

На правах рукописи



**ЛЕСНИКОВА ЮЛИЯ ИГОРЕВНА**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОГО  
ПОВЕДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ТИПА PANDA  
И ЕГО КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**1.2.2. Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ**

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

**Пермь 2022**

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

**Научный  
руководитель:**

**Труфанов Александр Николаевич,**  
кандидат технических наук

**Официальные  
оппоненты:**

**Барулина Марина Александровна,** д-р физ.-мат. наук,  
Институт проблем точной механики и управления —  
обособленное структурное подразделение  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Федерального исследовательского  
центра «Саратовский научный центр Российской  
академии наук», лаборатория анализа и синтеза  
динамических систем в прецизионной механике,  
заведующий лабораторией

**Голуб Михаил Владимирович,** д-р физ.-мат. наук,  
доцент, Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Кубанский государственный университет», кафедра  
теории функций, заведующий кафедрой

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Пермский государственный национальный  
исследовательский университет», г. Пермь

Защита состоится «21» февраля 2022 года в 16.00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.01.19 по адресу 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 423.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (сайт <http://pstu.ru>)

Автореферат разослан «26» декабря 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д ПНИПУ.01.19,  
кандидат физико-математических наук, доцент



Е.Л. Кротова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В науке и технике широко используются оптические волокна, которые обладают уникальными характеристиками. В отдельный класс выделяют специальные типы волокон, например, анизотропное одномодовое волокно типа Panda. Оно представляет собой гетерогенную конструкцию из легированных кварцевых стекол в полимерном защитно-упрочняющем покрытии (ЗУП) и способно сохранять состояние поляризации введенного света за счет разницы показателей преломления вдоль осей поляризации, вызванной наведением напряженного состояния в светопроводящей жиле. В конструкции предусмотрены специальные силовые элементы с отличными от основного материала волокна термомеханическими свойствами (КЛТР, вязкость, температура стеклования и т.д.). Данный эффект достигается за счет легирования кварцевого стекла. Чем выше степень легирования, тем большую температурную деформацию могут обеспечить стержни в волокне при изготовлении, для формирования разницы показателей преломления. Однако высокие концентрации легирующих оксидов могут приводить к разрушению заготовок силовых элементов в процессе их изготовления и эксплуатации. Волокно Panda используют для изготовления чувствительного контура волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), который является важной компонентой современных навигационных приборов. Температуры от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$  относятся к эксплуатационному диапазону ВОГ, требования по корректной работе конструкции в котором жестко регламентируются. В этот диапазон частично попадают релаксационные переходы полимеров ЗУП. Напряженно-деформированное состояние (НДС) светопроводящей жилы и конечных изделий зависит от поведения материалов, из которых изготовлено волокно. При термосиловом нагружении с разными режимами изменения температуры и нагрузки НДС жилы будет непрерывно изменяться во времени, меняя оптические характеристики волокна, что будет отражаться на показаниях прибора. Данный эффект связан с релаксационными процессами в полимерах ЗУП и развитием ползучести.

В настоящий момент широко распространено моделирование волокон и их конструктивных элементов в рамках термоупругости, что дает первое приближение, не позволяющее учитывать релаксационные процессы, свойственные конструкциям из стеклующихся материалов. В большинстве моделей не рассматривается влияние полимеров ЗУП, моделирование происходит при постоянной температуре или в узком диапазоне изменения. Рассматривается идеальная проектная геометрия или конструктивные элементы учитываются в рамках осреднения физико-механических свойств. Поэтому актуальной является задача моделирования поведения анизотропных оптических волокон и их конструктивных элементов в рамках термовязкоупругости в эксплуатационном диапазоне температур ВОГ, для оценки влияния термосилового воздействия на их оптические характеристики.

**Степень разработанности темы.** Для моделирования термомеханического поведения анизотропных оптических волокон и их конструктивных элементов необходимо прогнозировать их напряженное состояние после изготовления.

Построению моделей формирования НДС в стеклюющихся материалах с учетом их реономных свойств посвящены работы В.Л. Инденбома, А.А. Ильюшина, Б.Е. Победри, И.И. Бугакова, L.D. Coxon, J.G. Williams, О.В. Мазурина, Г.М. Бартенева, О.Ю. Сметанникова, Н.А. Труфанова, И.Н. Шардакова, В.П. Матвеевко и других ученых. Однако подавляющее большинство моделей для анизотропных волокон (Е.М. Дианов, К. Okamoto, К. Tsai, М. Fontaine и другие) представлено в термоупругой постановке, отличающейся только выбором начала отсчета температурной деформации. Также существует достаточно большое количество исследований, посвященных моделированию волокон типа Panda в рамках ряда упрощений: исключение из модели конструктивных элементов с осреднением свойств (D. Wong, И.А. Есипенко, М.А. Савин, Y. Zhang); модели без учета защитного покрытия (P. Lesiak, J. Liu, В. Hopf, M. Li); при комнатной температуре или в узком диапазоне температур (F. Esposito, X. Zhang, X. He) и т.д. Поэтому остается актуальной задача моделирования волокна и его конструктивных элементов в термовязкоупругой постановке, с учетом свойств, зависящих от температуры, позволяющая учитывать релаксационные процессы, свойственные конструкциям из стеклюющихся материалов и полимеров.

**Цель работы** – разработка математических моделей термовязкоупругости анизотропного оптического волокна типа Panda и его конструктивных элементов для изучения основных закономерностей деформационного и оптического поведения изделия на этапах изготовления.

**Задачи:**

1. Выполнить постановку задач изготовления силовых стержней и промежуточного испытания волокна типа Panda в условиях технологической пробы с учетом особенностей технологического процесса.

2. Построить математическую модель поведения заготовки силового стержня с учетом неоднородного легирования и температурных остаточных напряжений для анализа условий разрушения на различных этапах производства.

3. Разработать методику выбора и определить критерий прочности заготовки силового стержня на основе анализа количественных значений критериальных характеристик, полученных в рамках серии численных и натуральных экспериментов на разрушение.

4. Построить математическую модель волокна Panda с учетом термомеханики полимерных материалов защитно-упрочняющего покрытия для описания эволюции технологических напряжений в условиях термосилового воздействия.

5. Выполнить комплексные исследования основных закономерностей влияния защитно-упрочняющих покрытий на эволюции напряженно-деформированного состояния и оптических характеристик волокна Panda в условиях термосилового воздействия на основе серии вычислительных экспериментов.

**Научная новизна.**

1. Впервые построены пространственные параметризованные математические модели с физическими соотношениями теории вязкоупругости для анизотропных оптических волокон типа Panda и его конструктивных элементов.

2. Впервые получены величины критериальных характеристик прочности заготовок силовых стержней с учетом неоднородного легирования и температурных остаточных напряжений на основе комплексного численно-экспериментального исследования.

3. Разработаны новые программные модули для конечно-элементного программного пакета ANSYS Mechanical APDL, позволяющие моделировать термовязкоупругое поведение оптического волокна Panda и заготовки силового стержня, в которых реализован алгоритм учета температурных функциональных зависимостей термомеханических свойств материалов защитно-упрочняющих покрытий.

4. Впервые выполнено математическое моделирование термовязкоупругого поведения волокна Panda с учетом полимерного защитно-упрочняющего покрытия при сложном термосиловом нагружении с анализом эволюции напряженно-деформационного состояния и оптических характеристик конструкции.

5. Получены новые закономерности эволюции полей технологических напряжений и связанных с ними оптических характеристик волокна Panda в защитно-упрочняющем покрытии в условиях термосилового воздействия и сложного напряженно-деформированного состояния на основе комплексного исследования с применением вычислительных экспериментов.

**Практическая и теоретическая значимость.** Предложенные математические модели, алгоритмы и вычислительные программы использованы в технологических процессах производства и тестирования оптических волокон типа Panda в ПАО «ПНППК». Результаты, полученные в процессе исследования, позволили сформировать рекомендации, новые подходы и технологические решения, что дало возможность улучшить характеристики конечной продукции из анизотропного волокна.

Актуальность проблемы исследования обусловлена необходимостью формирования фундаментальных основ методологий решения прикладных задач технологической механики анизотропных волокон, имеющих выраженный междисциплинарный характер. Решение данной проблемы актуально с теоретической точки зрения, как развитие численных методов решения задач термовязкоупругости неоднородных стеклующихся тел, а также с позиций необходимости создания теоретических основ прикладных разделов технологической механики, связанных с проектированием изделий из неоднородно легированных кварцевых стекол и расчетами параметров технологических процессов изготовления оптоволокна и его компонент.

**Методы и методология исследования.** Для решения поставленных задач были использованы математический аппарат и численные методы механики деформированного твердого тела. Численное моделирование осуществлено методом конечных элементов, реализованным в проблемно-ориентированном программном комплексе ANSYS Mechanical средствами параметрического языка программирования APDL. Экспериментальная установка Instron 8801 ЦКП «Центр экспериментальной механики» ПНИПУ использовалась для реализации схемы трехточечного изгиба заготовок силовых стержней при испытании на прочность.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Трехмерная параметризованная математическая модель испытания на трехточечный изгиб заготовок силовых стержней анизотропных оптических волокон типа Panda, отличающаяся учетом неоднородного легирования и температурных остаточных напряжений.

2. Новые результаты по критериальным характеристикам конструкционной прочности заготовок силовых стержней анизотропного волокна типа Panda на основе комплексного численно-экспериментального исследования.

3. Трехмерная параметризованная математическая модель анизотропного оптического волокна типа Panda с полимерным защитно-упрочняющим покрытием, отличающаяся учетом зависимости коэффициента термического расширения (КТР) от температуры, реономного поведения полимерных материалов и протекающих в них релаксационных процессов.

4. Новые результаты об эволюции полей технологических напряжений и оптических характеристик волокна Panda, установленные в результате комплексного исследования на основе вычислительных экспериментов, в том числе при отклонениях от проектной геометрии конструктивных элементов и защитно-упрочняющих покрытий.

**Степень достоверности.** Обеспечивается сходимостью вычислительных алгоритмов программ, качественным и количественным соответствием результатов моделирования данным натуральных экспериментов и известным решениям других авторов на удовлетворительном уровне.

**Личный вклад автора.** Все отраженные в диссертации результаты получены автором лично или с его непосредственным участием. Разработка алгоритмов, создание программ для ЭВМ на их основе, реализация численных экспериментов и визуализация результатов выполнены диссертантом лично или при его непосредственном участии. В работе [1] автор принимал непосредственное участие в реализации серии натуральных испытаний; численное моделирование задачи, серия вычислительных экспериментов, обработка и анализ результатов выполнены совместно с научным руководителем А.Н. Труфановым. В работах [2-3] диссертанту принадлежат разработка алгоритмов, создание программ для ЭВМ, проведение серии численных экспериментов, визуализация результатов; анализ результатов выполнен совместно с научным руководителем А.Н. Труфановым. Работа [4] выполнена автором лично и без соавторов. В работе [5] автору принадлежит постановка задачи, численное моделирование и обработка результатов. В статье [6] численная реализация модели без учета изгиба и вычислительные эксперименты выполнены А.Н. Труфановым и О.Ю. Сметанниковым; автором разработана модель с учетом изгиба, выполнена ее численная реализация на ЭВМ, проведена серия численных экспериментов и их анализ. В работах [7-8] диссертанту принадлежат разработка алгоритмов, создание программ для ЭВМ, проведение серии численных экспериментов, визуализация результатов; анализ результатов выполнен совместно с научным руководителем А.Н. Труфановым. В работах [2-4, 6-8] автором лично разработан алгоритм перехода от деформационных параметров к оптическим и выполнена его численная

реализация. В работе [9] автор единолично реализовал процедуру имплантации зависимости КТР от температуры в проблемно-ориентированном программном комплексе ANSYS, работа выполнена без соавторов. Интерпретация результатов и подготовка публикаций [1-3, 5-8] выполнена совместно с соавторами. Диссертантом совместно с соавторами подготовлено две программы для ЭВМ, личный вклад автора: [10] разработка плоской модели заготовки силового стержня, моделирование поля остаточных деформаций, создание трехмерной модели и технологии имплантации поля остаточных деформаций в рамках моделирования технологического процесса, моделирование трехточечного изгиба заготовки; [11] имплантация моделей поведения материалов защитно-упрочняющих покрытий в программный комплекс ANSYS, моделирование остаточных напряжений в волокне после вытяжки, создание трехмерной параметризированной модели однорядного натяга оптического волокна на алюминиевую катушку с постоянной силой натяжения в рамках механики контактного взаимодействия.

#### **Апробация результатов работы.**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научной конференции «Проблемы деформирования и разрушения материалов и конструкций» (г. Пермь, 2015 г), на XXV и XXXI Всероссийской школе – конференции молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» (г. Пермь, 2016 и 2022 г.), на 6-й и 8-й Всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» (г. Москва, 2016 и 2018 г.г.), на XX, XXI и XII Зимней школе по механике сплошных сред (г. Пермь, 2017, 2019 и 2021 г.г.), на XX, XXI и XXII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (г. Алушта, 2017, 2019 и 2021 г.г.), на XII и XIV Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (г. Алушта, 2018 и 2022 г.г.), на Всероссийской конференции молодых ученых-механиков (г. Сочи, 2018, 2021 и 2022 г.г.), на XIV Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2020 г.), на Международной конференции Уфимская осенняя математическая школа (г. Уфа, 2021 и 2022 г.г.), на XVI Всероссийской школе-конференции молодых ученых (г. Новосибирск, 2022 г.). Результаты работы использованы в рамках проектов РФФИ 13-08-96036, 16-48-590660 и 20-48-596009, договора №2015/305 с ПАО «ПНППК», государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ FSNM-2020-0026).

Диссертационная работа докладывалась и обсуждалась на семинарах кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика» (рук. проф. В.Ю. Столбов), кафедры «Математическое моделирование систем и процессов» (рук. проф. П.В. Трусков), кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» (рук. проф. А.Н. Аношкин) ПНИПУ, Института механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН (рук. академик РАН В.П. Матвеев), Научного центра волоконной оптики РАН (рук. д.ф.-м.н. С.Л. Семенов), кафедры вычислительной и экспериментальной механики ПГНИУ (рук. доц. В.Н. Терпугов).

**Публикации.** По материалам диссертационного исследования опубликовано 35 печатных работ: в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи в изданиях, индексируемых в Scopus/Web of Science, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 статья в журнале, входящем в перечень РИНЦ, 24 тезиса докладов на российских и международных конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 113 страницах, содержит 61 иллюстрацию и 12 таблиц. Список литературы включает 140 наименований.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **введении** формулируются цель, задачи, научная новизна и практическая значимость диссертационного исследования на основе актуального состояния области научных изысканий. Сформулированы краткое содержание работы и основные результаты.

В **первой главе** описана технология изготовления оптических волокон типа Panda и заготовок их конструктивных элементов, а также термомеханические свойства кварцевых стекол. Проанализированы основополагающие модели стеклющихся материалов, позволяющие сформировать необходимое напряженно-деформированное состояние в изделиях. Проиллюстрированы основные проблемы прогнозирования эволюции напряженного состояния, оптических характеристик и прочности анизотропных оптических волокон. Отмечено, что оптические характеристики волокна зависят от напряженно-деформированного состояния изделия. Таким образом, особое внимание должно уделяться разработке математических моделей формирования внутренних напряжений волокна. На основе анализа современного состояния технологической механики анизотропных оптических волокон и их конструктивных элементов выделена проблематика и обоснована актуальность научных исследований.

Во **второй главе** приведена общая концептуальная и математическая постановка задач технологической механики оптических волокон. Модель формирования остаточных напряжений в стеклющихся материалах и модель трехточечного изгиба силовых стержней с учетом остаточных напряжений приведены в работе [1]. Модель технологической пробы с учетом остаточных напряжений, натяжения, изгиба, характера сопряжения волокно-катушка, температуры от  $-60$  до  $+60^\circ\text{C}$ , а также вязкоупругих эффектов, связанных с релаксационными переходами в полимерах ЗУП в данном температурном диапазоне приведена в [5].

Для полимеров ЗУП использовалась линейная вязкоупругая модель с аппроксимацией модуля релаксации суммой экспонент:

$$\hat{\sigma} = K \Delta \hat{I} + 2 \int_0^t G(t-\tau) d(\hat{\varepsilon}(\tau) - 1/3 \Delta(\tau) \hat{I}), \quad G(t) = G_0 \left[ C_\infty^G + \sum_{i=1}^{n_G} C_i^G \exp\left(-\frac{t}{\tau_i^G}\right) \right], \quad (1)$$

где  $\Delta$  – объемная деформация,  $K$  – модуль объемного сжатия,  $G(t)$  функция сдвиговой релаксации,  $G_0$  – мгновенный модуль,  $C_i^G$  – материальные константы,  $n_G$



- количество членов экспоненциального ряда,  $\tau_i^G$  – времена релаксации. Для учета влияния температуры на свойства материалов ЗУП использовалась температурно-временная аналогия, описываемая уравнением Вильямса-Ланделла-Ферри.

Постановка задачи включает математические соотношения, определяющие связь между оптическими характеристиками системы и параметрами НДС:

$$\Delta n_x = C_1 \sigma_x + C_2 (\sigma_y + \sigma_z), \quad \Delta n_y = C_1 \sigma_y + C_2 (\sigma_x + \sigma_z), \quad (2)$$

$$B = (C_1 - C_2) \int_{S_c} (\sigma_x - \sigma_y) |E^*|^2 dS_c / \int_{S_c} |E^*|^2 dS_c, \quad (3)$$

где  $C_1, C_2$  – коэффициенты фотоупругости,  $E^*$  – распределение интенсивности основной моды света по поперечному сечению волновода,  $S_c$  – площадь поперечного сечения жилы,  $B$  – модовое двулучепреломление,  $\Delta n_x, \Delta n_y$  – приращение показателя преломления света, вызванное напряженно-деформированным состоянием. В рамках исследования выполнена имплантация соотношений связывающих поля напряжений и оптические характеристики волокна в проблемно-ориентированном программном комплексе ANSYS.

**Третья глава** посвящена комплексному численно-экспериментальному исследованию конструкционной прочности заготовок силовых стержней волокна типа Panda (рисунок 1).

В основу критерия оценки конструкционной прочности заготовок легло сопоставление данных математического моделирования и натурных экспериментов на разрушение. Критерий прочности, определенный для конкретной конструкции, позволяет учесть основные факторы, влияющие на прочность: технологические остаточные напряжения; качество обработки поверхности; неоднородность легирования; разброс свойств материалов; наличие поверхностных и внутренних дефектов; масштабный фактор и т.д. Поэтому в экспериментах на разрушение стержней, имеющих разную геометрию (диаметры стержней и легированной зоны), варьировалось расстояние между базами в эксперименте на трехточечный изгиб, чтобы намеренно создать на момент разрушения разные напряженные состояния.

Для определения конструкционной прочности заготовок силовых стержней выполнена серия из 31 натурального эксперимента на трехточечный изгиб с двумя видами стержней – стержнем из чистого кварцевого стекла и силовым стержнем с легированной сердцевиной, схема которого приведена на рисунке 1. Геометрические характеристики: 98-245 мм и 6,8-10,4 мм – длина и диаметр стержней соответственно; 45-125 мм – расстояние между базами. Все стержни были доведены до разрушения, зафиксированы значения разрушающих нагрузок и соответствующих им прогибов.

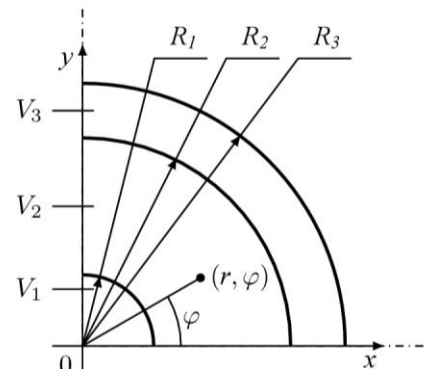


Рисунок 1 – Схема поперечного сечения силового стержня. V1:  $B_2O_3 : SiO_2$ , V2:  $B_2O_3 : P_2O_5 : SiO_2$ , V3:  $SiO_2$

Построена трехмерная параметризованная математическая модель испытания на трехточечный изгиб силовых стержней анизотропных оптических волокон типа Panda. Выполнена идентификация численной модели с натурным экспериментом, оценка сходимости численного решения по остаточным напряжениям и прогибу. В численном эксперименте в каждом стержне воссоздавалось поле напряжений, соответствующее моменту разрушения в натурном эксперименте, фиксировались максимальные значения характеристик, используемых для оценки прочности:  $\sigma_1, \sigma_{II}, \tau_2, \varepsilon_1$ .

Стержни разделились на три группы с похожим поведением (рисунок 2): 1-2 группы соответствуют типам исследуемых стержней, 3 группа – силовые стержни, выдержавшие аномально высокие нагрузки.

Выяснилось, что стержни 3 группы подвергались высокотемпературному отжигу, повлиявшему на микроструктуру стекол. Удовлетворительное совпадение прогибов (разброс в среднем не более 10%, за исключением стержня №30) подтверждает корректность задания физико-механических свойств и построенной модели трехточечного изгиба (рисунок 2). По каждой группе проведен статистический анализ разбросов критериальных величин. Для заготовок силовых стержней (2 группа) в качестве оценки конструкционной прочности изделия следует выбрать критерий максимальных главных деформаций, величина которого составляет  $\varepsilon_{1кр} = (2,85 \pm 0,24) \cdot 10^{-3}$  на основе 21 испытания. Выбранный критерий прочности не применим к 3 группе стержней, т.к. для нее требуется уточнение математической модели с учетом микроструктурных изменений стекол с разным легированием после высокотемпературного отжига.

**Четвертая глава** посвящена созданию параметризованной математической модели анизотропного оптического волокна типа Panda с учетом двухслойного полимерного ЗУП (рисунок 3) в условиях технологической пробы – силовая однорядная намотка на алюминиевую катушку с целью оценки чувствительности деформационных и оптических характеристик волокна к внешним воздействиям в диапазоне температур  $[-60^\circ\text{C}; +60^\circ\text{C}]$ . А также оценке

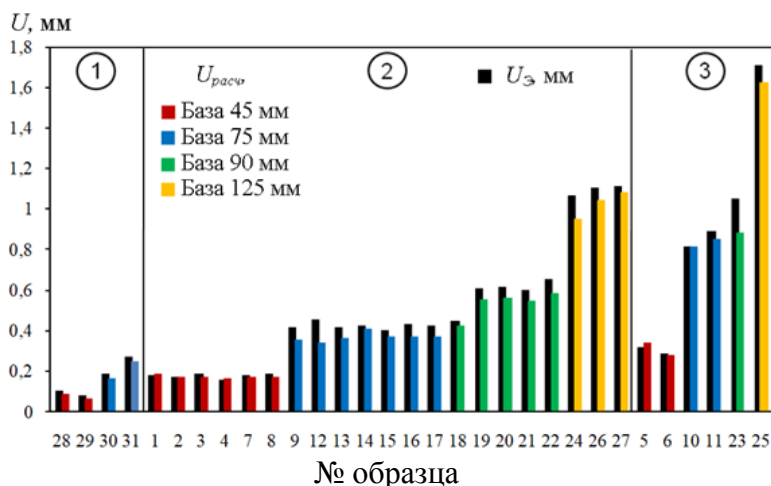


Рисунок 2 – Прогиб образца при разрушении:  
1 – стержни из кварцевого стекла; 2 – силовые стержни;  
3 – силовые стержни после отжига

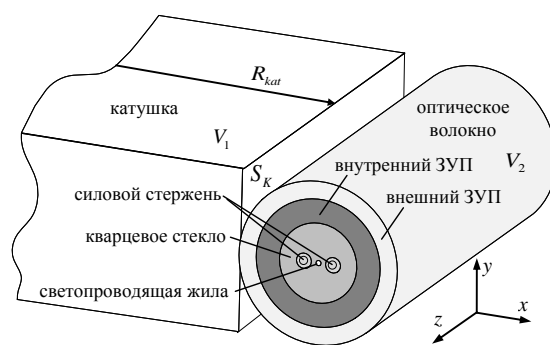


Рисунок 3 – Объемная модель технологической пробы

влияния различных геометрических параметров конструкции на работоспособность трехмерной параметризованной модели волокна в рамках термовязкоупругости: технологические напряжения, деформационные и оптические характеристики. В рамках предложенной модели возможно рассмотрение свободной намотки волокна.

В Разделе 4.1 численно определены технологические остаточные напряжения в анизотропном оптическом волокне Panda в процессе охлаждения от 2000°C до комнатной температуры после вытяжки (рисунки 4, 5).

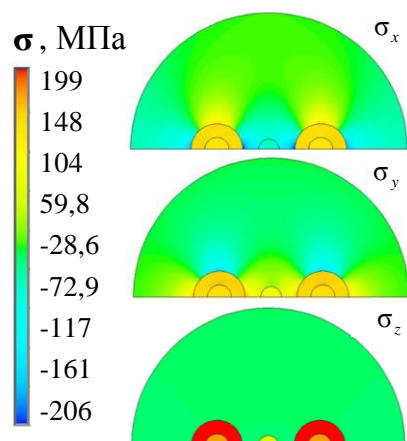


Рисунок 4 – Поля распределения остаточных напряжений в волокне после вытяжки

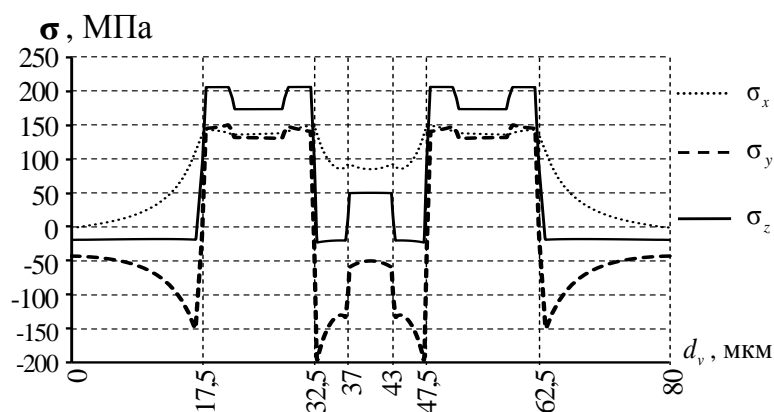


Рисунок 5 – Эпюры распределения компонент тензора остаточных напряжений вдоль центрального сечения волокна после вытяжки

Согласно данным других авторов<sup>1</sup> максимальный уровень остаточных упругих напряжений в волокне после вытяжки может достигать 150 МПа. В рамках реализованной модели максимальный уровень остаточных напряжений достигает:  $|\max\sigma_x| = 148,5$  МПа;  $|\max\sigma_y| = 181,5$  МПа;  $|\max\sigma_z| = 205,5$  МПа. Данный факт отражает работоспособность построенных моделей и возможность их использования для широкого круга задач.

В Разделе 4.2 выполнена оценка влияния характера сопряжения ЗУП и оптического волокна в модели технологической пробы. Проанализировано влияние характера сопряжения ЗУП-волокно на эволюцию деформационных и оптических характеристик в рамках термоциклирования (рисунок 6): идеальный контакт, полная адгезия, фрикционный контакт. Установлено

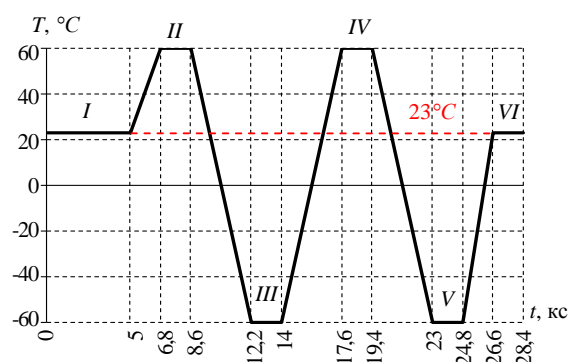


Рисунок 6 – Термоцикл

незначительное влияние характера сопряжения зон контакта ЗУП-волокно на деформационные и оптические характеристики. В рассмотренной модели расхождения контактных поверхностей не наблюдается. Для рационализации

<sup>1</sup> Yablou, A. D. Optical and mechanical effects of frozen-in stresses and strains in optical fibers //IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. – 2004. – Vol. 10. – №. 2. – P. 300-311.

времени выполнения вычислительных процедур принято решение рассматривать идеальный контакт волокна в ЗУП.

В Разделе 4.3 проводится оценка влияния радиуса катушки в термоцикле (рисунок 6) на деформационные и оптические характеристики системы. Исследования выполнены для модели технологической пробы со стандартным соотношением толщин ЗУП для трех вариантов радиуса катушки 5, 22 и 50 мм.

Изгиб волокна оказывает наибольшее влияние на компоненту тензора напряжений  $\sigma_z$  и контактное давление (рисунок 7). Уровень напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  при контакте и изгибе меняются незначительно (менее 1 %).

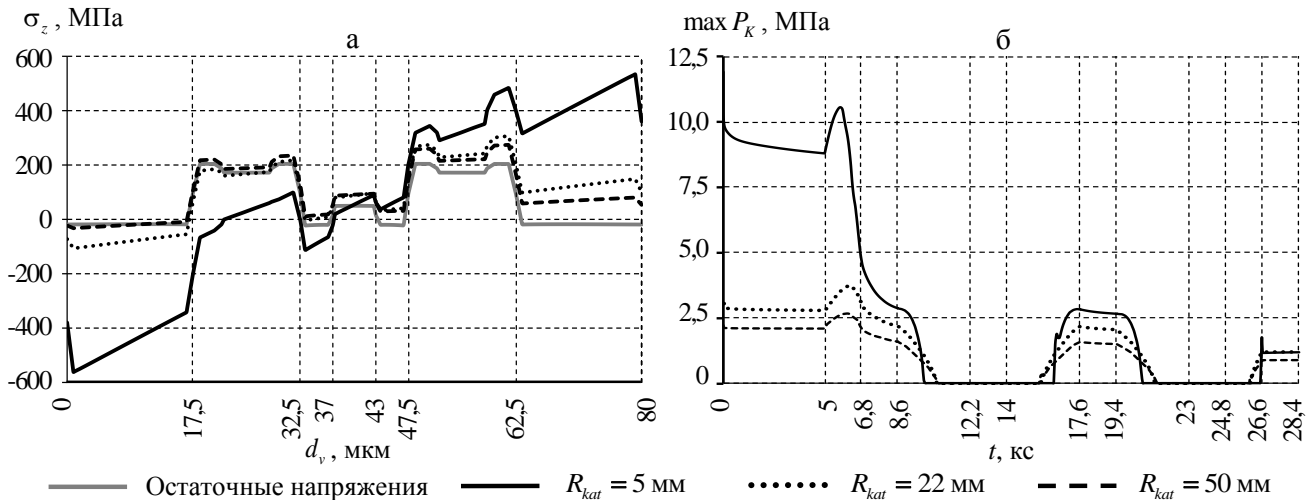
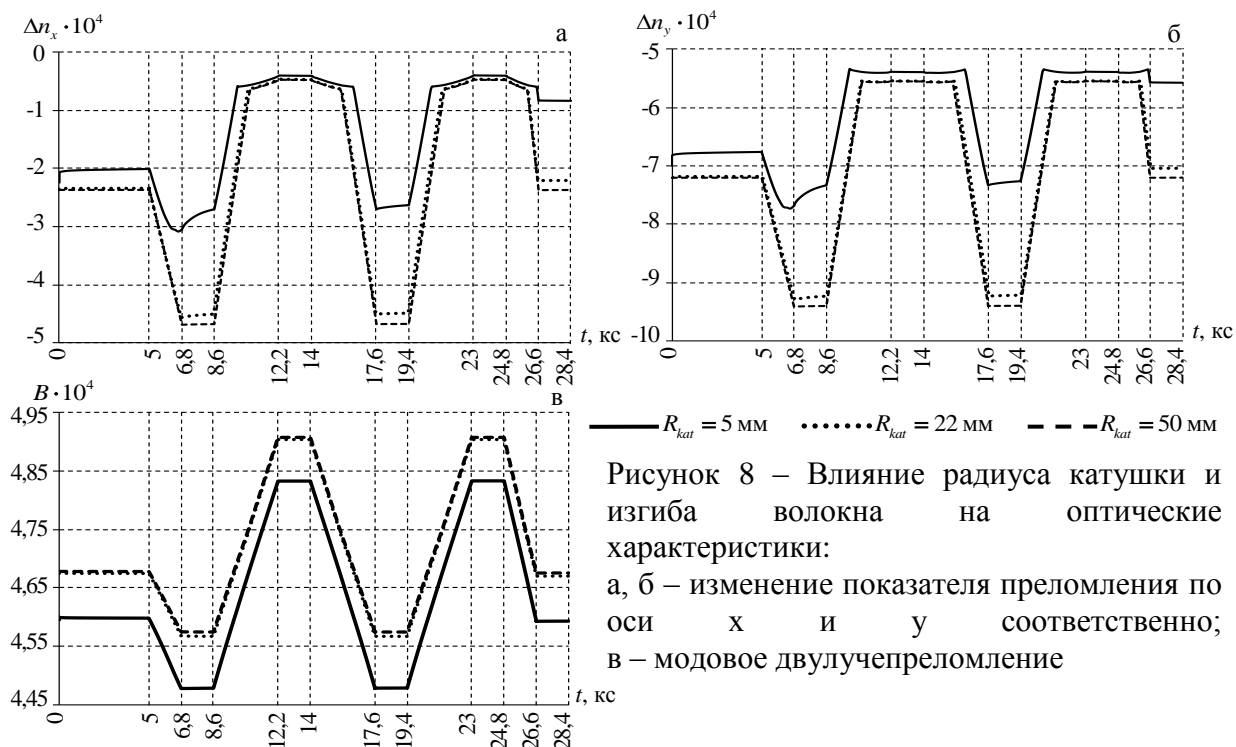


Рисунок 7 – Влияние изгиба на параметры деформирования волокна:  
 а –  $\sigma_z$  вдоль центрального сечения волокна после термоцикла при 23 °С;  
 б – максимальное контактное давление во время термоцикла

Наблюдается ассиметричный характер распределения компонент тензора напряжений по сечению волокна. Максимальный уровень  $\sigma_z$  при катушке 5 мм увеличился с 205 до 527 МПа (~ в 2,5 раза) при сравнении с остаточными напряжениями, при радиусах катушки 22 и 50 мм увеличение тоже существенное, на 48 и 33 % соответственно.

При уменьшении радиуса катушки с 50 до 5 и 22 мм наблюдается увеличение максимального уровня контактного давления в 4,44 и 1,39 раза соответственно. Максимальный уровень контактного давления наблюдается при первом нагреве до +60 °С. Размер катушки влияет и на температуру, при которой происходит полное отлипание поверхностей контакта из-за термической усадки материалов сборки. При радиусе катушки 5 мм раскрытие контакта происходит при температуре приблизительно 15 °С, при 22 и 50 мм при -3 °С. Получены зависимости показателя преломления (2) и двулучепреломления (3) от радиуса катушки и температуры (рисунок 8).

При катушке 5 мм наблюдаются нелинейное поведение показателей преломления, что связано с релаксационными переходами в ЗУП. Данного эффекта не наблюдается при больших радиусах катушки. Характер изменения двулучепреломления в рамках термоцикла не зависит от радиуса катушки. При этом количественные значения  $B$  при катушке 5 мм меньше не более чем на 2,2 %, чем при больших катушках. Оптические параметры волокна при катушках 22 и 50 мм имеют малые отличия.



В Разделе 4.4 проводится оценка влияния отклонения от соосности оси светопроводящей жилы и центра волокна на деформационные и оптические характеристики волокна типа Panda при термоциклировании. Рассматривалось смещение жилы по оси x в пределах  $\Delta h_x = \pm 4$  мкм и по оси y в пределах  $\Delta h_y = \pm 4$  мкм (рисунок 9). Получены поля остаточных напряжений в волокне после высокотемпературной вытяжки, эпюры приведены на рисунке 9.

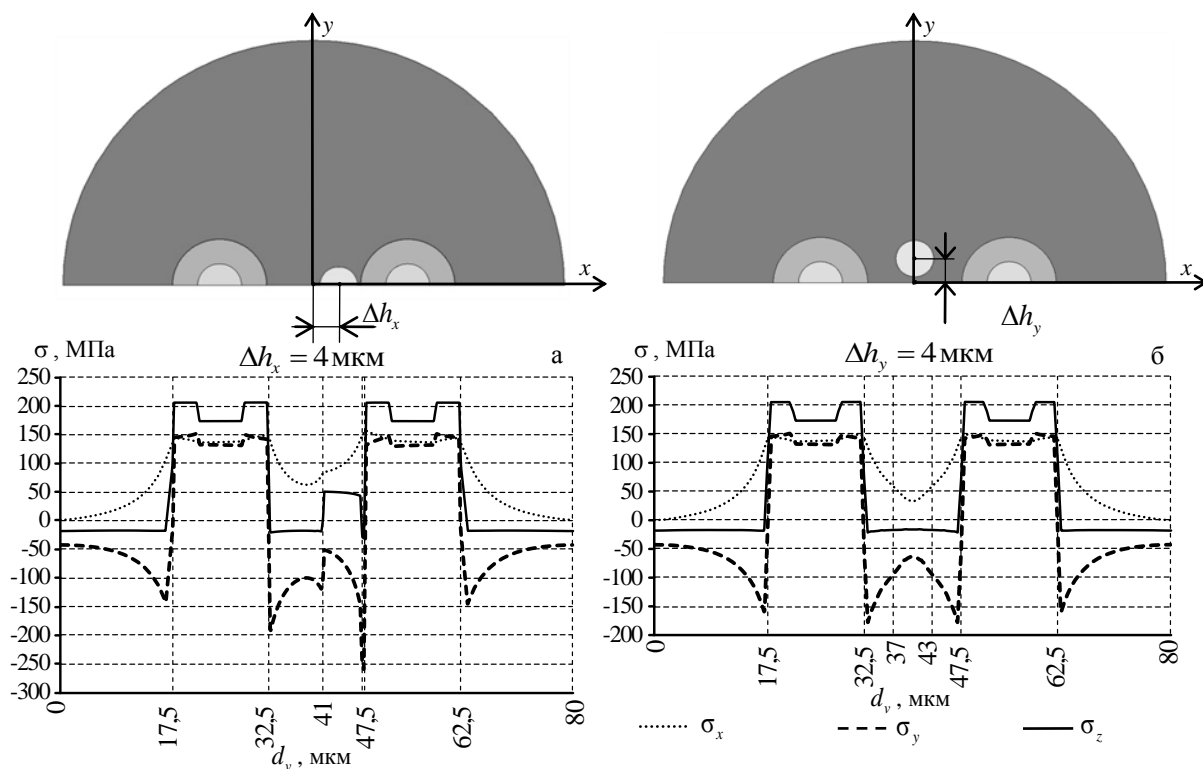


Рисунок 9 – Эпюры остаточных напряжений после вытяжки, вдоль поперечного сечения:  
 а – для  $\Delta h_x = 4$  мкм, б – для  $\Delta h_y = 4$  мкм

Получены зависимости технологических остаточных напряжений от времени в условиях термоцикла. Изменение температуры оказывает более существенное влияние на параметры системы при сдвиге светопроводящей жилы по оси  $y$ . Эволюция контактного давления оказывает влияние на изменение показателя преломления на участках выдержки после нагрева. Показатели преломления изменяются нелинейно, влияние контакта более выражено при уменьшении радиуса катушки. Наблюдается частичная разгрузка волокна за счет релаксационного перехода и соответствующего ему снижения жесткости внешнего ЗУП.

На рисунке 10 показаны зависимости изменения модового двулучепреломления  $\Delta B = B' - B_0$  при сдвиге светопроводящей жилы, где  $B'$  – двулучепреломление волокна со смещением жилы;  $B_0$  – двулучепреломление волокна с проектной геометрией. Изменение параметра показано на примере трех зон выдержки при постоянной температуре в термоцикле при  $R_{kat} = 50$  мм.

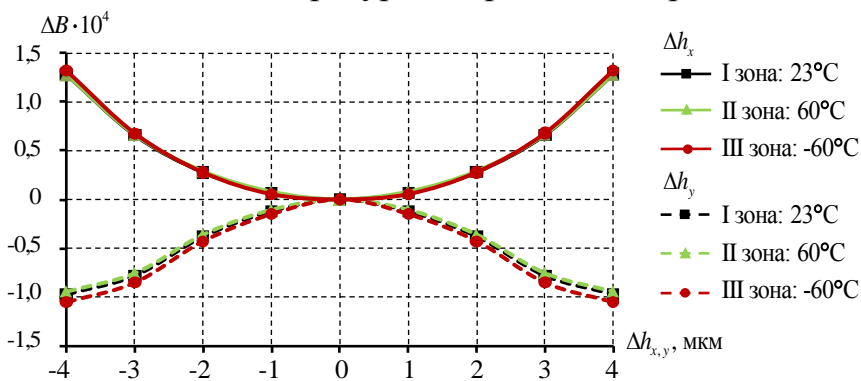


Рисунок 10 – Изменение модового двулучепреломления волокна при несоосности светопроводящей жилы

Отклонение жилы по оси  $x$  приводит к увеличению двулучепреломления, а по оси  $y$  наоборот к его уменьшению для приведенной ориентации силовых стержней. Отклонение по оси  $y$  более чувствительно к изменению температуры.

В Разделе 4.5 проводится оценка влияния отклонения геометрической конфигурации ЗУП на НДС и оптические характеристики волокна Panda при  $R_{kat} = 5$  мм. В качестве варьируемых параметров были приняты толщины внутреннего  $h_1$  и внешнего  $h_2$  ЗУП (таблица 1). Определены остаточные технологические напряжения, зависимости компонент тензора напряжений от времени (рисунок 11), характер изменения зоны сопряжения волокно-катушка в термоцикле. Для анализа результатов исследования в рамках термоцикла выделено 6 зон выдержки при постоянной температуре: I = 23 °C; II = 60 °C; III = -60 °C; IV = 60 °C; V = -60 °C; VI = 23 °C (рисунок 6). Параметры рассматриваются в середине временного интервала выдержки.

Таблица 1 – Параметры модели при варьировании соотношения толщин ЗУП

Параметр	Обозначения соотношения толщин ЗУП						
	$h_{10\_90}$	$h_{20\_80}$	$h_{30\_70}$	$h_{standart}$	$h_{70\_30}$	$h_{80\_20}$	$h_{90\_10}$
$h_1$ , мкм	4,35	8,7	13,05	25	30,45	34,8	39,15
$h_2$ , мкм	39,15	34,8	30,45	18,5	13,05	8,7	4,35
$h_1$ , % of $h$	10	20	30	57,5	70	80	90
$h_2$ , % of $h$	90	80	70	42,5	30	20	10



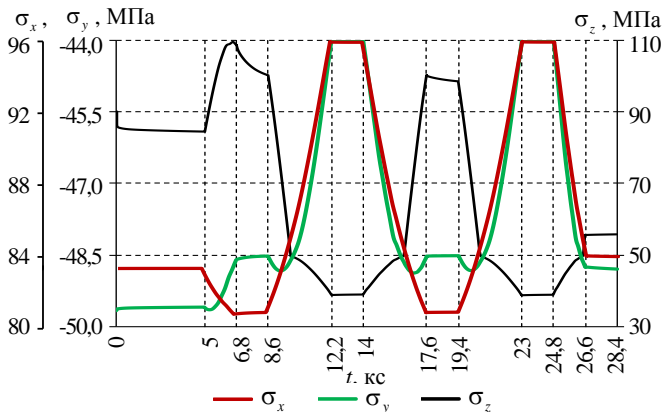


Рисунок 11 – Эволюция компонент тензора напряжений в центре светопроводящей жилы волокна при  $h_{\text{standart}}$

Максимальный вклад в тензор напряжений оказывает  $\sigma_z$ . На участках выдержки при  $60^\circ\text{C}$  можно отметить нелинейность изменения параметра. Разброс значений составляет 75-135 МПа. Два цикла нагружения приводят к снижению  $\sigma_z$  при комнатной температуре в среднем на 25 %.

Были получены закономерности изменения показателей преломления в центре светопроводящей жилы по формулам (2) (рисунок 12).

При термоциклировании наблюдается снижение показателя преломления примерно на  $2e-4$  по сравнению со свободным волокном. Показатель по оси  $y$  снижается больше, чем по оси  $x$  (рисунок 12а). При увеличении толщины внутреннего покрытия отличие изменения показателя преломления при всех вариантах температуры стремится к минимуму. При соотношении толщин внутреннего/внешнего ЗУП более 70/30 % различия изменения показателей преломления при разной температуре выдержки минимальные (рисунок 12б).

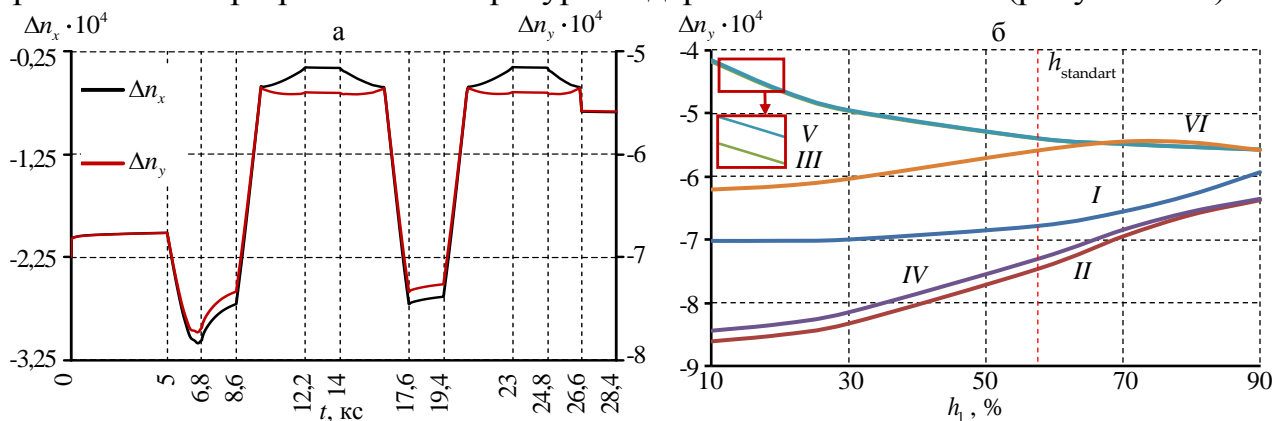


Рисунок 12 – Изменение показателя преломления в центре светопроводящей жилы: а – эволюция при  $h_{\text{standart}}$ , б – зависимость  $\Delta n_y$  от толщины внутреннего ЗУП

В Разделе 4.6 моделируется технологическая проба с учетом зависимости температурной деформации материалов ЗУП от температуры (рисунок 13). Ранее в моделях принимались значения КТР:  $\alpha_{\text{ЗУП I}} = 200e-6 \text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha_{\text{ЗУП II}} = 50e-6 \text{ K}^{-1}$ .

Анализ результатов показал, что в технологической пробе учет зависимости  $\epsilon_T(T)$  в большей степени влияет на изменение показателя преломления при отрицательных температурах при любом радиусе катушки (рисунок 14).

Наиболее существенное изменение компонент  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  наблюдается при отрицательных температурах. Данный эффект связан с релаксационными переходами в низко модульной буферной прослойке (внутренний слой ЗУП). Разброс значений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  при  $-60^\circ\text{C}$  не превышает 10-20 МПа. Максимальные значения наблюдаются при стандартном соотношении ЗУП. При положительных температурах зависимость от соотношения толщин ЗУП  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  линейная.

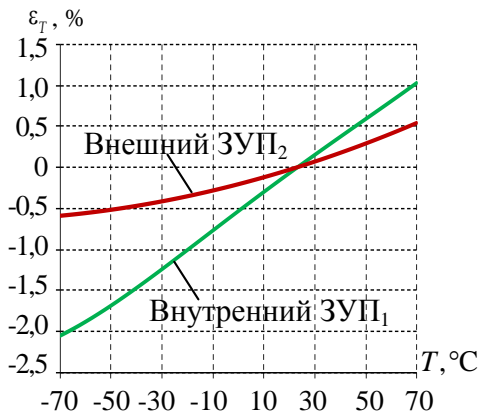


Рисунок 13 – Зависимость температурной деформации материалов ЗУП от температуры

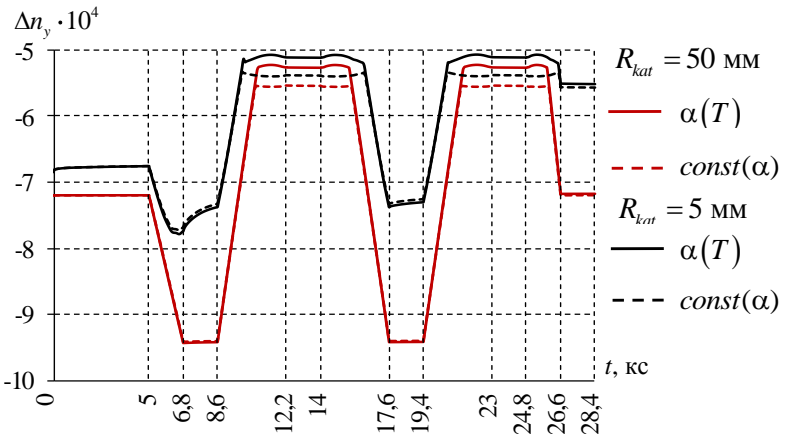


Рисунок 14 – Изменение показателя преломления по оси y в термоцикле

С уменьшением толщины внутреннего ЗУП увеличивается разница в изменении показателя преломления между моделями с постоянным КТР и КТР, зависящим от температуры. При других температурах отличие не превышает 6%.

В **Разделе 4.7** рассмотрена возможность моделирования технологической пробы в виде свободной намотки волокна по диаметру 17 см с использованием построенной численной модели. Термоцикл испытания приведен на рисунке 15. Такой вид технологической пробы применяется для контроля качества волокна с замером коэффициента экстинкции. Сравнение результатов численного моделирования с коэффициентом экстинкции, полученным экспериментально, показано на рисунке 15.

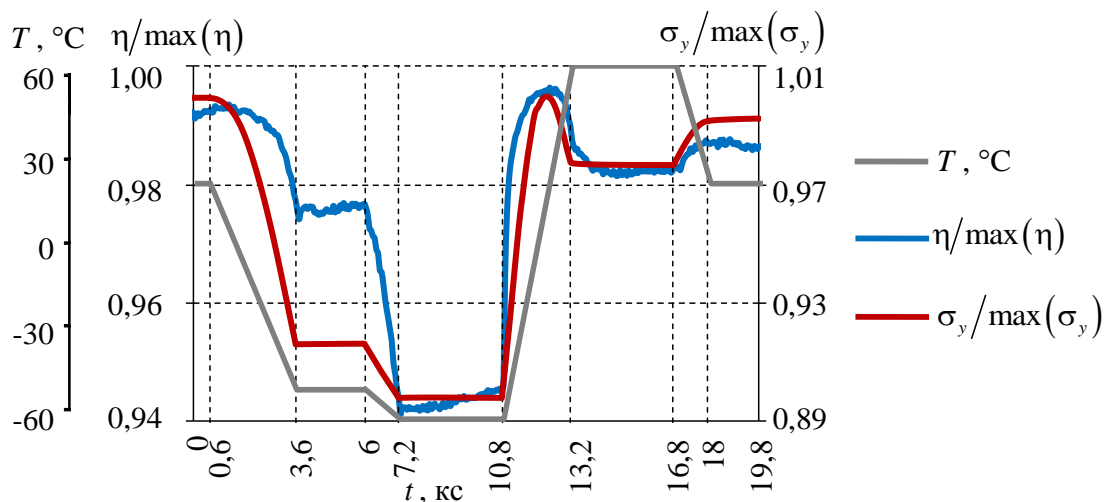


Рисунок 15 – Сравнение экстинкции с напряжением по оси y в рамках термоцикла

Характер изменения во время термоцикла напряжений по оси y коррелирует с изменением коэффициента экстинкции. Полученные результаты подтверждают, что на качественном уровне модель верно описывает терморелаксационные процессы в ЗУП.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнена постановка задач изготовления заготовок силовых стержней и технологической пробы с учетом особенностей технологического процесса, отличающаяся учетом широкого диапазона температур и термовязкоупругих свойств материалов конструкции.

2. Разработана математическая модель термомеханического поведения заготовок силового стержня для анализа условий разрушения, отличающаяся учетом неоднородного легирования и температурных остаточных напряжений с возможностью моделирования отжига.

3. Разработана методика выбора и определен критерий прочности заготовки силового стержня, на основе анализа количественных значений критериальных характеристик, полученных в рамках комплексного численно-экспериментального исследования.

4. Разработана математическая модель с физическими соотношениями теории вязкоупругости волокна типа Panda в полимерном защитно-упрочняющем покрытии с учетом технологических напряжений, изгиба, натяга, контактного взаимодействия и релаксационных процессов в полимерах.

5. Установлены новые закономерности влияния защитно-упрочняющего покрытия на оптические характеристики волокна Panda в условиях термосилового воздействия и сложного напряженно-деформированного состояния на основе комплексного исследования с применением вычислительных экспериментов.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных  
Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего  
образования Российской Федерации:**

1. Труфанов, А.Н. Выбор критерия конструкционной прочности неоднородного кварцевого стержня на основе натуральных и вычислительных экспериментов /А.Н. Труфанов, **Ю.И. Лесникова**, Н.А. Труфанов, О.Ю. Сметанников // Вычислительная механика сплошных сред = Computational continuum mechanics. – 2016. – Т. 9. – № 1. – С. 97-108. (ВАК)
2. **Лесникова, Ю.И.** Численное моделирование контактного термосилового воздействия на оптическое волокно в полимерном защитно-упрочняющем покрытии /Ю.И. Лесникова, О.Ю. Сметанников, А.Н. Труфанов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 2. – С. 28-31. (ВАК)
3. **Лесникова, Ю.И.** Исследование оптико-механических характеристик волокна в условиях термоцикла /Ю.И. Лесникова, А.Н. Труфанов, О.Ю. Сметанников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20. – № 6(2). – С. 255-260. (ВАК)
4. **Лесникова, Ю.И.** Анализ влияния двухслойного защитно-упрочняющего покрытия на деформационные и оптические характеристики волокна типа Panda // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2022. – Т. 24. – № 1. – С. 49–61. (ВАК)

5. **Лесникова, Ю.И.** Математическое моделирование контактного взаимодействия оптического волокна типа PANDA с алюминиевым полупространством при разном характере сопряжения элементов /Ю.И. Лесникова, А.А. Каменских, М.М. Пащенко // Прикладная математика и вопросы управления = Applied Mathematics and Control Sciences. – 2022. – № 3. – С. 45-65. (ВАК)

**Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в базе  
Web of Science, Scopus:**

6. **Lesnikova, Y.I.** Contact stresses modeling at the Panda-type fiber single-layer winding and evaluation of their impact on the fiber optic properties /Y.I. Lesnikova, O.Y. Smetannikov, A.N. Trufanov, N.A. Trufanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 177: Intern. Conf. on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2016, 2729 October 2016, Tomsk, Russian Federation. – Art. 012116. 5 p. (WoS, Scopus)

7. **Lesnikova, Y.I.** The effect of contact influence on the optico-mechanical properties of Panda-type fiber under thermocycling conditions /Y.I. Lesnikova, A.N. Trufanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1129. – Art. 012023. 6 p. (WoS, Scopus)

8. **Lesnikova, Y.I.** Analysis of the polymer two-layer protective coating impact on Panda-type optical fiber under bending /Y.I. Lesnikova, A.N. Trufanov, A.A. Kamenskikh // Polymers. – 2022. – Vol. 14. – Art. 3840. 19 p. (WoS, Scopus)

**Прочие публикации**

9. **Лесникова, Ю.И.** Анализ влияния конструкционных параметров и свойств материалов оптического волокна на деформационные и оптические параметры конструкции // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тез. докл. XVI Всерос. шк.-конф. молодых ученых, 14–17 марта 2022 г., Новосибирск / Сиб. отд.-ние РАН, Ин-т теорет. и прикл. механики им. С. А. Христиановича, Центр аэрогидродинам. ин-т им. проф. Н. Е. Жуковского. - Новосибирск : Параллель, 2022. - С. 83-84.

**Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ**

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669739 «Трехточечный изгиб заготовок силовых стержней анизотропных оптических волокон типа Panda» /Ю.И. Лесникова, А.Н. Труфанов, О.Ю. Сметанников, А.А. Каменских. – Заявка №2022669657. Дата поступления 25.10.2022. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.10.2022.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669757 «Программа испытания анизотропного волокна типа Panda с учетом изгиба и натяга в широком диапазоне температур от –60 до +60 °С» /Ю.И. Лесникова, А.Н. Труфанов, О.Ю. Сметанников, А.А. Каменских. – Заявка №2022669685. Дата поступления 25.10.2022. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.10.2022.