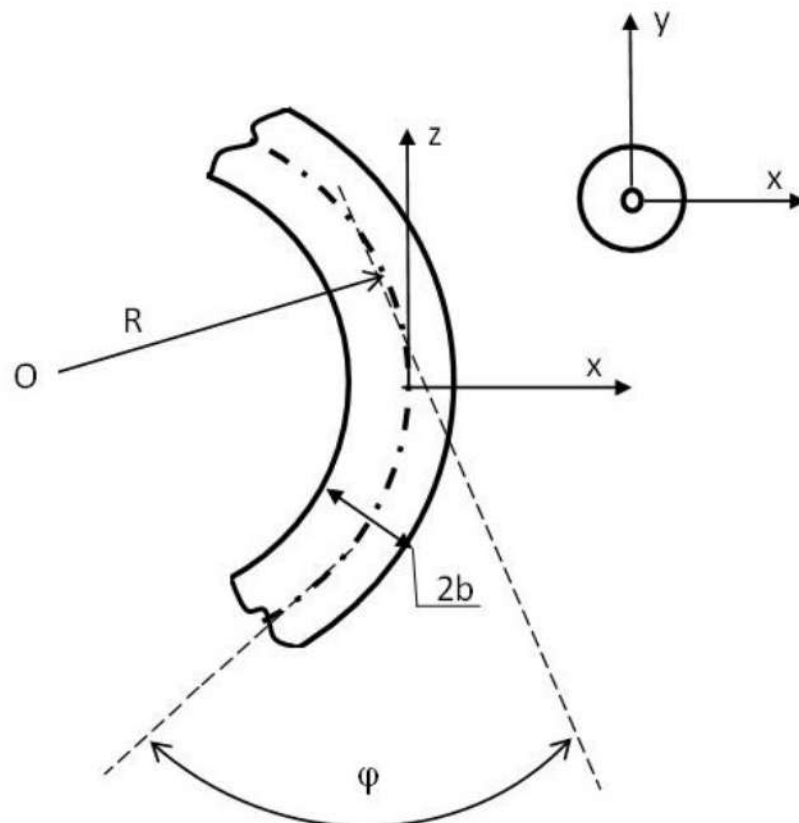


Рисунок 2.1 – Модель изгиба волокна.

Рассмотрим процесс численного моделирования деформации изгиба оптического волокна.

В п. 1.4.2 описаны составляющие механического напряжения в изогнутом волокне вдоль координатных осей.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{2R^2}(x^2 - b^2), \\ \sigma_y &= 0, \\ \sigma_z &= \frac{E}{R}x,\end{aligned}\tag{2.1}$$

где E – модуль Юнга,

b – радиус оболочки волокна,

R – радиус изгиба волокна,

x – координата относительно центральной оси волокна.

Деформация изгиба вызывает изменения в направлении оси X . Изменение значений по оси Y в пределах сердцевины волокна не происходит.

Учитывая эффект Пуассона, компоненты относительной деформации представляются выражениями:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{cases}\tag{2.2}$$

где μ – отношение Пуассона.

Видоизменяя систему (2.2) с учетом выражений (2.1), получим систему составляющих относительных деформаций для изогнутого оптического волокна:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{2R^2}(x^2 - b^2) - \frac{\mu}{R}x \\ \varepsilon_y = -\mu \left[\frac{1}{2R^2}(x^2 - b^2) + \frac{1}{R}x \right] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{R}x - \frac{1}{2} \frac{\mu}{R^2}(x^2 - b^2) \end{cases}\tag{2.3}$$

Необходимо выделить важный аспект системы уравнений (2.3) – она учитывает полный набор компонентов относительной деформации и фотоупругий эффект во всех направлениях координатных осей, применяя коэффициенты Поккельса. Данное отличие является существенным в сравнении с классической моделью (выражение (1.16)), которые исключают члены вроде $x \ll b$ (квадратичные составляющие) [32, 40]. Это приводит к упущению эффектов высших порядков и неверному отображению физических явлений, происходящих в волокне при изгибе.

Рассмотрим изменение показателя преломления, вносимое различными составляющими относительных деформаций (2.3) и эффектом фотоупругости в направлениях координатных осей δn_x , δn_y и δn_z с использованием коэффициентов Поккельса p_{ij} .

$$\begin{cases} \delta n_x = -\frac{n^3}{2}(p_{11}\varepsilon_x + p_{12}\varepsilon_y + p_{12}\varepsilon_z) \\ \delta n_y = -\frac{n^3}{2}(p_{12}\varepsilon_x + p_{11}\varepsilon_y + p_{12}\varepsilon_z), \\ \delta n_z = -\frac{n^3}{2}(p_{12}\varepsilon_x + p_{12}\varepsilon_y + p_{11}\varepsilon_z) \end{cases} \quad (2.4)$$

Систему (2.4) можно обобщить, записав следующим образом:

$$\delta n_{x,y,z} = \frac{-n^3(p_{11}\varepsilon_{x,y,z} + p_{12}\varepsilon_{y,z,x} + p_{12}\varepsilon_{z,x,y})}{2}, \quad (2.4a)$$

Подставляя выражения системы (2.3) в системы (2.4), получим изменение показателя преломления в направлении координатных осей [30-32, 64]:

$$\begin{aligned} n_x = n + \frac{n^3}{2} \left[\frac{\mu}{R^2} \left(p_{12} - \frac{p_{11}}{2\mu} \right) x^2 + \frac{\mu}{R} \left(p_{11} + \right. \right. \\ \left. \left. + p_{12} - \frac{p_{12}}{\mu} \right) x + \frac{\mu}{R^2} \left(\frac{p_{11}}{2\mu} - p_{12} \right) b^2 \right], \end{aligned} \quad (2.5a)$$

$$\begin{aligned} n_y = n + \frac{n^3}{4} \left[\frac{\mu}{R^2} \left(p_{11} - \frac{p_{12}}{\mu} + p_{12} \right) x^2 + \frac{\mu}{R} (2p_{11} + \right. \\ \left. + 2p_{12} - \frac{2p_{12}}{\mu}) x + \frac{\mu}{R^2} \left(\frac{p_{12}}{\mu} - p_{12} - p_{11} \right) b^2 \right], \end{aligned} \quad (2.5b)$$

$$n_z = n + \frac{n^3}{4} \left[\frac{\mu}{R^2} \left(p_{11} - \frac{p_{12}}{\mu} + p_{12} \right) x^2 + \frac{\mu}{R} (4p_{12} - \frac{2p_{11}}{\mu}) x + \frac{\mu}{R^2} \left(\frac{p_{12}}{\mu} - p_{12} - p_{11} \right) b^2 \right]. \quad (2.5в)$$

2.2 Расчет составляющих показателя преломления одномодового оптического волокна с помощью компьютерного пакета Mathcad и реализованного программного комплекса

На основе предложенной математической модели можно реализовать алгоритм расчетов приращений показателей преломления и показателей преломления в направлении координатных осей с использованием следующих технологий: комплекса программ в системе компьютерной инженерной математики Mathcad [40] и реализованного программного комплекса на языке программирования C#. Подробное описание процесса реализации программного продукта изложено в главе 4.

Используемый пакет выбран в связи с его широкими возможностями, заключающимися в интеграции между собой таких компонентов как:

- мощный текстовый редактор, который позволяет вводить, редактировать и форматировать текст и математические выражения на общепринятом языке математических символов и формул без применения специальных команд или операторов [98-101];
- встроенный вычислительный процессор, который умеет проводить расчеты по введенным формулам и выражениям с использованием различных встроенных методов расчета с появлением промежуточных результатов по мере ввода очередной формулы [102-105].

Входной язык ввода системы является интерпретирующим. А именно:

- встроенный символьный процессор, который, на сегодняшний момент, можно рассматривать фактически как системы искусственного интеллекта [106-107];

– интерфейс данного компьютерного пакета является визуальным (реализован принцип «WYSIWYG») [108, 109], практически любые действия в системе компьютерной инженерной математики (СКИМ) Mathcad можно выполнять без помощи клавиатуры, выбирая нужные пункты меню или инструменты на панелях [110-112].

Алгоритм расчетов приращений показателей преломления и показателей преломления в направлении координатных осей в СКИМ и программном комплексе следующий.

1. Провести обозначения формул (2.1) и формул (2.2) в СКИМ.
2. Для выполнения расчетов задать необходимые величины.
3. Записать выражения (2.2) и (2.3) в символьной форме. Часть результатов данного пункта в СКИМ представлена на рисунке 2.2.
4. Вычисления проводятся в результате выполнения символьных операций через присвоение переменных и вызова функции collect.
5. Провести группировку по заданным параметрам, для удобства расположения формул.

Составляющие механического напряжения в изотропном теле:

$$g(E, R, x, b) = \frac{E}{2 \cdot R^2} \cdot (x^2 - b^2) \quad g_y = 0 \quad g_z(E, R, x) = \frac{E}{R} \cdot x$$

Составляющие относительных деформаций:

$$e_x(E, R, x, b, m) = \frac{1}{E} \cdot (g_x(E, R, x, b) - m \cdot g_z(E, R, x)) \text{ collect, E} \rightarrow \frac{1}{2 \cdot R^2} \cdot (x^2 - b^2) - \frac{m}{R} \cdot x$$

$$e_y(E, R, x, b, m) = \frac{1}{E} \cdot [-m \cdot (g_x(E, R, x, b) + g_z(E, R, x))] \text{ collect, E} \rightarrow -m \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot R^2} \cdot (x^2 - b^2) + \frac{1}{R} \cdot x \right]$$

$$e_z(E, R, x, b, m) = \frac{1}{E} \cdot (g_z(E, R, x) - m \cdot g_x(E, R, x, b)) \text{ collect, E} \rightarrow \frac{1}{R} \cdot x - \frac{m}{2 \cdot R^2} \cdot (x^2 - b^2)$$

Приращение показателя преломления

$$\Delta n_x(R, x, b, m, p11, p12, n) = \frac{-n^3}{2} \cdot (p11 \cdot e_x(E, R, x, b, m) + p12 \cdot e_y(E, R, x, b, m) + p12 \cdot e_z(E, R, x, b, m)) \text{ collect, n}^3, x^2, b^2 \rightarrow \left[\left(\frac{1}{2} \cdot p12 \cdot \frac{m}{R^2} - \frac{1}{4} \cdot \frac{p11}{R^2} \right) \cdot x^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot p11 \cdot \frac{m}{R} + \frac{1}{2} \cdot p12 \cdot \frac{m}{R} - \frac{1}{2} \cdot \frac{p12}{R} \right) \cdot x + \left(\frac{1}{4} \cdot \frac{p11}{R^2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{p12}{R^2} \cdot \frac{m}{R^2} \right) \cdot b^2 \right] \cdot n^3$$

$$\Delta n_y(R, x, b, m, p11, p12, n) = \frac{-n^3}{2} \cdot (p12 \cdot e_x(E, R, x, b, m) + p11 \cdot e_y(E, R, x, b, m) + p12 \cdot e_z(E, R, x, b, m)) \text{ collect, n}^3, x^2, b^2 \rightarrow \left[\left(\frac{1}{4} \cdot p11 \cdot \frac{m}{R^2} - \frac{1}{4} \cdot \frac{p12}{R^2} + \frac{1}{4} \cdot p12 \cdot \frac{m}{R^2} \right) \cdot x^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot p11 \cdot \frac{m}{R} + \frac{1}{2} \cdot p12 \cdot \frac{m}{R} - \frac{1}{2} \cdot \frac{p12}{R} \right) \cdot x + \left(\frac{1}{4} \cdot \frac{p12}{R^2} - \frac{1}{4} \cdot p12 \cdot \frac{m}{R^2} - \frac{1}{4} \cdot p11 \cdot \frac{m}{R^2} \right) \cdot b^2 \right] \cdot n^3$$

$$\Delta n_z(R, x, b, m, p11, p12, n) = \frac{-n^3}{2} \cdot (p12 \cdot e_x(E, R, x, b, m) + p12 \cdot e_y(E, R, x, b, m) + p11 \cdot e_z(E, R, x, b, m)) \text{ collect, n}^3, x^2, b^2 \rightarrow \left[\left(\frac{1}{4} \cdot p11 \cdot \frac{m}{R^2} - \frac{1}{4} \cdot \frac{p12}{R^2} + \frac{1}{4} \cdot p12 \cdot \frac{m}{R^2} \right) \cdot x^2 + \left(p12 \cdot \frac{m}{R} - \frac{1}{2} \cdot \frac{p11}{R} \right) \cdot x + \left(\frac{1}{4} \cdot \frac{p12}{R^2} - \frac{1}{4} \cdot p12 \cdot \frac{m}{R^2} - \frac{1}{4} \cdot p11 \cdot \frac{m}{R^2} \right) \cdot b^2 \right] \cdot n^3$$

Рисунок 2.2 – Символьные расчеты составляющих относительных деформаций.

6. В результате появится строка с вычислением подобных слагаемых, которые выполняются во встроенном символьном процессоре. Результат получается в символьной форме.

7. Провести символьные вычисления приращений показателей преломления системы (2.4) и показателей преломления в направлении координатных осей по формулам (2.5а-2.5в). Символьные расчеты изменений показателя преломления сердечника ОВ, вносимые различными составляющими относительных деформаций представлены на рисунке 2.3 [45].

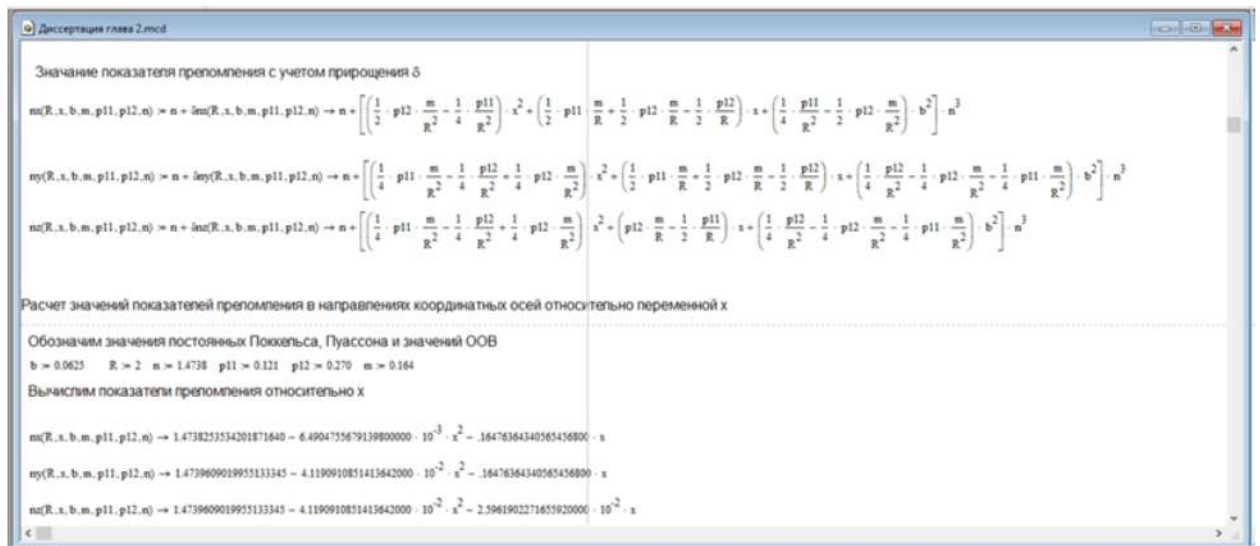


Рисунок 2.3 – Символьные расчеты изменений показателя преломления.

Используя выражения (2.5а – 2.5в), проведен числовой расчёт компонент показателя преломления, основанный на значениях коэффициентов Поппельса и Пуассона [14, 32, 58]: $p_{11} = 0,121$; $p_{12} = 0,270$; $\mu = 0,164$.

Диаметр волокна стандартно $2b = 125$ мкм, значения показателей преломления сердечника $n = 1,4738$ и оболочки $n_{об} = 1,4627$ для длины волны $\lambda = 1310$ нм, взяты для одномодового оптического волокна типа TrueWave [113-118] для высокоскоростной передачи с ненулевой смещенной дисперсией [118-120], при наиболее вероятном радиусе искривления оптического волокна $R = 2$ мм. Результаты вычислений в СКИМ Mathcad и с помощью программного комплекса представлены на рисунке 2.4 в табличной форме. Шаг

вычисления выбран $h=0,0002$ мм, для упрощения восприятия таблиц. Полученные численные значения представлены в таблице 2.1 [44].

Таблица 2.1 – Расчеты показателей преломления при радиусе искривления оптического волокна $R = 2$ мм

№	x	n_x	n_y	n_z
1	2	3	4	5
1	-0,004	1,474068	1,474089	1,473867
2	-0,0038	1,474054	1,474076	1,473865
3	-0,0036	1,474041	1,474063	1,473863
4	-0,0034	1,474028	1,47405	1,473861
5	-0,0032	1,474015	1,474037	1,473859
6	-0,003	1,474002	1,474023	1,473857
7	-0,0028	1,473989	1,47401	1,473855
8	-0,0026	1,473975	1,473997	1,473853
9	-0,0024	1,473962	1,473984	1,473851
10	-0,0022	1,473949	1,473971	1,473849
11	-0,002	1,473936	1,473958	1,473847
12	-0,0018	1,473923	1,473944	1,473844
13	-0,0016	1,47391	1,473931	1,473842
14	-0,0014	1,473896	1,473918	1,47384
15	-0,0012	1,473883	1,473905	1,473838
16	-0,001	1,47387	1,473892	1,473836
17	-0,0008	1,473857	1,473878	1,473834
18	-0,0006	1,473844	1,473865	1,473832
19	-0,0004	1,47383	1,473852	1,47383
20	-0,0002	1,473817	1,473839	1,473828
21	0	1,473804	1,473826	1,473826
22	0,0002	1,473791	1,473813	1,473824
23	0,0004	1,473778	1,473799	1,473822
24	0,0006	1,473765	1,473786	1,47382
25	0,0008	1,473751	1,473773	1,473817
26	0,001	1,473738	1,47376	1,473815
27	0,0012	1,473725	1,473747	1,473813
28	0,0014	1,473712	1,473733	1,473811
29	0,0016	1,473699	1,47372	1,473809
30	0,0018	1,473685	1,473707	1,473807
31	0,002	1,473672	1,473694	1,473805
32	0,0022	1,473659	1,473681	1,473803
33	0,0024	1,473646	1,473668	1,473801
34	0,0026	1,473633	1,473654	1,473799
35	0,0028	1,47362	1,473641	1,473797
36	0,003	1,473606	1,473628	1,473795
37	0,0032	1,473593	1,473615	1,473793
38	0,0034	1,47358	1,473602	1,47379

1	2	3	4	5
39	0,0036	1,473567	1,473588	1,473788
40	0,0038	1,473554	1,473575	1,473786
41	0,004	1,47354	1,473562	1,473784

Для понимания корреляции значений показатели преломления предложена графическая интерпретация результатов, полученных в СКИМ Mathcad в реализованном программном комплексе. Графики представлены на рисунке 2.4. По горизонтальной оси отмечены изменение координаты x от оси оптического волокна. На вертикальной оси отмечено изменение показателя преломления ОВ. Так же на рисунке отмечены следующие значения:

- x — координата относительно центральной оси ООВ;
- n, n_x, n_y, n_z — значение показателя преломления сердечника до деформации изгиба и деформированного волокна в направлении координатных осей;
- 1 и 2 — точки перехода деформированного волокна из двухосного состояния «кристалла» в одноосное.

Значения n_x, n_y и их разности изменяются при изменении координаты x , но не зависят от других координат (см. рисунок 2.4).

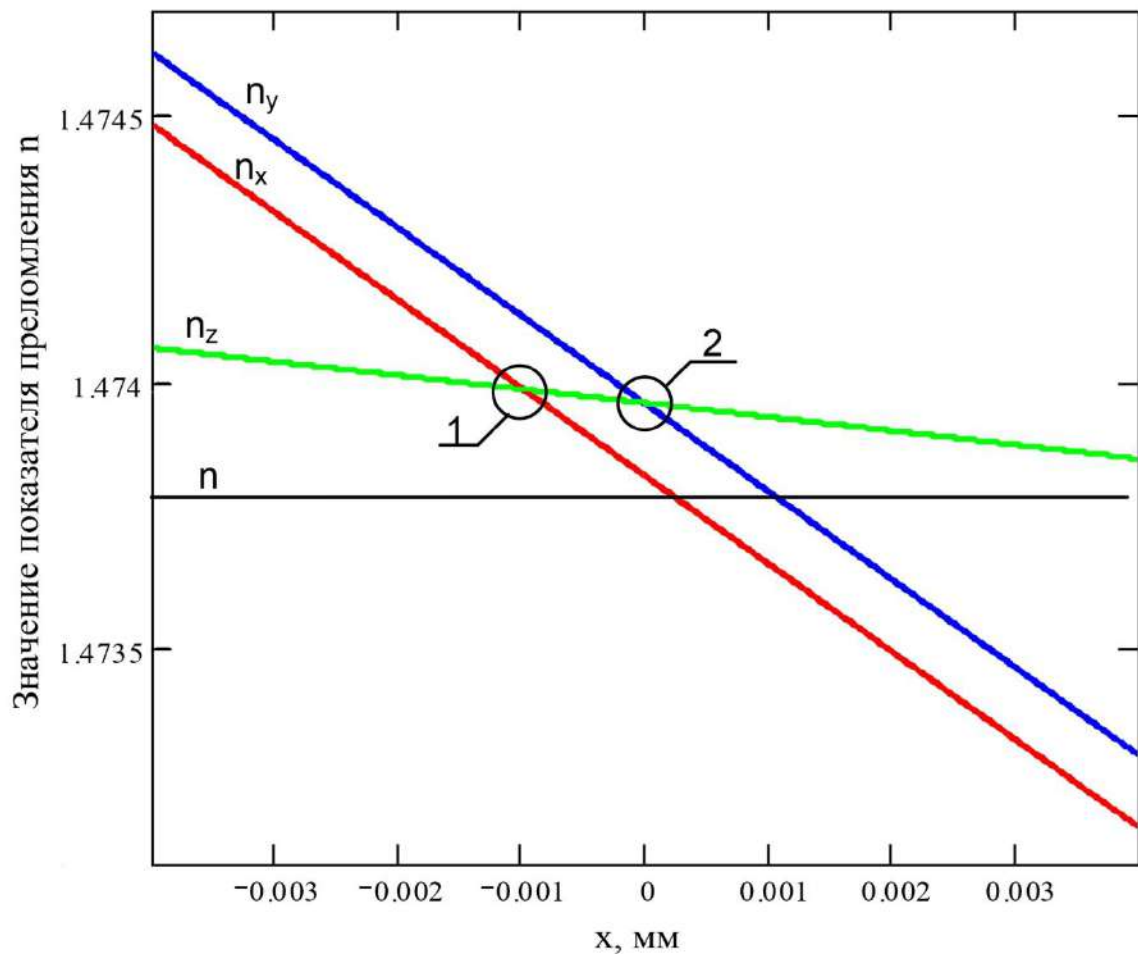


Рисунок 2.4 – Изменение значений показателей преломления деформированного волокна внутри сердечника при радиусе изгиба 2 мм.

Проведем вычисления для радиусов искривления оптического волокна $R = 4$ мм (таблица 2.2), $R = 7$ мм (таблица 2.3), $R = 10$ мм (таблица 2.4), шаг вычисления выберем $h=0,0004$ мм. Графическая интерпретация результатов представлена на рисунках 2.5, 2.6 и 2.7 соответственно.

Таблица 2.2 – Расчеты показателей преломления при радиусе искривления оптического волокна $R = 4$ мм

№	x	n_x	n_y	n_z
1	2	3	4	5
1	-0,004	1,47399	1,474001	1,473843
2	-0,0036	1,473972	1,473983	1,47384
3	-0,0032	1,473953	1,473964	1,473837
4	-0,0028	1,473934	1,473945	1,473834

1	2	3	4	5
5	-0,0024	1,473915	1,473926	1,473831
6	-0,002	1,473896	1,473907	1,473828
7	-0,0016	1,473877	1,473888	1,473825
8	-0,0012	1,473859	1,47387	1,473822
9	-0,0008	1,47384	1,473851	1,473819
10	-0,0004	1,473821	1,473832	1,473816
11	0	1,473802	1,473813	1,473813
12	0,0004	1,473783	1,473794	1,47381
13	0,0008	1,473764	1,473775	1,473807
14	0,0012	1,473746	1,473757	1,473804
15	0,0016	1,473727	1,473738	1,473801
16	0,002	1,473708	1,473719	1,473798
17	0,0024	1,473689	1,4737	1,473795
18	0,0028	1,47367	1,473681	1,473792
19	0,0032	1,473651	1,473662	1,473789
20	0,0036	1,473633	1,473644	1,473786
21	0,004	1,473614	1,473625	1,473783

Таблица 2.3 – Расчеты показателей преломления при радиусе искривления оптического волокна $R = 7$ мм

№	x	n_x	n_y	n_z
1	2	3	4	5
1	-0,004	1,473933	1,473938	1,473827
2	-0,0036	1,47392	1,473925	1,473825
3	-0,0032	1,473906	1,473912	1,473823
4	-0,0028	1,473893	1,473899	1,473821
5	-0,0024	1,47388	1,473886	1,473819
6	-0,002	1,473867	1,473872	1,473817
7	-0,0016	1,473854	1,473859	1,473815
8	-0,0012	1,473841	1,473846	1,473813
9	-0,0008	1,473827	1,473833	1,473811
10	-0,0004	1,473814	1,47382	1,473809
11	0	1,473801	1,473806	1,473806
12	0,0004	1,473788	1,473793	1,473804
13	0,0008	1,473775	1,47378	1,473802
14	0,0012	1,473761	1,473767	1,4738
15	0,0016	1,473748	1,473754	1,473798
16	0,002	1,473735	1,473741	1,473796
17	0,0024	1,473722	1,473727	1,473794
18	0,0028	1,473709	1,473714	1,473792
19	0,0032	1,473696	1,473701	1,47379
20	0,0036	1,473682	1,473688	1,473788
21	0,004	1,473669	1,473675	1,473786

Таблица 2.4 – Расчеты показателей преломления при радиусе искривления оптического волокна $R = 10$ мм

№	x	n_x	n_y	n_z
1	2	3	4	5
1	-0,004	1,474001	1,473843	1,47399
2	-0,0036	1,473983	1,47384	1,473972
3	-0,0032	1,473964	1,473837	1,473953
4	-0,0028	1,473945	1,473834	1,473934
5	-0,0024	1,473926	1,473831	1,473915
6	-0,002	1,473907	1,473828	1,473896
7	-0,0016	1,473888	1,473825	1,473877
8	-0,0012	1,47387	1,473822	1,473859
9	-0,0008	1,473851	1,473819	1,47384
10	-0,0004	1,473832	1,473816	1,473821
11	0	1,473813	1,473813	1,473802
12	0,0004	1,473794	1,47381	1,473783
13	0,0008	1,473775	1,473807	1,473764
14	0,0012	1,473757	1,473804	1,473746
15	0,0016	1,473738	1,473801	1,473727
16	0,002	1,473719	1,473798	1,473708
17	0,0024	1,4737	1,473795	1,473689
18	0,0028	1,473681	1,473792	1,47367
19	0,0032	1,473662	1,473789	1,473651
20	0,0036	1,473644	1,473786	1,473633
21	0,004	1,473625	1,473783	1,473614

Графическая интерпретация полученных результатов (таблиц 2.2-2.4) представлена на рисунках 2.5-2.7. Пределы значений по осям координат графиков (по горизонтальной – изменение координаты x от оси оптического волокна, по вертикальной оси – изменение показателя преломления волокна) [48] для всех графиков (рисунки 2.5, 2.6 и 2.7) остаются такими же, как на рисунке 2.4.

Согласно рисункам 2.4, 2.5, 2.6 и 2.7 наиболее существенные изменения в значениях показателя преломления происходят при радиусе искривления 2 мм (рисунок 2.4), поэтому дальнейшие исследования будем проводить при этом значении.

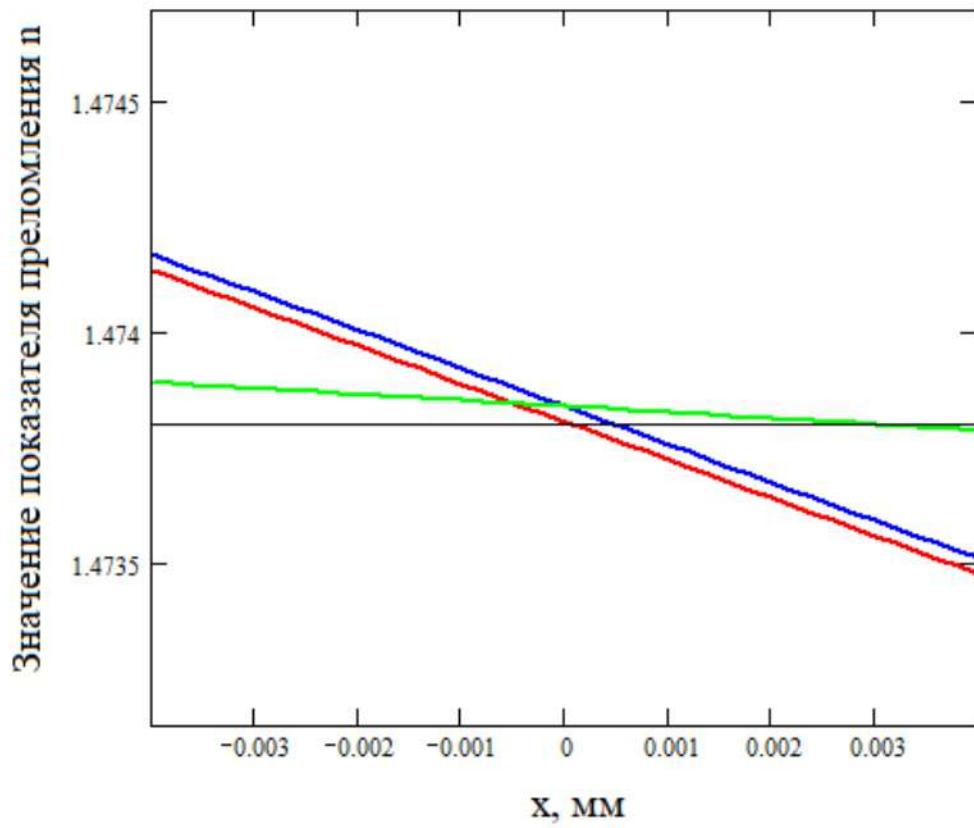


Рисунок 2.5 – Изменение показателей преломления волокна при $R = 4$ мм.

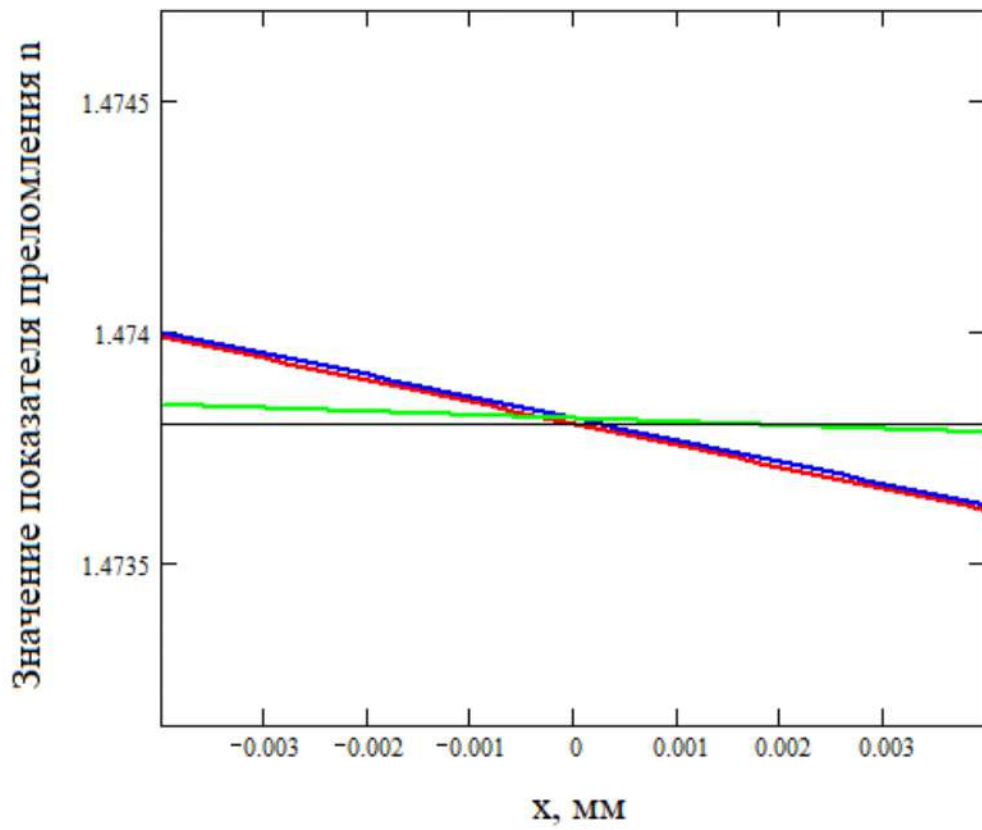


Рисунок 2.6 – Изменение показателей преломления волокна при $R = 7$ мм.

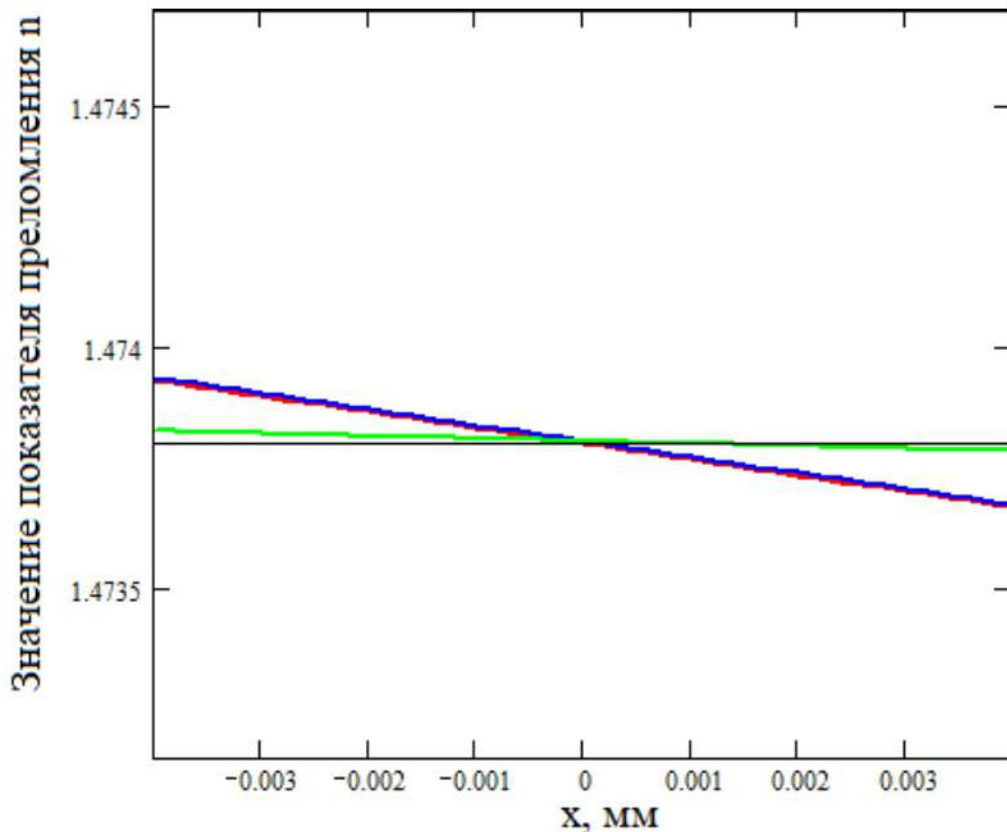


Рисунок 2.7 – Изменение показателей преломления волокна при $R = 10$ мм.

Исходя из представленных выводов (см. рисунок 2.4), передача излучения в изогнутом волокне напоминает поведение в двулучепреломляющем материале. Тем не менее, имеются две особые конфигурации ориентации n_x , n_y и n_z (точки 1 и 2), при которых n_x совпадает с n_z , а n_y соответствует n_z . Именно в этих положениях излучение движется сквозь деформированное волокно аналогично распространению в одноосном кристалле [5].

Необходимо отметить, что точка 1, зависит, от радиуса изгиба волокна и смещается вправо. Так при $R = 2$ мм значения $n_x = n_z$ в точке $x = -0,001$ мм, при $R = 4$ мм значения $n_x = n_z$ в точке $x = -0,0005$ мм, при $R = 7$ мм значения $n_x = n_z$ в точке $x = -0,0003$ мм, при $R = 10$ мм значения $n_x = n_z$ в точке $x = -0,0002$ мм.

На рисунке 2.8 отражены изменения показателя преломления внутри сердечника оптического волокна и в переходе сердечник-оболочка. Параметры представленные на рисунке: $n_{об}$ – значение показателя преломления обо-

лочки волокна до деформации; n_{xob} , n_{yob} , n_{zob} значения показателя преломления оболочки изогнутого волокна в направлении координатных осей переход сердечник-оболочка.

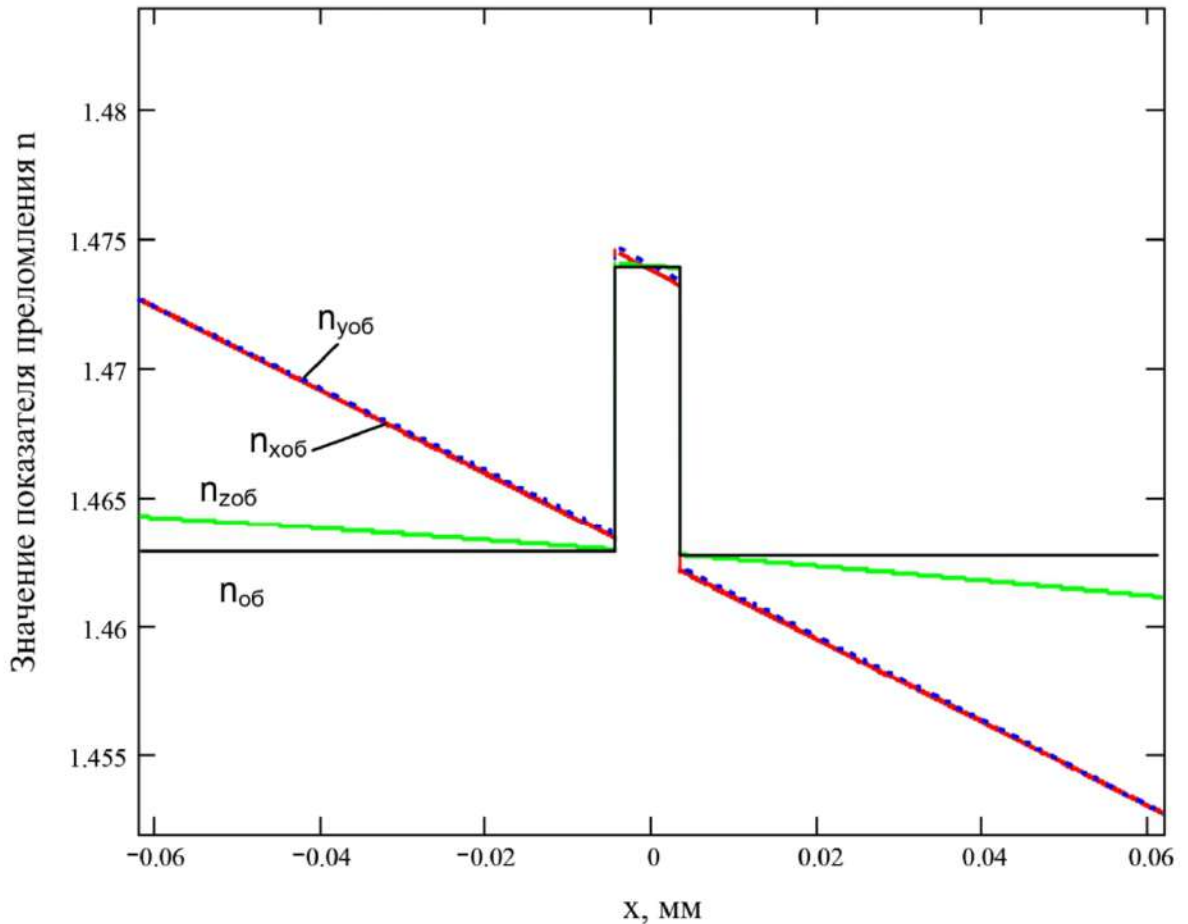


Рисунок 2.8 – Изменение показателей преломления в направлении координатных осей сердечник-оболочка изогнутого ОВ.

Согласно классической теории под действием деформации изгиба возникает процесс потери круговой симметрии [14, 32, 56, 120-124]. Согласно графикам рисунка 2.4 значения показателей преломления деформированного волокна в направлении координатных осей X , Y и Z принимают значение показателя преломления волокна до изгиба на расстоянии 0,14 мкм, 1 мкм и 6 мкм от оси неизогнутого волокна соответственно. n_z принимало бы значение равное показателю преломления до изгиба за пределами сердечника волокна,

если бы не существовало скачка показателя преломления сердечник-оболочка.

Согласно рисунку 2.8 разность показателей преломления n_x и n_y для двух ортогональных поляризаций различна в сердечнике и по краям. Значение этой разности можно определить, воспользовавшись выражением:

$$n_x - n_y = \frac{n^3}{4R^2} (\mu + 1)(p_{12} - p_{11})(x^2 - b^2) \quad (2.6)$$

Зависимость разности показателей преломления ортогональных поляризаций сердцевины и переходной зоны сердцевина-оболочка оптического волокна вычислена согласно выражению (2.6). Результаты представлены графически на рисунке 2.9. Полученная зависимость демонстрирует отчетливо выраженный квадратичный характер, в отличие от традиционно предполагаемого линейного характера.

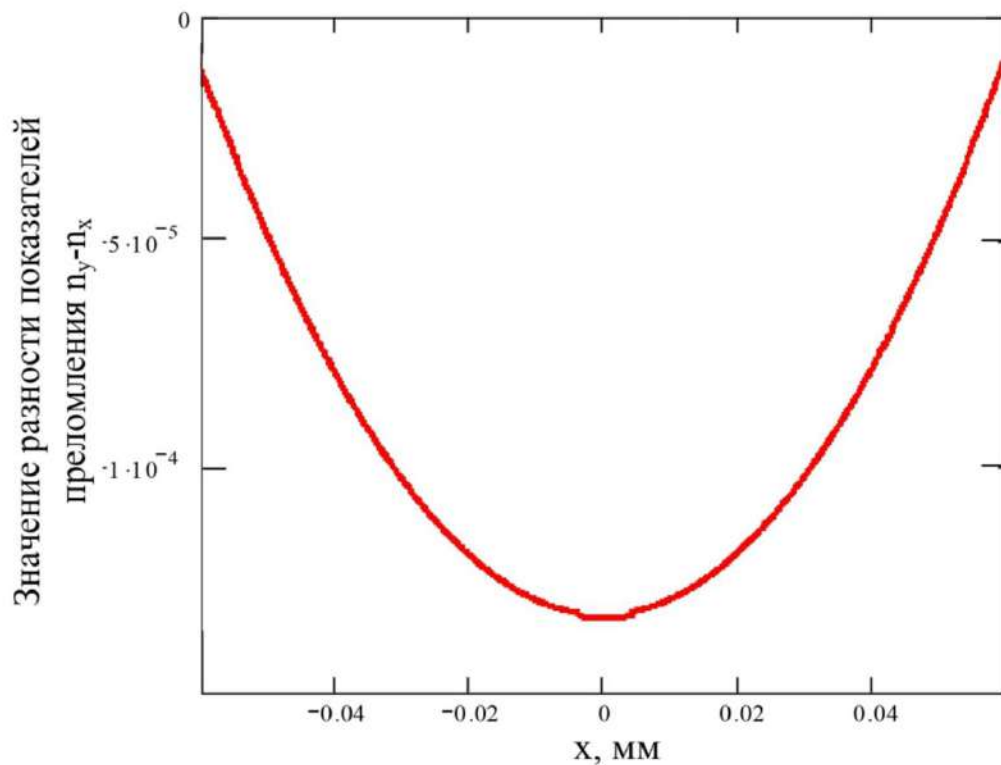


Рисунок 2.9 – Разность показателей преломления для двух ортогональных состояний поляризаций.

Проведем расчет положений оптических осей (осей эллипсоида Френе-ля) сердечника изогнутого волокна в зависимости от координаты x .

Согласно полученным ранее результатам (рисунок 2.4), соотношение значений показателя преломления изогнутого волокна в направлении координатных осей внутри сердечника $n_z > n_y > n_x$ существенно изменяется на интервале x от 0 до 4 мкм.

Результаты расчетов представлены в таблице 2.5, а графическая интерпретация результатов – на рисунке 2.10. (Округление расчетных значений угла между оптической осью и осью Z в таблице до тысячных).

Таблица 2.5 – Расчеты значения угла между оптической осью и осью Z при радиусе искривления 2 мм

№	x	Угол между ОО и осью Z
1	2	3
1	0,0002	90
2	0,0004	65,653
3	0,0006	57,383
4	0,0008	51,911
5	0,001	47,853
6	0,0012	44,661
7	0,0014	42,053
8	0,0016	39,866
9	0,0018	37,995
10	0,002	36,368
11	0,0022	34,937
12	0,0024	33,663
13	0,0026	32,520
14	0,0028	31,487
15	0,003	30,546
16	0,0032	29,685
17	0,0034	28,893
18	0,0036	28,160
19	0,0038	27,481
20	0,004	26,847
21	0,0002	26,256

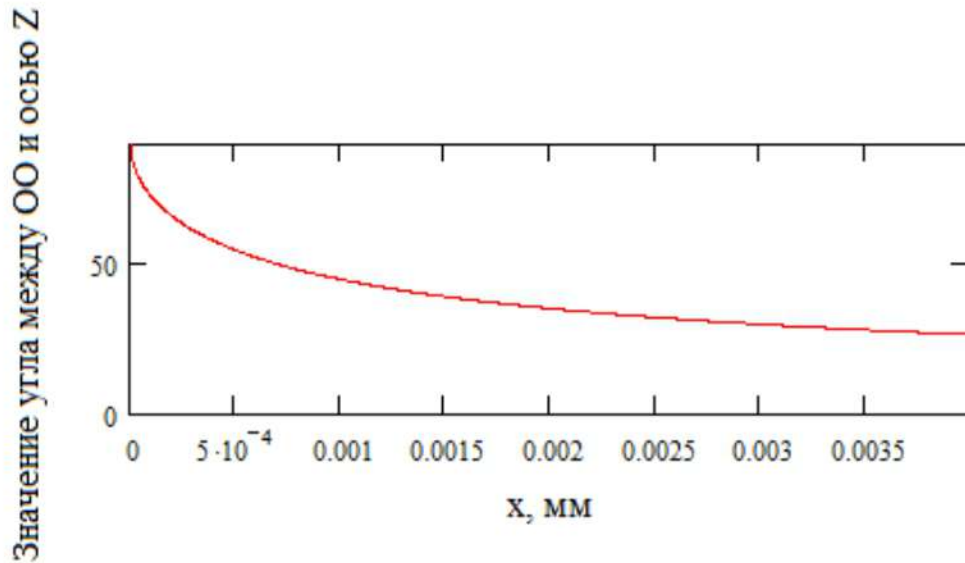


Рисунок 2.10 – График расчетов значения угла между ОО и осью Z в СКИМ Mathcad.

Сопоставляя результаты, представленные на рисунках 2.4, 2.8 и в таблице 2,5 можно сделать вывод: при расстояниях от 4 мкм до 0 угол между ОО и осью Z (в плоскости XOZ) меняется (рисунок 2.11). Положение оптических осей изменяется в пределах от 30° до 90° , это означает, что свойства ОВ переходят из двухосной анизотропии в одноосную и ОО совпадает с направлением оси X . [29]

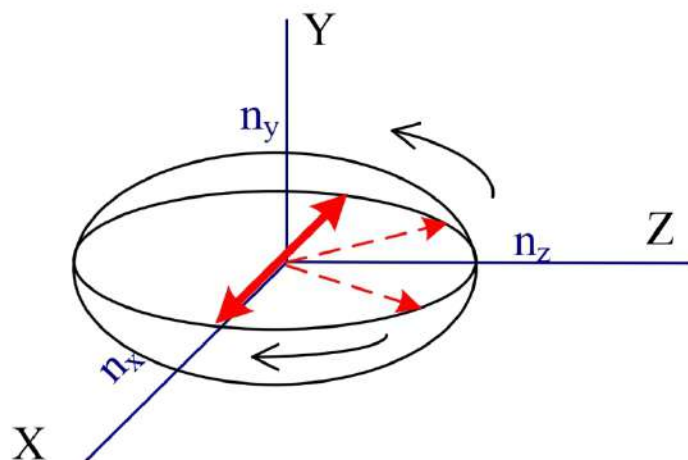


Рисунок 2.11 – Изменение положения оптических осей изогнутого волокна в плоскости XOZ .

Аналогичные расчеты проведены для двух других случаев.

Второй случай.

При расстояниях от 0 до -1 мкм значения показателя преломления изогнутого волокна в направлении координатных осей внутри сердечника согласно полученным значениям (таблице 2.1 и рисунок 2.4) будут соотноситься следующим образом $n_y > n_z > n_x$, то есть будет изменяться угол между ОО и осью X (в плоскости XOY). Табличные значения и графическая интерпретация представлены в таблице 2.6 и на рисунке 2.12 соответственно [29]. (Округление расчетных значений угла между оптической осью и осью X в таблице до тысячных).

Таблица 2.6 – Расчеты значения угла между оптической осью и осью X при радиусе искривления 2 мм

№	x	Угол между ОО и осью X
1	2	3
1	-0,0001	71.338
2	-0,000095	71.828
3	-0,00009	72.328
4	-0,000085	72.842
5	-0,00008	73.369
6	-0,000075	73.912
7	-0,00007	74.472
8	-0,000065	75.050
9	-0,00006	75.649
10	-0,000055	76.272
11	-0,00005	76.923
12	-0,000045	77.605
13	-0,00004	78.324
14	-0,000035	79.088
15	-0,00003	79.906
16	-0,000025	80.793
17	-0,00002	81.772
18	-0,000015	82.881
19	-0,00001	84.192
20	-0,000005	85.897
21	0	90

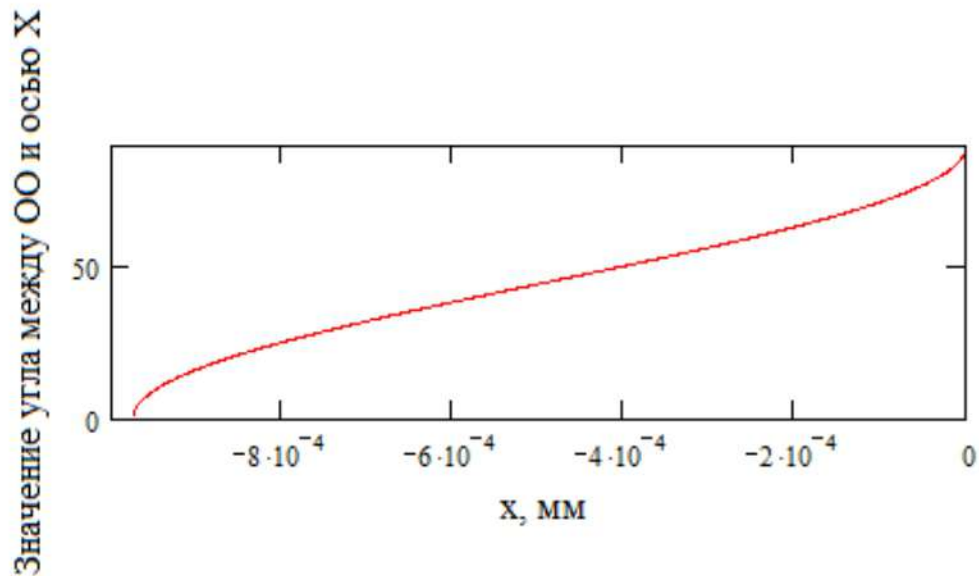


Рисунок 2.12 – График значений угла между ОО и осью X .

При расстояниях от 0 до -1 мкм угол между ОО и осью X (в плоскости XOY) (рисунок 2.13) [41] положение оптических осей изменяется в пределах от 0° до 90° . Анизотропные оптические свойства сердечника ОВ переходят из одноосных в двухосные (в средней части интервала) и, вновь, переходят в одноосные, при которых обе ОО совпадают по направлению Y .

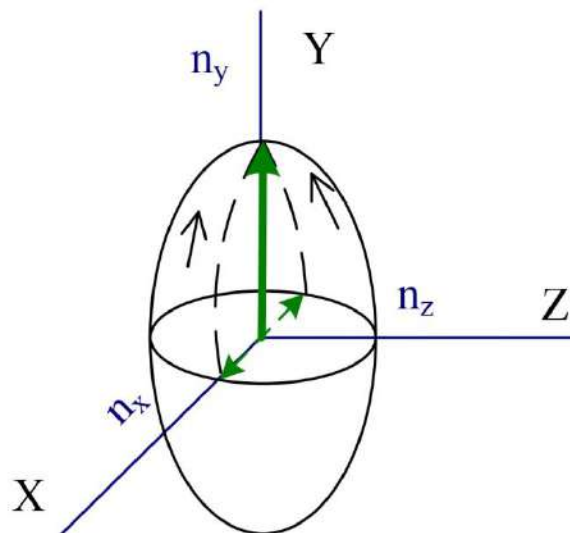


Рисунок 2.13 – Изменение положения оптических осей изогнутого волокна в плоскости XOY .

Третий случай.

При расстояниях от -1 мкм до -4 мкм значения показателя преломления изогнутого волокна в направлении координатных осей внутри сердечника согласно расчетам (таблица 2.1, рисунок 2.4) будут соотноситься следующим образом $n_y > n_x > n_z$, то образуется угол между ОО и осью Y меняется в плоскости YOZ .

Табличные значения и графическая интерпретация представлены в таблице 2.7 и на рисунке 2.14 соответственно. (Округление расчетных значений угла между оптической осью и осью Y в таблице до тысячных).

Таблица 2.7 – Расчеты значения угла между оптической осью и осью Y при радиусе искривления 2 мм

№	x	Угол между ОО и осью Y
1	2	3
1	-0,0040	60,463
2	-0,0038	59,609
3	-0,0036	58,676
4	-0,0034	57,653
5	-0,0032	56,522
6	-0,0030	55,263
7	-0,0028	53,850
8	-0,0026	52,247
9	-0,0024	50,405
10	-0,0022	48,258
11	-0,0020	45,704
12	-0,0018	42,589
13	-0,0016	38,651
14	-0,0014	33,389
15	-0,0012	25,588
16	-0,0010	8,854

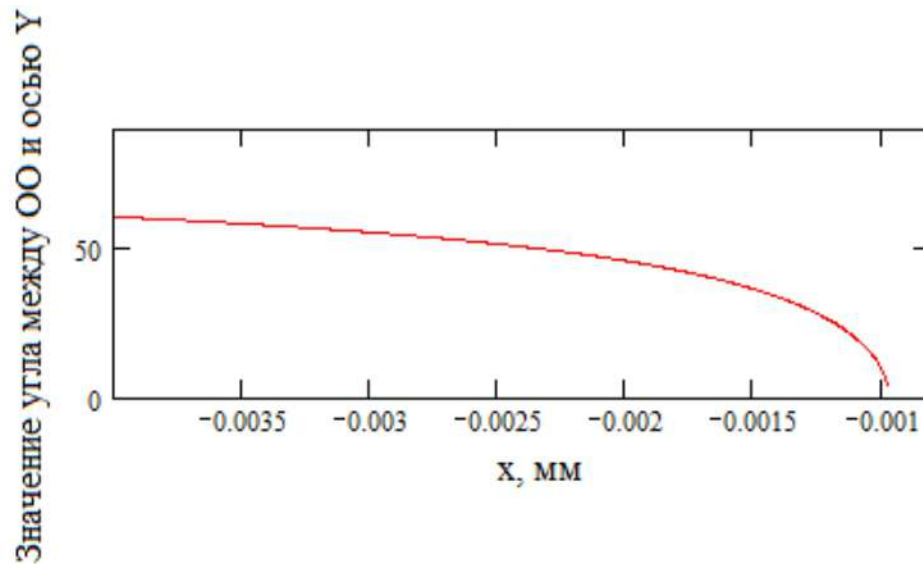


Рисунок 2.14 – График расчетов значения угла между ОО и осью Y .

При расстояниях от -1 мкм до -4 мкм угол между ОО и осью Y (в плоскости YOZ) (рисунок 2.15) [41] изменяется в пределах от 0° до 60° . Оптическая анизотропия сердечника из одноосной переходит в двухосную.

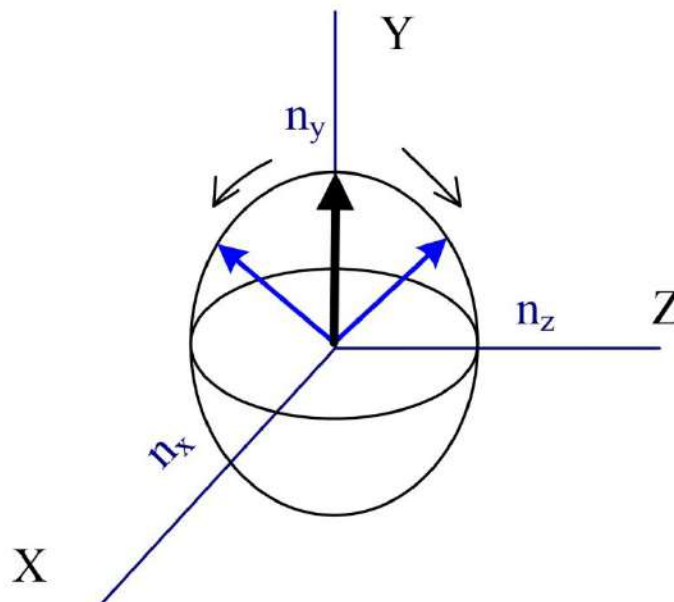


Рисунок 2.15 – Изменение положения оптических осей изогнутого волокна в плоскости YOZ .

На рисунке 2.16 положение ОО определяется как проекция концов векторов, сонаправленных с ними, на плоскость XOZ . Положение ОО изогнутого

волокна будет изменяться в трех плоскостях XOZ , XOY и YOZ при условии изменения осевого расстояния $ОВ$ в направлении оси X в пределах сердечника волокна от 4 мкм до -4 мкм.

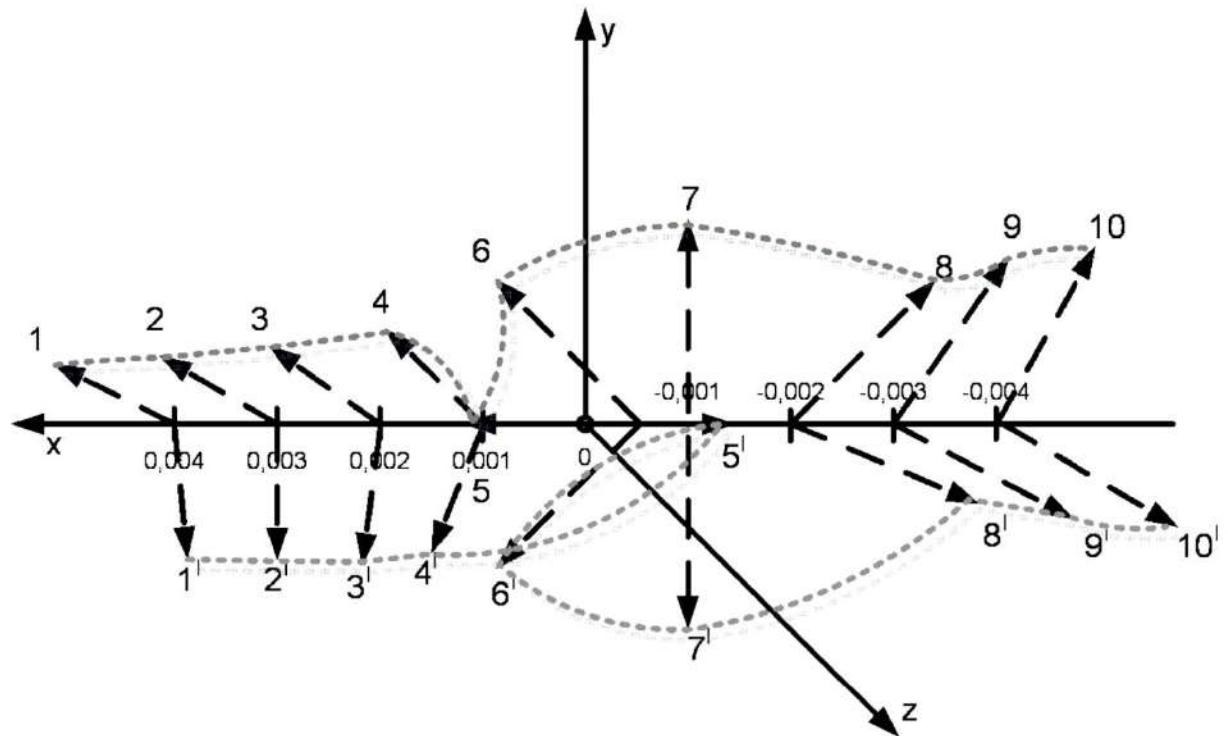


Рисунок 2.16 – Изменение положения оптических осей изогнутого волокна.

При изменении значения радиуса изгиба в процессе деформации одномодового оптического волокна происходит изменение начального угла между $ОО$ волокна и осью Z (рисунок 2.17), а также меняется конечный угол – между $ОО$ и осью Y (рисунок 2.18). На рисунках 2.17 и 2.18 черным стрелками отмечены положения оптических осей при радиусе изгиба 15 мм, а красным и синим при радиусе изгиба 1 мм.

Цифрами обозначены положение углов между $ОО$ и осью Z и Y , под номером 1 обозначено положение осей при радиусе изгиба 15 мм, под номером 2 – при радиусе изгиба 1 мм соответственно.

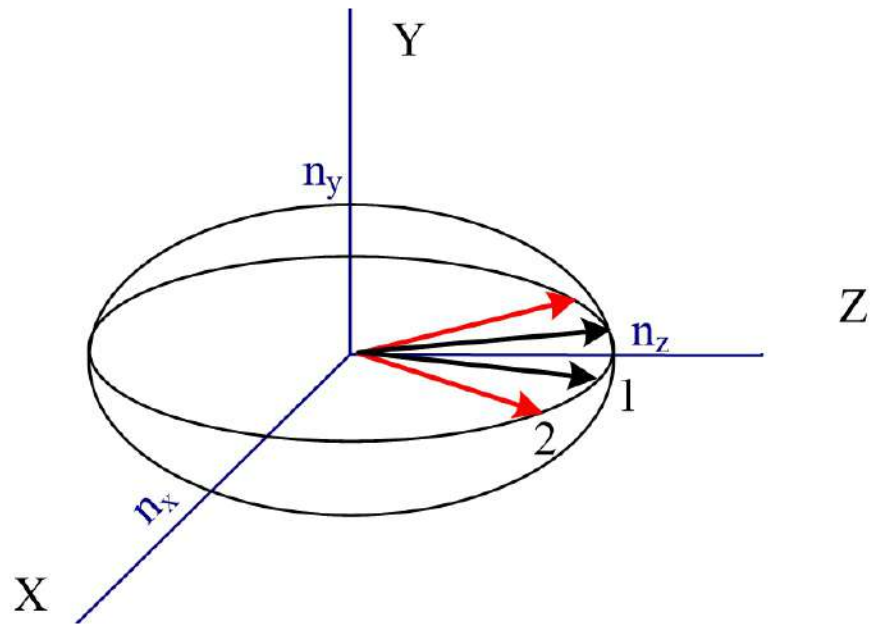


Рисунок 2.17 – Изменение положения ОО (изменения начального угла между ОО и осью Z) при увеличении радиуса изгиба.

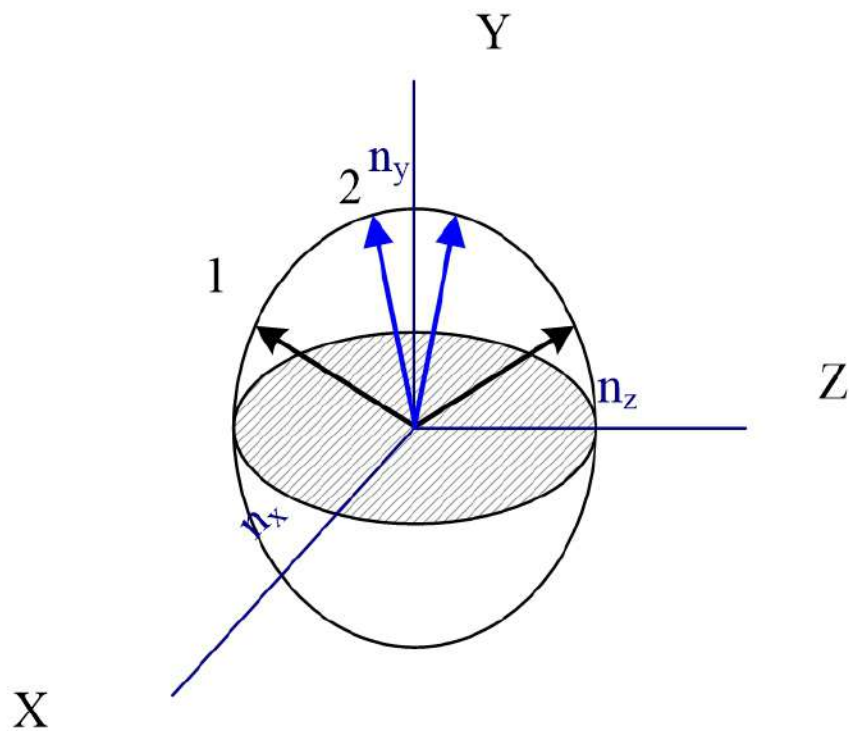


Рисунок 2.18 – Изменение положения ОО (изменения конечного угла между ОО и осью Y) при увеличении радиуса изгиба.

Выводы по второй главе

На основе проведенных расчетов для модели деформационно изогнутого одномодового оптического волокна можно сделать следующие выводы:

1. Показатель преломления в направлении координатных осей неодинаков. Распространение света по изогнутому оптическому волокну происходит как по двухосному анизотропному кристаллу.
2. Найдены две точки, в которых свет распространяется по изогнутому волокну как по одноосному кристаллу.
3. Значения показателей преломления деформированного оптического волокна вдоль направлений координатных осей X , Y и Z соответствуют показателю преломления недеформированного волокна на расстояниях 0,14 мкм, 1 мкм и 6 мкм от центральной оси последнего соответственно. Значение показателя преломления в направлении координатной оси Z совпадал бы с показателем преломления сердечника недеформированного волокна, если бы отсутствовал резкий переход между показателями преломления сердечник-оболочка.
4. Разность координат точки 1 и точки 2 ($x_1 - x_2$) и ее значение относительно центральной оси волокна обратно пропорционально радиусу кривизны деформационного изгиба волокна.
5. Положение оптических осей изменяется в зависимости от осевого расстояния.
6. Показатель преломления искривленного оптического волокна отличается от аналогичного параметра невозмущенного состояния ($x_2 = 0$), что ведет к смещению положения пика распределения электромагнитного поля (см. рисунок 2.19). Следовательно, возникает изменение ориентации главного направления излучения в деформированном волокне. Возможно также боковое отклонение линии распространения сигнала, обусловленное нарушением ортогональности поверхности фронта волны относительно продольной оси оптического волокна.

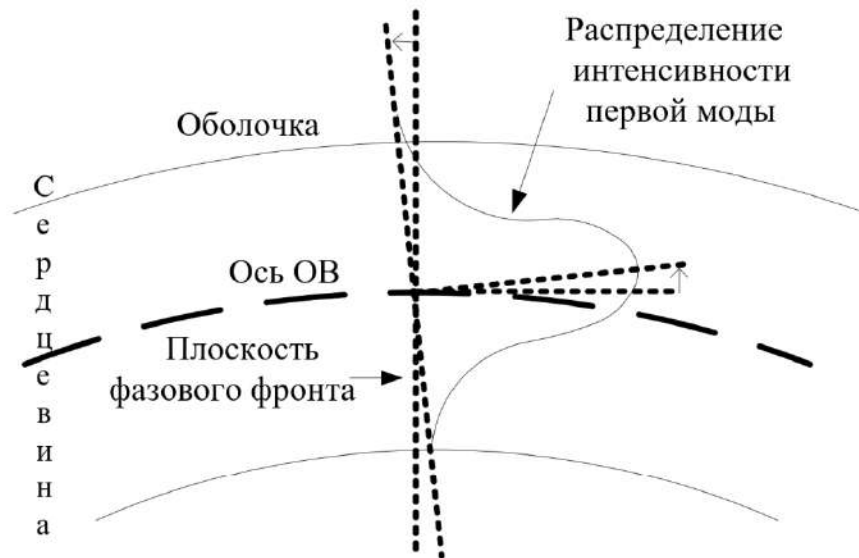


Рисунок 2.19 – Изменение диаграммы направленности при изгибе ОВ

7. Значение показателя преломления оптического волокна до изгиба и при деформации смещены $n = n_x$ относительно оптической оси на величину равную 0,128 мкм, таким образом, показатель преломления при деформации изгиба на оптической оси волокна будет составлять значение больше начального.

8. Полученное выражение, описывающее разность показателей преломления для двух взаимно перпендикулярных поляризаций, отличается от результатов, предложенных исследователями в работе [32]. Разность оказывается зависимой от конкретного значения координаты x и носит квадратичный характер.

9. Поскольку в одномодовом оптоволокне имеется продольная компонента электрического поля, деформация волоконной структуры сильно влияет на процессы распространения электромагнитных волн. Этот эффект остаётся неизменным, что связано с повышением значения показателя преломления деформированного волокна в направлении оси Z внутри сердцевинны, чем у недеформированного.

10. Зависимость поляризации излучения от направления осей анизотропии деформированного волокна приводит к ее изменению. Следовательно, использование изогнутого волокна в приборах управления поляризацией даёт возможность компенсировать флуктуации поляризации, характерные для устройств с четверть- и полуволновой фазовыми пластинками, ведь в последних разница путей прохождения лучей разных поляризаций намного превосходит длину световой волны.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА ВНУТРИ СЕРДЕЧНИКА ВОЛОКНА

3.1 Влияние относительного изменения показателя преломления сердечника одномодового оптического волокна на погрешность измерения его длины

Важнейшим фактором, существенно влияющим на свойства волоконно-оптической линии связи, выступает ее протяженность [14, 32, 56]. При изготовлении кабеля осуществляется прямые замеры длины изделия, сопровождающиеся разметкой специальными отметками для удобства использования.

Эксплуатация кабеля в реальных условиях осложняется проведением прямого измерения его протяженности. Аналогичная ситуация складывается и при поиске удалённости точки повреждения от края кабеля. Для решения указанных проблем используются не прямые методики оценки длины кабеля, включая рефлектометрию и локационные технологии [2, 32].

Работа таких методов базируется на анализе временных интервалов прохождения зондирующего импульса вдоль волоконно-оптического тракта в двух направлениях: прямом и обратном. Рассчитанные временные задержки позволяют определить расположение дефекта либо окончания кабеля согласно формуле:

$$l = \frac{ct}{2n}, \quad (3.1)$$

где n – показатель преломления сердечника оптоволокна,

t – время распространения импульса в обоих направлениях,

c – скорость света в вакууме.

При косвенном измерении длины оптического волокна, основанного на вычислениях величины фазового смещения низкочастотного гармонического сигнала, который накладывается на исходный сигнал с высокой частотой модуляции, важнейшими факторами, которые необходимо учитывать являются механические деформации и температурные воздействия на волокно [32]. Это связано с существенной разницей в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКР) кварцевого стекла ($0,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и полиэтилена ($2,0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$), что может привести к дефектам волокна в кабеле. Он заключается в удлинении волокна внутри кабеля. Для его устранения применяют два конструктивных решения.

Первая конструкция предполагает укладку оптического волокна свободным способом в модуль при повышенных температурах. После охлаждения кабеля волокно принимает извилистую конфигурацию.

Вторая же конструкция предусматривает спиральную навивку модулей с волокнами. Когда кабель остывает, волокна перемещаются ближе к центру, а при нагревании удаляются к периферическим слоям [4].

Независимо от выбранного варианта исполнения, наблюдается деформация оптического волокна, приводящая к изменениям показателя преломления кварца не только в результате колебаний температуры самого кабеля, но и благодаря дополнительным механическим факторам: изгибу (первая конструкция) либо скручиванию (вторая конструкция), индуцированным термическим расширением материалов.

Отметим, что исследования, подробно изучающие конструкцию волоконно-оптических кабелей [2, 11, 13, 57, 66, 77, 122], обходят стороной описание специфики деформации оптического волокна, приводящей к изменению значения основного параметра сердцевины волокна — показателя преломления.

Источники, освещающие вопросы по изменению показателя преломления веществ, из которых изготавливаются оптические волокна под воздействием температуры окружающей среды или механической деформации ка-

бея [32, 56, 123], не предоставляют исчерпывающих расчётов, позволяющих оценить точные характеристики оптико-волоконных кабелей при определённых режимах деформации.

Температурное изменение показателя преломления сердечника выглядит следующим образом:

$$\Delta n = \left[\left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_T + \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_R \right] \Delta T. \quad (3.2)$$

Выражение (3.2) содержит две составляющие. Рассмотрим каждую из них отдельно.

Первая рассмотрена в литературе. В источниках [32, 56, 123] представлены данные для нахождения составляющей изменения показателя преломления в зависимости от температуры: $\frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_T = 0,68 \cdot 10^{-5} C^{-1}$ для кварцевого стекла. Для оценки второй составляющей необходимо учитывать поведение волокна в кабеле.

Проведём анализ размещения оптического волокна в модуле первого типа конструкции кабеля. Изначально, при воздействии повышенной температуры, волокно располагается параллельно оси модуля, совпадающей с осью Z , образуя прямую линию вдоль своей длины. Однако, с постепенным уменьшением температуры окружающей среды, материал полиэтиленовых оболочек, окружающих волокно, испытывает процесс сокращения, постепенно уплотняясь и сжимаясь.

Температурный коэффициент расширения (ТКР) кварцевого волокна, составляющего основу оптического элемента, в сравнении с ТКР полиэтиленовых оболочек меньше последнего примерно в 333 раза. Благодаря этому, волокно сохраняет свою исходную геометрическую протяжённость даже при изменениях внешних условий. Но в связи с различием свойств материалов, сохраняется тенденция к образованию изгиба волокна в произвольных плоскостях, проходящих через центральную ось модуля (см. рисунок 3.1).

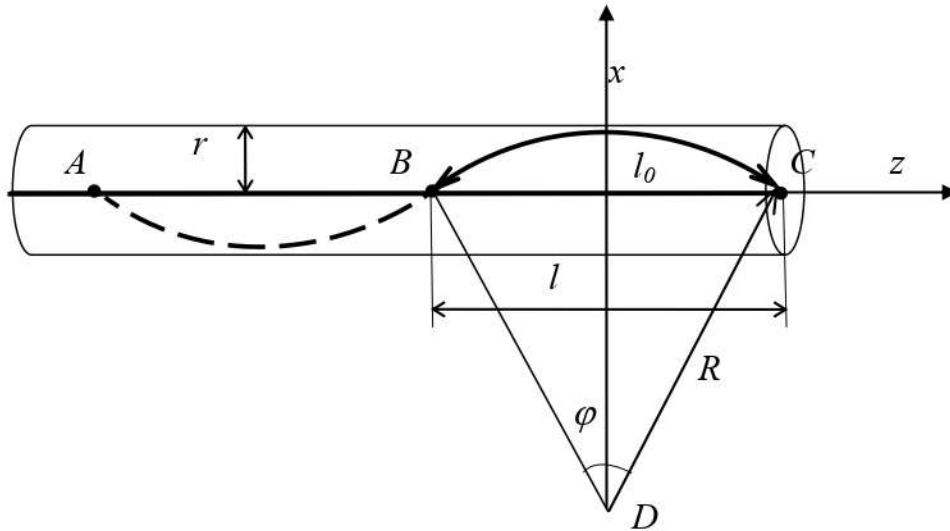


Рисунок 3.1 – Положение волокна в модуле в сжатом и растянутом состоянии.

Допустим, что оптическое волокно в изогнутом положении образует сегменты окружностей средней кривизны радиуса R уложенные внутри модуля с внутренним радиусом r . Радиус кривизны дуги изгиба можно найти, воспользовавшись выражением:

$$R = \frac{r}{(1 - \cos \frac{\phi}{2})}, \quad (3.3)$$

где ϕ – угол, опирающийся на дугу BC .

Угол ϕ связан с относительным удлинением оптического волокна следующей формулой:

$$\delta l = \frac{l_0 - l}{l_0} = 1 - \frac{2}{\phi} \sin \frac{\phi}{2}, \quad (3.4)$$

где l_0 – длина OB ,

l – длина хорды BC .

Основываясь на физическом анализе ситуации (деформации волокна в кабеле являются незначительными), используем разложение функций $\sin(\phi/2)$ и $\cos(\phi/2)$ в степенной ряд по ϕ до ϕ^3 включительно. На основании этого найдем радиус кривизны дуги

$$R = \frac{r}{3\delta l}. \quad (3.5)$$

Величина относительного удлинения в соответствии с законами теплового расширения будет выражена следующим образом:

$$\delta l = \beta(T - T_0), \quad (3.6)$$

где β – температурный коэффициент линейного расширения (полиэтилена), T_0 – условная температура, при которой длина ОВ равнялась бы длине модуля.

Подставив выражение (3.6) в (3.5) и взяв производную по температуре, получим

$$\frac{\partial R}{\partial T} = \frac{r}{3\beta(T - T_0)^2}. \quad (3.7)$$

Зависимость показателя преломления по сечению изогнутого ОВ является достаточно сложной и несколько зависит от поляризации света [15, 32, 56].

Для света с направлением электрического вектора по оси X n_x выглядит следующим образом:

$$n_x = n + n^3 \left[\left(\frac{p_{11}}{2} - \mu p_{12} \right) \frac{a^2 - x^2}{2R^2} + (\mu p_{11} + \mu p_{12} - p_{12}) \frac{x}{2R} \right]. \quad (3.8)$$

При направлении электрического вектора света вдоль оси Y , (см. рисунок 3.1) перпендикулярной плоскости рисунка, n_y выражается:

$$n_y = n + n^3 \left\{ [p_{12} - (p_{11} + p_{12})\mu] \frac{a^2 - x^2}{4R^2} + (\mu p_{11} + \mu p_{12} - p_{12}) \frac{x}{2R} \right\}. \quad (3.9)$$

В выражениях (3.8) и (3.9) n – показатель преломления оптоволокна при оптимальных условиях эксплуатации, p_{11} и p_{12} – коэффициенты Поггеля для фотоупругости, μ – коэффициент Пуассона, a – радиус сердечника во-

локна, принимаемый за радиус поля моды, x – координата сечения ОВ, отсчитываемая от оси волокна вверх.

Средний по сечению показатель преломления для моды HE_{11x} можно вычислить на основе выражения:

$$n_{xcp} = \frac{\int_{-a}^a \int_{-\sqrt{a^2-x^2}}^{\sqrt{a^2-x^2}} n_x \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{a^2}\right) dy dx}{\int_{-a}^a \int_{-\sqrt{a^2-x^2}}^{\sqrt{a^2-x^2}} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{a^2}\right) dy dx} \cong \frac{\int_{-\infty}^{\infty} n_x \exp\left(-\frac{x^2}{a^2}\right) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{a^2}\right) dx}. \quad (3.10)$$

Подставив выражение (3.8) в (3.10) получим

$$n_{xcp} = n + \frac{n^3 a^2}{8R^2} (p_{11} - 2\mu p_{12}). \quad (3.11)$$

Получим n_{ycp} – средний показатель преломления сердцевинки волокна для моды HE_{11y} . Заменим в выражении (3.10) параметр n_x на n_y .

Аналогично n_{xcp} получим n_{ycp} подставив выражение (3.9) в (3.10).

$$n_{ycp} = n + \frac{n^3 a^2}{8R^2} [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})]. \quad (3.12)$$

Поскольку направление изгиба оптического волокна в модуле меняется хаотично, среднее значение показателя преломления представляется в следующем виде:

$$n_{cp} = \frac{n_{xcp} + n_{ycp}}{2} = n + \frac{n^3 a^2 [(1-\mu)(p_{11} + p_{12})/2 - \mu p_{12}]}{8R^2}. \quad (3.13)$$

На основании значений $p_{11} = 0,121$, $p_{12} = 0,270$, $\mu = 0,164$ [32, 56, 123] получим частную производную среднего показателя преломления сердечника волокна по радиусу изгиба

$$\frac{\partial n_{cp}}{\partial R} = -\frac{0,03n^3 a^2}{R^3}. \quad (3.14)$$

Вклад деформации в изменение показателя преломления сердцевины волокна выражается следующей формулой:

$$\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)_R = \frac{\partial n_{\text{ср}}}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial T} = 0,03 \frac{n^3 a^2}{R^2 (T_0 - T)}. \quad (3.15)$$

Все указанные результаты были получены аналитически с применением программного комплекса SKIM Mathcad.

Используя выражение (3.15) совместно с (2.5а-2.5б), реализованными средствами SKIM Mathcad, определена величина относительного изменения показателя преломления сердцевины оптического волокна, обусловленная деформациями изгиба, возникшими вследствие теплового расширения.

Величина данного изменения составляет значение порядка 10^{-5} [42].

Поскольку различные марки оптических волокон обладают разным диапазоном значений показателя преломления сердцевины, фактические отклонения варьируются в диапазоне $0,8 \cdot 10^{-5} - 1,0 \cdot 10^{-5}$.

Подставляя полученный результат в выражение (3.2) с учётом выражения (3.15), получаем итоговое изменение показателя преломления сердцевинны волокна различных марок, находящееся в границах $6,8 \cdot 10^{-5} - 7,0 \cdot 10^{-5}$.

Приведённые результаты дополняют и уточняют данные публикаций ([32, 56, 123]), поскольку включают в рассмотрение весь спектр факторов, влияющих на изменение показателя преломления.

3.2 Исследование влияния деформационного изменения показателя преломления волокна на возникновение поляризационных явлений

Деформация одномодового световода вызывает не только изменение показателя преломления сердечника (иллюстрация представлена на рисунке 2.1), но также формирует пространственно-зависимую структуру показателя преломления в поперечном сечении изгибающейся траектории волокна. Эта

структура определяется координатами относительно оси, проходящей через центр кривизны: она зависит как от направления, перпендикулярного центру окружности (ось X), так и от направления, параллельного ей (ось Y).

Модель деформации изгиба одномодового оптоволокна подробно изложена в главе 2.

Вычислив частные производные по заданным координатам, найдём уравнения, характеризующие распределение градиентов коэффициента преломления следующим образом:

$$\frac{dn_x}{dx} = \frac{n^3\mu}{2R} \left[\frac{x}{R} \left(2p_{12} - \frac{p_{11}}{\mu} \right) + p_{11} + p_{12} - \frac{p_{12}}{\mu} \right], \quad (3.16)$$

$$\frac{dn_y}{dx} = \frac{n^3\mu}{2R} \left[\frac{x}{R} \left(p_{11} - \frac{p_{12}}{\mu} + p_{12} \right) + p_{11} + p_{12} - \frac{p_{12}}{\mu} \right], \quad (3.17)$$

где n – показатель преломления невозмущенной среды;

μ – коэффициент Пуассона для плавленого кварца;

R – радиус окружности ОВ, взятый по оси сердечника;

p_{11} и p_{12} – коэффициенты Поггеля для плавленого кварца [32, 56].

Градиент показателя преломления в направлении оси X обуславливает формирование волнообразной траектории нормали к фронту волны, обладающей специфической величиной кривизны, выраженной в виде соответствующего вектора.

$$\mathbf{N}_{x,y} = \frac{R_{0x,y}}{R_{0x,y}^2} = \mathbf{grad} \ln n_{x,y} = \frac{n_{x,y}}{\mathbf{grad} n_{x,y}}, \quad (3.18)$$

где $R_{0x,y}$ – радиус кривизны пути распространения луча, имеющего поляризацию параллельно плоскости деформации (направление X) и ортогонально ей (направление Y).

Под «траекторией нормали» будем подразумевать совокупность исходных точек нормалей, проведенных к волновому фронту.

Согласно выражениям (3.16) – (3.18) – направление векторов и радиусов кривизны траекторий одинаковое для каждой разновидности поляриза-

ции и направлено в сторону повышения значения показателя преломления материала. В центральной части сердцевины волоконного элемента радиусы кривизны равнозначны независимо от типа поляризационной моды, тогда как по мере удаления от оси волокна расхождение значений радиусов возрастает. Так, при фиксированном радиусе закручивания волокна $R = 10$ мм и приведенных ранее характеристиках материала радиусы кривизны нормальных траекторий волн различной поляризации могут быть представлены следующими соотношениями:

$$R_{0x} = \begin{cases} 4,4725R = 44,725 \text{ мм, при } x = 0, \\ \frac{R^2}{1,41 \cdot 10^{-7} + 0,224R} = 44,722 \text{ мм, при } x = 0,004 \text{ мм,} \\ \frac{R^2}{-1,41 \cdot 10^{-7} + 0,224R} = 44,727 \text{ мм, при } x = -0,004 \cdot \text{ мм,} \end{cases}, \quad (3.19)$$

$$R_{0y} = \begin{cases} 4,4725R = 44,725 \text{ мм, при } x = 0, \\ \frac{R^2}{8,93 \cdot 10^{-7} + 0,224R} = 44,707 \text{ мм, при } x = 0,004 \text{ мм,} \\ \frac{R^2}{-8,93 \cdot 10^{-7} + 0,224R} = 44,742 \text{ мм, при } x = -0,004 \text{ мм.} \end{cases} \quad (3.20)$$

Графическое представление полученных выражений показано на рисунке 3.2.

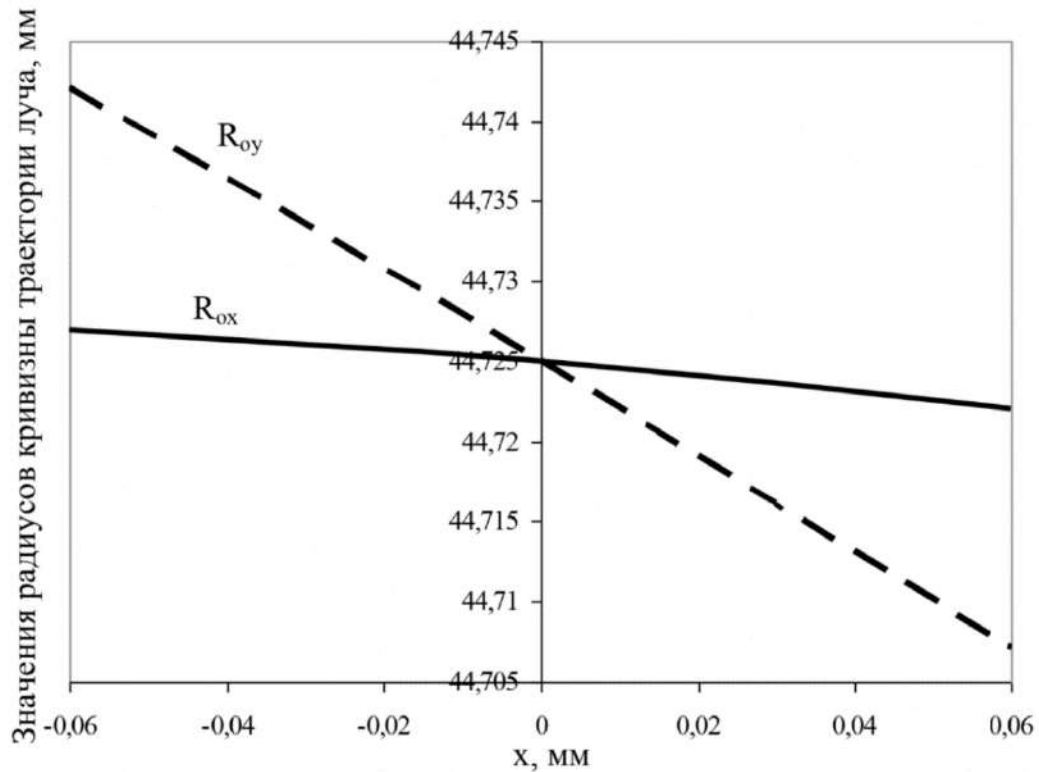


Рисунок 3.2 – Радиусы кривизны траекторий нормалей ортогональных поляризаций.

Форма волновода в зоне изгиба одномодового волокна способствует частичной коррекции отклонений в распространении электромагнитной волны. Если угол наклона световых лучей к границе раздела сердцевина-оболочка остается меньше предельно допустимого угла полного внутреннего отражения, энергия не покидает пределы волокна, а значит – потеря сигнала отсутствует. Для расчета указанного угла используется следующая формула:

$$\operatorname{tg} \frac{\phi_{\max}}{2 \frac{NA}{\sqrt{n^2 - NA^2} - nR/R_0}}, \quad (3.21)$$

где NA – числовая апертура оптоволокна.

Все полученные результаты найдены в символьной форме с применением компьютерного пакета систем компьютерной математики Mathcad.

В качестве примера проведем расчет значения подобного угла для ОВ типа TrueWave с ненулевой смещенной дисперсией. Параметры волокна: по-

казатели преломления сердцевины $n=1,4738$ и оболочки $n_{об}=1,4627$. В расчетах необходимо учитывать изменения показателя преломления сердцевины при изгибе оптического волокна (выражения (2.4) и (2.5)).

Числовую апертуру вычислим по формуле [2, 32, 123]:

$$NA = \sin \varphi = \sqrt{n^2 - n_{об}^2}. \quad (3.22)$$

Полученное расчетное значение для предложенных параметров волокна составляет $NA = 0,18$.

На основании выражения (3.21), с учетом результата, полученного по формуле (3.22) в СКИМ Mathcad установлено, существование некоторого предельного угла при изгибе, для которого характерно, что при любом радиусе изгиба потери сигнала в оптоволокне будут отсутствовать, если деформация ОВ осуществляется в линейной области. Расчетное значение такого угла с учетом заданных условий составляет φ_{max} , которое зависит от значений показателей преломления сердечника и оболочки оптического волокна. Последние же меняют свои значения под действием деформации и температурной деформации.

Таким образом, на основании полученных данных можно говорить о том, что превышение максимального угла изгиба ведет к потере излучения при любом радиусе изгиба волокна.

Выводы по третьей главе

В результате исследования влияние деформационного изменения показателя преломления на параметры ООВ и распространение света внутри сердечника оптического волокна можно сделать следующие выводы.

1 Воздействие температуры на оптическое волокно приводит к возникновению деформации изгиба волокна или температурной деформации.

2 Установлено количественное значение относительного изменения показателя преломления сердечника оптического волокна, вызванного механическими воздействиями изгиба, обусловленные термическим расширением. Величина указанного изменения составляет значение порядка 10^{-5} .

3 С учетом влияния дополнительных изменений определено, что изменение показателя преломления сердечника для ОВ различных марок лежит в пределах $6,8 \cdot 10^{-5} - 7,0 \cdot 10^{-5}$.

4 Анализ полученных изменений показателя преломления вследствие изгиба позволяет скорректировать ошибку измерений, выполняемых методом рефлектометрии, в волоконно-оптических линиях. Данная ошибка находится в пределах от 0,0045% до 0,005%, рассчитанных на единицу строительной длины. (Строительная длина – без дополнительного оборудования от 10 км до 100 км. Может составлять значение до 5 м).

5 Установлено, что искривление траектории распространения света на изогнутом участке оптического волокна частично компенсируется искажения формы волновода при деформации. Следовательно, если угол падения световых лучей на границу раздела сердцевина-оболочка не превышает критическое значение, обеспечивающее полное внутреннее отражение, утечки энергии не произойдёт, а значит ослабление сигнала по данной причине исключено.

6 Исследования позволили выявить максимально допустимый угол отклонения волокна, при котором сохраняется отсутствие потерь сигнала вне зависимости от величины радиуса изгиба, при условии, что материал волокна испытывает исключительно упругое растяжение в рамках линейного диапазона деформаций. При радиусе изгиба оптического волокна 10 мм найдены значения $NA = 0,18$ и ϕ°_{max} .

ГЛАВА 4 ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС

4.1 Описание алгоритма работы программного комплекса

Реализация программного комплекса для расчетов приращений показателей преломления и показателей преломления в направлении координатных осей (алгоритм описан в главе 2) осуществлялась согласно схеме действий, модернизированной для разработки и реализации программы на ЭВМ. Полученный алгоритм обеспечивает удобную работу пользователя с программой, позволяя быстро вводить нужные параметры, получать наглядные результаты, сохранять и обрабатывать их удобным способом.

Рассмотрим общую схему работы программного комплекса.

1. Запуск приложения.

Окно программы инициализируется и загружается главный экран.

Происходит создание необходимых элементов и установка начальных значений.

2. Ввод данных пользователем.

Пользователь вводит различные параметры в специальные поля интерфейса:

- показатель преломления сердечника волоконно-оптического кабеля;
- диаметр оптоволокна;
- радиус изгиба волокна;
- шаг вычислений;
- координата начала и конца диапазона измерений.

3. Обработка ввода.

После изменения полей вызывается событие `Input_TextChanged`. Программа проверяет правильность введенных данных, преобразуя их в числовой формат и записывает.

4. Расчёт данных.

Пользователем выбирается модель расчёта: классическая или уточненная.

Согласно выбранной модели вызывается соответствующий расчётный модуль. Каждый из модулей выполняет математическое моделирование распределения значений показателей преломления в волокне согласно своей модели.

5. Отображение результатов.

При отображении полученных результатов происходит следующий порядок действий:

- таблица с расчётными значениями добавляется в сетку;
- строится график с линиями изменения показателей преломления вдоль осей;
- дополнительно генерируются специальные графики пересечений и тенденций.

6. Сохранение результатов.

При «Сохранении» пользователь может экспортировать элементы:

- основной график;
- таблица данных;
- график пересечений;
- график тенденций.

При этом файлы сохраняются в формате PDF, PNG или JPEG.

7. Дополнительные возможности.

В программный комплекс внедрена возможность использования нескольких методов обработки полученных результатов на основе регрессионного анализа (применение аппроксимирующих и интерполирующих функций).

Рассмотрим некоторые детали основных этапов работы программного комплекса.

1. Инициализация окна и создание структуры данных.

- При создании главного окна создается набор колоночных заголовков для таблицы данных, после чего назначаются обработчики событий.
- Структура данных представляет собой словарь списков, где ключи соответствуют различным видам пересечений, а списки содержат равнозначные элементы.

2. Расчёт и обновления графиков.

Процедура DrawScheduleAndTable() отвечает за формирование модели графика и заполнение таблицы.

- Происходит чтение входные данные, создается экземпляр класса UserInput, проверяется корректность введенных значений.
- Объект передается в соответствующую теорию расчёта (классическую или уточненную).
- По окончании расчетов – данные поступают обратно, происходит обновление графиков и таблицы.

3. Работа с файлами и экспорт.

Экспорт осуществляется путём открытия диалогового окна сохранения файла, выбора формата и последующей передачи пути и имени файла соответствующему методу экспорта.

4.2 Описание структуры программного комплекса

Программный комплекс для моделирования (ПКМ) влияния деформации оптического волокна на показатель преломления сердечник-оболочка, реализован на языке C# (программа), XAML (интерфейс) и может применяться для расчетов параметров оптического волокна и их визуализации при моделировании процесса эксплуатации оптического волокна [8, 49].

Программный комплекс обеспечивает выполнение следующих функций:

- ввод начальных данных, включающий показатель преломления сердцевины, радиус и диаметр волокна, величину шага вычислений, начальную и конечную точку по координате x , в зависимости от марки волокна;
- выбор алгоритма для моделирования характеристик оптического волокна;

- вычисление величин показателя преломления для изогнутого волокна в каждом из направлений координатных осей внутри сердцевины;
- визуализация численных результатов в форме таблиц и графиков;
- определение ключевых точек, соответствующих смене режима напряжения изогнутого одномодового волокна с двуосного («кристаллическое») на одноосное состояние и обратно;
- получение значений отдельных точек графика в специальном окне по наведению мыши на соответствующую точку;
- вывод значений точек пересечения графиков и добавление в отдельную таблицу;
- представление точек перехода в графическом виде в отдельном окне;
- сохранение графика результатов в форматах pdf, png и jpg;
- сохранение таблицы расчетных значений в форматах pdf и xlsx;
- уточнение координат точки графика и вывод их в отдельном окне;
- возможность изменения названия графика и осей;
- регрессионный анализ точек перехода, представленный в графическом виде;
- сброс результатов численного моделирования;
- вывод ошибок при их возникновении.

Отдельно реализуется подсистема трехмерного построения процесса деформации оптического волокна, для визуализации изгиба оптического волокна, с возможностью изменения радиуса, угла изгиба и угла разреза.

Программный комплекс содержит следующие модули и подсистемы: модуль графического интерфейса, модуль классической модели расчетов приращений показателей преломления и показателей преломления в направлении координатных осей, модуль уточненной модели расчетов приращений

показателей преломления и показателей преломления в направлении координатных осей, модуль графической интерпретации полученных расчётных значений, модуль фиксации и построения точек перехода, модуль анализа, модуль графического представления регрессионного анализа точек перехода, подсистема трехмерной визуализации процесса деформации оптического волокна.

Процесс работы программного комплекса схематично представлен на рисунке 4.1.

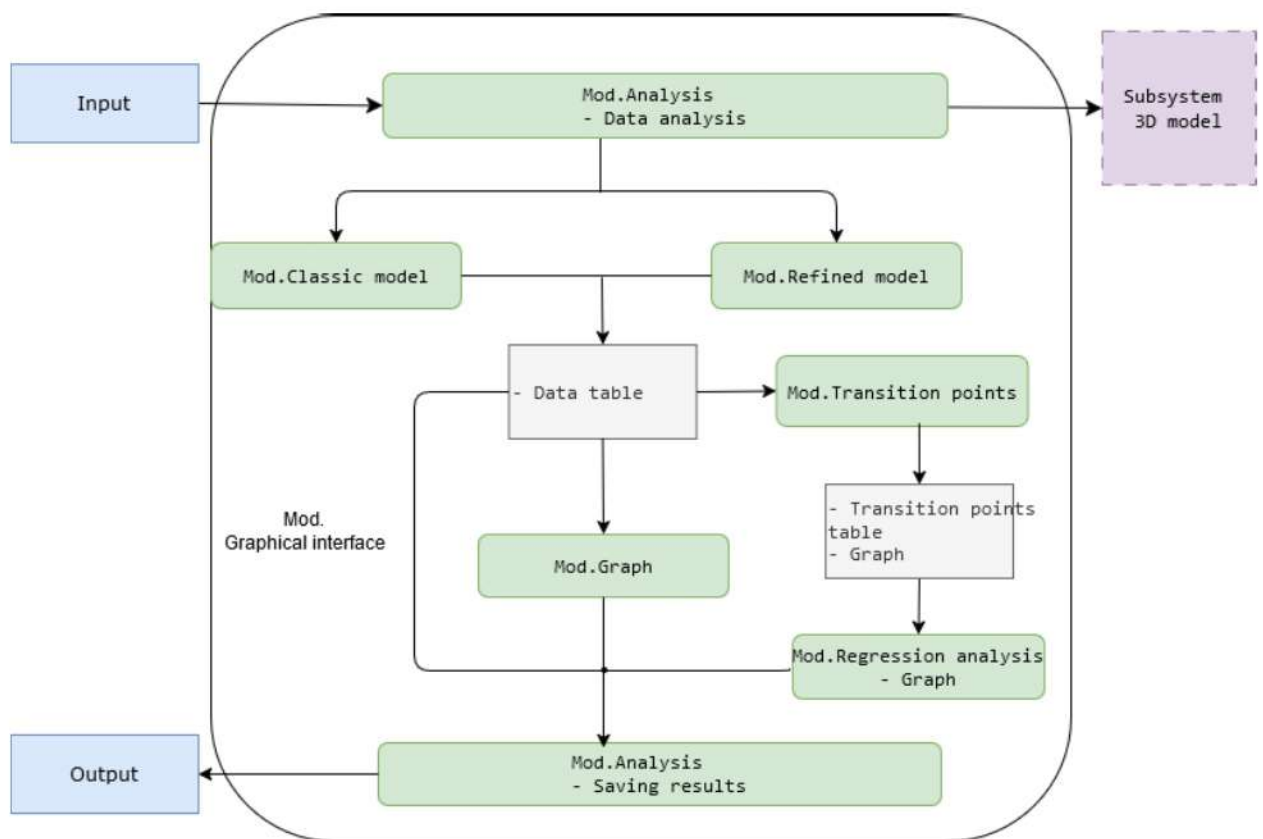


Рисунок 4.1 – Процесс работы программного комплекса.

Принципы разработки и реализации интерактивного графического интерфейса программного комплекса представлен в работах [8, 43, 46], а разработанный программный комплекс подтвержден свидетельством о регистрациях программ для ЭВМ [47, 50].

Основные элементы модуля графического интерфейса:

- основное меню;
- поля ввода значений физических характеристик оптического волокна, с поясняющими надписями;
- область данных, реализованных в табличной форме;
- область графической интерпретации данных вычислительного эксперимента, с возможностью получения координат, для конкретной точки по нажатию мыши на графике;
- кнопка расчета выбранной модели;
- кнопка добавления точек перехода в отдельную таблицу;
- кнопка 3D модели;
- кнопка для сброса результатов численного моделирования;
- первая область графика для отображения точек перехода;
- вторая область графика для изображения результатов аппроксимации и/или интерполяции;
- кнопка для сброса таблиц.

К исходным данным относятся: показатель преломления сердечника; диаметр волокна; радиус искривления оптического волокна; шаг вычисления; начальная и конечная координаты относительно центральной оси оптоволокна.

В качестве выходных данных приложение предоставляет таблицу расчетных значений показателей преломления деформированного волокна в направлении координатных осей внутри сердечника и в переходе сердечник-оболочка, график изменения показателей преломления изогнутого волокна внутри сердечника в переходе сердечник-оболочка в направлении координатных осей.

Для ввода физических характеристик созданы поля ввода начальных значений с поясняющими надписями (рисунок 4.2).

Введите показатель преломления сердечника:

Введите диаметр волокна:

Введите радиус оптического волокна:

Введите шаг вычислений:

Введите пределы координаты x :

Рисунок 4.2 – Поля ввода исходных данных.

Вывод полученных результатов моделирования осуществляется в виде таблиц. Для их создания, использовались элементы `DataGrid`, которым были определены права доступа, которыми будет обладать пользователь программного средства. Пример заполненной таблицы представлен на рисунке 4.3.

Модуль классически модели расчетов приращений показателей преломления и показателей преломления в направлении координатных осей и модуль уточненной модели реализуются на основе разработанной математической модели, подробно описанной в п. 2.1 и предоставляют пользователю организовать, полученные в ходе вычислительного эксперимента данные в виде таблицы со столбцами x , n_x , n_y , n_z .

Модуль графической интерпретации полученных расчётных значений, позволяет организовать данные в виде графиков с осями координат n и x . В модуле реализована возможность осуществлять вывод координат точки, на которую пользователь наводит и зажимает левую кнопку мыши, а так же производить изменения названия графика и осей путём нажатия правой кнопкой мыши на области графика и выбора пункта «название», «ось X » или «ось Y » соответственно.

x	n_x	n_y	n_z
-0.004	1.474484408	1.474619957	1.47406475
-0.0036	1.474418503	1.474554051	1.474054365
-0.0032	1.474352597	1.474488146	1.47404398
-0.0028	1.474286692	1.47442224	1.474033595
-0.0024	1.474220786	1.474356335	1.474023211
-0.002	1.474154881	1.474290429	1.474012826
-0.0016	1.474088975	1.474224524	1.474002441
-0.0012	1.47402307	1.474158618	1.473992056
-0.0008	1.473957164	1.474092713	1.473981672
-0.0004	1.473891259	1.474026807	1.473971287
0	1.473825353	1.473960902	1.473960902
0.0004	1.473759448	1.473894997	1.473950517
0.0008	1.473693543	1.473829091	1.473940132
0.0012	1.473627637	1.473763186	1.473929748
0.0016	1.473561732	1.47369728	1.473919363
0.002	1.473495826	1.473631375	1.473908978
0.0024	1.473429921	1.473565469	1.473898593
0.0028	1.473364015	1.473499564	1.473888209
0.0032	1.47329811	1.473433658	1.473877824
0.0036	1.473232204	1.473367753	1.473867439
0.004	1.473166299	1.473301847	1.473857054

Рисунок 4.3 – Таблица результатов расчета значений показателей преломления вдоль координатных осей.

Для создания модуля графической интерпретации полученных расчётных значений, использовалась библиотека OxyPlot, в частности элемент PlotView, который будет производить построение графика по заданным точкам.

Особенностью графика в ПКМ является меню, которое вызывается при нажатии правой кнопки мыши. Для этого в элементе oxy:PlotView.ContentMenu, создано само меню, с помощью элемента ContentMenu и элемента MenuItem, позволяющего задавать пункты меню. Данные пункты нужны для изменения названия графика, осей X и Y . Программный код реализации графика приведён на рисунке 4.4.

```

<oxy:PlotView x:Name="OxyPlotSchedule" Background="White" Height="408" Width="450"
    HorizontalAlignment="Center" VerticalAlignment="Top" Margin="10,0,0,0">
    <oxy:PlotView.ContextMenu>
        <ContextMenu>
            <MenuItem Header="Название">
                <TextBox x:Name="InputScheduleTitle" Width="100" TextChanged="Input_TextChanged"></TextBox>
            </MenuItem>
            <MenuItem Header="Ось X">
                <TextBox x:Name="InputScheduleAxisX" Width="100" TextChanged="Input_TextChanged"></TextBox>
            </MenuItem>
            <MenuItem Header="Ось Y">
                <TextBox x:Name="InputScheduleAxisY" Width="100" TextChanged="Input_TextChanged"></TextBox>
            </MenuItem>
        </ContextMenu>
    </oxy:PlotView.ContextMenu>
</oxy:PlotView>

```

Рисунок 4.4 – Код графика и меню.

На рисунке 4.5 приведен пример результатов моделирования в виде графиков.

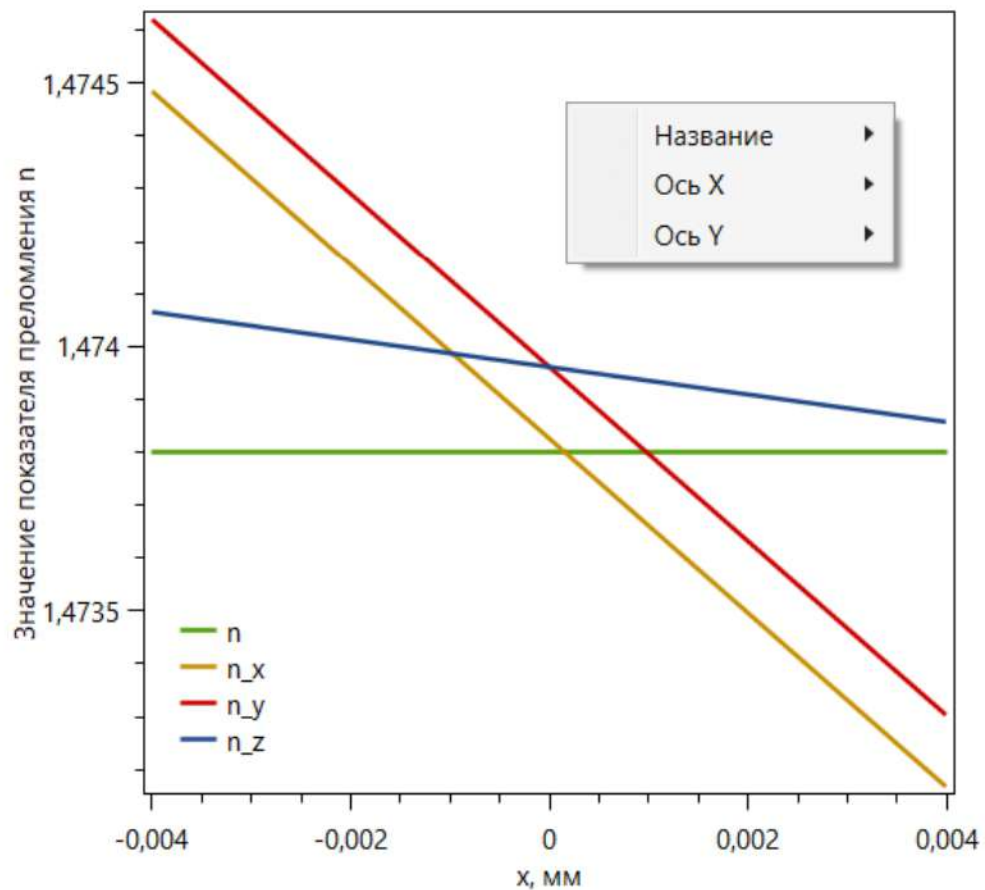


Рисунок 4.5 – Пример графика.

Основное меню содержит пункты, представленные далее.

- «Сохранение», позволяет производить сохранение полученных в ходе вычислительного эксперимента данных в виде таблиц и графиков, с выбором формата сохранения;
- «Модель», позволяет выбрать классическую или уточнённую расчетную модель деформации изгиба оптического волокна, обе модели подробно рассмотрены в п.2.1.;
- «Метод», позволяет осуществить аппроксимацию и/или интерполяцию точек перехода в графическом виде;
- «Справка», предоставляет пользователю возможность увидеть информацию о программе и ее функционировании.

Интерфейс программного комплекса представлен в приложении Б.

В результате исследования математической модели деформированного ОВ были найдены такие состояния, в которых волокно переходило из двухосного состояния кристалла в одноосное (см. рисунок 2.4). Для подобных состояний реализован модуль фиксации и построения точек перехода.

В данном модуле точки перехода изогнутого оптоволокна из двухосного состояния кристалла переходят в одноосное и наоборот. Это точки пересечения показателей преломления по трём координатам. Для нахождения таких точек, необходимо сравнивать значения показателей преломления на каждом шаге [125, 126]. Однако, возможна ситуация пересечения значений между шагами (см. рисунок 4.6), тогда существует большая вероятность потери данных точек перехода. Поэтому для нахождения всех точек пересечения, помимо основного сравнения результатов, необходимо нахождение точки пересечения векторов, которыми являются отрезки графиков.

Таким образом, для нахождения всех точек пересечения, также находятся точки пересечения векторов, которыми являются отрезки графиков. Для этого использовался метод структуры Dot (рисунок 4.7), при этом если точка не существует, то значения x и y будут равны -1 (рисунок 4.8).

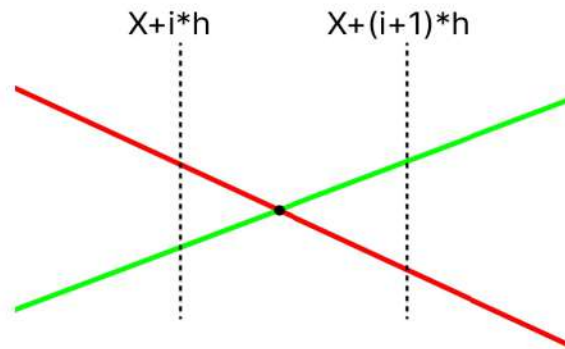


Рисунок 4.6 – Точка пересечения функций между шагами.

```
struct Dot
{
    Count: 8
    public double x { get; set; }
    Count: 8
    public double y { get; set; }
    Count: 8
    public static Dot CrossTwoLines(double x1, double y1, double x2, double y2, double x3, double y3, double x4, double y4)...
```

Рисунок 4.7 – Код структуры Dot.

```
public static Dot CrossTwoLines(double x1, double y1, double x2, double y2, double x3, double y3, double x4, double y4)
{
    double n;
    Dot resultDot = new Dot();
    if (y2 - y1 != 0)
    { // a(y)
        double q = (x2 - x1) / (y1 - y2);
        double sn = (x3 - x4) + (y3 - y4) * q;
        if (sn == 0)
        {
            resultDot.x = -1;
            resultDot.y = -1;
            return resultDot;
        } // c(x) + c(y)*q
        double fn = (x3 - x1) + (y3 - y1) * q; // b(x) + b(y)*q
        n = fn / sn;
    }
    else
    {
        if (y3 - y4 == 0)
        {
            resultDot.x = -1; // b(y)
            resultDot.y = -1;
            return resultDot;
        }
        n = (y3 - y1) / (y3 - y4); // c(y)/b(y)
    }
    resultDot.x = x3 + (x4 - x3) * n; // x3 + (-b(x))*n
    resultDot.y = Math.Round(y3 + (y4 - y3) * n, 9); // y3 + (-b(y))*n
    return resultDot;
}
```

Рисунок 4.8 – Код функции для нахождения точек пересечения векторов.

Расчёт данных таблицы и графика.

При вводе или изменении данных в полях ввода, запускается метод DrawScheduleAndTable. Работа данного метода осуществляется следующим образом:

- в начала преобразуются все введённые данные в числа с плавающей запятой;
- после этого задаются названия графика и осей (если название осей пустое, то используются названия по умолчанию – «х, мм» и «Значение показателя преломления n» для осей x и y соответственно);
- создаётся переменная data типа Data, в которую будет записываться ответ метода расчетов таблиц;
- если номер модели равен 1, вызывается классическая модель, иначе уточнённая.

Полученные данные передаются для заполнения таблицы и отрисовки графика. Для графика в атрибут Model передаётся атрибут scheduleModel переменной data, для основной таблицы атрибут itemSourceTable, для таблицы перехода состояний equalsElements. Код метода представлен на рисунке 4.9.

```
double b = System.Convert.ToDouble(Input_2b.Text) / 2;
double h = System.Convert.ToDouble(Input_h.Text);
double n = System.Convert.ToDouble(Input_n.Text);
double R = System.Convert.ToDouble(Input_R.Text);
double x_start = System.Convert.ToDouble(Input_x_start.Text);
double x_end = System.Convert.ToDouble(Input_x_end.Text);

string title = InputScheduleTitle.Text;
string titleAxisX = InputScheduleAxisX.Text;
string titleAxisY = InputScheduleAxisY.Text;

if (titleAxisX == "") titleAxisX = DefaultTitleAxisX;
if (titleAxisY == "") titleAxisY = DefaultTitleAxisY;

Data data;
data = model_number == 1 ?
    ClassicalTheory.Calculating(b, h, n, R, x_start, x_end, title, titleAxisX, titleAxisY) :
    DopTheory.Calculating(b, h, n, R, x_start, x_end, title, titleAxisX, titleAxisY);

OxyPlotSchedule.Model = data.scheduleModel;
Table.ItemsSource = data.itemSourceTable;
EqualsTable.ItemsSource = data.equalsElements;
```

Рисунок 4.9 – Код метода DrawScheduleAndTable.

Рассмотрим структуру данных Data (см. рисунок 4.10). Она содержит три атрибута `itemSourceTable` (для отрисовки таблицы), `sheduleModel` (для создания оформленного графика), `equalsElements` (список элементов типа `EqualElements`).

```
public struct Data
{
    Ссылка 3
    public List<List<double>> itemsSourceTable { get; set; }
    Ссылка 3
    public OxyPlot.PlotModel sheduleModel { get; set; }
    Ссылка 3
    public List<EqualElements> equalsElements { get; set; }
}
```

Рисунок 4.10 – Код структуры Dot.

Структура `EqualElements` необходима для хранения точек пересечения показателей преломления, поэтому содержит поля `x`, `n_value` с координатами и строковые поля `first` и `second`, которые хранят названия графиков пересечения. Например, если пересекается показатель преломления в направлении координаты x и показатель преломления в направлении координаты y , то поле `first` будет равно «`n_x`», а поле `second` равно «`n_y`». Строковое поле `cross` необходимо для заполнения таблицы точек перехода, которая хранит информацию объединённых полей `first`, `second`. Для заданного примера оно будет равно «`n_x/n_y`». Также для данной структуры перегружены операторы равно и не равно, что является необходимым условием для выбора только уникальных точек без повторений (см. рисунок 4.11).

```

public struct EqualElements
{
    Ссылка 18
    public double x { get; set; }
    Ссылка 14
    public double n_value { get; set; }
    Ссылка 16
    public string first { get; set; }
    Ссылка 16
    public string second { get; set; }
    Ссылка 2
    public string cross { get; set; }

    Ссылка 1
    public static bool operator ==(EqualElements f, EqualElements s)
    {
        return (f.x == s.x && f.n_value == s.n_value && f.first == s.first && f.second == s.second);
    }

    Ссылка 0
    public static bool operator !=(EqualElements f, EqualElements s)
    {
        return !(f == s);
    }
}

```

Рисунок 4.11 – Код структуры EqualElements

Модуль анализа позволяет контролировать следующие ошибки:

- ввод неправильных значений в поля ввода;
- попытка сохранения таблицы без её создания;
- попытка сохранения графика без его создания.

Окна, предупреждающие об ошибке – отдельные окна с текстом, в которых указано, почему произошла ошибка и что нужно сделать для исправления. Код ошибок содержит элемент Label, в атрибут Content которого помещается текст ошибки. Пример кода окна ошибки приведен на рисунке 4.12, пример окна ошибки представлен на рисунке 4.13.

```

<Label Content="Чтобы сохранить таблицу, сначала нужно её&#xA;создать.&#xA;
Пожалуйста, введите нужные физические &#xA;характеристики.&#xD;
&#xA;А затем сохраняйте таблицу." HorizontalAlignment="Center"
Height="114" VerticalAlignment="Center" Width="280"/>

```

Рисунок 4.12 – Пример кода окна ошибки.

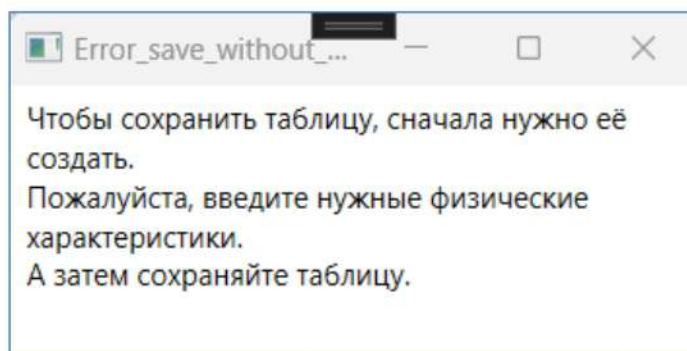


Рисунок 4.13 – Пример окна ошибки.

Окна справки и других обработанных ошибок создаются аналогично.

Реализация возможных ошибок в программном комплексе.

Проверка на правильность ввода данных происходит в методе DrawScheuleAndTable. Обработка осуществляется в два этапа, сначала проверяется возможность преобразования введённых данных в тип double. Если это возможно, то происходит создание таблицы результатов численного моделирования и графика, в противном случае наступает второй этап проверки.

В связи с тем, что при запуске программы все поля пустые происходит проверка на отсутствие записей в них.

Если существуют пустые поля, возвращать ошибку ну нужно, так как пользователь заполнит данные поля позже.

Если поля не пустые, следовательно, в них содержатся символы, которые могут вызвать ошибку (см. рисунок 4.14).

```

private void DrawScheduleAndTable()
{
    if (isCanConvertToDouble(Input_2b.Text) &&
        isCanConvertToDouble(Input_h.Text) &&
        isCanConvertToDouble(Input_n.Text) &&
        isCanConvertToDouble(Input_R.Text) &&
        isCanConvertToDouble(Input_x_start.Text) &&
        isCanConvertToDouble(Input_x_end.Text))...
    else if (
        Input_2b.Text != "" &&
        Input_h.Text != "" &&
        Input_n.Text != "" &&
        Input_R.Text != "" &&
        Input_x_start.Text != "" &&
        Input_x_end.Text != ""
    )
    {
        Error_input err_window = new Error_input();
        err_window.Show();
    }
}

```

Рисунок 4.14 – Обработка ошибки ввода данных.

Для ошибок, возникающих при сохранении таблицы и графика проверки осуществляются следующие проверки. Например, модель для графика не создана или таблица пуста, то выдается соответствующее окно с ошибкой. Код обработки ошибки сохранения графика представлен на рисунке 4.15, таблицы на рисунке 4.16.

```

if (OxyPlotSchedule.Model == null)
{
    Error_save_without_schedule err_window = new Error_save_without_schedule();
    err_window.Show();
}
else...

```

Рисунок 4.15 – Обработка ошибки сохранения графика.

```

if (Table.Items.OfType<List<double>>().ToList().ToList().Count == 0)
{
    Error_save_without_table err_window = new Error_save_without_table();
    err_window.Show();
}
else...

```

Рисунок 4.16 – Обработка ошибки сохранения таблицы.

Модуль графического представления регрессионного анализа точек перехода реализуется на основе классических методов аппроксимации (полиномом первой и второй степени) и интерполяции (полиномом Лагранжа). Теория данных методов подробно рассмотрена в литературе, описывающей численные методы, в частности [127-130].

Подсистема трехмерной визуализации процесса деформации оптического волокна, позволяющая визуализировать процесс изгиба оптического волокна и рассмотреть процесс детально.

Тестирование программного комплекса осуществлялось в два этапа: на первом этапе проходило выявление ошибок работы комплекса согласно спецификациям, на втором этапе проходило тестирование результатов численного моделирования путем сравнительного анализа с полученными результатами в ходе численного моделирования в СКИМ.

4.3 Создание 3D модели оптического волокна

Для реализации трехмерной модели уточним следующее – волокно можно представить набором окружностей, которые находятся на определённом расстоянии друг от друга, следовательно, необходимо найти центры для каждой окружности [131-133].

В ходе численного моделирования пользователь вводит радиус изгиба и угол изгиба. Вначале создаётся цилиндр с радиусом R , который, как и волокно состоит из соединённых окружностей. Центры этих окружностей это точки $(0; 0; z)$, где z лежит в промежутке $[-b; b]$, где b – радиус волокна. Затем волокно как бы ложится на цилиндр по дуге. Центры окружностей для волокна можно найти с помощью формулы окружности для осей X и Y , значение оси Z остаётся нулевой. Радиусом окружности является сумма R и b . Эти точки рассчитываются и добавляются в массив `positions`, который содержит все точки модели. Код расчёта центров окружностей при изгибе представлен на рисунке 4.17.

```
double rotation_x = (R + b) * Math.Cos(angle_for_wire);
double rotation_y = (R + b) * Math.Sin(angle_for_wire);

positions.Add(new Point3D(rotation_x, rotation_y, 0));
```

Рисунок 4.17 – Код расчёта центров окружностей при изгибе.

Каждая окружность состоит из 32 точек (сегментов), шаг для угла окружности составит $360 / 32$. Сама окружность строится по координатам y, z .

При деформации изгиба, изменение радиуса волокна происходит плавно. Для этого необходимо использовать функцию синуса, которая позволит иметь нулевое изменения при 0° и 180° и максимальное изменение при угле в 90° . Программный код реализации радиуса изгиба представлен на рисунке 4.18.

```
double r;
if (circle_angle < 3.1415) r = b * (1 - coeff_verx) * Math.Sin(circle_angle);
else r = b * coeff_verx * Math.Sin(circle_angle);

double r_for_perehod = b - Math.Sin(h_for_perehoda * angle_for_wire) * r;
```

Рисунок 4.18 – Программный код расчета радиуса изгиба.

Полный программный код расчёта точек окружности представлен на рисунке 4.19.

```
double rotation_x = (R + b) * Math.Cos(angle_for_wire);
double rotation_y = (R + b) * Math.Sin(angle_for_wire);

positions.Add(new Point3D(rotation_x, rotation_y, 0));
for (int j = 0; j < segments; j++)
{
    double circle_angle = j * angle_step;

    double r;
    if (circle_angle < 3.1415) r = b * (1 - coeff_verx) * Math.Sin(circle_angle);
    else r = b * coeff_verx * Math.Sin(circle_angle);

    double r_for_perehod = b - Math.Sin(h_for_perehoda * angle_for_wire) * r;

    double circle_x = 0;
    double circle_y = r_for_perehod * Math.Sin(circle_angle);
    double circle_z = r_for_perehod * Math.Cos(circle_angle);

    double after_rotation_x = Math.Cos(angle_for_rotation) * circle_x - Math.Sin(angle_for_rotation) * circle_y;
    double after_rotation_y = Math.Sin(angle_for_rotation) * circle_x + Math.Cos(angle_for_rotation) * circle_y;
    double after_rotation_z = circle_z;

    positions.Add(new Point3D(after_rotation_x + rotation_x, rotation_y + after_rotation_y, after_rotation_z));
}
```

Рисунок 4.19 – Полный программный код расчёта точек окружности.

Для создания текстуры модели используются треугольники, которые необходимо соединить с точкой на текущей окружности и двумя точками на следующей окружности, для чего создаётся массив `triangleIndices`, который будет содержать номера точек для соединения. Пример соединения точек представлен на рисунке 4.20.

```
triangleIndices.Add(segmentsOnEveryCircle * z_layer + i + 1);
triangleIndices.Add(segmentsOnEveryCircle * z_layer + i + 2);
triangleIndices.Add(segmentsOnEveryCircle * (z_layer + 1) + i + 2);
```

Рисунок 4.20 – Пример соединения точек.

Таким же способ создаются цилиндр (на которое волокно «ложиться» при изгибе) и продолжение волокна.

Для наглядного просмотра заданного угла изгиба созданы две плоскости, которые будут его образовывать.

Пример созданной 3D модели представлен на рисунке 4.21.

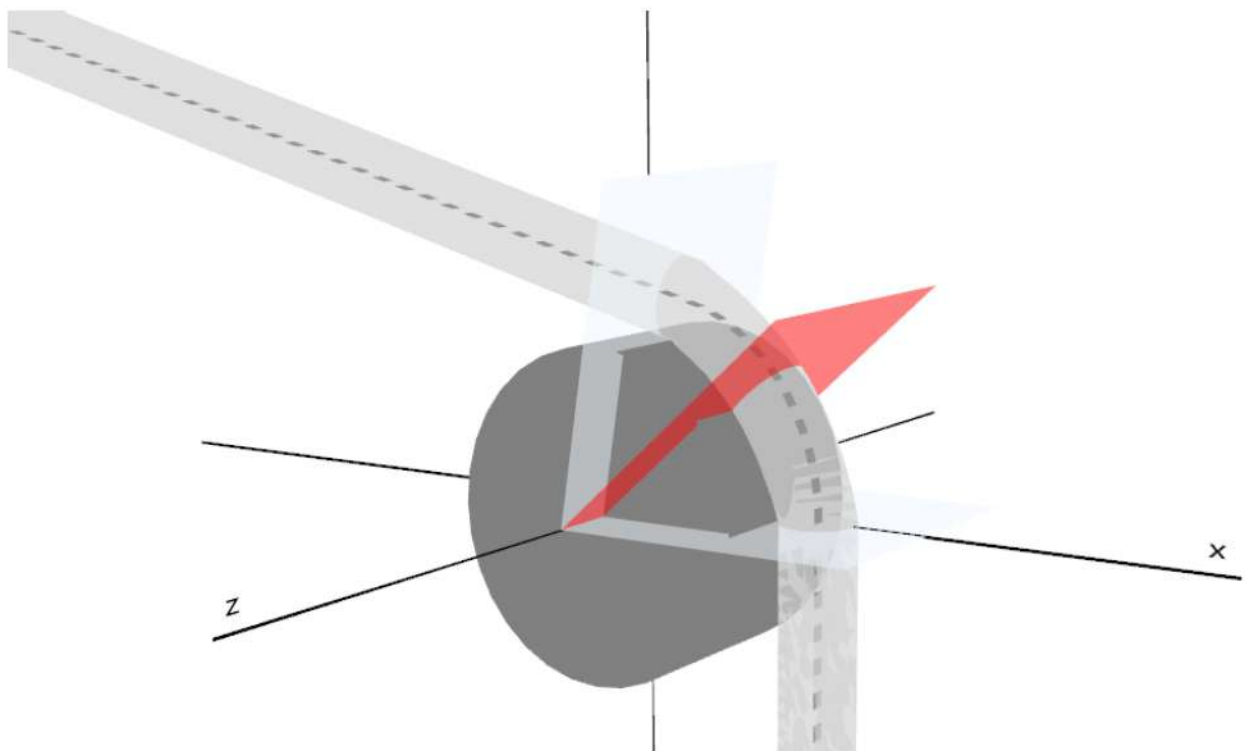


Рисунок 4.21 – Пример созданной 3D модели

Выводы по четвертой главе

Разработанный программный комплекс позволяет осуществлять ввод исходных данных; выбор модели расчетов параметров оптического волокна, представляет данные в табличном и графическом виде; вывод значения точек пересечения графиков в табличной форме. Дополнительно предоставляет возможность пользователю определять координаты точки графика по наведению мыши в специальном окне; выводить значения точек пересечения графиков, полученных в результате нескольких экспериментов моделирования, в виде отдельной таблицы; проводить графический регрессионный анализ полученных точек перехода; предоставляет возможность трехмерной визуализации процесса деформации изгиба оптического волокна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автором в ходе проведения исследования получены следующие результаты.

1 Получена уточненная математическая модель, описывающая процессы распространения света в деформированном одномодовом оптическом волокне. На базе модели разработаны вычислительные алгоритмы расчетов влияния деформации и температурной деформации на изменение показателя преломления оптического волокна, измерение длины волокна и максимального угла изгиба при котором потери в волокне будут отсутствовать.

2 Установлено, что оси показателя преломления для всех трех взаимно перпендикулярных направлений, в изогнутом волокне в одномодовом режиме, неодинаковы, таким образом оптическое волокно представляет собой двухосный кристалл, положение осей которого меняется в пространстве сложным образом.

3 При воздействии изгиба на одномодовое оптическое волокно в пределах сердечника появляется разность показателя преломления двух ортогональных составляющих изогнутого волокна. Полученная разность различна по краям и середине сердечника оптического волокна.

4 В ходе исследования математической модели найдены случаи, в которых распространение света по изогнутому волокну происходит как по одноосному кристаллу.

5 Согласно вычислительному эксперименту выявлено, что значения показателей преломления изогнутого волокна в направлении координатных осей X , Y и Z принимают значения больше значения показателя преломления недеформированного волокна, что приводит к сдвигу максимума поля моды.

6 Впервые показано влияние температуры на изменение оптической длины ОВ в волоконно-оптическом кабеле, вызывающее температурно-

деформационное изменение показателя преломления сердечника оптического волокна при изменении температуры.

7 Получено количественное значение относительного изменения показателя преломления сердечника одномодового оптического волокна, вызванное деформацией изгиба, возникающей за счет теплового расширения. Оно составляет величину порядка $\cdot 10^{-5}$.

8 Согласно полученным соотношениям температурных деформационных составляющих показателя преломления определено относительное изменение показателя преломления сердечника для волокна различных марок лежит в пределах $6,8 \cdot 10^{-5} - 7,0 \cdot 10^{-5}$. На основе полученных данных и в связи с использованием значения показателя преломления в рефлектометрических измерениях длины оптоволокна, можно уточнить погрешность метода измерения. Она составляет величину 0,0045% – 0,005% в зависимости от типа волокна (строительная длина без дополнительного оборудования лежит в пределах от 10 км до 100 км, погрешность может составлять значение до 5 м).

9 Определён наибольший допустимый угол изгиба, при котором потери сигнала отсутствуют независимо от радиуса кривизны, при условии, что деформация оптического волокна протекает в линейной области. Так при радиусе изгиба ОВ $R=10$ мм (согласно техническим характеристикам ООВ данный радиус изгиба не влечет возникновение потерь излучения в волокне) значение угла изгиба составит $\varphi_{max} = 56,88^\circ$. Однако увеличение угла изгиба влечет за собой затухание сигнала даже при заявленном радиусе изгиба.

Автор выражает благодарность научному руководителю Э. М. Вихтенко за помощь, активную поддержку и научное руководство.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Послание Президента РФ Федеральному Собранию от 29.02.2024 "Послание Президента Федеральному Собранию" // СПС КонсультантПлюс.
2. Коршунов, В. Н. Увеличение скорости передачи информации по оптическим кабелям / В. Н. Коршунов // Кабели и провода. – 2017. – № 1(362). – С. 16-19.
3. Вийюкусенге, О. Предельная скорость волоконно-оптической системы передачи / О. Вийюкусенге // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2019. – Т. 13, № 4. – С. 21-26.
4. Локтев, А. А. Модель повышения пропускной способности волоконно-оптической линии связи / А. А. Локтев, А. И. Воробьева // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – Т. 8, № 11. – С. 66-68.
5. **Резак, Е. В.** Моделирование влияния деформации изгиба в одномодовом оптическом волокне на показатель преломления сердечник-оболочка / **Е. В. Резак** // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2023. – №2. – С. 44-50.
6. Полная компенсация межмодовой дисперсии в оптических волокнах с эффектом Керра / С. А. Михнов, Р. В. Литвинов, Д. А. Конкин [и др.] // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2-2(22). – С. 147-151.
7. Зелютков, Е. А. Влияние хроматической дисперсии при выборе оптимальной длины регенерационного участка на волоконно-оптической линии связи : специальность 05.12.13 "Системы, сети и устройства телекоммуникаций" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Зелютков Евгений Александрович. – Москва, 2009. – 157 с.
8. **Резак, Е. В.** Программное средство для моделирования влияния деформации на параметры оптического волокна / **Е. В. Резак**, Ю. В. Карась // Инженерный вестник Дона, 2024, № 2. – Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/8998, (дата обращения: 15.05.2024).

9. Портнов, Э. Л. Новый подход в определении параметров передачи и влияния в оптических линиях телекоммуникаций / Э. Л. Портнов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Т. 10, № 5. – С. 60-63.
10. Measuring the focal length of a tapered fiber: experiment and modeling in the approximation of geometric optics / A. S. Pankov, D. P. Sokolchik, L. O. Zhukov [et al.] // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2023. – Vol. 16, No. S3.1. – P. 357-361.
11. Савин, Е. З. Совместное воздействие внешних факторов на подвесной волоконно-оптический кабель / Е. З. Савин, А. Н. Шевцов // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2023. – № 4(37). – С. 94-100.
12. Большаков, К. Э. Влияние температуры на оптические и структурные свойства оптических волокон / К. Э. Большаков, Н. И. Ильиных // Тенденции развития науки и образования. – 2019. – № 46-6. – С. 25-28.
13. Исследование влияния длительного воздействия повышенных и пониженных температур на оптические кабели и волокна / И. А. Овчинникова, Э. Я. Геча, А. Г. Корякин [и др.] // Кабели и провода. – 2022. – № 3(395). – С. 26-37.
14. Гуртов, В. А. Оптоэлектроника и волоконная оптика / В. А. Гуртов; ПетрГУ. – Петрозаводск: Изд во ПетрГУ, 2005. – 100 с.
15. Бейли, Д. Волоконная оптика : теория и практика : [перевод с английского] / Д. Бейли, Э. Райт ; Дэвид Бейли, Эдвин Райт. – Москва : КУДИЦ-Пресс, 2008. – 320 с.
16. Нешина, Е. Г. Волоконно-оптическая система контроля идентификации геотехнического состояния / Е. Г. Нешина / Дисс. канд. технич. наук. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. – 149 с.
17. Овчаренко, А. Б. Волоконно-оптические датчики деформаций и разрушений как элементы встроенных систем диагностики авиаконструкций / А. Б. Овчаренко, В. А. Трушин // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2008. – № 4(33). – С. 129-140.

18. Таранов, М. А. Волоконно-оптический низкокогерентный рэлеевский рефлектометр для распределенных измерений относительной деформации и температуры : специальность 01.04.03 Радиофизика: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Таранов Михаил Александрович, 2021. – 153 с.
19. Патент на полезную модель № 161075 U1 Российская Федерация, МПК G01B 11/16. волоконно-оптический сенсор распределения деформации: № 2015153985/28: заявл. 16.12.2015: опубл. 10.04.2016 / Б. В. Авдеев, И. М. Алексейчук; заявитель Закрытое акционерное общество «Фосенс».
20. Патент № 2213328 C2 Российская Федерация, МПК G01D 5/38, G01B 11/16, G01D 5/353. Система датчиков поперечной деформации на основе волоконно-оптических решеток : № 99107275/28 : заявл. 08.09.1997 : опубл. 27.09.2003 / Э. Удд ; заявитель БЛЮ РОУД РИСЕРЧ, ИНК.
21. Методы одновременного контроля деформации и температуры композитных конструкций волоконно-оптическими датчиками / М. Ю. Федотов, О. Н. Будадин, С. О. Козельская, В. С. Терентьев // Конструкции из композиционных материалов. – 2020. – № 2(158). – С. 44-51.
22. Микроструктурное оптическое grating-волокно для датчиков тока на основе эффекта Фарадея / Ю. К. Чаморовский, Н. И. Старостин, С. К. Моршнева [и др.] // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39, № 11. – С. 1074-1077.
23. Мильков, Ю. А. Эффект Фарадея в одномодовых волоконно-оптических световодах / Ю. А. Мильков, Е. З. Савин // Оптика-2003. Труды третьей международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2003». Санкт-Петербург, 20-23 октября 2003. / Под. ред. проф. С. А. Козлова. СПб: СПбГУ ИТМО. – 2003. – С. 367
24. Казакевич, М. С. Эффект Фарадея в волоконном световоде в ближней ИК-области спектра / М. С. Казакевич, А.Л. Дмитриев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2004. №15. – С. 84-87.

25. Богачков, И. В. Исследования влияния температуры на спектр бриллюэновского рассеяния и характеристики оптических волокон / И. В. Богачков // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 61-64.
26. Исследование влияния изменения относительного давления на величину Н-параметра двулучепреломляющего волокна / А. Мухтубаев, Д. К. Болотов, В. А. Шулепов, С. М. Аксарин // Сборник трудов XI Международной конференции "Фундаментальные проблемы оптики – 2019", Санкт-Петербург, 21–25 октября 2019 года / Под ред. С.А. Козлова. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2019. – С. 350-352.
27. Исследование дополнительных потерь оптической мощности, возникающих при механическом изгибе оптического волокна стандарта G.652 / А. Д. Мехтиев, А. Д. Алькина, Е. Г. Нешина [и др.] // Труды университета. – 2024. – № 2(95). – С. 402-409.
28. Лесникова, Ю. И. Анализ влияния двухслойного защитно-упрочняющего покрытия на деформационные и оптические характеристики волокна типа Panda / Ю. И. Лесникова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 49-61.
29. **Резак, Е. В.** Модель поведения деформированного оптического волокна / Е. В. Резак, С. Г. Панкратьева // Перспективы науки. – 2023. – № 7(166). – С. 81-84.
30. **Резак, Е. В.** Потери в оптическом волокне при изгибе / **Е. В. Резак** // Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика и химия. – 2009. – № 4. – С. 119-122.
31. **Резак, Е. В.** Моделирование влияния деформации и эффекта фотоупругости на изменение поведения излучения в оптическом волокне [Электронный ресурс] / **Е. В. Резак** // Вопросы устойчивого развития общества. – 2023. – № 5. С. 1-6. – Режим доступа: <https://adm.nauka20->

- 35.ru/Files/ArticleFiles/6cdcdfab-12b5-439d-81de-e0dbf00065d4.pdf (дата обращения: 15.05.2024).
32. Окоси, Т. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ. – Л., 1990. 256 с.
 33. Математическая модель неравномерной микромеханической деформации участка оптического волокна при осесимметричном поверхностном нагружении / И. Л. Борисенков, А. Ф. Федечев, Г. И. Леонович [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2019. – Т. 21, № 6. – С. 331-340.
 34. Математическая модель отраженного оптического сигнала при неоднородной продольной деформации внутриволоконной брэгговской решетки / И. Л. Борисенков, А. Ф. Крутов, Н. П. Козлов [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2020. – Т. 22, № 7. – С. 361-368.
 35. Кутенин, В. С. Моделирование многосердцевинного оптического волокна при помощи среды моделирования OptiBPM / В. С. Кутенин, Д. В. Кусайкин // Тенденции развития науки и образования. – 2019. – № 50-1. – С. 61-64.
 36. Старикова, В. А. Математическое моделирование распространения температурных полей при пробое оптического волокна / В. А. Старикова, А. В. Перминов // Математическое моделирование в естественных науках. – 2023. – Т. 1. – С. 307-309.
 37. Gisin, N. Polarization effects in optical fibers: measurement issues / N. Gisin // Proc. OFC 2002. paper Tul. 2002.
 38. Султанов, А. Х. Моделирование распространения WDM-сигналов в волоконно-оптической линии передачи в условиях нелинейностей и поляризационно-модовой дисперсии / А.Х. Султанов, В.Х. Багманов, Р.В. Кутлюяров, С. В. Харитонов // Вестник УГАТУ = Vestnik UGATU. 2012. №8 (53). – С. 20-25.
 39. **Резак, Е. В.** Дополнение к определению погрешности измерения длины оптического волокна / **Е. В. Резак** // Фотон-экспресс. – 2009. – № 6(78). – С. 136-137.

40. **Резак, Е. В.** Исследование математической модели изгиба оптического волокна / **Е. В. Резак** // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления : Материалы VII Международной научно-практической конференции, Хабаровск, 11–13 сентября 2023 года. – Хабаровск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, 2023. – С. 177-179.
41. **Резак, Е. В.** Моделирование возникновения явления оптической анизотропии на изгибе волоконного световода / **Е. В. Резак** // Математические методы и модели техники, технологий и экономики : материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции, Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2023. – С. 97-102.
42. **Резак, Е. В.** Учет погрешности измерения длины оптического волокна / **Е. В. Резак, М. Р. Прокопович** // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2008. – № 4(11). – С. 167-172.
43. Карась, Ю. В. Специфика программных средств для моделирования физических процессов / Ю. В. Карась, **Е. В. Резак** // Far East Math - 2023 : Материалы национальной научной конференции, Хабаровск, 04-09 декабря 2023 года. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2024. – С. 112-117.
44. **Резак, Е. В.** Математическое моделирование в волоконной оптике как возможность предварительного исследования поведения сигнала при условии внешнего и внутреннего воздействия на оптическое волокно / **Е. В. Резак** // Far East Math – 2023: Материалы национальной научной конференции, Хабаровск, 04–09 декабря 2023 года. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2024. – С. 28-33.
45. **Резак, Е. В.** Моделирование и расчет составляющих показателя преломления оптического световода с помощью компьютерного пакета систем компьютерной математики Mathcad / **Е. В. Резак** // Российская наука, ин-

- новации, образование – РОСННО-2023 : сборник научных статей по материалам Всероссийской научной конференции. – Красноярск: Общественное учреждение «Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений», 2023. – С. 72-75.
46. **Резак, Е. В.** Изменение распространения сигнала в зависимости от изгиба оптического волокна / **Е. В. Резак** // ТОГУ-Старт: фундаментальные и прикладные исследования молодых : Материалы научно-практической конференции, Хабаровск, 23–25 апреля 2020 года. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2020. – С. 39-43.
 47. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614652 Российская Федерация. Программа для моделирования влияния деформации оптического волокна на показатель преломления сердечник-оболочка : № 2024612706 : заявл. 12.02.2024 : опубл. 28.02.2024 / **Е. В. Резак**, Ю. В. Карась ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет».
 48. **Резак, Е. В.** Исследование математической модели оптического волокна при воздействии деформации изгиба, возникающей как результат влияния внешних и внутренних факторов / **Е. В. Резак** // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование : Материалы XXII Всероссийской научной конференции, Хабаровск, 30 сентября – 04 2024 года. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2024. – С. 41-46.
 49. **Резак, Е. В.** Программный модуль регрессионного анализа для моделирования и исследования влияния внешнего изгиба оптического волокна на показатель преломления перехода сердечник-оболочка / **Е. В. Резак**, Ю. В. Карась // Инженерный вестник Дона, 2025, № 5. – С. 1-8.
 50. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619354 Российская Федерация. Программный модуль регрессионного

анализа для моделирования влияния внешнего изгиба оптического волокна на показатель преломления сердечник-оболочка : заявл. 31.03.2025 : опубл. 15.04.2025 / **Е. В. Резак**, Ю. В. Карась ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет».

51. Баландин, Е. А. Волоконно-оптический гироскоп / Е. А. Баландин, Т. Н. Баландина // Современные техника и технологии : Сборник докладов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14–18 апреля 2014 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Том 1. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2014. – С. 67-68.
52. Инновационный потенциал Кольской науки / Рос. акад. наук, Кол. науч. центр ; [отв. редакторы: В. А. Маслобоев, Б. В. Ефимов]. - Апатиты : [Кол. науч. центр РАН], 2005 (Апатиты : Кольский науч. центр РАН). - 327 с. : ил., табл.; 27 см.; ISBN 5-88414-057-6 (В пер.).
53. Effect of anisotropy of a single-mode fibre on lightning-induced rotation of polarisation of a light signal in an optical ground wire / D. V. GorbatoV, V. A. Konyshchev, T. O. Lukinykh [et al.] // Quantum Electronics. – 2022. – Vol. 52, No. 1. – P. 87-93.
54. Ландсберг, Г. С. Оптика. Учебное пособие / Г. С. Ландсберг. – Москва : Физматлит, 2010. – 848 с. – ISBN 978-5-9221-0314-5.
55. Симонов, А. А. Исследование волоконно-оптических систем и создание на их основе оптических модулей и сенсоров: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 01.04.05 / Симонов Александр Алексеевич. – Ташкент, 2011. – 25 с.
56. Дмитриев, А. Л. Оптические системы передачи информации / Учебное пособие. / А. Л. Дмитриев/ – СПб: СПбГУИТМО, 2007. – 96 с.

57. Портнов, Э. Л. Принципы построения первичных сетей и оптические кабельные линии связи : учебное пособие / Э. Л. Портнов. — Москва : Горячая линия-Телеком, 2017.
58. Портнов Э. Л., Григорьян А. К. Поляризационная модовая дисперсия на волоконно-оптической линии передачи [Электронный ресурс] // Т-Comm. 2014. №9. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/polyarizatsionnaya-modovaya-dispersiya-na-volokonno-opticheskoy-linii-peredachi> (дата обращения: 05.01.2024).
59. Poole, C. D. Polarization effects in lightwave systems / C. D. Poole, J. Nagel, I. P. Kaminov, T. L. Koch // Optical Fiber Telecommunications IIIA, eds. (Academic press, San Diego, 1997). - p. 114.
60. Портнов, Э. Л. Влияние хроматической и поляризационной модовой дисперсий на дисперсионную длину под действием фазовой кросс-модуляции / Э. Л. Портнов, Ж. Рабенандрасана // Т-Comm. 2019. №9. — С. 17 - 21.
61. Волков, П. В. Диагностика дефектов анизотропии сохраняющих поляризацию оптических световодов / П. В. Волков, В. В. Иванов, В. А. Маркелов, М. А. Новиков, С. С. Уставшиков // Труды Научной конференции по радиофизике. ННГУ. —2005. —С 377-379.
62. Kim, J. An evaluation of polarization-dependent loss-characterization methods / J. Kim, R. Buerli // Lightwave, Vol.17, № 9, August 2000, p.156-162.
63. Гладышевский М. А. Искажение световых импульсов в волоконно-оптических линиях связи при комбинированном воздействии поляризационной модовой дисперсии и поляризационно-зависимых потерь. / Гладышевский М. А.// Материалы конференции «Оптические сети связи в России: наука и практика». — 2002. — С. 39.
64. Поляризационная модовая дисперсия. // LIGHTWAVE Russian Edition. — 2008. — №2. — С 21-22.

65. Гладышевский, М. А. Чем опасна поляризационная модовая дисперсия? / М. А. Гладышевский, Д. Д. Щербаткин // LIGHTWAVE russian edition. – 2004. – №4. – С 33-34.
66. Андреев, В.А. Испытания поляризационной модовой дисперсии оптических кабелей / В. А. Андреев, В. Б. Попов, М. В. Дашков, А. И. Вырыпаев, С. Г. Онищенко // Вестник связи. – 2002. – №10. – С 123-126.
67. Ищенко, Е. Ф. Поляризационная оптика / Е. Ф. Ищенко, А. Л. Соколов / М., Физматлит. – 2019. – 576 с.
68. Moller, Lothar. The residual polarization of coherent orthogonal channels for all-optical networking applications / Lothar Moller, Paul S. Westbrook, Robert E. Behringer // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2001. – V.13. – № 11. – P. 1251-1253.
69. Zhou, Y.; Ming, J.; Wang, L.; Wu, D.; Zhao, L.; Xiao, J. Optical Polarization Division Multiplexing Transmission System Based on Simplified Twin-SSB Modulation. *Sensors* 2022, 22, 7700.
70. Ivanovich, Darko, «Polarization Division Multiplexing for Optical Data Communications» (2019). McKelvey School of Engineering Theses & Dissertations. 474. URL: https://openscholarship.wustl.edu/eng_etds/474 (date of the application: 15.05.2023).
71. Алексеев, А. Н. Геометрия собственных мод оптического волокна с сильным двулучепреломлением / А. Н. Алексеев, А. В. Воляр, Т. А. Фадеева // Письма в Журнал технической физики. – 2005. – Т. 31, № 9. – С. 35-42.
72. Валюшина, П. М. Модель волоконно-оптического резонатора из одномодового волокна с учетом эффекта двулучепреломления / П. М. Валюшина, Д. Г. Гилев // Фотон-экспресс. – 2021. – № 6(174). – С. 367-368.
73. Митрохин, В. Е. Измерения в волоконно-оптических системах передачи : учебное пособие / В. Е. Митрохин. – Москва : , 2007. – 197 с.
74. Шумкова, Д. Б. Специальные волоконные световоды : учебное пособие / Д. Б. Шумкова, А. Е. Левченко. – Пермь : ПНИПУ, 2011. – 178 с.

75. Гончаренко, А.М., Основы теории оптических волноводов / А.М. Гончаренко, В.А. Карпенко Изд. М.: URSS. –2004. – 240 с.
76. Ермошкина, И. Г. Сопротивление материалов. Расчеты на прочность и жесткость при растяжении-сжатии и кручении / И. Г. Ермошкина, И. А. Харитонюк, Н. В. Лазько. – Москва : Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2022. – 75 с.
77. Акопов, С. Г. Одномодульные подвесные оптические кабели для широкополосных сетей доступа / С. Г. Акопов, Н. А. Васильев, Е. Б. Гаскевич // LIGHTWAVE russian edition, 2007. №3. №3. – С. 23-30.
78. Александров, А. В. Сопротивление материалов в 2 ч. Часть 1 : учебник и практикум для вузов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин ; под редакцией А. В. Александрова. – 9-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2025. – 293 с.
79. Работнов, Ю. Н. Сопротивление материалов / Ю. Н. Работнов. – М.: Ленанд, 2019 г., 456 с.
80. Биргер, И.А. Сопротивление материалов / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М.: Ленанд, 2015. – 560 с.
81. Беляев, Н. М. Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – М.: Изд-во Наука, 1976. – 608 с.
82. Бондаренко В. П. Потери на распространение света в изогнутых интегральных волноводах на основе окисленного пористого кремния / В. П. Бондаренко, А. А. Клышко, М. Балукани, А. Феррари // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – Вып. 6. – С 17-22.
83. Гладышевский, М. А. Оптическое волокно для систем передачи информации / М. А. Гладышевский, О. Е. Наний, Н. К. Сабинин // Волоконная оптика. Сб. статей. – 2002. – М.: Изд-во «ВиКо» – С. 9-51.
84. Катаевская, И. В. Влияние спиральной формы волокна на распространение света / И. В. Катаевская, Н. Д. Кундикова // Квантовая электроника. – 1995. -Т.2. – Вып. 9. – С.959-960.

85. Кульчин, Ю. Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы / Ю. Н. Кульчин – М: ФИЗМАТЛИТ. 2001. С.57.
86. Okoshi, T. IEEE / T. Okoshi. Quantum Electron, 1981, v.17, p. 189.
87. Голубев, А. В мире поляризованного света / А. Голубев // Наука и жизнь. – 2008. – №5. – С. 110-115.
88. Новикова, В. А. Рассеяние света и его применение в волоконной оптике / В. А. Новикова, С. В. Варжель ; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2019. – 39 с.
89. Трофимова, Т. И. Основы физики. Волновая и квантовая оптика : учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – Москва : КНОРУС, 2015. – 224с.
90. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс инженеров и научных работников. Под ред. Э. Удда. Москва: Техносфера, 2008. – 520 с.
91. Гармаш, В. Б. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В. Б. Гармаш, Ф. А. Егоров, Л. Н. Коломиец, А. П. Неугольников, В. И. Поспелов // Спецвыпуск «Фотон-экспресс». – 2005. – №6. – С 128-140.
92. Гаврицков, С. А. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом / С. А. Гаврицков– М.: МГУЛ. 2004. – 245 с.
93. Моделирование физического принципа действия датчиков на основе фрактального подхода. Ч. 2. Моделирование микроэлектронных и волоконно-оптических датчиков давления : монография / О. М. Шикульская, И. Ю. Петрова, Г. Б. Абуова [и др.]. – Астрахань : Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ. – 2019. – 148 с.

94. Мурашкина, Т. Н. Амплитудные волоконно-оптические датчики автономных систем управления / Т. Н. Мурашкина, В. И. Волчихин. – Пенза: Издательство Пенз. Гос. Ун-та. – 1999. – с. 57.
95. Майер В. В. Полное внутреннее отражение света: Учебные исследования / В. В. Майер. – М.: «Физматлит». – 2007. – 160 с.
96. Афонин, И. Е. Математическая модель сигнала, отраженного от цели сложной формы [Электронный ресурс] / И. Е. Афонин, В. Е. Федосеев // I-methods. 2015. №3. –Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskaya-model-signala-otrazhennogo-ot-tseli-slozhnoy-formy> (дата обращения: 13.11.2024).
97. Варданын, В. А. Физические основы оптики : учебное пособие / В. А. Варданын. – Новосибирск : Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2015. – 235 с.
98. Тоиров, О. З. Математическая модель электрических процессов в комбинированном контрольном кабеле [Электронный ресурс] / О.З. Тоиров, В.В. Цыпкина, В.П. Иванова, А.Р. Аширов // Universum: технические науки. 2021. №6-4 (87). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskaya-model-elektricheskikh-protssessov-v-kombinirovannom-kontrolnom-kabele> (дата обращения: 20.02.2024).
99. Ураксеев М. А. Математическая модель, чувствительность и статическая характеристика электрооптического прибора / М. А. Ураксеев, Т. А. Закурдаева // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. №1. – С. 86-92.
100. Любопытов, В. С. Математическая модель полностью оптической системы детектирования параметров распространения мод в оптическом волокне при маломодовом режиме для адаптивной компенсации смещения мод [Электронный ресурс] / В.С. Любопытов, А.З. Тлявлин, А.Х. Султанов, В.Х. Багманов, С.Н. Хонина, С.В. Карпеев, Н.Л. Казанский // КО. 2013. №3. –Режим доступа:

- <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskaya-model-polnostyu-opticheskoy-sistemy-detektirovaniya-parametrov-rasprostraneniya-mod-v-opticheskom-volokne-pri> (дата обращения: 11.03.2024).
101. Воронцов, К.К. Применение системы mathcad при изучении технических дисциплин [Электронный ресурс] / К.К. Воронцов // МНИЖ. 2021. №8-1 (110). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-sistemy-mathcad-pri-izuchenii-tehnicheskikh-distsiplin> (дата обращения: 21.09.2024).
 102. Ершова, И. В. Применение пакета MathCAD для расчёта и изображения векторных полей [Электронный ресурс] / И. В. Ершова, Т. А. Минеева // Символ науки. 2016. №11-4. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-paketa-mathcad-dlya-raschyota-i-izobrazheniya-vektornyh-poley> (дата обращения: 21.09.2024).
 103. Абдуллаева, Н. И. Концептуальные особенности применения системы компьютерной математики MathCAD в процессе визуализации поведения функций [Электронный ресурс] / Н. И. Абдуллаева // Вестник Науки и Творчества. 2016. №5 (5). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualnye-osobennosti-primeneniya-sistemy-kompyuternoy-matematiki-mathcad-v-protssesse-vizualizatsii-povedeniya-funktsiy> (дата обращения: 25.09.2024).
 104. Леонтьев, Н.А. Применение программы MathCAD при изучении основ электромагнитной совместимости [Электронный ресурс] / Н. А. Леонтьев // Проблемы и перспективы развития образования в России. 2015. №32. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-programmy-mathcad-pri-izuchenii-osnov-elektromagnitnoy-sovmestimosti> (дата обращения: 25.09.2024).
 105. Седов, Р. Л. Применение mathcad в реализации математических моделей [Электронный ресурс] / Р. Л. Седов// Интерактивная наука. 2022. №3 (68). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-mathcad-v-realizatsii-matematicheskikh-modeley> (дата обращения: 25.09.2024).

106. Романюк, Г. Э. Геометрическое моделирование с применением средств компьютерной математики (MATHCAD) [Электронный ресурс] / Г. Э. Романюк // Вестник ВГТУ. 2006. №11. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/geometricheskoe-modelirovanie-s-primeneniem-sredstv-kompyuternoy-m-a-t-ema-ti-ki-mathcad> (дата обращения: 12.10.2024).
107. Леонтьев, А. Л. Методика использования пакета Mathcad при рассмотрении уравнения колебаний [Электронный ресурс] / А. Л. Леонтьев, Н. В. Драгныш // Вестник Таганрогского института имени А. П. Чехова. 2019. №1. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-ispolzovaniya-paketa-mathcad-pri-rassmotrenii-uravneniya-kolebaniy> (дата обращения: 13.11.2024).
108. Волкова, М. Г. Преимущества использования графических задач при изучении физики [Электронный ресурс] / М. Г. Волкова // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований. 2020. №2. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-ispolzovaniya-graficheskikh-zadach-pri-izuchenii-fiziki> (дата обращения: 13.11.2024).
109. Ахметова, Ф. Х. Обучение студентов интегрированию в среде MathCAD [Электронный ресурс] / Ф. Х. Ахметова // Концепт. 2017. №V8. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/obuchenie-studentov-integrirovaniyu-v-srede-mathcad> (дата обращения: 27.11.2024).
110. Использование программы mathcad для типовых оптических расчетов [Электронный ресурс] / Н. Г. Киселев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2002. №5. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-programmy-mathcad-dlya-tipovyh-opticheskikh-raschetov> (дата обращения: 28.11.2024).
111. Калинин, Т. В. Моделирование траектории движения космического объекта в зоне действия комплексов обнаружения в среде mathcad [Электронный ресурс] / Т. В. Калинин, Д. В. Хрестинин, С. В. Куликов, А. С. Кознев // Программные продукты и системы. 2020. №3. – Режим до-

- ступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-traektorii-dvizheniya-kosmicheskogo-obekta-v-zone-deystviya-kompleksov-obnaruzheniya-v-srede-mathcad> (дата обращения: 09.12.2024).
112. Полякова, Т. А. Кинематический расчет кулачков выпуклого профиля с использованием программы mathcad [Электронный ресурс] / Т. А. Полякова, Ю. П. Макушев, Л. Ю. Волкова, В. В. Рындин // ОНВ. 2021. №5 (179). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/kinematicheskiiy-raschet-kulachkov-vypuklogo-profilya-s-ispolzovaniem-programmy-mathcad> (дата обращения: 09.12.2024).
 113. Исламова, Э. Ф. Компьютерное моделирование перекрестных помех в информационно-измерительном волоконно-оптическом приборе / Э. Ф. Исламова, А. В. Куликов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – №5 (87). – С. 59-62.
 114. IEC 60794-1-2: 1999. Optical fibres – Part 1-2: Generic specification – Basic optical cable test procedures.
 115. Гринштейн, М. Л. Методы анализа измерения ВОЛС при автоматическом мониторинге / М. Л. Гринштейн, М. С. Зюзин // LIGHTWAVE russian edition. – 2008. – №1. – С. 27-33.
 116. Lopez-Higuera, J. M. (Editor). Handbook of Optical Fibre Sensing Technology / J. M. Lopez-Higuera. // John Wiley & Sons, Ltd. 2002. 828 p.
 117. Бурков, В. Д. Волоконно-оптическая система передачи информации / В. Д. Бурков, С. В. Перминов, Ю. С. Капранов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2011. №3. – С. 157-169.
 118. Шабалина, Н. А. Технические характеристики и спецификации для одномодового оптоволокна G.652.D / Н. А. Шабалина // Перспективы развития информационных технологий. – 2013. – № 15. – С. 60-63.
 119. Лиференко, В. Обновленные технические характеристики и спецификации одномодового оптоволокна стандарта G.652.D / В. Лиференко, Н. Шабалина // Компоненты и технологии. – 2014. – № 3(152). – С. 138-139.

120. Peters, J. Bellcore's fiber measurement audit of existing cable plant for use with high bandwidth systems / J. Peters, A. Dori, and F. Kapron // Proceedings of NFOEC. San Diego. pp. 19-30 1997.
121. Гроднев, И. И. Линии связи / И. И. Гроднев, С. М. Верник, Л. Н. Кочановский / Под ред. Л. Н. Кочановского, 6-е изд., перераб. и доп. - М. Радио и связь 1995. – 488 с.
122. Ларин, Ю. Т. Оптические кабели / Ю. Т. Ларин, И. И. Теумен. – М.: Энергоиздат, 2001. – 67-71с.
123. Гроднев, И. И. Волоконно-оптические линии связи / И. И. Гроднев – М.: Радио и связь. 2003. -120с.
124. Потапов В. Т. Новые типы оптических волокон для высокоскоростных систем передачи // Информационный бюллетень «Фотон-Экспресс». – 2001. – № 17. – С.18.
125. Малютина, Т. П. Задание пары ближайших точек на скрещивающихся прямых графическим и вычислительным методами / Т. П. Малютина, Я. Р. Лимановский // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2022. – № 4(156). – С. 48-52.
126. Вышнепольский, В. И. Геометрические места точек, равноотстоящих от двух заданных геометрических фигур. Часть 3 / В. И. Вышнепольский, К. А. Киршанов, К. Т. Егiazарян // Геометрия и графика. – 2018. – Т. 6, № 4. – С. 3-19.
127. Сравнительный анализ методов аппроксимации гармонической функции / В. В. Чекушкин, С. Н. Жиганов, А. А. Быков, К. В. Михеев // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2018. – № 3(39). – С. 58-66.
128. Сергеев, В. В. Сравнительный анализ методов аппроксимации функций в задачах обработки изображений / В. В. Сергеев, В. Н. Копенков, А. В. Чернов // Компьютерная оптика. – 2004. – № 26. – С. 119-122.

129. Сенотова, С. А. Сравнительный анализ методов аппроксимации с помощью регрессионных зависимостей и нейронных сетей для линейных моделей / С. А. Сенотова // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2021. – Т. 1, № 18. – С. 31-35.
130. Smirnov V. V., Manevitch L. I. COMPLEX ENVELOPE VARIABLE APPROXIMATION IN NONLINEAR DYNAMICS // Rus. J. Nonlin. Dyn., RJND. 2020. №3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/complex-envelope-variable-approximation-in-nonlinear-dynamics> (дата обращения: 15.01.2025).
131. Белютина, К. А. К вопросу о выборе технологии для создания трехмерных изображений / К. А. Белютина, Н. А. Иванова // Современные научные исследования и инновации. – 2017. – № 12(80). – С. 16.
132. Сулина, О. В. Создание фотореалистичных изображений трехмерных моделей деталей и сборочных единиц / О. В. Сулина, Е. В. Грачева // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2017. – № 2(12). – С. 290-295.
133. Turakulov A. The benefits of using three-dimensional modeling in the development of students ' knowledge and skills in computer graphics science // Universum: технические науки. 2021. №11-5 (92). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/the-benefits-of-using-three-dimensional-modeling-in-the-development-of-students-knowledge-and-skills-in-computer-graphics-science> (дата обращения: 17.01.2025).
134. **Резак, Е. В.** Моделирование деформационного влияния макро-изгиба оптического волокна на показатель преломления его сердцевины / **Е. В. Резак** // Информатика и системы управления. – 2025. – № 3(85). – С. 109-116.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Охранные документы на результат интеллектуальной деятельности

8 2024

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2024614652

**Программа для моделирования влияния деформации
оптического волокна на показатель преломления
сердечник-оболочка**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тихоокеанский государственный университет» (RU)*

Авторы: *Резак Елена Владимировна (RU), Карась Юрий
Вячеславович (RU)*



Заявка № **2024612706**
Дата поступления **12 февраля 2024 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **28 февраля 2024 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности
Ю.С. Зубов

РЕФЕРАТ

Программа: *Программа для моделирования влияния деформации оптического волокна на показатель преломления сердечник-оболочка*

Аннотация: Программа предназначена для моделирования влияния деформации изгиба в оптическом волокне на показатель преломления сердечник-оболочка. Программа может применяться для расчетов параметров оптического волокна и их визуализации при моделировании процесса эксплуатации волокна.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- ввод исходных данных для расчета;
- выбор модели расчета параметров оптического волокна;
- представление модели данных в табличном виде;
- представление модели данных в графическом виде;
- вывод значений точек пересечения графиков в табличной форме;
- получение значений отдельных точек графика в специальном окне по наведению мыши на соответствующую точку;
- сохранять график в форматах pdf, png и jpg;
- сохранять полученные таблицы в форматах pdf и xlsx.

Язык: C# (программа), XAML (интерфейс).

(программирование)

Объем

программы: 83 Мб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025619354

**Программный модуль регрессионного анализа для
моделирования влияния внешнего изгиба оптического
волокна на показатель преломления сердечник-
оболочка**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тихоокеанский государственный университет» (RU)*

Авторы: *Резак Елена Владимировна (RU), Карась Юрий
Вячеславович (RU)*

Заявка № **2025617273**

Дата поступления **31 марта 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **15 апреля 2025 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

РЕФЕРАТ

Программа: *Программный модуль регрессионного анализа для моделирования влияния внешнего изгиба оптического волокна на показатель преломления сердечник-оболочка*

Аннотация: Программный модуль предназначен для проведения регрессионного анализа данных, полученных в ходе моделирования влияния внешнего изгиба оптического волокна на показатель преломления сердечник-оболочка.

Программный модуль обеспечивает выполнение следующих функций:

- ввод исходных данных для моделирования деформации изгиба оптического волокна;
- визуализировать, полученные в ходе моделирования данные в графическом виде;
- выводить значения точек пересечения графиков, полученных в результате нескольких экспериментов моделирования, в виде отдельной таблицы;
- вывод значений точек пересечения графиков в табличной форме;
- позволяет на основе значений созданного массива провести интерполирование табличных значений;
- провести на основе полученного массива данных аппроксимирование для расчета зависимости показателя преломления сердечник-оболочка от показателя преломления сердечника и радиуса оптического волокна.

Язык: C# (программа), XAML (интерфейс).
(программирование)

Объем
программы: 93 Мб

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Интерфейс программного средства

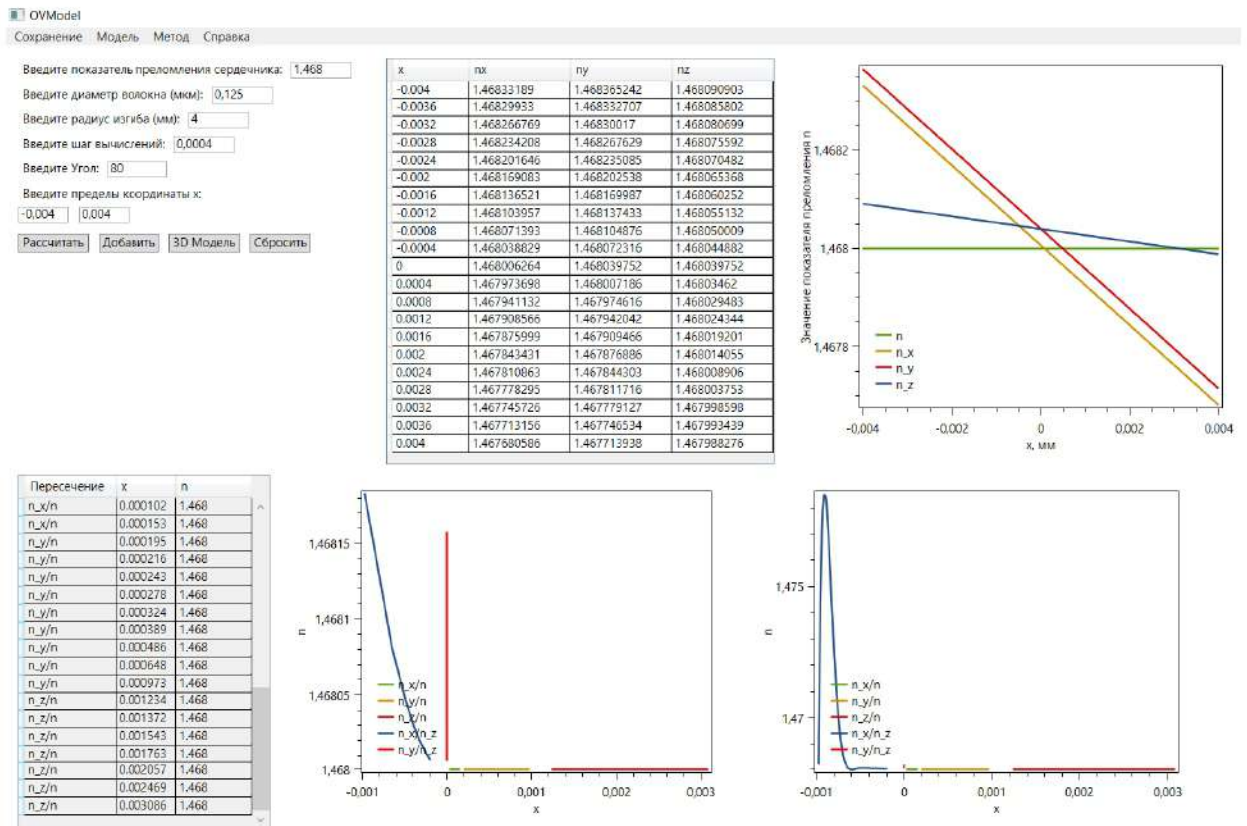


Рисунок Б.1 – Интерфейс программного средства.

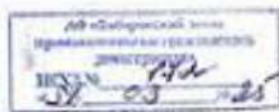
ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертационной работы



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ХАБАРОВСКИЙ ЗАВОД ПРОМЫШЛЕННОГО И ГРАЖДАНСКОГО ДОМОСТРОЕНИЯ»

680013 г. Хабаровск, ул. Суворова, 84. тел.: (4212) 47-97-06; тел./факс: (4212) 47-97-14,
E-mail: zak@steel.ru



УТВЕРЖДАЮ
Директор по общим вопросам
АО «Хабаровский завод промышленного и гражданского домостроения»
Трубчик А.П.
_____ 20__ г.



АКТ
о внедрении (использовании)
результатов кандидатской диссертационной работы
Резак Елена Владимировна

Комиссия в составе:

председатель: Трубчик А.П. – директор по общим вопросам;
члены комиссии: Корольков А.Ф. – директор по проектированию;
Таранец, Д.Г. – начальник отдела автоматизации и контрольно-измерительных приборов

составила настоящий акт о том, что результаты кандидатской диссертационной работы Резак Елена Владимировна «Моделирование влияния деформации изгиба и температурной деформации на параметры одномодового оптического волокна», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, имеют высокую практическую значимость. Научная новизна диссертационного исследования позволяет: улучшить конструкции кабельных сборок, учитывая влияние изгиба и температурных деформаций, что снижает потери сигнала и повышает надежность системы; выбрать оптимальные материалы и конструктивные решения обеспечивающие стабильную работу оптического волокна в заданных условиях эксплуатации; установить ограничения на радиус изгиба оптического волокна при монтаже, гарантирующие отсутствие потерь сигнала.

Комиссия отмечает целесообразность использования результатов кандидатской диссертационной работы Резак Елена Владимировна при планировании и проектировании телекоммуникационных систем связи разрабатываемых в АО «Хабаровский завод промышленного и гражданского домостроения».

Председатель комиссии

Члены комиссии:

А. П. Трубчик

А. Ф. Корольков

Д. Г. Таранец