

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»

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Хабаровск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск; региональном научно-образовательном математическом центре «Дальневосточный центр математических исследований» (НОМЦ ДЦМИ), г. Хабаровск.

Научный руководитель:

**ВИХТЕНКО Эллина Михайловна,**

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент высшей школы кибернетики и цифровых технологий Политехнического института ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск.

Официальные оппоненты:

**КРИШТОП Виктор Владимирович**

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательского института радиотоники и оптоэлектроники Пермской научно-производственной приборостроительной компании, г. Пермь

**ГЛАДКИХ Вячеслав Александрович**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник вычислительного центра обособленного подразделения Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск

Защита состоится 05 февраля 2026 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 24.1.478.02, созданного на базе Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Ким-Ю-Чена, д. 65, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ХФИЦ ДВО РАН в обособленном подразделении Вычислительный центр ДВО РАН по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Ким-Ю-Чена, д. 65

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Ким-Ю-Чена, д. 65, ученому секретарю диссертационного совета Д 24.1.478.02.

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_ 2025 г.  
Телефон для справок: +7 (4212) 32-79-27.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
Д 24.1.478.02,  
канд. техн. наук, доцент



Пассар Андрей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Увеличение объема передаваемой информации требует создания высокоскоростных телекоммуникационных линий. В настоящее время таковыми являются волоконно-оптические линии, где наибольшую скорость передачи обеспечивают одномодовые оптические волокна. Однако даже в таких сетях постоянное увеличение скорости передачи информации невозможно из-за особенностей среды распространения.

Для увеличения скорости передачи информации необходимо учитывать внешние факторы влияния среды, в которую помещается волокно в процессе эксплуатации. К ним можно отнести механические вибрации, температуру, давление и влажность окружающей среды, различного вида деформации, электромагнитное поле. Перечисленные факторы оказывают влияние на затухание сигнала в оптическом волокне и изменение показателя преломления самого волокна, что препятствует дальнейшему увеличению скорости передачи информации.

Возникновение анизотропии в оптическом волокне связано с несколькими моментами: нарушение идеальной круговой формы сердцевинки или наведенным двулучепреломлением вещества, например, из-за наличия несимметричных напряжений в материале самого волокна или из-за геометрического несовпадения центров сердцевинки волокна и его оболочки. Контроль формы сердцевинки происходит на стадии производства волокна, и отследить нарушение круговой симметрии в процессе эксплуатации не представляется возможным. Наведенное двулучепреломление можно отследить в реальных условиях эксплуатации, а в некоторых случаях провести компенсацию или корректировку погрешности.

Помимо линий связи волокно широко используется в создании волоконной техники (например, генераторы излучения светового диапазона), а также в датчиках различного назначения. Принципы действия высокочувствительных волоконно-оптических датчиков напряженности электрических и магнитных полей (эффекты Керра и Фарадея), вибрации, температуры, давления, деформации (фотоупругий эффект) основаны на влиянии на оптическое волокно параметров среды, что подтверждает актуальность данной работы.

Наиболее часто встречающиеся изменения сигнала, проходящего по оптическому волокну, сопряжены с деформацией волокна. При этом потери сигнала в волокне, проявляющиеся в результате внешней деформации (растяжение, изгиб, кручения), 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 не так широко, что, вероятно, связано с относительной новизной области научных исследований, основанных на изучении деформированного оптического волокна. Здесь можно выделить работы таких авторов, как Азанова И. С., Аксенов В. А., Борисенков И. Л., Будадин О. Н., Власенко В. Д., Гладких В. А., Денисов И. В., Дмитриева А. Д., Козельская С. О., Козлов Н. П., Крутов А. Ф., Лесникова Ю. И., Мосунова И. Д., Ниценко А. В., Оборнева И. В., Овчаренко А. Б., Ременникова М. В., Селезнёв Д. А.; Смирнова А. Н. Таранов М. А., Терентьев В. С., Хисамов Д. В.

**Теоретическая актуальность** темы заключается в том, что на сегодняшний день проблемы, связанные с воздействием на волокно деформации и температуры недостаточно полно исследованы. Открытым остается вопрос влияния деформации изгиба и температурной деформации на параметры одномодового оптического волокна.

**Практическая актуальность** темы. Особенности отрасли связи, а именно большая протяженность линий связи (максимальная длина оптической трассы без активного оборудования до 100 км), малые поперечные размеры оптических волокон, высокая стоимость материалов и работ по прокладке кабеля, делают очень трудоемким и затратным процесс исследования состояния волокна в реальных условиях. В связи с этим необходимо предварительное численное моделирование для изучения влияния различных факторов, таких как температура и деформация, на потери сигнала в волокне.

**Целью** исследования является построение модели одномодового оптического волокна и ее исследование под влиянием деформации изгиба и температурной деформации. Данная модель должна стать инструментом для оптимизации эксплуатационных качеств волоконно-оптических линий связи.

Конкретные задачи исследования включают:

1. Создание новой математической модели, описывающей распространение света в одномодовом оптическом волокне, подвергнутому механическим деформациям.
2. Разработку вычислительных алгоритмов, позволяющих рассчитать влияние указанных факторов на характеристики одномодовых оптических волокон.
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 (деформации изгиба и температурной деформации).

**Научная новизна работы.**

В ходе исследований получены следующие результаты.

- 1 Построена новая математическая модель, описывающая процессы распространения света в деформированном (изогнутом) одномодовом оптическом во-

локне. В модели учтены все составляющие относительных деформаций и квадратичные составляющие координаты относительно центральной оси волокна. В применяемых ранее моделях используются упрощённые формулы, 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 проявляет себя как оптически двухосная анизотропная среда. Найдены точки, в которых изогнутое оптическое волокно является оптически одноосным анизотропным «кристаллом».

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

**Теоретическая и практическая значимость** работы состоит в обосновании применимости уточненной модели деформации изгиба одномодового оптического волокна в связи с особенностью отрасли связи; уточнении величины погрешности при измерении волоконно-оптической линии связи рефлектометрическими методами; определении минимального угла изгиба волокна, при котором возникают потери 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. Полученные в работе результаты внедрены и используются 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 используются в учебном процессе при реализации образовательных программ по направлениями 09.03.04 и 09.04.04 Программная инженерия, 01.03.04 Прикладная математика в дисциплинах, связанных с изучением математического моделирования и технологий проектирования и разработки программного обеспечения.

**Методы исследования** включают совокупность системного и комплексного подходов к теоретическому материалу исследуемой темы, математическое моделирование, методы теории дифференциальных уравнений, численного дифферен-

цирования, вычислительного эксперимента. При разработке вычислительных алгоритмов использована система компьютерной математики Mathcad, реализация вычислительных алгоритмов осуществлена в виде программного комплекса на языке программирования C#.

**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.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертационная работа соответствует области исследования специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, в пунктах: п. 3. реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента (п. 3 научной новизны); п. 4. разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели (п. 1, 2 научной новизны); п. 6. разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей (технические науки) (п. 4 научной новизны); п. 8. комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента (п. 5 и 6 научной новизны).

**Апробация работы.** Работа над диссертацией велась более 15 лет. Основные результаты докладывались на всероссийских и международных конференциях с 2009 по 2025 год: международной научно-практической конференции «Современные проблемы гуманитарных и естественных наук», XVI международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», III международной научно-практической конференции «Актуальные аспекты научных исследований», Москва; всероссийской научно-практической студенческой конференции «Математические модели техники, технологий и экономики», Санкт-Петербург; XVI всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых, Екатеринбург; II всероссийской (национальной) научной конференции с международным участием «Российская наука, инновации, образование», Красноярск; IV международной научной конференции «Вычислительные технологии и прикладная математика», Владивосток; научно-практической конференции ТОГУ-Старт: фундаментальные и прикладные исследования молодых, национальной научной конференции «Far East Math», XXII всероссийской научной конференции «ФИЗИКА: фундаментальные и прикладные исследования, образование» и The IVth International School and Workshop on Few-Body Systems, VII, VIII между-

народной научно-практической конференции «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления», Хабаровск.

**Публикации и личный вклад автора.** По результатам диссертационной работы лично автором и в соавторстве опубликовано 16 работ, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Общий объем публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК, составляет 3,2 п. л., из которых 2,7 п. л. принадлежит лично соискателю.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 127 страниц, включая 51 рисунок, 7 таблиц, 3 приложения. Список литературы содержит 134 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** диссертации обоснованы актуальность выбранной темы и научно-практическая значимость работы, определены цель и задачи диссертации, методы исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, кратко изложено содержание работы.

**В первой главе** приведены теоретические сведения о рассматриваемой в работе предметной области, выполнен анализ литературы по теме диссертации. Рассмотрены параметры одномодовых оптических волокон, различные варианты возникновения двулучепреломления в волокне. Дана систематизация факторов, влияющих на передачу сигнала в оптическом волокне, в рамках которой рассмотрены статические и динамические факторы возникновения оптической анизотропии в волокне.

К первым относятся такие физические воздействия на волокно, как деформация растяжения и сжатия, деформация изгиба и деформация кручения. Ко вторым – влияние окружающей среды (внешнего электромагнитного поля, температуры, колебаний и другие), динамические деформации волокон (ветровые нагрузки).

Показано, что исследование параметров передачи излучения в волокне, построение новых и уточнение уже существующих математических моделей, описывающих процессы распространения света в деформированном (изогнутом) одномодовом оптическом волокне, разработка вычислительных алгоритмов расчетов и проведение вычислительных экспериментов является актуальной задачей.

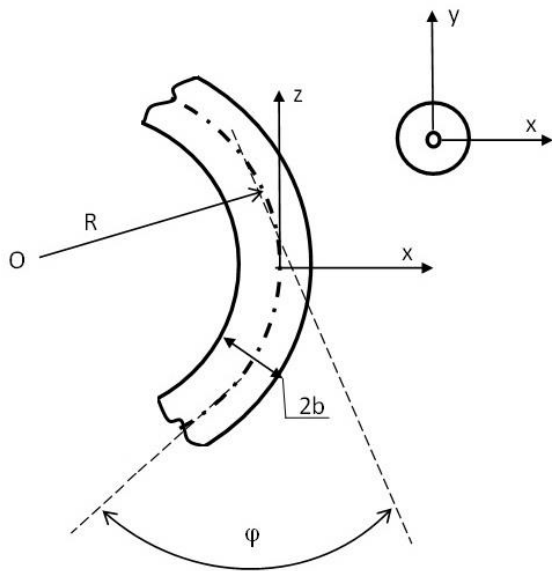
**Вторая глава** посвящена исследованию деформации изгиба оптического волокна, построению новой модели деформации изгиба оптического волокна. Приведен алгоритм расчета составляющих показателя преломления одномодового оптического волокна с помощью СКИМ MathCAD и разработанного программного комплекса.

Оптическое волокно, являясь диэлектрической направляющей средой, в общем виде представляет собой тонкую нить (длинный, тонкий, прозрачный, однородный сплошной цилиндр) из стекла или пластика (прозрачных материалов). Используется для распространения электромагнитных волн оптического и инфракрасного диапазонов за счет полного внутреннего отражения. Конструктивно волокно состоит из сердцевины и оптической оболочки, изготовленных из специальных материалов с целью обеспечения распространения оптического излучения внутри волокна. Показатель преломления сердцевины оптического волокна варьи-

руется в диапазоне от 1,4 до 1,5. Показатель преломления оболочки немного меньше (в пределах 1%), что обеспечивает полное внутреннее отражение света на границе раздела сердцевина-оболочка.

В результате внешних воздействий на оптическое волокно действуют силы, приводящие к его неравномерным деформациям по различным осям, при изгибе происходят пространственные изменения структуры волокна по трем направлениям.

Модель изгиба волокна представлена на рисунке 1, на котором обозначены  $2b$  – диаметр оболочки оптического волокна,  $R$  – радиус изгиба,  $\varphi$  – угол изгиба



волокна, ось  $X$  и  $Y$  соответствуют поперечному сечению волокна, а ось  $Z$  направлена вдоль длины волокна.

Рисунок 1 – Модель деформации изгиба одно-  
модового оптического волокна.

Во время изгиба волокно одновременно удлиняется и укорачивается. Разместим оптическое волокно таким образом, чтобы деформации происходили вдоль оси  $X$ , тогда составляющая механического напряжения вдоль оси  $Y$  будет отсутствовать.

Механическое напряжение в изогнутом волокне описывается соотношениями

$$\sigma_x = \frac{E}{2R^2}(x^2 - b^2), \quad \sigma_y = 0, \quad \sigma_z = \frac{E}{R}x, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $x$  – координата относительно центральной оси волокна.

Для учета эффекта Пуассона в соотношения (1) добавляется дополнительное слагаемое, тогда составляющие относительных деформаций определяются в обобщенном виде

$$\varepsilon_{x,y,z} = \frac{1}{E} [\sigma_{x,y,z} - \mu(\sigma_{y,x,x} + \sigma_{z,z,y})], \quad (2)$$

где  $\sigma$  – составляющая механического напряжения вдоль соответствующей оси,  $\mu$  – отношение Пуассона.

Под воздействием деформаций происходит изменение показателя преломления следующим образом:

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

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

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

В формулах (3а) – (3б) учтены все составляющие относительных деформаций, эффект фотоупругости в направлениях координатных осей, коэффициенты

Поккельса. В отличие от классической теории, где не рассматриваются значения  $x \ll b$ , это позволяет получить полную картину процессов внутри оптического волокна при деформации изгиба. В исследованиях других авторов квадратичных составляющих не учитываются, что приводит к потере полноты представления процессов.

На основе предложенной математической модели реализован алгоритм расчетов приращений и значений показателей преломления в направлении координатных осей, составлен комплекс программ в СКИМ MathCAD и на языке программирования C#.

Для выполнения расчетов разработана программа вычислений показателя преломления волокна при заданных внешних воздействиях. На основании формул (3) в программном комплексе выполнен численный расчет составляющих показателя преломления с использованием коэффициентов Поккельса и Пуассона  $p_{11} = 0,121$ ;  $p_{12} = 0,270$ ;  $\mu = 0,164$ . Диаметр волокна стандартный  $2b = 0,125$  мм, значения показателей преломления сердечника  $n = 1,4738$  и оболочки  $n_{об} = 1,4627$  для длины волны  $\lambda = 1310$  нм. Указанные значения соответствуют параметрам одномодового оптического волокна типа TrueWave для высокоскоростной передачи с ненулевой смещенной дисперсией. Шаг вычислений  $h = 0,0002$  мм. Проведенное численное моделирование для радиусов искривления оптического волокна 2 мм, 4 мм, 7 мм и 10 мм показало, что наиболее существенные изменения в значениях показателя преломления возникают при радиусе искривления, составляющем 2 мм.

Результаты численного моделирования представлены на рисунке 2. По горизонтальной оси отмечено изменение координаты  $x$  относительно оси волокна, по вертикальной – изменение показателя преломления волокна.

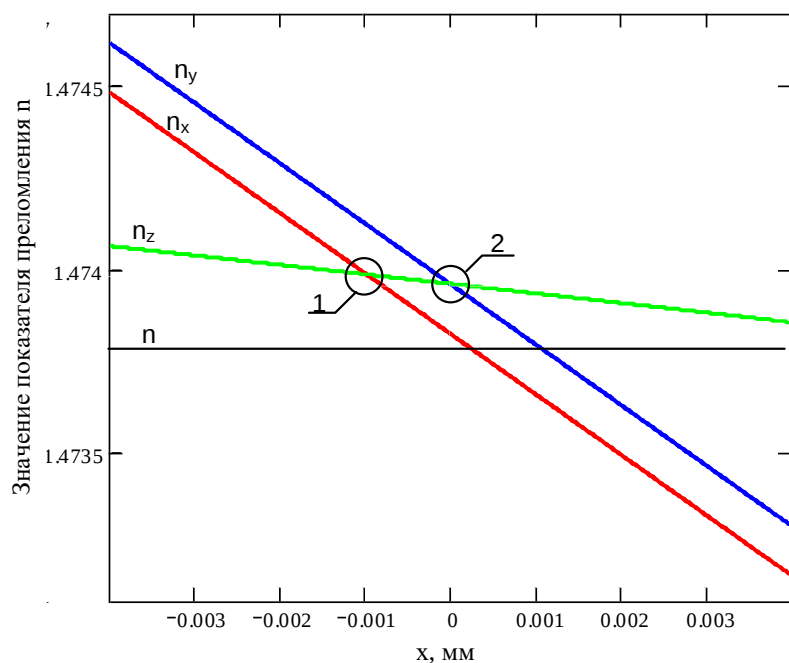


Рисунок 2 – Изменение показателей преломления изогнутого волокна внутри сердечника в направлении координатных осей.

$x$  – координата относительно центральной оси ОВ;  $n$  – значение показателя преломления сердечника неизогнутого волокна;  $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$  – значения показателя преломления изогнутого волокна в направлении координатных осей внутри сердечника; 1 и 2 – точки перехода изогнутого волокна из двухосного состояния «кристалла» в одноосное.

На рисунке 2 видны изменения значений показателей преломления в зависимости от изменения значения координаты  $x$ , при этом значения  $n_x$ ,  $n_y$  и их разности не зависят от других координат.

В соответствии с полученными результатами (рисунок 2) распространение излучения в изогнутом волокне происходит как внутри двухосного кристалла. При этом существуют два таких взаимных расположения  $n_x$ ,  $n_y$  и  $n_z$  (точки 1 и 2 на рисунке 2), при которых значения  $n_x = n_z$  и  $n_y = n_z$ . Таким образом, в данных точках свет распространяется по деформированному волокну как по одноосному кристаллу. Необходимо отметить, что точка 1 зависит от радиуса изгиба волокна и смещается вправо при увеличении радиуса изгиба. Так при  $R = 2$  мм значения  $n_x = n_z$  в точке  $x = -0,001$  мм, при  $R = 4$  мм в точке  $x = -0,0005$  мм, при  $R = 7$  мм в точке  $x = -0,0003$  мм, при  $R = 10$  мм в точке  $x = -0,0002$  мм.

На рисунке 3 представлено изменение показателя преломления внутри сердечник-оболочка волокна.

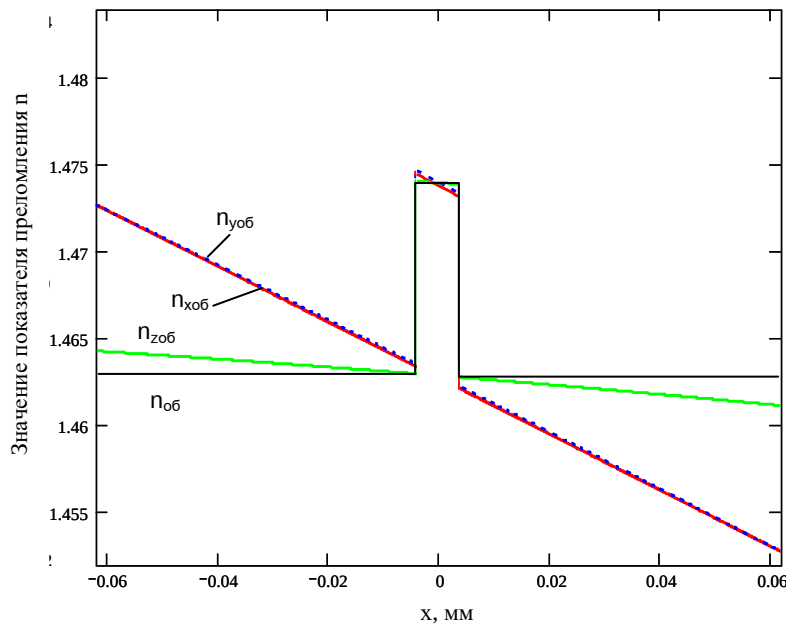


Рисунок 3 – Изменение показателей преломления сердечник-оболочка.

$n_{об}$  – значение показателя преломления оболочки волокна;  $n_{хоб}$ ,  $n_{yоб}$ ,  $n_{zоб}$  – значения показателя преломления оболочки изогнутого волокна в направлении координатных осей сердечник-оболочка.

Под действием изгиба волокно теряет круговую симметрию, что соответствует классической теории. При этом (см. рисунок 3) значения

показателей преломления изогнутого волокна в направлениях координатных осей  $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$  принимают значения показателя преломления неизогнутого волокна на расстояниях 0,14 мкм, 1 мкм и 6 мкм от оси неизогнутого волокна соответственно. Величина  $n_z$  принимала бы значение, равное показателю преломления до изгиба за пределами сердечника волокна, если бы не существовал скачок показателя преломления сердечник-оболочка.

Значение показателя преломления ОВ при изгибе и до него будет смещено  $n = n_x$  относительно оптической оси (ОО) на величину 0,128 мкм (рисунок 3). На ОО показатель преломления при изгибе будет больше начального.

На основе полученных результатов (рисунки 2, 3) можно сделать вывод, что разность показателей преломления для двух ортогональных поляризаций  $n_x$  и  $n_y$  в сердечнике и по краям различна. Ее значение можно определить по формуле

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

Согласно этой формуле, разность показателей преломления внутри сердечника и в переходе сердечник-оболочка имеет квадратичный характер, а не линейный, как утверждает классическая теория. При этом значение разности показателей преломления обратно пропорционально радиусу кривизны изгиба волокна.

На основе этих данных произведен расчет положений оптических осей (осей эллипсоида Френеля) сердечника изогнутого волокна в зависимости от координаты  $x$ . Найдены три случая, представленные на рисунке 4.

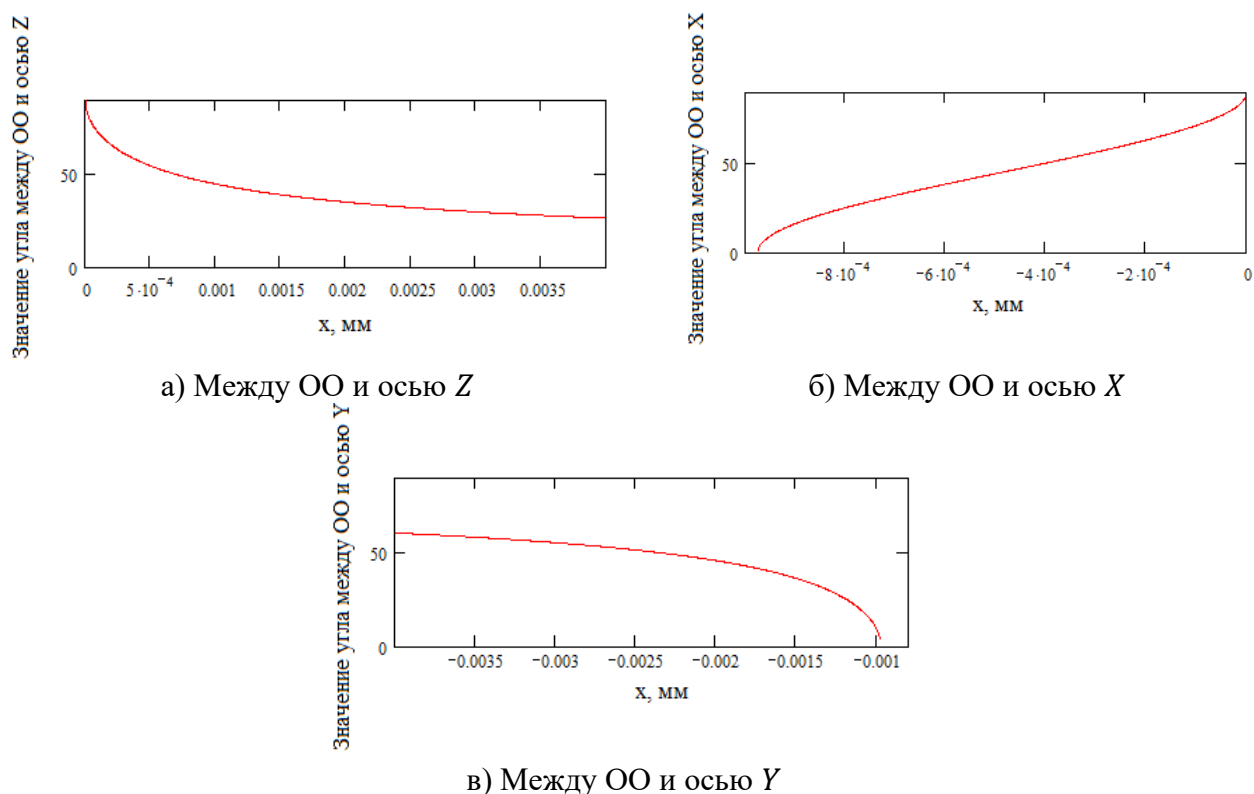


Рисунок 4 – График расчетов значения угла между ОО и осью координат.

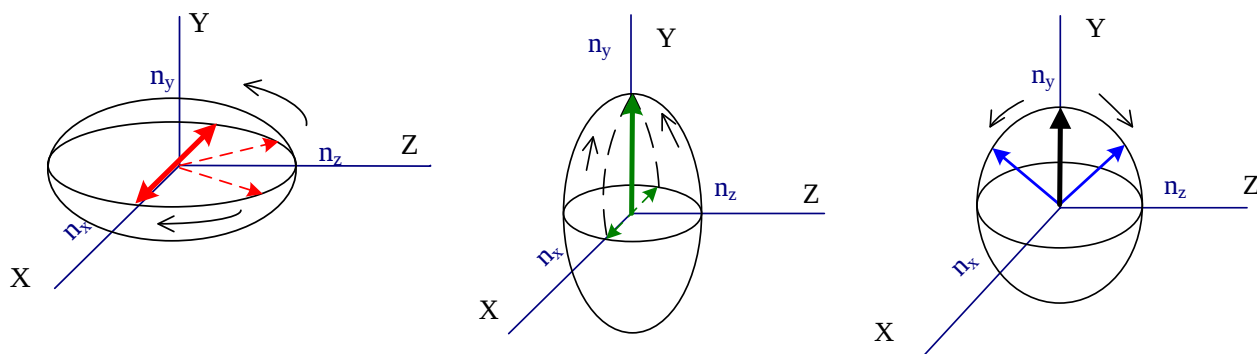
Первый случай. Согласно полученным ранее результатам (рисунок 2), соотношение значений показателя преломления изогнутого волокна в направлении координатных осей внутри сердечника  $n_z > n_y > n_x$  существенно изменяется на интервале  $x$  от 0 до 4 мкм (рисунок 4а).

Второй случай. При расстояниях от 0 до -1 мкм соотношение значений показателя преломления изогнутого волокна в направлении координатных осей внутри сердечника согласно расчетам (рисунок 2) будет  $n_y > n_z > n_x$ , т. е. изменяется угол между ОО и осью X (в плоскости XOY) (рисунок 4б).

Третий случай. При расстояниях от -1 мкм до -4 мкм соотношение значений показателя преломления изогнутого волокна в направлении координатных осей внутри сердечника согласно расчетам (рисунок 2) будет  $n_y > n_x > n_z$ , при этом угол между ОО и осью Y меняется в плоскости YOZ (рисунок 4в).

Сопоставляя результаты, представленные на рисунках 2 и 4а, можно сделать вывод, что при расстояниях от 4 мкм до 0 угол между ОО и осью Z (в плоскости XOZ) изменяется в пределах от  $30^\circ$  до  $90^\circ$  (рисунок 5а). Это означает переход свойств оптического волокна из двухосной анизотропии в одноосную, и ОО совпадает с направлением оси X.

При расстояниях от 0 до -1 мкм угол между ОО и осью X (в плоскости XOY) изменяется в пределах от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  (рисунок 5б). Анизотропные оптические свойства сердечника переходят из одноосных (в начале интервала) в двухосные (в средней части интервала), затем вновь становятся одноосными, при которых обе оптические оси совпадают по направлению с осью Y.



а) В плоскости  $XOZ$

б) В плоскости  $XOY$

в) В плоскости  $YOZ$

Рисунок 5– Изменение положения ОО изогнутого волокна в соответствующей плоскости.

При расстояниях от -1 мкм до -4 мкм угол между ОО и осью  $Y$  (в плоскости  $YOZ$ ) меняется в пределах от  $0^\circ$  до  $60^\circ$  (рисунок 5в). Оптическая анизотропия сердечника переходит из одноосной в двухосную.

Положение ОО определяется как проекция концов векторов, сонаправленных с ними, на плоскость  $XOZ$ . Положение оптических осей изогнутого волокна будет изменяться сложным образом в трех плоскостях  $XOZ$ ,  $XOY$  и  $YOZ$  при условии изменения осевого расстояния оптического волокна в направлении оси  $X$  в пределах сердечника волокна от 4 мкм до -4 мкм.

Согласно полученным результатам численного моделирования при изменении радиуса изгиба изменяется начальный угол между ОО и осью  $Z$  и конечный угол между ОО и осью  $Y$ .

**В третьей главе** приводится исследование влияния деформационных изменений показателя преломления на параметры одномодового оптического волокна.

Одним из существенных параметров, определяющих характеристики волоконно-оптических кабелей (ВОК), является их длина. Во время производства кабеля проводится непосредственное измерение его длины (прямым методом) с нанесением меток для ее определения. Однако в процессе эксплуатации непосредственное измерение длины становится невозможным. Аналогичная проблема возникает при определении расстояния до места повреждения кабеля. В таких случаях применяются косвенные методы (рефлектометрический или локационный). Они основаны на измерении времени распространения импульса по кабелю в прямом и обратном направлениях для определения расстояния до повреждения или до конца кабеля. Результаты измерения зависят от натяжения оптического волокна и его температуры.

Для исключения растяжения оптического волокна в кабеле вследствие значительной разности температурных коэффициентов расширения кварцевого стекла ( $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) и полиэтиленовых оболочек ( $2,0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ) используются две его конструкции. В первой волокно свободно укладывается в модуле при высокой температуре. При охлаждении кабеля оптическое волокно в модуле приобретает волнообразный характер. Во второй применяется повив модулей с волокном. При охлаждении кабеля волокна в модулях смещаются к центральной оси кабеля, а при его нагревании они смещаются к периферии.

Деформация волокна происходит в обеих конструкциях. Показатель преломления сердцевинки волокна изменяется как вследствие изменения внешней

температуры, так и вследствие деформации (изгиба – первая конструкция, кручения – вторая конструкция), вызванной тепловым расширением оболочки.

В литературных источниках не уточняются особенности деформации волокна, при которой изменяется показатель преломления сердечника. Также не содержатся полные вычисления изменений показателя преломления волокна при изменении температуры окружающей среды или вследствие деформации для волоконно-оптических кабелей. Температурное изменение показателя преломления сердечника, определяющееся формулой

$$\Delta n = \left[ \left( \frac{\partial n}{\partial T} \right)_T + \left( \frac{\partial n}{\partial T} \right)_R \right] \Delta T. \quad (5)$$

Первое слагаемое хорошо изучено. Так, например, для кварцевого стекла составляющая показателя преломления в зависимости от температуры удовлетворяет соотношению

$$\frac{1}{n} \left( \frac{\partial n}{\partial T} \right)_T = 0,68 \cdot 10^{-5} \text{°C}^{-1}. \quad (6)$$

Для оценки второй составляющей необходимо учитывать поведение оптического волокна.

Рассмотрим расположение оптического волокна в модуле кабеля первой конструкции. При высокой температуре волокно расположено параллельно оси модуля (ось  $Z$ ). С понижением температуры полиэтиленовые оболочки оптического кабеля сжимаются. Оптическое волокно выполнено из кварца, который имеет температурный коэффициент линейного расширения ниже в 330 раз, чем у полиэтиленовой оболочки. В этом случае волокно сохраняет свою первоначальную длину, но будет изгибаться в случайно расположенных плоскостях, пересекающихся с осью модуля (см. рисунок 6).

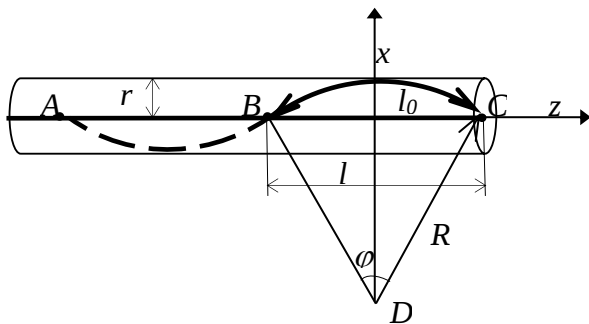


Рисунок 6 – Положение волокна в модуле.

Положим, что оптическое волокно в изогнутом состоянии располагается в виде отрезков дуг среднего радиуса  $R$  в модуле с внутренним радиусом  $r$  и углом изгиба  $\phi$ . Производная радиуса изгиба по температуре равна

$$\frac{\partial R}{\partial T} = \frac{r}{3\beta(T-T_0)^2}, \quad (7)$$

где  $\beta$  – температурный коэффициент линейного расширения (полиэтилена),  $T_0$  – условная температура, при которой длина оптического волокна равнялась бы длине модуля.

Зависимость показателя преломления по сечению изогнутого волокна является достаточно сложной и существенно зависит от поляризации света. Для света с направлением электрического вектора по оси  $OX$  и оси  $OY$  (ось  $OY$  перпендикулярна плоскости, рисунок 6) показатель преломления изменяется нелинейным образом,

$$n_x = n + n^3 \left[ \left( \frac{p_{11}}{2} - \mu p_{12} \right) \frac{a^2 - x^2}{2R^2} + (\mu p_{11} + \mu p_{12} - p_{12}) \frac{x}{2R} \right], \quad (8)$$

$$n_y = n + n^3 \left\{ [p_{12} - (p_{11} + p_{12})\mu] \frac{a^2 - x^2}{4R^2} + (\mu p_{11} + \mu p_{12} - p_{12}) \frac{x}{2R} \right\}. \quad (9)$$

В формулах (8) и (9)  $a$  – радиус сердечника волокна, принимаемый за радиус поля моды,  $x$  – координата сечения оптического волокна, отсчитываемая от оси волокна вверх.

Средний по сечению показатель преломления для моды  $HE_{11x}$  вычисляется следующим образом:

$$n_{xcp} = \frac{\int_{-a}^a \int_{-\sqrt{a^2-x^2}}^{\sqrt{a^2-x^2}} n_x \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{a^2}\right) dy dx}{\int_{-a}^a \int_{-\sqrt{a^2-x^2}}^{\sqrt{a^2-x^2}} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{a^2}\right) dy dx} \cong \frac{\int_{-\infty}^{\infty} n_x \exp\left(-\frac{x^2}{a^2}\right) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{a^2}\right) dx}. \quad (10)$$

Средние по сечению показатели преломления для моды  $HE_{11x}$  и моды  $HE_{11y}$  имеют вид

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

Поскольку направления изгибов волокна в модуле меняются случайным образом, то для среднего значения показателя преломления получаем

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

При значениях  $p_{11} = 0,121$ ,  $p_{12} = 0,270$ ,  $\mu = 0,164$  для производной среднего показателя преломления сердечника оптического волокна по радиусу изгиба выполняется соотношение

$$\frac{\partial n_{cp}}{\partial R} = -\frac{0,03 n^3 a^2}{R^3}. \quad (13)$$

Отсюда следует, что деформационная составляющая производной показателя преломления сердечника оптического волокна будет равна

$$\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)_R = \frac{\partial n_{cp}}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial T} = 0,03 \frac{n^3 a^2}{R^2 (T_0 - T)}. \quad (14)$$

На основании формулы (14) с учетом формул (3а) – (3б) выполнены численные расчеты, получено значение относительного изменения показателя преломления сердечника волокна, вызванное деформацией изгиба или кручения за счет теплового расширения, которое составило величину порядка  $10^{-5}$ .

Согласно формулам (3) и (14), изменение показателя преломления сердечника для волокон различных марок лежит в пределах  $6,8 \cdot 10^{-5} - 7,0 \cdot 10^{-5}$ .

Деформационные изменения показателя преломления уточняют погрешность рефлектометрических измерений волоконно-оптической линии, которая составляет величину  $0,0045\% - 0,005\%$  на строительную длину. В зависимости от типа волокна величина поправки достигает значения до 5 м.

Известно, что при изгибе одномодового оптического волокна (рисунок 1) изменяется не только показатель преломления его сердечника (рисунок 2), но и возникает зависимость показателя преломления от координат в плоскости окружности изгиба по направлению от центра окружности (координата  $x$ ) и перпендикулярно ей (координата  $y$ ), а именно

$$\frac{dn_x}{dx} = \frac{n^3 \mu}{2R} \left[ \frac{x}{R} \left( 2p_{12} - \frac{p_{11}}{\mu} \right) + p_{11} + p_{12} - \frac{p_{12}}{\mu} \right], \quad (15)$$

$$\frac{dn_y}{dy} = \frac{n^3 \mu}{2R} \left[ \frac{x}{R} \left( p_{11} - \frac{p_{12}}{\mu} + p_{12} \right) + p_{11} + p_{12} - \frac{p_{12}}{\mu} \right]. \quad (16)$$

Наличие градиента показателя преломления в направлении координаты  $x$  приводит к круговой траектории нормали волнового фронта.

Как следует из формул (15) – (16) вектор кривизны для всех поляризаций направлен в сторону увеличения показателя преломления.

В ходе вычислительного эксперимента установлено, что искривление траектории на изгибе волокна приводит к частичной компенсации искривления волновода. Если угол падения на границе сердечник – оболочка не будет превышать предельный угол полного внутреннего отражения, то вытекания энергии из оптического волокна не произойдет, затухание по этой причине – отсутствует. Такой угол  $\phi_{max}$  можно определить по формуле

$$tg \frac{\phi_{max}}{2} = \frac{NA}{\sqrt{n^2 - NA^2} - nR/R_0}, \quad (17)$$

где  $NA$  – числовая апертура оптического волокна,  $NA = \sin \varphi = \sqrt{n^2 - n_{06}^2}$ ,  $R_0$  – радиус кривизны траектории луча.

Все полученные результаты найдены в символьной форме с применением компьютерного пакета СКИМ MathCAD. По полученным данным проведен расчет для определения предельного угла изгиба (17), при котором не происходит вытекания энергии из оптического волокна. При выполнении расчетов использованы параметры волокон типа TrueWave, рассмотренных ранее, а также полученное значение числовой апертуры ( $NA = 0,18$ ). Установлено следующее: существует такой максимальный угол изгиба, при котором при любом радиусе изгиба потери будут отсутствовать, если деформация волокна осуществляется в линейной области. Значение такого угла составляет  $\phi_{max} = 56,88^\circ$ . Таким образом, на основании полученных данных можно утверждать, что превышение максимального угла изгиба ведет к потерям излучения при любом радиусе изгиба волокна.

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

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 волокна.

ПКМ обеспечивает выполнение следующих функций: ввод исходных данных; выбор модели расчета; расчет значения показателя преломления изогнутого волокна в направлении координатных осей; представление численной модели данных в табличном и графическом виде; расчёт точек перехода; получение значений отдельных точек графика в специальном окне; вывод значений точек пересечения графиков в отдельную таблицу и виде графика; сохранение таблиц и графиков результатов; проведение регрессионного анализа для точек перехода; сброс результатов численного моделирования; вывод ошибок при их возникновении.

Модули и подсистемы ПКМ: модуль графического интерфейса; модули классической и уточненной моделей расчета 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 ре-

зультатов регрессионного анализа точек перехода; подсистема трехмерной визуализации процесса деформации оптического волокна. Процесс работы ПМК схематично представлен на рисунке 7.

К исходным данным относятся показатель преломления сердечника, диаметр волокна, радиус искривления оптического волокна, шаг дискретизации, начальные и конечные координаты относительно центральной оси оптоволокна. В качестве выходных данных приложение предоставляет таблицу расчетных значений показателей преломления изогнутого 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.

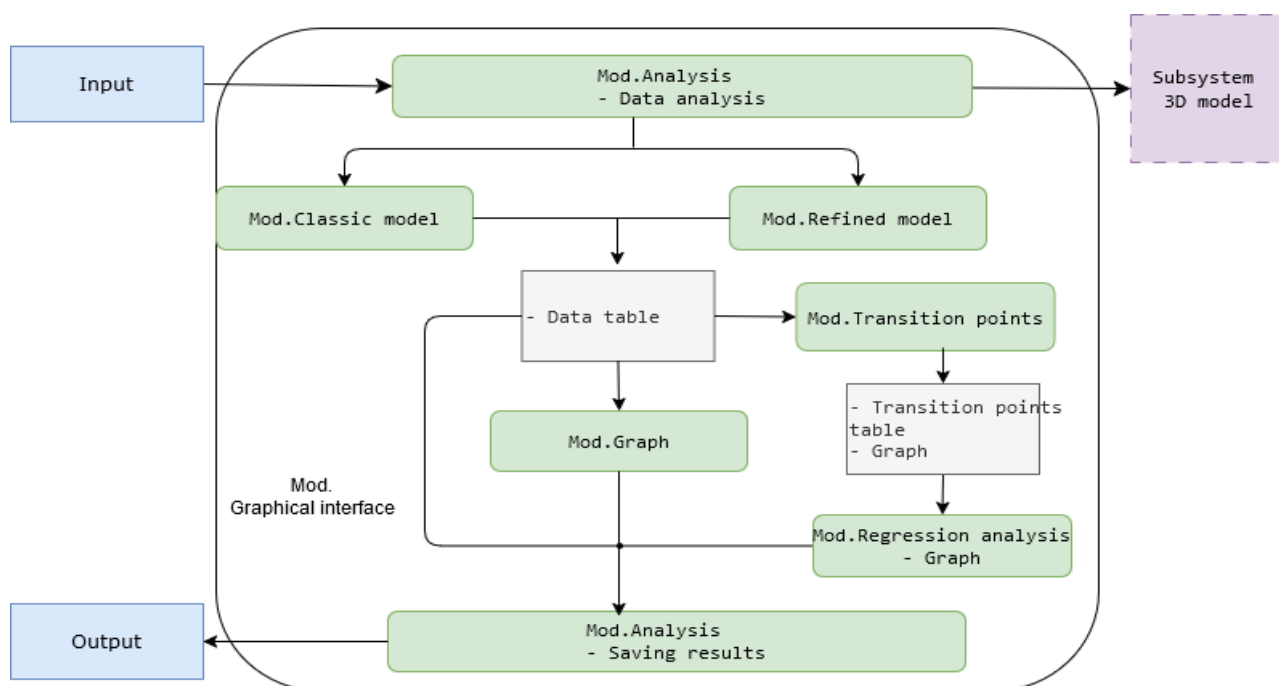


Рисунок 7 – Процесс работы программного комплекса.

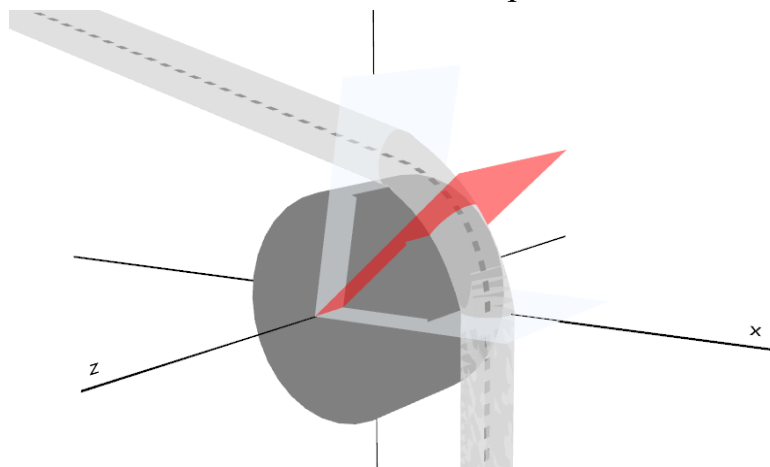
Модули классической и уточненной моделей реализуются на основе разработанных математических моделей, предоставляют пользователю возможность организовать полученные в ходе вычислительного эксперимента данные в виде таблицы. Модуль графической интерпретации полученных расчётных значений позволяет организовать данные в виде графиков (рисунок 2). В модуле реализована функция осуществления вывода координат точки при наведении мыши.

В результате исследования математической модели деформированного оптического волокна обнаружены такие состояния, при которых волокно переходит из двухосного состояния «кристалла» в одноосное (см. рисунок 2). Для подобных состояний реализован модуль фиксации и построения точек перехода, или точек пересечения показателей преломления. Для их нахождения необходимо сравнивать значения показателей преломления на каждом шаге и дополнительно определять точки пересечения векторов, которыми являются отрезки графиков.

Модуль анализа позволяет контролировать ошибки ввода, попытки сохранения таблицы и графика без их создания. Модуль графического представления регрессионного анализа точек перехода реализуется на основе классических методов

аппроксимации (первой и второй степени) полинома, а также интерполяции (методом Лагранжа). Теория данных методов подробно рассмотрена в литературе.

Подсистема трехмерной визуализации процесса деформации оптического волокна позволяет наблюдать процесс изгиба последнего. В ходе численного мо-



делирования пользователь, работая с подсистемой, вводит радиус изгиба и угол изгиба. Пример созданной 3D-модели представлен на рисунке 8.

Рисунок 8– Пример 3D-модели.

Тестирование программного комплекса осуществлялось в два этапа: на

первом – выявление ошибок работы комплекса согласно спецификациям, а на втором – тестирование результатов численного моделирования путем сравнительного анализа с данными, полученными при использовании СКИМ.

В приложениях представлены охранные документы на результаты интеллектуальной деятельности и основной интерфейс программного комплекса.

В заключении приведены основные результаты работы.

1 Получена уточненная математическая модель, описывающая процессы распространения света в деформированном одномодовом оптическом волокне. На основе модели разработаны вычислительные алгоритмы для расчета влияния деформации, температуры 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 показателей преломления для всех трех взаимно перпендикулярных направлений в изогнутом оптическом волокне в одномодовом режиме неодинаковы. Таким образом, оптическое волокно представляет собой двухосный кристалл, положение осей которого меняется в пространстве сложным образом.

3 Установлено, что при воздействии изгиба на одномодовое оптическое волокно внутри сердечника возникает разность показателя преломления двух ортогональных составляющих изогнутого волокна; при этом полученная разность показателей преломления для двух ортогональных поляризаций  $n_x$ ,  $n_y$  различна по краям и середине сердечника волокна.

4 В ходе исследования обнаружены случаи, когда распространение света по изогнутому волокну происходит как по одноосному кристаллу.

5 В результате вычислительных экспериментов выявлено, что значения показателей преломления изогнутого волокна в направлениях координатных осей  $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$  принимают значения больше показателя преломления недеформированного волокна, что приводит к сдвигу максимума поля моды.

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

изменение показателя преломления сердечника оптического волокна при изменении температуры.

7 Определено количественное значение относительного изменения показателя преломления сердечника волокна, вызванного деформацией изгиба за счет теплового расширения, которое составляет величину порядка  $10^{-5}$ .

8 Согласно полученным соотношениям температурных деформационных составляющих показателя преломления определено, что изменение показателя преломления сердечника для оптических волокон различных марок лежит в пределах  $6,8 \cdot 10^{-5} - 7,0 \cdot 10^{-5}$ , что позволяет уточнить погрешность рефлектометрических измерений волоконно-оптической линии, составляющую величину от 0,0045% до 0,005% в зависимости от типа волокна на строительную длину (до 100 км), что соответствует значению до 5 м.

9 Найден максимальный угол изгиба, при котором при любом радиусе изгиба потери будут отсутствовать, если деформация волокна происходит в линейной области. Так, при радиусе изгиба  $R=10$  мм (согласно техническим характеристикам, данный радиус изгиба не влечет возникновения потерь излучения в волокне) значение максимального угла изгиба составляет  $\varphi_{max} = 56,88^\circ$ . Однако увеличение угла изгиба приводит к затуханию сигнала даже при заявленном радиусе изгиба.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных в ВАК России.

1 **Резак, Е. В.** Моделирование деформационного влияния макро-изгиба оптического волокна на показатель преломления его сердцевин / Е. В. Резак // Информатика и системы управления. – 2025. – № 3(85). – С. 109-116.

2 **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.

3 **Резак, Е. В.** Программное средство для моделирования влияния деформации на параметры оптического волокна / Е. В. Резак, Ю. В. Карась // Инженерный вестник Дона, 2024, № 2. – С. 1-12.

4 **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.

5 **Резак, Е. В.** Модель поведения деформированного оптического волокна / Е. В. Резак, С. Г. Панкратьева // Перспективы науки. – 2023. – № 7(166). – С. 81-84.

6 **Резак, Е. В.** Дополнение к определению погрешности измерения длины оптического волокна / Е. В. Резак // Фотон-экспресс. – 2009. – № 6(78). – С. 136-137.

7 **Резак, Е. В.** Потери в оптическом волокне при изгибе / Е. В. Резак // Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика и химия. – 2009. – № 4. – С. 119-122.

8 **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.

**Публикации в других изданиях.**

1 **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 октября 2024 года. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2024. – С. 41 - 46.

2 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, декабрь 2023 года. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2024. – С. 112-117.

3 **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.

4 **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.

5 **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-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2023. – С. 97-102.

6 **Резак, Е. В.** Моделирование и расчет составляющих показателя преломления оптического световода с помощью компьютерного пакета систем компьютерной математики Mathcad / Е. В. Резак // Российская наука, инновации, образование – РОСНИО-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.

7 **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.

8 **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.

**Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ.**

1 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».

2 Свидетельство о гос. регистрации программы на ЭВМ. Программа для моделирования влияния деформации оптического волокна на показатель преломления сердечник-оболочка / **Е. В. Резак**, Ю. В. Карась. – № 2024614652; заявл. 12.02.2024; опубл. 28.02.2024, 2024614652 (Рос. Федерация).