На правах рукописи

Есипенко Иван Александрович

ПОСТРОЕНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОНТУР ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ЕГО ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФА

01.02.06 – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный КЕЛЛЕР Илья Эрнстович, доктор физико-математических руководитель: наук, доцент

Официальные МУСАЛИМОВ Виктор Михайлович, доктор технических ΦΓΑΟΥ BO «Санкт-Петербургский профессор, оппоненты: наук, национальный исследовательский университет информационных технологий, механики И оптики», профессор кафедры мехатроники

> ПАНКРАТОВ Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, ФГБУН Институт проблем точной механики и управления РАН, заведующий лабораторией анализа и синтеза возмущенных динамических систем в прецизионной механике

Ведущая ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический организация: университет Петра Великого»

Защита состоится «14» декабря 2017 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д002.075.02 при Институте проблем машиноведения РАН по адресу: 199178, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, Большой пр., д. 61.

С диссертацией ОНТИ Института проблем можно ознакомиться В сайте машиноведения И адресу на института ПО http://www.ipme.ru/ipme/ru/indexr.html.

Автореферат разослан «__» ____ 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета кандидат технических наук, доцент

Hayn А.Ю. Кучмин

Актуальность степень разработанности И темы исследования. Волоконно-оптические гироскопы широко используются В системах стабилизации, управления и навигации. Значительные усилия разработчиков в настоящее время направлены на устранение кажущейся угловой скорости (дрейфа) при нестационарном тепловом воздействии на контур волоконнооптического гироскопа, которая является барьером для повышения точности прибора. Снижения влияния температуры на гироскоп добиваются этапе проектирования конструкторскими решениями на и последующей алгоритмической компенсацией выходного сигнала методами теории автоматического управления. Конструкторский этап представляется наиболее важным. Для оценки эффективности конструкции прибора требуется надежный инструмент в виде математической модели теплового дрейфа волоконнооптического гироскопа, обусловленного его термоупругим поведением в условиях нестационарного теплового воздействия, ее численной реализации и методики ее экспериментальной верификации.

Принцип действия ВОГ основан на эффекте Саньяка: разность фаз (фаза Саньяка) двух световых волн, распространяющихся по волоконному контуру в направлениях, противоположных пропорциональна угловой скорости вращения. При внешнем нестационарном тепловом воздействии неравномерность нагрева/охлаждения волоконного контура ведет К неоднородному изменению длины и показателя преломления жилы волокна, вследствие чего изменяется время пробега каждой из встречных волн по контуру и появляется фаза Саньяка (кажущаяся угловая скорость).

В 1980 г. D.M. Shupe¹ построил функционал кажущейся угловой скорости, в котором искажение фазы Саньяка связывается с изменением температуры в жиле оптического волокна (термооптический эффект). В рамках данного подхода авторы А.В. Голиков, Д.С. Громов, В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов, E.B. Панкратова, A.B. Шарков минимизировали тепловой дрейф выравниванием нестационарных тепловых полей в контуре волоконнооптического гироскопа, используя численное решение нестационарной задачи теплопроводности. А.М. Курбатов, Р.А. Курбатов, J. Euverte, W. Gao, Z. Gao, X. Li, W. Ling, C.M. Lofts, F. Mohr, M. Parker, P.B. Ruffin, C.C. Sung, O. Tirat, Y. Wei, Z. Xu, Y. Zhang исследовали влияние различных схем намотки волоконных контуров на тепловой дрейф ВОГ.

¹ Shupe D. M. Thermally induced non-reciprocity in the fiber-optic interferometer // Appl. Opt. – 1980. – Vol. 19, No. 5. – P. 654–655. DOI: 10.1364/AO.19.000654

В 1996 г. О. Tirat и J. Euverte² дополнили функционал кажущейся угловой скорости механизмом, в котором искажение фазы Саньяка связывается с напряженно-деформированным состоянием в жиле оптического волокна (упругооптический эффект). Для моделирования дрейфа теплового с использованием данного представления требуется постановка нестационарной задачи термоупругости. При численном решении данной задачи авторы F. Mohr, S. Ogut, B. Osunluk, E. Ozbay, F. Schadt представляли волоконный контур однородным трансверсально-изотропным телом, а авторы Е.И. Вахрамеев, К.С. Галягин, М.А. Ошивалов, М.А. Савин, Ю.А. Селянинов, Х. Li, W. Ling, Y. Wei, Z. Xu, рассматривали структурно-неоднородное сечение контура. В своих В.М. Панкратов работах М.А. Барулина, В.Э. Джашитов, исследуют интенсивности напряжений В изотропном определения контуре ДЛЯ температурных погрешностей волоконно-оптического гироскопа.

Анализ существующих работ выявил следующие недостатки, лимитирующие эффективность методики снижения теплового дрейфа средствами математического моделирования:

 отсутствие качественного и количественного анализов вкладов каждого из эффектов в тепловой дрейф волоконно-оптического гироскопа и методики их экспериментального подтверждения;

- отсутствие исследования теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа, В котором контур лишен сопрягаемых конструктивных особенностей, приводящих к неоднородному тепловому И напряженнодеформированному состоянию;

– отсутствие экспериментальных подтверждений напряженнодеформированного состояния в жиле волокна при действии тепловой нагрузки;

 отсутствие экспериментальных подтверждений решения нестационарной задачи теплопроводности;

 при учете влияния упругооптического эффекта решается тепловая, а не термоупругая задача;

– не ведется детальный учет физико-механических свойств волокна, его покрытий и связующего компаунда.

Не найдено ни одной работы, в которой бы отсутствовали все выписанные выше недостатки, а, следовательно, существующие подходы в полной мере не могут быть использованы в качестве инструмента для снижения теплового дрейфа ВОГ.

² Tirat O.F., Euverte J.-M. Finite element model of thermal transient effect in fiber optic gyro // Fiber optic gyros: 20th anniversary conference (04–09 August 1996, Denver, CO, United States). – SPIE, 1996. – Vol. 2837. – P. 230–238. DOI: 10.1117/12.258183

Целью исследования является комплексное изучение закономерностей теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа, вызванного нестационарным тепловым воздействием, для повышения его точности. Для этого выполняется построение и численная реализация математической модели дрейфа волоконно-оптического гироскопа, обусловленного его термоупругим поведением в условиях нестационарного теплового воздействия, и создается экспериментальной верификации. методика ee Данный инструмент используется для рациональных конструкторских решений обеспечивающих снижение и предсказуемость теплового дрейфа.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Выбор максимально полного функционала теплового дрейфа, учитывающего все возможные механизмы его возникновения.

2. Разработка методики экспериментального исследования теплового дрейфа, включая проектирование приспособления для бескаркасного крепления волоконного контура.

3. Формулировка и численная реализация задачи нестационарного термоупругого поведения волоконного контура в приспособлении с детальным учетом физико-механических свойств волокна, его покрытий и связующего компаунда.

4. Идентификация параметров модели с помощью стационарных и нестационарных испытаний.

5. Качественный и количественный анализ составляющих функционала кажущейся угловой скорости.

6. Выбор рациональных конструкторских решений для минимизации теплового дрейфа с помощью построенной модели и его экспериментальное подтверждение.

Научная новизна

– впервые построена, численно реализована и подтверждена экспериментом комплексная математическая модель теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа, включающая нестационарные уравнения термоупругости с детальным учетом неоднородности физико-механических свойств волоконного контура и функционал кажущейся угловой скорости, учитывающий термооптический и упругооптический эффекты;

 – реализована методика изучения теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа с использованием приспособления бескаркасного крепления волоконного контура, конструкция которого минимизирует возмущение напряженно-деформированного состояния волоконного контура от сопряжения с корпусными деталями; – разработан метод верификации упругих деформаций на уровне волокна, исключающий собственное напряженно-деформированное состояние волоконного контура, в рамках построенной модели при стационарном температурном воздействии с использованием оптического импульсного анализатора;

 – выявлены качественные и количественные различия составляющих функционала теплового дрейфа в зависимости от особенностей намотки волоконного контура.

Практическая значимость работы заключается в разработке комплексной методики расчета теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа при действии нестационарной тепловой нагрузки, которая позволяет на этапе проектирования прибора определять величину кажущейся угловой скорости и оценивать применяемые конструкторские решения. Данная методика внедрена в ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания».

Методология исследования: И методы уравнения линейной нестационарной теории термоупругости, функционал теплового дрейфа, учитывающий термооптический И упругооптический эффекты, **TABAI** программируемая термокамера ESPEC MC-711, аттестованное приема и обработки технологическое оборудование для информации, оптический импульсный анализатор BOTDA Omnisens DiTeSt STA-R202, метод конечных элементов, лицензионные пакеты прикладных программ ANSYS Mechanical APDL 17.2, MATLAB R2014b, Microsoft Excel 2010.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплексная математическая модель теплового дрейфа волоконнооптического гироскопа, включающая нестационарные уравнения термоупругости с детальным учетом неоднородности физико-механических свойств волоконного контура и функционал кажущейся угловой скорости, учитывающий термооптический и упругооптический эффекты.

2. Методика изучения теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа с приспособления бескаркасного использованием крепления волоконного контура, конструкция которого минимизирует возмущение напряженнодеформированного состояния волоконного контура ОТ сопряжения С корпусными деталями.

3. Метод верификации упругих деформаций на уровне волокна, исключающий собственное напряженно-деформированное состояние волоконного контура, в рамках построенной модели при стационарном температурном воздействии с использованием оптического импульсного анализатора. Идентификация коэффициента Пуассона первичного покрытия волокна на основе данного метода. 4. Результаты идентификации коэффициента теплопередачи между приспособлением и окружающей средой с учетом конвекции в термокамере.

5. Качественные и количественные различия составляющих функционала теплового дрейфа в зависимости от особенностей намотки волоконного контура.

6. Результаты численных и экспериментальных исследований теплового дрейфа с различными схемами намотки, рациональные решения конструкции ВОГ.

обеспечивается Достоверность результатов полной нестационарной термоупругой постановкой задачи, детальным учетом неоднородных физикомеханических свойств волоконного контура, максимально подробной структурой функционала теплового дрейфа, подтверждением численных расчетов данным серии экспериментов, специально организованных в ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания». Избыточность системы выполненных экспериментов подтверждает внутреннюю непротиворечивость разработанной модели.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались соискателем лично на конференциях:

– XX Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 13 – 16 февраля 2017 г.);

– X Всероссийская конференция по механике деформируемого твердого тела (Самара, 18 – 22 сентября 2017 г.);

– Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО-2017 (Пермь, 03 – 06 октября 2017 г.).

Диссертационная работа обсуждалась на семинарах кафедры «Динамика и прочность машин» (академик РАН, д-р. техн. наук, проф. В.П. Матвеенко) и на научно-технических советах ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания».

Лично автором предложено и спроектировано приспособления для изучения теплового дрейфа волоконных контуров, выбран функционал кажущейся MATLAB, угловой скорости И выполнена его реализация В пакете сформулирована постановка нестационарной математическая задачи термоупругости, организованы сборка и испытания волоконных контуров в приспособлении, установлены количественные параметры модели И предложены методы их идентификации, осуществлены постановка и контроль численного решения задач. Численные эксперименты с использованием пакета ANSYS выполнены Д.А. Лыковым.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ, из них [1–3] в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения по результатам исследования. Объем диссертации составляет 103 страницы и содержит 56 рисунков и 2 таблицы. Список цитируемой литературы состоит из 91 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность комплексного исследования теплового дрейфа ВОГ при нестационарном температурном воздействии на волоконный контур, формулируются цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, перечисляются методы исследования, отмечается личный вклад автора, представляются положения, выносимые на защиту, описываются апробация результатов и структура диссертации.

В первой главе содержится аналитический обзор научной литературы по теме диссертационного исследования, а именно, описываются существующие математические модели теплового дрейфа ВОГ, рассматривается их экспериментальная верификация, приводится анализ недостатков.

Вторая глава посвящена построению математической модели теплового дрейфа ВОГ при нестационарном тепловом воздействии на волоконный контур, установленный в специально спроектированное приспособление. Волоконный контур представляет собой структурно-неоднородную конструкцию, которая включает в себя оптическое волокно, два защитно-упрочняющих покрытия и эпоксидный компаунд (Рис. 1).



Рис. 1. Поперечное сечение волоконного контура: 1 – оптическое волокно типа «Panda», 2 – первичное покрытие, 3 – вторичное покрытие, 4 – эпоксидный компаунд

Для построения функционала кажущейся угловой скорости рассматривается элемент волокна типа «Panda» (Puc. 2).



Рис. 2. Волокно типа «Panda»: 1 – жила, 2 – стержни, 3 – оболочка

Световая волна длиной λ_c при прохождении в жиле оптического волокна длиной *L* по быстрой плоскости поляризации с коэффициентом преломления *n* имеет фазу

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda_c} \int_{0}^{L} n dl$$

Изменения фаз $\Delta \Phi_{\Delta T}$ и $\Delta \Phi_{\Delta \varepsilon}$ от действия температуры ΔT и упругих деформаций $\Delta \varepsilon$ имеют вид

$$\Delta \Phi_{\Delta T} = \frac{2\pi}{\lambda_c} \int_{0}^{L} \left(\frac{\partial (dl)}{dl \partial T} + \frac{\partial n}{n \partial T} \right) n \Delta T dl,$$
$$\Delta \Phi_{\Delta \varepsilon} = \frac{2\pi}{\lambda_c} \int_{0}^{L} \left(\frac{\partial (dl)}{dl \partial \varepsilon} + \frac{\partial n}{n \partial \varepsilon} \right) n \Delta \varepsilon dl,$$

где $\frac{\partial(dl)}{dl\partial T} = \alpha$ – коэффициент линейного температурного расширения жилы, которым будем пренебрегать вследствие малости, $\frac{\partial n}{\partial T}$ – термооптический коэффициент, $\frac{\partial(dl)}{dl\partial\varepsilon}\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_{ZZ}$ – изменение диагональной компоненты тензора деформаций, действующей вдоль волокна.

Изменение коэффициента преломления от действия единственной компоненты тензора деформаций

$$\frac{\partial n}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon = -\frac{n^3}{2} [(1 - \nu_1)p_{12} - \nu_1 p_{11}] \Delta \varepsilon_{ZZ},$$

где p_{11} и p_{12} – упругооптические константы, v_1 – коэффициент Пуассона светопроводящей жилы. (Здесь и далее индекс для коэффициента Пуассона соответствует номеру компоненты волоконного контура как показано на рис. 1.)

Итоговые соотношения для изменения фаз принимают вид

$$\Delta \Phi_{\Delta T} = \frac{2\pi}{\lambda_{\rm c}} \int_{0}^{L} \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T dl, \qquad (1)$$

$$\Delta \Phi_{\Delta \varepsilon} = \frac{2\pi}{\lambda_{\rm c}} \int_{0}^{L} n \left(1 - \frac{n^2}{2} \left[(1 - \nu) p_{12} - \nu p_{11} \right] \right) \Delta \varepsilon_{ZZ} dl.$$

противоположно распространяющихся лучей дается выражением

$$\Delta t = \frac{n}{c}(L-l) - \frac{n}{c}l = \frac{n}{c}(L-2l),$$

где с – скорость света в вакууме.

B

Изменение температур $\Delta T = \dot{T} \Delta t$ и упругих деформаций $\Delta \varepsilon_{ZZ} = \dot{\varepsilon}_{ZZ} \Delta t$ за время пробега световых волн суть

$$\Delta T = \frac{n}{c} (L - 2l) \dot{T}, \quad \Delta \varepsilon_{ZZ} = \frac{n}{c} (L - 2l) \dot{\varepsilon}_{ZZ}.$$
(2)

Математическая формулировка эффекта Саньяка имеет вид

$$\Phi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda_c c} \Omega, \tag{3}$$

где Φ_s – фаза Саньяка, Ω – угловая скорость вращения, D – средний диаметр контура.

Подстановка (2) в (1) с учетом (3) дает выражения для кажущихся угловых скоростей, вызванных термооптическим и упругооптическим эффектами

$$\Omega_{\dot{T}} = \frac{1}{LD} \int_{0}^{L} n \frac{\partial n}{\partial T} (L - 2l) \dot{T} dl,$$

$$\Omega_{\dot{\varepsilon}} = \frac{1}{LD} \int_{0}^{L} n^{2} \left(1 - \frac{n^{2}}{2} \left[(1 - \nu_{1}) p_{12} - \nu_{1} p_{11} \right] \right) (L - 2l) \dot{\varepsilon}_{ZZ} dl.$$
(4)

Для теоретического и экспериментального исследования теплового дрейфа была спроектирована и изготовлена специальная оснастка (Рис. 3), состоящая из двух корпусных деталей, волоконный контур в которой удерживается посредством резиновых прокладок. Данная конструкция обеспечивает осесимметричное распространение температуры и минимизирует механические нагрузки на контур от сопряжения с корпусными деталями. На крышку и основание приспособления клеятся датчики для контроля температуры.



Рис. 3. Приспособление: *1* – крышка, *2* – основание, *3* – волоконный контур, *4* – прокладки, *5* – пружина, *T*₁ и *T*₂ – датчики температуры

В качестве расчетной схемы объекта исследования рассматривается сечение осесимметричного приспособления (Рис. 4), полагая что геометрия, физикомеханические свойства, температурная нагрузка не изменяются вдоль окружной координаты. Внутреннее пространство между корпусными деталями, прокладками и контуром заполнено воздухом. Структурно-неоднородное сечение контура, включает в себя оптическое волокно, два защитноупрочняющих покрытия и эпоксидный компаунд. В предположении, что физико-механические свойства жилы, нагружающих стержней и оболочки слабо отличаются друг от друга, оптическое волокно представлено в виде однородного изотропного тела со свойствами чистого кварцевого стекла.



Рис. 4. Расчетная схема: *1* – волокно, *2* – первичное покрытие, *3* – вторичное покрытие, *4* – компаунд, *5* – прокладка, *6* – корпус, *7* – воздух

Волокно, первичное и вторичное покрытия, компаунд, резиновые прокладки, корпусные детали и воздух занимают объем V_1 , V_2 , V_3 , V_4 , V_5 , V_6 и V_7 соответственно и имеют границы контактов между собой S_{12} , S_{23} , S_{34} , S_{45} , S_{47} , S_{56} , S_{57} и S_{67} . Наружная граница деталей корпуса с окружающей средой обозначена S. Будем полагать, что воздействующее температурное поле изменяется медленно, вследствие чего оказывается возможным пренебречь инерционными членами в уравнениях движения и дилатационным членом в уравнении теплопроводности. В цилиндрической системе координат (Рис. 3) система уравнений несвязанной квазистационарной задачи термоупругости для изотропного тела с учетом осевой симметрии принимает вид

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} = 0,$$

$$\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} = 0,$$

$$\sigma_{rr} = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{rr} + \lambda(\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz}) - 3K\alpha T,$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{\varphi\varphi} + \lambda(\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{zz}) - 3K\alpha T,$$

$$\sigma_{zz} = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{zz} + \lambda(\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi}) - 3K\alpha T,$$

$$\sigma_{rz} = 2\mu\varepsilon_{rz},$$
(5)

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \qquad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u_r}{r}, \qquad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \qquad \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right), (r, z) \in V, \qquad V = V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_4 \cup V_5 \cup V_6; \rho c \dot{T} = k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \qquad (r, z) \in V \cup V_7.$$
(6)

Здесь обозначено: σ_{ij} и ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и малых деформаций, u_i – компоненты вектора перемещений, T – температура, ρ – плотность массы, c – удельная теплоемкость, k – теплопроводность, $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ и $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – коэффициенты Ламе, E – модуль упругости, $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ – модуль объемного сжатия, α – коэффициент линейного температурного расширения.

Условия на границах сопряжения материалов

$$(\sigma_{rr}l_{r} + \sigma_{rz}l_{z})_{V_{i}} = (\sigma_{rr}l_{r} + \sigma_{rz}l_{z})_{V_{i+1}}, (\sigma_{rz}l_{r} + \sigma_{zz}l_{z})_{V_{i}} = (\sigma_{rz}l_{r} + \sigma_{zz}l_{z})_{V_{i+1}}, (u_{r})_{V_{i}} = (u_{r})_{V_{i+1}}, \qquad (u_{z})_{V_{i}} = (u_{z})_{V_{i+1}}, i = \overline{1,5}, \qquad (r,z) \in S_{12}, S_{23}, S_{34}, S_{45}, S_{56}; \left(k\frac{\partial T}{\partial r}l_{r} + k\frac{\partial T}{\partial z}l_{z}\right)_{V_{i}} = \left(k\frac{\partial T}{\partial r}l_{r} + k\frac{\partial T}{\partial z}l_{z}\right)_{V_{i+1}},$$
(8)

$$(T)_{V_i} = (T)_{V_{i+1}}, \quad i = \overline{1,5}, \quad (r,z) \in S_{12}, S_{23}, S_{34}, S_{45}, S_{56};$$
$$\left(k\frac{\partial T}{\partial r}l_r + k\frac{\partial T}{\partial z}l_z\right)_{V_j} = \left(k\frac{\partial T}{\partial r}l_r + k\frac{\partial T}{\partial z}l_z\right)_{V_7},$$
$$(T)_{V_j} = (T)_{V_7}, \quad j = \overline{4,6}, \quad (r,z) \in S_{47}, S_{57}, S_{67}.$$

где l_r и l_z – направляющие косинусы вектора нормали к соответствующим поверхностям.

При z = 0 поставлены граничные условия свободного опирания приспособления:

$$u_z|_{z=0} = 0. (9)$$

На границах с воздухом и окружающей средой напряжения отсутствуют:

$$\sigma_{rr}l_r + \sigma_{rz}l_z = 0, \sigma_{rz}l_r + \sigma_{zz}l_z = 0,$$
(10)
$$(r, z) \in S_{47}, S_{57}, S_{67}, S.$$

Для уравнения теплопроводности на всех наружных поверхностях приспособления используются граничные условия

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial r}l_r + \frac{\partial T}{\partial z}l_z\right) = h(T - T_c), \qquad (r, z) \in S,$$
(11)

где *h* – коэффициент теплоотдачи, *T_c* – температура окружающей среды.

Начальное условие для уравнения теплопроводности:

$$T|_{t=0} = T_0, \qquad (r, z) \in V \cup V_7.$$
 (12)

Поскольку задача термоупругости решается в цилиндрической системе координат ($r\varphi z$), а функционал кажущейся угловой скорости записан в декартовой системе координат (*XYZ*), далее все результаты вычислений будут представлены в локальной системе координат для волокна (Рис. 2).

Третья глава посвящена комплексному исследованию теплового дрейфа ВОГ для волоконного контура длиной 1000 м с модифицированной квадрупольной схемой намотки, расположение витков в которой условно показано на рисунке 5. Исследуемый контур состоит из 40 слоев (10 ячеек периодичности) по 80/79 витков в каждом слое. Суммарное количество витков – 3180.



Рис. 5. Модифицированная схема квадрупольной намотки

С помощью оптического импульсного анализатора экспериментально установлены (Рис. 6) сдвиги бриллюэновских частот на двух температурах 20 °C и 60 °C.



Рис. 6. Экспериментальные данные бриллюэновских частот

Изменение сдвига бриллюэновской частоты при действии температуры и упругих деформаций дается выражением

$$\Delta f_b = C_T \Delta T + C_\varepsilon \Delta \varepsilon_{ZZ},\tag{13}$$

где $C_T = 1,05 \text{ M}\Gamma \mu/^{\circ} \text{C}$ и $C_{\varepsilon} = 47,2 \Gamma\Gamma \mu - коэффициенты пропорциональности, которые были определены экспериментально на отрезке волокна при испытаниях на растяжение и нагрев.$

Из формулы (13) следует

$$\Delta \varepsilon_{ZZ} = \frac{1}{C_{\varepsilon}} (\Delta f_b - C_T \Delta T).$$

Для верификации упругих деформаций $\Delta \varepsilon_{ZZ}$ в жиле волокна решается стационарная задача термоупругости (5) при краевых условиях (7), (9), (10) с однородным полем температуры. Необходимо отметить, что для совпадения расчетных и экспериментальных данных варьировался коэффициент Пуассона слабо сжимаемого первичного покрытия в диапазоне от 0,495 до 0,499 с шагом 0,001. Наилучшее совпадение упругих деформаций получается при $\nu_2 = 0,498$ (Рис. 7).



Рис. 7. Верификация деформаций $\Delta \varepsilon_{ZZ}$

С целью определения коэффициента теплоотдачи h для граничных условий (11) между деталями оснастки и принудительно движущимся воздухом в термокамере решение начально-краевой задачи теплопроводности (6), (8), (11), (12) сравнивается с экспериментальными данными двух датчиков темпертуры, установленных в оснастке (Рис. 3). В качестве воздействия $T_c(t)$ задается режим нагрева от 20 до 60 °C со скоростью $\dot{T}_c = 1$ °C/мин. Коэффициент теплоотдачи для S варьируется в диапазоне от 5 до 25 Вт/(м²·K) с шагом 1 Вт/(м²·K), совпадение расчетных и экспериментальных температур (Рис. 8) достигается при h = 13 Вт/(м²·K).



Рис. 8. Сравнение расчетных и экспериментальных температур

Для определения скоростей температур и деформаций решается квазистационарная задача термоупругости (7)–(8) с краевыми условиями (9)–(12). В качестве воздействия $T_c(t)$ рассматривается термопереход от 20 до 60 °C со скоростью изменения температуры $\dot{T}_c = 1$ °C/мин с последующей часовой выдержкой при максимальной температуре (Рис. 9).



Рис. 9. Температура окружающей среды Т_с

Подстановка скоростей температур и деформаций в функционал (4) дает кажущиеся угловые скорости, вызванные термооптическим И упругооптическим эффектами (Рис. 10). Волоконный контур в приспособлении (с осью чувствительности, совпадающей с нормальном исследуется в направлением оси Z) И перевернутом (c осью чувствительности, противоположно направленной по отношению к оси Z)положениях. Равноудаленные от середины волокна в контуре участки при намотке вниз располагаются на расстоянии одного витка друг от друга (2-2', 3-3' и т.д. см. рис. 5), а при намотке вверх оказываются разнесенными друг от друга на два витка (12-12', 13-13' и т.д. см. рис. 5). Таким образом, при намотке вверх расстояние между равноудаленными от середины контура участками волокна больше, чем при намотке вниз. Удаленность витков и разница расстояний при намотке приводит к резкому увеличению кажущихся угловых скоростей $\Omega_{\dot{T}}$ и Ω_έ на участках разгона и торможения. При перевороте контура меняется направление намотки, при намотке вниз расстояние между равноудалёнными от середины контура витками будет больше, чем при намотке вверх. Данная смена расстояний приводит к смене знака угловых скоростей $\Omega_{\dot{T}}$ и $\Omega_{\dot{E}}$ на участках разгона торможения, что говорит высокой чувствительности И 0 модифицированной квадрупольной схемы намотки К скоростей полю температур. Угловые скорости, вызванные разными механизмами, сопоставимы по величине для данной схемы намотки.



Рис. 10. Расчетные кажущиеся угловые скорости в нормальном (а) и перевернутом (б) положениях волоконного контура

На рисунке 11 представлены суммарные угловые скорости, в сравнении с экспериментальными данными. Результаты экспериментальных данных были сглажены простым скользящим средним на интервале 10 секунд. Также из сигнала была исключена постоянная составляющая скорости вращения Земли.

Из рисунка видно, что функционал кажущейся угловой скорости при условии достоверно найденных температур и деформаций хорошо качественно и количественно описывает тепловой дрейф нормального и перевернутого волоконных контуров в приспособлении.



Рис. 11. Верификация теплового дрейфа в нормальном (а) и перевернутом (б) положениях волоконного контура

Четвертая глава посвящена выбору рациональных конструкторских решений для минимизации теплового дрейфа. Как показало исследование, у предыдущей схемы намотки есть существенные недостатки вследствие того, что равноудаленные от середины контура участки располагаются не вплотную друг к другу.

Следующим исследуется волоконный контур с оригинальной квадрупольной намоткой (Рис. 12).



Рис. 12. Оригинальная квадрупольная схема намотки

На рисунке 13 показаны составляющие кажущейся угловой скорости. Результат расчета показывает существенную разницу между

модифицированной и оригинальной схемами намоток. Ввиду того, что в оригинальной квадрупольной схеме равноудаленные от центра световода участки располагаются вплотную друг к другу, качественно и количественно меняются поведения кажущихся угловых скоростей, вызванных разными механизмами. Решающую роль в формировании теплового дрейфа играет упругооптический эффект, причем, угловая скорость $\Omega_{\dot{\epsilon}}$ не имеет резких скачков на участках разгона и торможения и не изменяется при перевороте контура. Составляющая кажущейся угловой скорости $\Omega_{\dot{\tau}},$ вызванная термооптическим эффектом, при перевороте контура изменяется по амплитуде в четыре раза, но ее вклад в суммарный тепловой дрейф ничтожен. Таким образом, оригинальная квадрупольная схема намотки имеет преимущества по сравнению с модифицированной с точки зрения компенсации исходного теплового дрейфа в волоконно-оптическом гироскопе. Суммарная кажущаяся угловая скорость имеет меньшую амплитуду и практически не изменяется от переворота, поэтому может быть надежно алгоритмически скомпенсирована на уровне прибора методами теории автоматического управления.



Рис. 13. Расчетные кажущиеся угловые скорости в нормальном (а) и перевернутом (б) положениях волоконного контура

На рисунке 14 представлены расчетные и экспериментальные значения теплового дрейфа. Сравнение данных показывает хорошее совпадение, что в очередной раз доказывает непротиворечивость разработанной математической модели.



Рис. 14. Верификация теплового дрейфа в нормальном (а) и перевернутом (б) положениях волоконного контура

В целях снижения амплитуды дрейфа на модели был опробован вариант варьирования геометрии волоконного контура (изменение количества слоев и витков в слое) с оригинальной схемой квадрупольной намотки (Рис. 15). Точкой на графике обозначен верифицированный ранее вариант.



Рис. 15. Варьирование геометрии волоконного контура

Увеличение количества слоев (длина волокна и средний диаметр контура фиксированы) приводит к незначительному снижению теплового дрейфа, но усложняет процесс самой намотки контура. После чего, было принято решение сменить раскладку на октупольную (Рис. 16).

20



Рис. 16. Октупольная схема намотки волоконного контура

На рисунке 17 представлены сопоставления расчетных и экспериментальных кажущихся угловых скоростей для октупольной схемы в сравнении с оригинальной квадрупольной. Результаты экспериментальных данных, как и ранее, были сглажены, и исключена скорость вращения Земли. Сравнение данных показывает преимущество октупольной схемы, тепловой дрейф у которой на порядок ниже, чем у оригинальной квадрупольной.



Рис. 17. Сравнение теплового дрейфа квадрупольной и октупольной схем намотки

Проведенные расчетные и экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о том, что для минимизации и предсказуемости теплового дрейфа необходимо располагать равноудаленные от середины контура участки волокна вплотную друг к другу и увеличивать число слоев в ячейке периодичности при выборе схемы намотки волоконного контура.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Построена математическая модель для расчета теплового дрейфа при нестационарном тепловом воздействии, включающая в себя функционал кажущейся угловой скорости, вызванной термооптическим и упругооптическим эффектами, и несвязанную квазистационарную задачу термоупругости в осесимметричной постановке.

2. Спроектировано и изготовлено приспособление, которое обеспечивает осесимметричное распространение температуры и минимизирует механические нагрузки на контур от сопряжения с корпусными деталями.

3. Сформулирована и численно реализована задача квазистационарного термоупругого поведения волоконного контура в приспособлении с детальным учетом физико-механических свойств волокна, его покрытий и связующего компаунда.

4. Предложен и реализован метод верификации упругих деформаций, достоверное определение которых позволило с высокой точностью спрогнозировать кажущуюся угловую скорость.

5. Идентифицированы коэффициент Пуассона первичного слабо сжимаемого покрытия и коэффициент теплопередачи с помощью дополнительных стационарных и нестационарных испытаний.

6. Проведен качественный и количественный анализ составляющих функционала кажущейся угловой скорости.

7. Проведенные расчетные и экспериментальные исследования конструкторских решений по изменению схем намотки позволили минимизировать на порядок величину теплового дрейфа.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Есипенко И.А. Лыков Д.А. Математическая модель теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа и ее экспериментальная верификация // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2017. – № 5. – С. 31–46. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-5-31-46 (ВАК)

2. Есипенко И.А. Лыков Д.А. Метод верификации упругих деформаций в контуре волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 8. – С. 728–733. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-8-728-733 (ВАК)

3. Есипенко И.А. Лыков Д.А. Численный расчет и экспериментальная верификация фиктивной угловой скорости волоконно-оптического гироскопа

при нестационарном температурном воздействии на его контур // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 313–323. DOI: 10.7242/1999-6691/2017.10.3.24 (ВАК)

4. Есипенко И.А. Лыков Д.А. Исследование деформированного состояния светопроводящей жилы волоконно-оптического гироскопа // ХХ Зимняя школа по механике сплошных сред: тез. докл. (13 – 16 февраля 2017 г., Пермь, Россия). – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2017. – С. 124.

5. Есипенко И.А. Лыков Д.А. Влияние упругих деформаций на тепловой дрейф волоконно-оптического гироскопа // Фотон-экспресс. – 2017. – № 6 (142). – С. 240–241.

6. Есипенко И.А. Лыков Д.А. Математическая модель теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа: численный расчет и экспериментальная верификация // Материалы X Всероссийской научной конференции по механике деформируемого твердого тела (18–22 сентября 2017 г., Самара, Россия): в 2-х томах. Т. 1. / под ред. Н.Ф. Морозова, А.В. Манжирова, В.П. Радченко. – Самара: СамГТУ, 2017. – С. 236–239.