

DOI: 10.7242/1999-6691/2017.10.3.24
УДК 53.096

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ФИКТИВНОЙ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЕГО КОНТУР

И.А. Есипенко¹, Д.А. Лыков^{1,2}

¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Российская Федерация

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

Проведено численное моделирование и экспериментальное исследование влияния двух видов квадрупольной намотки контура на фиктивную угловую скорость волоконно-оптического гироскопа при нестационарном температурном воздействии. Контур образован намоткой на цилиндрическую поверхность и последующей фиксации компаундом оптического волокна, на которое предварительно нанесены два защитно-упрочняющих покрытия. Для экспериментальной верификации фиктивной угловой скорости была изготовлена специальная оснастка, в которой волоконный контур удерживался посредством резиновых прокладок, максимально исключающих передачу на него механических нагрузок от корпусных деталей. Представлен функционал фиктивной угловой скорости, зависящий от скоростей температуры и упругих деформаций в световоде контура. В программном комплексе ANSYS построен двумерный осесимметричный конечно-элементный аналог структурно-неоднородного контура в оснастке. Для верификации упругих деформаций при однородном температурном воздействии решена задача стационарной термоупругости. С помощью оптического импульсного анализатора при двух значениях температуры экспериментально установлены сдвиги бриллюэновских частот, на основе которых получено распределение деформаций. Их сопоставление с расчетными позволило уточнить коэффициент Пуассона слабо сжимаемого первичного покрытия. Решение нестационарной задачи теплопроводности и показания термодатчиков дали возможность определить коэффициент теплопередачи между оснасткой и движущимся в термокамере воздухом. В качестве воздействия рассмотрен нагрев окружающей среды со скоростью 1 °С/мин с последующим выходом на стационарный режим. Для нахождения полей температур и деформаций, входящих в выражение для функционала фиктивной угловой скорости, решена несвязанная квазистационарная задача термоупругости. Сравнение экспериментальных данных с результатами математического моделирования показало удовлетворительное совпадение для двух видов намотки.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, волоконный контур, нестационарное тепловое воздействие, скорость температуры, скорость упругих деформаций, функционал фиктивной угловой скорости, тепловой дрейф

NUMERICAL CALCULATION AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE FICTITIOUS ANGULAR VELOCITY FOR TRANSIENT TEMPERATURE IMPACT ON THE FIBER-OPTIC GYROSCOPE COIL

I.A. Esipenko¹ and D.A. Lykov^{1,2}

¹Perm Scientific Industrial Instrument-Making Company, Perm, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Numerical simulation and experimental investigation of the effect of two types of quadrupole winding of fiber coil on the fictitious angular velocity of a fiber-optic gyroscope under transient temperature conditions are carried out. The coil is formed by winding optical fiber precured with two protective-hardening layers on the cylindrical surface and its further fixation by compound. For experimental verification of the fictitious angular velocity, a special device was made, in which the fiber coil was held by rubber gaskets used to maximally exclude the transfer of mechanical loads from the body parts to the coil. A functional for the fictitious angular velocity is represented as a function of temperature and elastic strain rate in the fiber core. In the software ANSYS, a two-dimensional axisymmetric finite-element analog of a structurally inhomogeneous coil in the device is modeled. To verify the elastic strains under uniform thermal actions, the problem of stationary thermoelasticity was solved. With the Brillouin optical time domain analyzer, Brillouin frequencies shifts at two temperatures were established, and the distribution of strains was obtained. A comparison of the calculated and experimental strains made it possible to refine the Poisson's ratio of a weakly compressible primary coating. The solution of the transient thermal problem and temperature sensor readings allowed us to establish the heat-conductivity coefficient between the device and the moving air in the heat chamber. As an impact, we considered the heating of the environment at a rate of 1 °C/min, followed by a steady-state output. To find the temperature and strain fields for the functional of fictitious angular velocity, the unbound quasistationary thermoelasticity problem was solved. Tests were carried out with two types of winding of the coil. The experimental results showed satisfactory agreement with the calculated data.

Key words: fiber-optic gyroscope, fiber coil, transient thermal effects, temperature velocity, strain rate, functional of fictitious angular velocity, thermal drift

1. Введение

Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) — это оптико-электронный прибор для измерения угловой скорости объекта, на котором он установлен [1–3]. Принцип действия ВОГ основан на эффекте Саньяка [4, 5], который состоит в том, что разность фаз двух световых волн, распространяющихся в противоположных направлениях по замкнутому волоконному контуру, при вращении контура вокруг оси, нормальной к его плоскости, пропорциональна угловой скорости вращения:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega, \quad (1)$$

где $\Delta\Phi$ — разность фаз (фаза Саньяка), L — длина оптического волокна, D — диаметр витка волоконного контура, Ω — угловая скорость вращения, λ — длина световой волны, c — скорость света.

ВОГ, благодаря высокой точности измеряемых угловых скоростей, применяются в качестве чувствительного элемента вращения в системах стабилизации, управления и навигации [6]. Одной из основных проблем сохранения заданной точности при эксплуатации ВОГ в случаях нестационарного температурного воздействия является возникновение фиктивной угловой скорости (теплового дрейфа). В настоящее время существует два одновременно используемых подхода к снижению теплового дрейфа: алгоритмическая компенсация выходного сигнала [7–11] и конструктивные решения на этапе проектирования ВОГ. Осуществляемые конструктивные решения включают в себя мероприятия, направленные на снижение влияния градиентов и скоростей изменения температур [11–14], в том числе с применением различных схем намотки волоконного контура [15–17]. Автор работы [18], используя математическую модель теплового дрейфа [19], впервые показал превосходство квадрупольной намотки над остальными типами. Ее преимущество заключается в том, что равноудаленные от центра световода участки располагаются вплотную друг к другу, обеспечивая тем самым подобие температурных условий при распространении двух противоположно направленных световых волн. Квадрупольная схема имеет ряд модификаций [20], возникновение которых обусловлено технологией процесса намотки. Вопрос взаимосвязи вида квадрупольной намотки с фиктивной угловой скоростью является актуальным с точки зрения конструирования ВОГ.

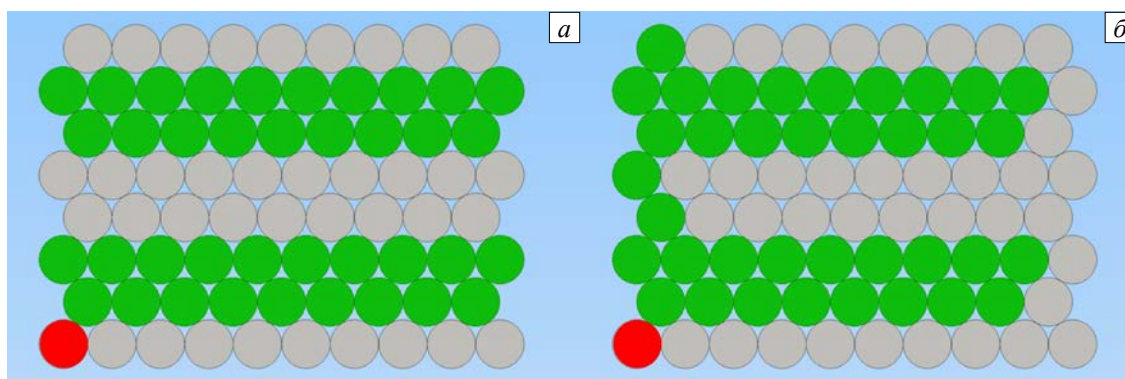


Рис. 1. Виды квадрупольной намотки: (а) – оригинальная (БК №1), (б) – модифицированная (БК №2)

В данной работе исследуется контур с двумя видами квадрупольной намотки (Рис. 1): оригинальной и модифицированной. На рисунке красным цветом обозначена середина намотки, от которой начинается укладка волокон в противоположных направлениях. Витки одного направления изображены серым цветом, витки другого — зеленым. Цель работы заключается в численном и экспериментальном исследовании влияния вида намотки на фиктивную угловую скорость в условиях нестационарного температурного воздействия.

2. Функционал фиктивной угловой скорости

В качестве волновода рассматривается оптическое волокно типа «Panda», которое состоит из кварцевой оболочки, жилы и силовых нагружающих стержней (Рис.2). Для увеличения коэффициента преломления светопроводящая жила легирована оксидом германия. Стержни в процессе вытяжки волокна формируют в жиле поля напряжений для обеспечения разности коэффициентов преломления в двух взаимно перпендикулярных плоскостях [21]. Таким образом, волокно данного типа имеет две ортогональные плоскости поляризации: быструю (XOZ) и медленную (YOZ), вдоль одной из которых распространяется свет.

Световая волна длиной λ при прохождении в жиле оптического волокна длиной L с коэффициентом преломления n по быстрой плоскости поляризации имеет фазу [2]:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L n dZ.$$

У световой волны, распространяющейся вдоль волокна, фаза изменяется так:
– в зависимости от температуры ΔT [22]

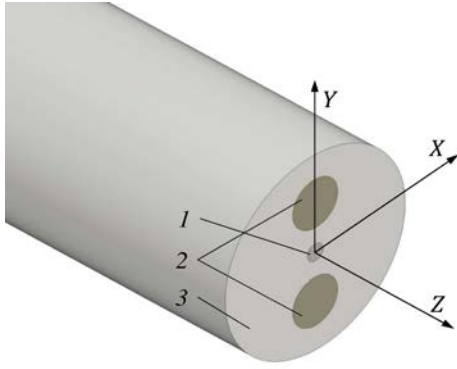


Рис. 2. Волокно типа Panda: 1 – жила; 2 – стержни; 3 – оболочка

$$\Delta\Phi_{\Delta T} = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L \left(n\alpha + \frac{\partial n}{\partial T} \right) \Delta T dZ ,$$

где α — коэффициент линейного температурного расширения жилы, которым будем пренебрегать ввиду его малости [23], $\frac{\partial n}{\partial T}$ — термооптический коэффициент;

– в зависимости от упругих деформаций $\Delta\varepsilon$ [24, 25]

$$\Delta\Phi_{\Delta\varepsilon} = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L \left(n\Delta\varepsilon_{zz} - \frac{n^3}{2} [p_{12}\Delta\varepsilon_{zz} - \nu p_{12}\Delta\varepsilon_{zz} - \nu p_{11}\Delta\varepsilon_{zz}] \right) dZ ,$$

где p_{11} и p_{12} — упругооптические константы, ν — коэффициент Пуассона.

Таким образом, изменения фазы, вызванные термооптическим и упругооптическим эффектами, суть

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{\Delta T} &= \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T dZ , \\ \Delta\Phi_{\Delta\varepsilon} &= \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L n \left(1 - \frac{n^2}{2} [(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11}] \right) \Delta\varepsilon_{zz} dZ . \end{aligned} \quad (2)$$

В интерферометре Саньяка задержка по времени двух противоположно распространяющихся световых волн составляет [2]:

$$\Delta t = \frac{L-Z}{c/n} - \frac{Z}{c/n} = \frac{L-2Z}{c/n} .$$

За время пробега световой волны температура и упругие деформации изменяются следующим образом:

$$\Delta T = \frac{L-2Z}{c/n} \dot{T} , \quad \Delta\varepsilon_{zz} = \frac{L-2Z}{c/n} \dot{\varepsilon}_{zz} . \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} \Omega_{\dot{T}} &= \frac{1}{LD} \int_0^L n \frac{\partial n}{\partial T} \dot{T} (L-2Z) dZ , \\ \Omega_{\dot{\varepsilon}} &= \frac{1}{LD} \int_0^L n^2 \left(1 - \frac{n^2}{2} [(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11}] \right) \dot{\varepsilon}_{zz} (L-2Z) dZ . \end{aligned} \quad (4)$$

Термооптическая и упругооптические константы для жилы $\frac{\partial n}{\partial T} = 1,14 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $p_{11} = 0,122$, $p_{12} = 0,271$ посчитаны по правилу смеси, исходные значения для чистых оксидов германия и кремния взяты из работы [26]. Коэффициент преломления равнялся: $n = 1,458$ [27].

3. Методика экспериментального исследования

Для экспериментального исследования фиктивной угловой скорости было изготовлено два волоконных контура с двумя видами квадрупольной намотки (см. Рис. 1). Также была спроектирована и сделана специальная оснастка (Рис. 3), состоящая из двух корпусных деталей: крышки 1 и основания 2. Контур 3 удерживается посредством резиновых прокладок 4. Пружина сжатия 5 дает возможность крышке перемещаться вдоль оси z . Такая конструкция обеспечивает осесимметричное распространение температуры и максимально исключает передачу механических нагрузок от корпусных деталей контуру. На крышку и основание оснастки клеились датчики для контроля температуры. В термокамере задавался

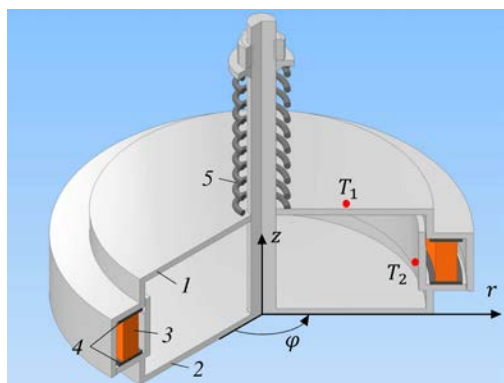


Рис. 3. Волоконный контур в оснастке

режим нагрева от 20 до 60°C со скоростью $\dot{T} = 1^\circ\text{C}/\text{мин}$ с последующей часовой выдержкой на максимальной температуре. Каждый волоконный контур проходил испытания в нормальном (с осью чувствительности, совпадающей по направлению с осью z) и перевернутом положениях.

4. Постановка задачи термоупругости

Для численного моделирования был построен двумерный осесимметричный конечно-элементный аналог в среде ANSYS (Рис.4) в предположении, что геометрия, физико-механические свойства, температурная нагрузка в конструкции не изменяются вдоль окружной координаты φ . Внутреннее

пространство между корпусными деталями, прокладками и контуром заполняет воздух. Структурно-неоднородное сечение контура включает в себя оптическое волокно, два защитно-упрочняющих покрытия и эпоксидный компаунд. В предположении, что физико-механические свойства жилы, нагружающих стержней и оболочки (Рис. 2) слабо отличаются друг от друга, оптическое волокно представляется в виде однородного изотропного тела со свойствами чистого кварцевого стекла.

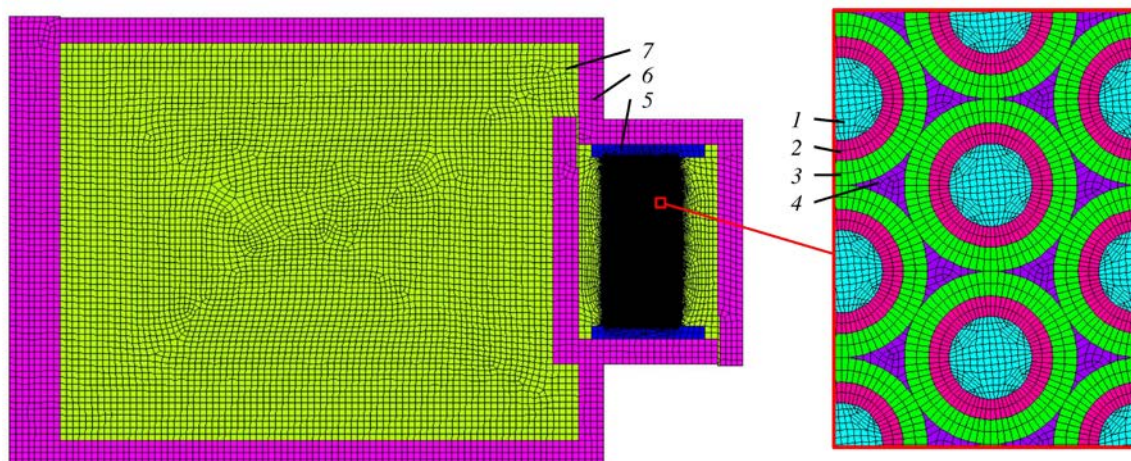


Рис. 4. Конечно-элементная модель: 1 – волокно; 2 – первичное покрытие; 3 – вторичное покрытие; 4 – компаунд; 5 – прокладка; 6 – корпус; 7 – воздух

Волокно, первичное и вторичное покрытия, компаунд, резиновые прокладки, корпусные детали и воздух занимают, соответственно, объемы $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7$ и имеют границы контакта 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 обозначается как S .

Полагается, что воздействующее температурное поле изменяется медленно, вследствие чего возможно 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 [28]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} &= 0, \\ \sigma_{rr} &= (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{rr} + \lambda(\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz}) - 3K\alpha T, \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{\varphi\varphi} + \lambda(\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{zz}) - 3K\alpha T, \\ \sigma_{zz} &= (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{zz} + \lambda(\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi}) - 3K\alpha T, \\ \sigma_{rz} &= 2\mu\varepsilon_{rz}, \end{aligned}$$

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right),$$

$$(r, z) \in V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_4 \cup V_5 \cup V_6; \quad (5)$$

$$\rho c \dot{T} = k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (r, z) \in V \cup V_7. \quad (6)$$

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.

Точка над индексом указывает на дифференцирование по времени t

Условия на границах сопряжения материалов считаются следующими:

$$\begin{aligned} (\sigma_{rr} l_r + \sigma_{rz} l_z)_{V_i} &= (\sigma_{rr} l_r + \sigma_{rz} l_z)_{V_{i+1}}, \\ (\sigma_{rz} l_r + \sigma_{zz} l_z)_{V_i} &= (\sigma_{rz} l_r + \sigma_{zz} l_z)_{V_{i+1}}, \\ (u_r)_{V_i} &= (u_r)_{V_{i+1}}, \quad (u_z)_{V_i} = (u_z)_{V_{i+1}}, \\ i &= \overline{1, 5}, \quad (r, z) \in S_{12}, S_{23}, S_{34}, S_{45}, S_{56}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} l_r + k \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right)_{V_i} &= \left(k \frac{\partial T}{\partial r} l_r + k \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right)_{V_{i+1}}, \\ (T)_{V_i} &= (T)_{V_{i+1}}, \quad i = \overline{1, 5}, \quad (r, z) \in S_{12}, S_{23}, S_{34}, S_{45}, S_{56}, \\ \left(k \frac{\partial T}{\partial r} l_r + k \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right)_{V_j} &= \left(k \frac{\partial T}{\partial r} l_r + k \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right)_{V_7}, \\ (T)_{V_j} &= (T)_{V_7}, \quad j = \overline{4, 6}, \quad (r, z) \in S_{47}, S_{57}, S_{67}, \end{aligned} \quad (8)$$

где l_r и l_z — компоненты вектора нормали к соответствующим поверхностям.

При $z = 0$ ставятся граничные условия свободного опирания приспособления:

$$\begin{aligned} u_z|_{z=0} &= 0, \\ \sigma_{rz}|_{z=0} &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

На границах с воздухом и окружающей средой напряжения отсутствуют:

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

Для уравнения теплопроводности на всех наружных поверхностях приспособления используются граничные условия

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

где h — коэффициент теплоотдачи, T_c — температура окружающей среды.

Начальное условие для уравнения теплопроводности:

$$T|_{t=0} = T_0. \quad (12)$$

Полагается, что физико-механические свойства материалов, представленные в таблице, являются постоянными в рассматриваемом температурном диапазоне.

Таблица. Физико-механические константы материалов

	Волокно	Первичное покрытие	Вторичное покрытие	Компаунд	Резиновые прокладки	Корпусные детали	Воздух
E , МПа	74000	1,2	950	3000	4,9	72200	–
ν	0,17	0,498	0,33	0,33	0,49973	0,3	–
k , Вт/(м·К)	1,4	0,18	0,25	0,34	0,25	115	0,025
ρ , кг/м ³	2200	990	1130	1140	1100	2800	1,2
c , Дж/(кг·К)	750	2200	1500	1200	2000	900	1000
α , $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	0,55	660	40	40	300	28	–

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

5. Расчет упругих деформаций и их экспериментальное подтверждение при стационарном температурном воздействии

На первом этапе для верификации упругих деформаций решалась стационарная задача термоупругости (5) при краевых условиях (7), (9), (10) с однородным полем температуры $T = 20^\circ\text{C}$ и $T = 60^\circ\text{C}$. На рисунке 5 представлено распределение упругих деформаций вдоль волокна для ВК №1 (см. Рис. 1) при двух этих температурах.

Для экспериментальной верификации распределения упругих деформаций по длине волокна был использован оптический импульсный анализатор BOTDA Omnisens DiTeSt STA-R202, работающий на эффекте вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна [29]. Измерения сдвига бриллюэновской

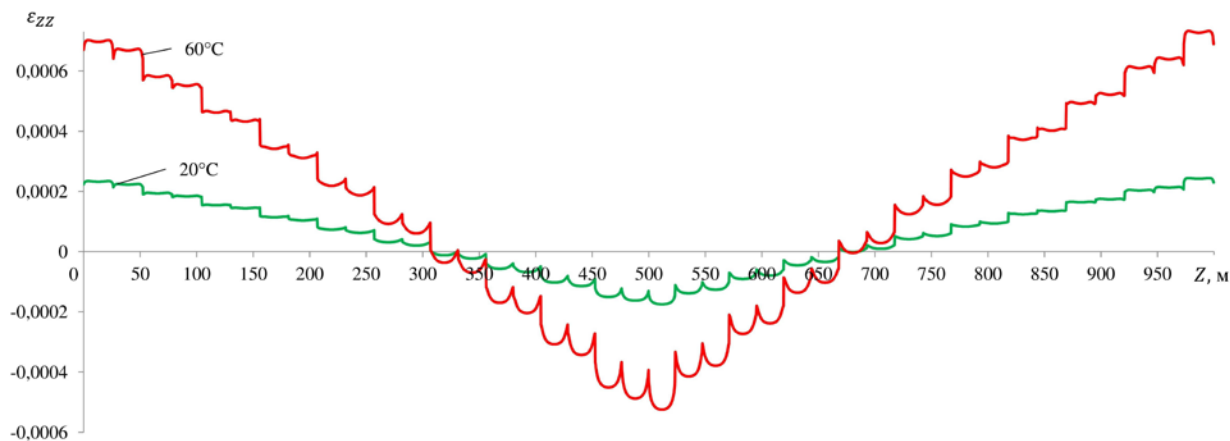


Рис. 5. Распределение деформаций ε_{zz} вдоль волокна

частоты проводились при температурах $T = 20^\circ\text{C}$ и $T = 60^\circ\text{C}$ после часовой выдержки волоконного контура в термокамере. Схема и методика эксперимента подробно описаны в работе [30]. На рисунке 6 показаны сдвиги бриллюэновских частот для ВК №1.

Изменение сдвига бриллюэновской частоты при действии температуры и упругих деформаций составляет [31]:

$$\Delta f_b = C_T \Delta T + C_\varepsilon \Delta \varepsilon_{zz}, \quad (13)$$

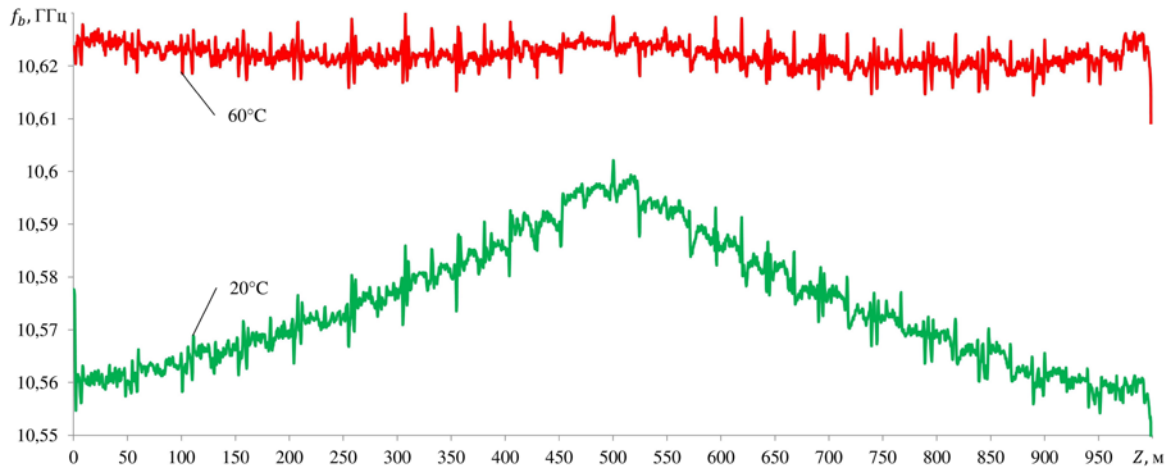


Рис. 6. Экспериментальные данные для бриллюэновских частот

где $C_T = 1,06 \text{ Гц}/^\circ\text{C}$ и $C_\varepsilon = 47,2 \text{ ГГц}$ — коэффициенты пропорциональности, которые по аналогии с работой [32] определялись экспериментально на отрезке волокна при испытаниях на растяжение и нагрев. Из формулы (13) следует:

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

Необходимо отметить, что для выбора коэффициента Пуассона, при котором расчетные и экспериментальные данные наиболее близки, проведены численные эксперименты, в которых коэффициент Пуассона слабо сжимаемого первичного покрытия варьировался в диапазоне от 0,495 до 0,499. Наилучшее согласование упругих деформаций получилось при $\nu = 0,498$ (Рис. 7).

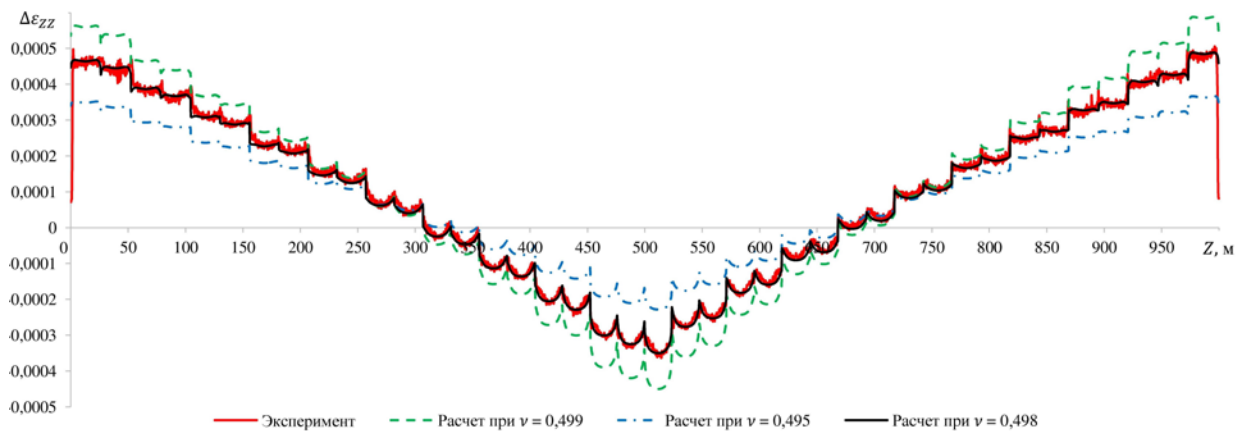


Рис. 7. Верификация деформаций $\Delta\varepsilon_{zz}$

6. Решение задачи теплопроводности

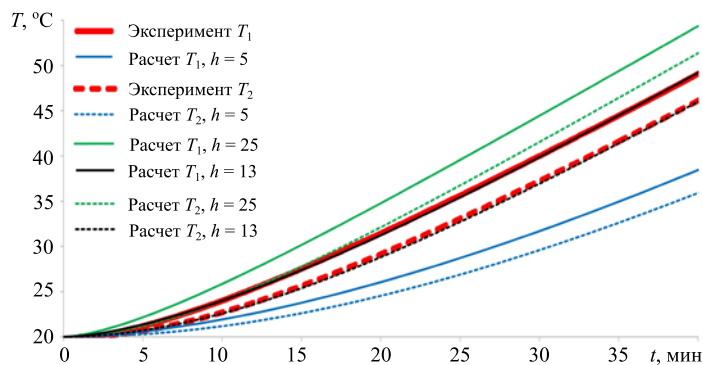


Рис. 8. Сравнение расчетных и экспериментальных температур

На втором этапе для определения коэффициента теплоотдачи между деталями оснастки и принудительно движущимся воздухом в термокамере решалась задача теплопроводности (6) с краевыми условиями (8), (11), (12). Коэффициент теплоотдачи h для S варьировался в диапазоне от 5 до 25 $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, совпадение (Рис. 8) расчетных и экспериментальных температур удалось получить при $h = 13 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

7. Фиктивная угловая скорость при нестационарном температурном воздействии

На третьем этапе решалась квазистационарная задача термоупругости (5), (6) с краевыми условиями (7)–(12). Подстановка в модель (4) скоростей изменения температур и деформаций позволила вычислить фиктивную угловую скорость ВОГ. На рисунке 9 показаны составляющие фиктивной угловой скорости, вызванные термооптическим и упругооптическим эффектами.

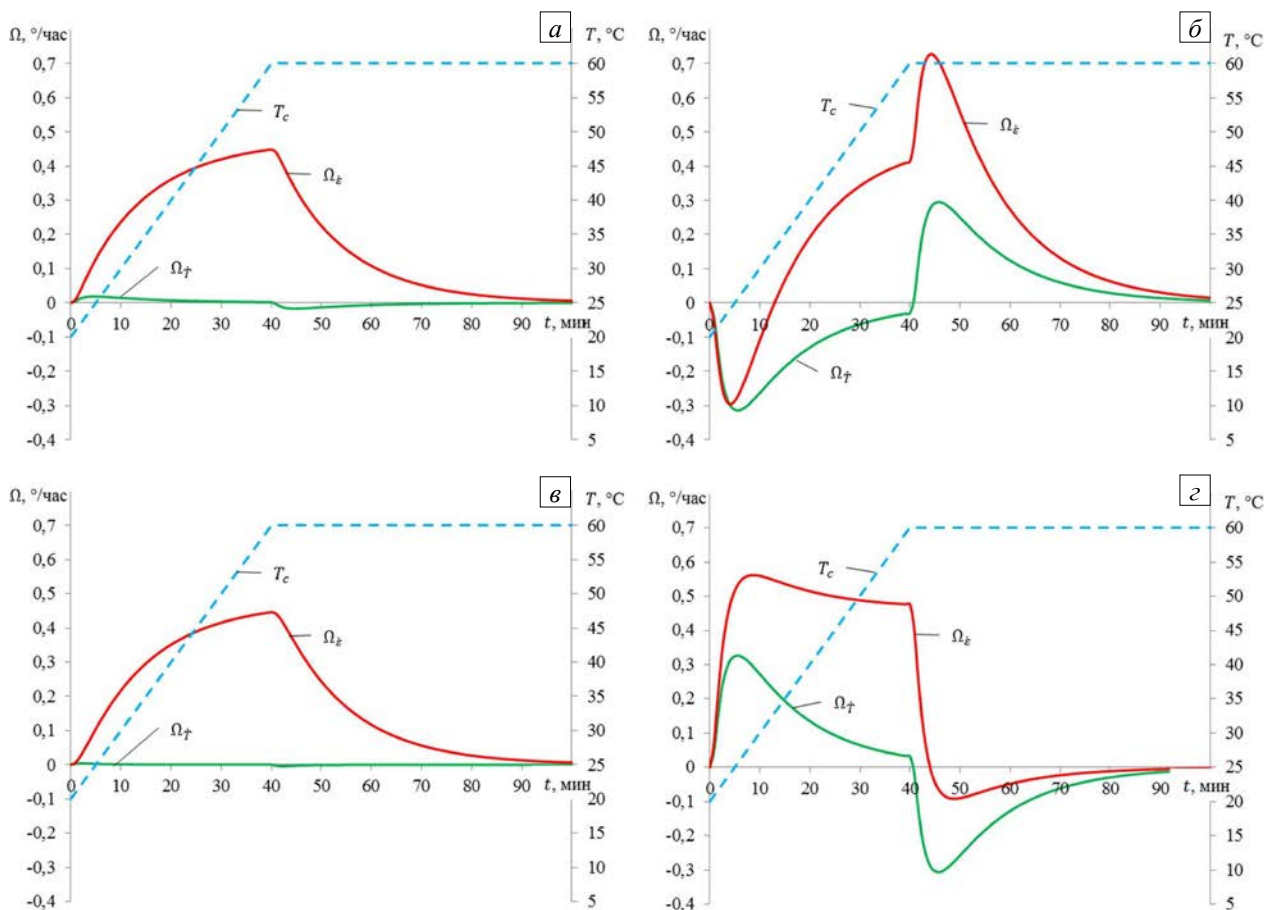


Рис. 9. Расчетные фиктивные угловые скорости для ВК №1 (а, в), ВК №2 (б, г) в нормальном (а, б) и перевернутом (в, г) состояниях

Результат расчета показывает существенную разницу между фиктивными угловыми скоростями в контуре с разными вариантами намоток. В ВК №1 при намотке витков вправо и влево (Рис. 1) равноудаленные от центра световода участки располагаются вплотную друг к другу и обеспечивают согласованность полей скоростей изменения температур и деформаций. Решающую роль в формировании фиктивной угловой скорости играет упругооптический эффект. При перевороте контура наблюдается изменение в четыре раза фиктивной угловой скорости, вызванной термооптическим эффектом, но ее вклад в суммарный дрейф ничтожен. В ВК №2 равноудаленные от центра световода участки при намотке влево оказываются разнесенными друг от друга на три витка, что приводит к увеличению разностей скоростей изменения температур и деформаций на участках «разгона» (при времени от 0 до 10 мин) и «торможения» (от 40 до 50 мин) внешней температуры. При перевороте контура на данных участках имеет место смена знака угловых скоростей у обеих компонент теплового дрейфа, что говорит о высокой чувствительности модифицированной намотки к полю скоростей изменения температур.

На рисунке 10 представлены расчетные суммарные угловые скорости, вызванные термооптическим и упругооптическим эффектами, и, для сравнения, экспериментальные данные. Результаты эксперимента были сглажены методом скользящего среднего на интервале 10 с. Также из сигнала была исключена постоянная составляющая скорости вращения Земли. Из рисунка видно, что функционал (4) при условии достоверно найденных температур и деформаций адекватно описывает фиктивную угловую скорость.

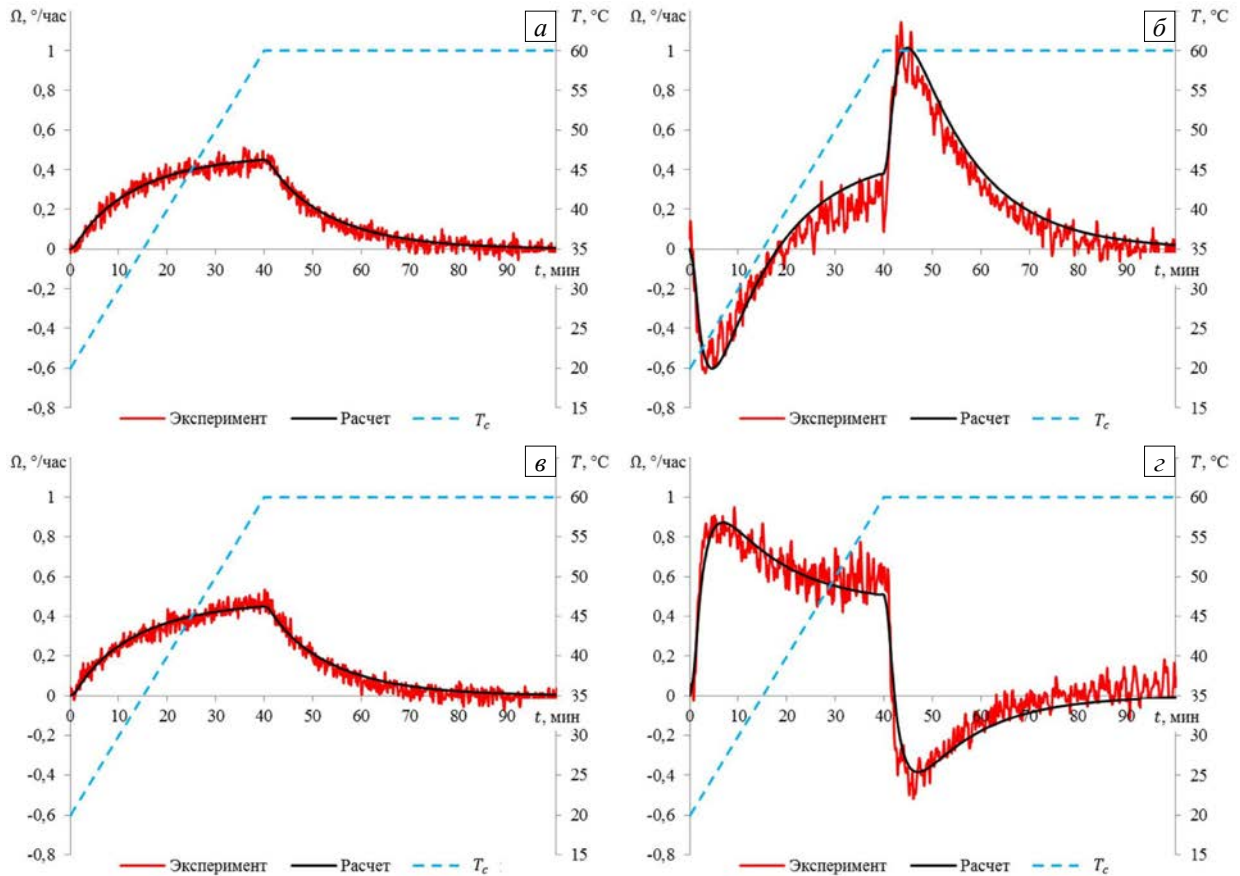


Рис. 10. Фиктивные угловые скорости для ВК №1 (а, в), ВК №2 (б, г) в нормальном (а, б) и перевернутом (в, г) состояниях

8. Заключение

С целью исследования теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа при нестационарном тепловом воздействии была изготовлена специальная оснастка, в которой бескаркасный контур удерживается резиновыми прокладками. Данная конструкция позволяет обеспечить осесимметричное распространение температуры и минимизирует механические нагрузки на контур при сопряжении с корпусными деталями. Для контура в приспособлении построена комплексная математическая модель, включающая квазистационарные уравнения термоупругости с детальным учетом неоднородности физико-механических свойств контура и функционал кажущейся угловой скорости, учитывающий термооптический и уругооптический эффекты. С помощью дополнительных стационарных и нестационарных испытаний идентифицированы коэффициент Пуассона первичного слабо сжимаемого покрытия и коэффициент теплопередачи между оснасткой и окружающей средой. Результаты расчета и экспериментальное подтверждение теплового дрейфа для двух схем намотки с изменением направления оси чувствительности дают основание сделать вывод о внутренней непротиворечивости разработанной модели и возможности ее использования в качестве инструмента для рациональных конструкторских решений, обеспечивающих снижение и предсказуемость теплового дрейфа ВОГ.

Следует отметить, что от принятой гипотезы о постоянстве физико-механических свойств материалов необходимо отказаться при расчете фиктивной угловой скорости в широком диапазоне температур. Исследования двух видов контуров показывают предпочтительность использования волоконного контура с оригинальной квадрупольной намоткой. Низкая чувствительность к распределению в контуре скоростей изменения температур и меньшая амплитуда открывают возможность для более эффективной компенсации выходного сигнала ВОГ.

Авторы выражают глубокую признательность доктору физико-математических наук Келлеру Илье Эрнстовичу за поддержку исследований и рекомендации на этапах подготовки и редактирования настоящей статьи.

Литература

1. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. – М.: Радио и связь, 1987. – 152 с.
2. Lefevre H. C. The Fiber-Optic Gyroscope. – Boston: Artech House, 2014. – 343 p.

3. *Okosi T., Okamoto K. и др.* Волоконно-оптические датчики. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
4. *Sagnac G.* The demonstration of the luminiferous aether by an interferometer in uniform rotation // *Comptes Rendus.* – 1913. – Vol. 157. – P. 708-710.
5. *Sagnac G.* On the proof for the existence of a luminiferous aether using a rotating interferometer experiment // *Comptes Rendus.* – 1913. – Vol. 157. – P. 1410-1413.
6. *Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Скрипников С.Ф. и др.* Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на основе волоконно-оптических гироскопов // *Гироскопия и навигация.* – 2014. – № 1(84). – С. 14-25. (English version [DOI](#)).
7. *Вахрамеев Е.И., Галягин К.С., Ошивалов М.А., Савин М.А.* Методика численного прогнозирования и коррекции теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // *Изв. вузов. Приборостроение.* – 2017. – Т. 60, № 1. – С. 32-38. [DOI](#)
8. *Антонова М.В., Матвеев В.А.* Модель погрешности волоконно-оптического гироскопа при воздействии тепловых и магнитных полей // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение.* – 2014. – № 3. – С. 73-80.
9. *Wang G., Wang Q., Zhao B., Wang Z.* Compensation method for temperature error of fiber optical gyroscope based on relevance vector machine // *Appl. Optics.* – 2016. – Vol. 55, no. 5. – P. 1061-1066. [DOI](#)
10. *Zhang Y., Guo Y., Li C., Wang Y., Wang Z.* A new open-loop fiber optic gyro error compensation method based on angular velocity error modeling // *Sensors.* – 2015. – Vol. 15, no. 3. – P. 4899-4912. [DOI](#)
11. *Драцицына Е.В., Егоров Д.А., Унтилов А.А., Дейнека Г.Б., Шарков И.А., Дейнека И.Г.* Снижение влияния изменения температуры на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа // *Гироскопия и навигация.* – 2012. – № 4(79). – С. 10-20. (English version [DOI](#)).
12. *Джашиитов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В., Николаев С.Г., Колеватов А.П., Плотников А.Д., Коффер К.В.* Иерархические тепловые модели бесплатформенной инерциальной навигационной системы на волоконно-оптических гироскопах // *Гироскопия и навигация.* – 2013. – № 1(80). – С. 49-63. [DOI](#)
13. *Громов Д.С., Шарков А.В.* Тепловые режимы гироскопических приборов на базе волоконно-оптических гироскопов // *Изв. вузов. Приборостроение.* – 2013. – Т. 56, № 1. – С. 62-67.
14. *Голиков А.В., Панкратов В.М., Панкратова Е.В.* Применение пассивных способов уменьшения температурных перепадов в волоконно-оптическом гироскопе на основе использования наноматериалов // *Гироскопия и навигация.* – 2016. – № 2(93). – С. 33-40. (English version [DOI](#)).
15. *Курбатов А.М., Курбатов Р.А.* Температурные характеристики чувствительных катушек волоконно-оптического гироскопа // *Радиотехника и электроника.* – 2013. – Т. 58, № 7. – С. 735-742. (English version [DOI](#)).
16. *Li X., Ling W., He K., Xu Z., Du S.* A thermal performance analysis and comparison of fiber coils with the D-CYL winding and QAD winding methods // *Sensors.* – 2016. – Vol. 16, no. 3. – P. 900. [DOI](#)
17. *Ling W., Li X., Yang H., Liu P., Xu Z., Wei Y.* Reduction of the Shupe effect in interferometric fiber optic gyroscopes: The double cylinder-wound coil // *Opt. Commun.* – 2016. – Vol. 370. – P. 62-67. [DOI](#)
18. *Mohr F.* Thermo-optically induced bias drift in fiber optical Sagnac interferometers // *J. Lightwave Technol.* – 1996. – Vol. 14, no. 1. – P. 27-41. [DOI](#)
19. *Shupe D.M.* Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer // *Appl. Optics.* – 1980. – Vol. 19, no. 5. – P. 654-655. [DOI](#)
20. <http://www.nufern.com/services/coilwindings> (дата обращения: 10.09.2017).
21. *Trufanov A.N., Smetannikov O.Y., Trufanov N.A.* Numerical analysis of residual stresses in preform of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers // *Opt. Fiber Technol.* – 2010. – Vol. 16, no. 3. – P. 156-161. [DOI](#)
22. *Hocker G.B.* Fiber-optic sensing of pressure and temperature // *Appl. Optics.* – 1979. – Vol. 18, no. 9. – P. 1445-1448. [DOI](#)
23. *Mohr F., Schadt F.* Bias error in fiber optic gyroscopes due to elasto-optic interactions in the sensor fiber // *EWOFS, Spain, SPIE.* – 2004. – Vol. 5502. – P. 410-413.
24. *Hocker G.B.* Fiber optic acoustic sensors with composite structure: an analysis // *Appl. Optics.* – 1979. – Vol. 18, no. 21. – P. 3679-3683. [DOI](#)
25. *Butter C.D., Hocker G.B.* Fiber optics strain gauge // *Appl. Optics.* – 1978. – Vol. 17, no. 18. – P. 2867-2869. [DOI](#)
26. *Dianov E.M., Mashinsky V.M.* Germanium-based core optical fibers // *J. Lightwave Technol.* – 2005. – Vol. 23, no. 11. – P. 3500-3508. [DOI](#)
27. *Fleming J.W.* Dispersion in GeO₂-SiO₂ glasses // *Appl. Optics.* – 1984. – Vol. 23, no. 24. – P. 4486-4493. [DOI](#)
28. *Новацкий В.* Вопросы термоупругости. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 364 с.
29. *Агравал Г.* Нелинейная волоконная оптика. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
30. *Беспрозванных В.Г., Кривошеев А.И., Кель О.Л.* Исследование влияния температурного фактора на состояние контура волоконно-оптического гироскопа методом бриллюэновской рефлектометрии // *Прикладная фотоника.* – 2015. – Т. 2, № 4. – С. 329-341.
31. *Minakuchi S., Sanada T., Takeda N., Mitani S., Mizutani T., Sasaki Y., Shinozaki K.* Thermal strain in lightweight composite fiber-optic gyroscope for space application // *J. Lightwave Technol.* – 2014. – Vol. 33, no. 12. – P. 2658-2662. [DOI](#)
32. *Moser F., Lienhart W., Woschitz H., Schuller H.* Long-term monitoring of reinforced earth structures using distributed fiber optic sensing // *J. Civil Struct. Health Monit.* – 2016. – Vol. 6, no. 3. – P. 321-327. [DOI](#)

References

1. Sheremet'ev A.G. *Volokonnyj opticheskiy giroskop* [The fiber-optic gyroscope]. Moscow: Radio i svyaz', 1987. 152 p.
2. Lefevre H.C. *The fiber-optic gyroscope*. Boston: Artech House, 2014. 343 p.
3. Okosi T., Okamoto K., et al. *Volokonno-opticheskie datchiki* [Fiber-optic sensors]. Leningrad: Energoatomizdat, 1991. 256 p.
4. Sagnac G. The demonstration of the luminiferous aether by an interferometer in uniform rotation. *Comptes Rendus*, 1913, vol. 157, pp. 708-710.

5. Sagnac G. On the proof for the existence of a luminiferous aether using a rotating interferometer experiment. *Comptes Rendus*, 1913, vol. 157, pp. 1410-1413.
6. Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Prilutskii V.E., Ponomarev V.G., Morev I.V., Skripnikov S.F., et al. Strapdown inertial navigation systems based on fiber-optic gyroscopes. *Gyroscopy and Navigation*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 195-204. DOI
7. Vahrameev E.I., Galyagin K.S., Oshivalov M.A., Savin M.A. Method of numerical prediction and correction of thermal drift of the fiber-optic gyro. *Izv. vuzov. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 32-38. DOI
8. Antonova M.V., Matveev V.A. Model of error of a fiber-optic gyro exposed to thermal and magnetic fields. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2014, no. 3, pp. 73-80.
9. Wang G., Wang Q., Zhao B., Wang Z. Compensation method for temperature error of fiber optical gyroscope based on relevance vector machine. *Appl. Optics*, 2016, vol. 55, no. 5, pp. 1061-1066. DOI
10. Zhang Y., Guo Y., Li C., Wang Y., Wang Z. A new open-loop fiber optic gyro error compensation method based on angular velocity error modeling. *Sensors*, 2015, Vol. 15, no. 3, pp. 4899-4912. DOI
11. Dranitsyna E.V., Egorov D.A., Untilov A.A., Deineka G.B., Sharkov I.A., Deineka I.G. Reducing the effect of temperature variations on FOG output signal. *Gyroscopy and Navigation*, 2013, vol. 4, no. 2, pp. 92-98. DOI
12. Dzhashitov V.E., Pankratov V.M., Golikov A.V., Nikolaev S.G., Kolevator A.P., Plotnikov A.D., Koffer K.V. Hierarchical thermal models of FOG-based strapdown inertial navigation system. *Gyroscopy and Navigation*, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 162-173. DOI
13. Gromov D.S., Sharkov A.V. Heat regimes of gyroscopic instruments on the base of fiber optical gyroscopes. *Izv. vuzov. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*, 2013, vol. 56, no. 1, pp. 62-67.
14. Golikov A.V., Pankratov V.M., Pankratova E.V. Passive methods of enhancing thermal stability of nanostructured fiber-optic gyros. *Gyroscopy and Navigation*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 38-42. DOI
15. Kurbatov A.M., Kurbatov R.A. Temperature characteristics of fiber-optic gyroscope sensing coils. *J. Commun. Technol. El.*, 2013, vol. 58, no.7. pp. 745-752. DOI
16. Li X., Ling W., He K., Xu Z., Du S. A thermal performance analysis and comparison of fiber coils with the D-CYL winding and QAD winding methods. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 3, p. 900. DOI
17. Ling W., Li X., Yang H., Liu P., Xu Z., Wei Y. Reduction of the Shupe effect in interferometric fiber optic gyroscopes: The double cylinder-wound coil. *Opt. Commun.*, 2016, vol. 370, pp. 62-67. DOI
18. Mohr F. Thermooptically induced bias drift in fiber optical Sagnac interferometers. *J. Lightwave Technol.*, 1996, vol. 14, no. 1, pp. 27-41. DOI
19. Shupe D.M. Thermally induced non-reciprocity in the fiber-optic interferometer. *Appl. Optics*, 1980, vol. 19, no. 5, pp. 654-655. DOI
20. <http://www.nufern.com/services/coilwindings> (accessed 10 September 2017).
21. Trufanov A.N., Smetannikov O.Y., Trufanov N.A. Numerical analysis of residual stresses in preform of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers. *Opt. Fiber Technol.*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 156-161. DOI
22. Hocker G.B. Fiber-optic sensing of pressure and temperature. *Appl. Optics*, 1979, vol. 18, no. 9, pp. 1445-1448. DOI
23. Mohr F., Schadt F. Bias error in fiber optic gyroscopes due to elasto-optic interactions in the sensor fiber. *EWOFs, Spain, SPIE*, 2004, vol. 5502, pp. 410-413.
24. Hocker G.B. Fiber optic acoustic sensors with composite structure: an analysis. *Appl. Optics*, 1979, vol. 18, no. 21, pp. 3679-3683. DOI
25. Butter C.D., Hocker G.B. Fiber optics strain gauge. *Appl. Optics*, 1978, vol. 17, no. 18, pp. 2867-2869. DOI
26. Dianov E.M., Mashinsky V.M. Germania-based core optical fibers. *J. Lightwave Technol.*, 2005, vol. 23, no. 11, pp. 3500-3508. DOI
27. Fleming J.W. Dispersion in GeO₂-SiO₂ glasses. *Appl. Optics*, 1984, vol. 23, no. 24, pp. 4486-4493. DOI
28. Novatskiy V. *Voprosy termouprugosti* [Problems of thermoelasticity]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1962. 364 p.
29. Agrawal G. *Nonlinear fiber optics*. Academic Press, 2013. 648 p.
30. Besprozvannykh V.G., Krivosheev A.I., Kel' O.L. Investigation of temperature factor influence upon the state of fiber gyro circuit studied by Brillouin reflectometry. *Prikladnaya fotonika – Applied Photonics*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 329-341.
31. Minakuchi S., Sanada T., Takeda N., Mitani S., Mizutani T., Sasaki Y., Shinozaki K. Thermal strain in lightweight composite fiber-optic gyroscope for space application. *J. Lightwave Technol.*, 2014, vol. 33, no. 12, pp. 2658-2662. DOI
32. Moser F., Lienhart W., Woschitz H., Schuller H. Long-term monitoring of reinforced earth structures using distributed fiber optic sensing. *J. Civil Struct. Health Monit.*, 2016, vol. 6, no. 3, pp. 321-327. DOI

Поступила в редакцию 05.06.2017; опубликована в электронном виде 04.10.2017

Сведения об авторах

Есипенко Иван Александрович, инженер-конструктор 1 кат., Публичное акционерное общество «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (ПАО «ПНИПК»), 614990, Пермь, ул. 25 Октября, д. 106; e-mail: esipenkoivan@gmail.com

Лыков Даниил Андреевич, магистрант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, Пермь, Комсомольский пр., д. 29; e-mail: lykovdaperm@gmail.com