

решениями, полученными с помощью метода конечных разностей. Сравнение показало, что физически информированные нейронные сети способны аппроксимировать решения нестационарных задач теории термоупругости с достаточной для практических приложений точностью.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (Грант РНФ № 23-29-00680), выданного Московскому авиационному институту.

Список литературы

- 1 **Земсков, А. В.** Одномерные нестационарные задачи термоупругости : учеб. пособие / А. В. Земсков, Д. В. Тарлаковский, Г. В. Федотенков. – М. : Изд-во МАИ, 2023 – 96 с.
- 2 **Хайкин, С.** Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2006. – 1104 с.
- 3 **Kingma, D. P.** A Method for Stochastic Optimization / D. P. Kingma, J. L. Ba. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1412.6980> (date of access: 10.09.2025). – DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.
- 4 **Федотенков, Г. В.** Определение нестационарной нагрузки на балку Тимошенко / Г. В. Федотенков, Д. В. Тарлаковский, Ю. А. Вахтерова // Лобачевский Ю. Математика. – 2019. – Т. 40, № 4. – С. 439–447. – DOI: 10.1134/S1995080219040061.
- 5 **Тарлаковский, А. М.** PINNs для моделирования течения подземных вод в пористых средах / А. М. Тарлаковский, С. О. Марреро // Adv. Водные ресурсы. – 2020. – Т. 141. – С. 103610. – DOI: 10.1016/j.advwatres.2020.103610.

УДК 629.7.054.011

О ПОДХОДЕ К РАСЧЕТУ ТЕПЛООВОГО ДРЕЙФА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С УЧЕТОМ КВАДРУПОЛЬНОГО СПОСОБА НАМОТКИ ВОЛОКНА

А. В. ГОЛИКОВ

Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр РАН»

В. С. ПОПОВ

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Российская Федерация

Гироскопические датчики играют важную роль в навигационных системах подвижных объектов, в железнодорожном транспорте (поезда на монорельсах), современных гаджетах, инклинометрах и др.

Существует несколько видов таких датчиков, которые различаются принципом действия и классом точности. Одной из разновидностей является волоконно-оптический гироскоп (ВОГ). Теория и практика ВОГ достаточно хорошо разработана, однако задача повышения точности и надежности гироскопов такого типа не теряет актуальности. Одним из источников погрешностей ВОГ являются температурные возмущения и для решения задач минимизации их влияния необходимо всестороннее исследование тепловых процессов, приводящих к искажению выходного сигнала (тепловому дрейфу), в т. ч. путем компьютерного моделирования.

Анализ исследований в этом направлении показал, что механизм, приводящий к появлению ложного сигнала вследствие температурного воздействия, обусловлен двумя основными факторами: изменением показателя преломления оптического волокна при изменении температуры (термооптическая составляющая) и термоупругими деформациями, также приводящими к изменению оптических характеристик волокна (упругооптическая составляющая) [1–3].

В настоящей работе приводится пример решения задачи расчета теплового дрейфа ВОГ с учетом специального способа намотки оптического волокна на катушку (чувствительный элемент ВОГ).

Методика расчета теплового дрейфа состоит из следующих этапов.

1 Решение задачи расчета нестационарного температурного поля ВОГ в условиях внешних температурных возмущений. Данная задача решается на основе хорошо апробированного метода элементарных тепловых балансов [2].

2 На основе полученных на первом этапе данных выполняется расчет нестационарного термоупругого напряженно-деформированного состояния (НДС) чувствительной катушки волоконно-

оптического гироскопа. Полученные в результате данные являются основой для расчета упругооптической составляющей теплового дрейфа.

3 Рассчитывается термооптическая и упругооптическая составляющие и суммарный тепловой дрейф ВОГ.

Задача термоупругого НДС решается на основе соотношений для осесимметричной контактной термоупругой задачи [4].

Составляющие теплового дрейфа вычисляются по известным выражениям [1,3]:

$$\Omega_T = \frac{1}{LD} \int_0^L \left(\frac{dn}{dT} + n\alpha_T \right) n(2l-L) \frac{\partial T(t,l)}{\partial t} dl, \quad (1)$$

$$\Omega_\varepsilon = \frac{1}{LD} \int_0^L \left(n^2 \dot{\varepsilon}_\theta + \frac{1}{2} n^4 (p_{11} \dot{\varepsilon}_r + p_{12} \dot{\varepsilon}_z + p_{12} \dot{\varepsilon}_\theta) \right) (2l-L) dl, \quad (2)$$

где T – нестационарная температура; n – температурозависимый показатель преломления сердечника волокна; L, D – длина волокна и диаметр катушки; α_T – температурный коэффициент линейного расширения, p_{11}, p_{12} – упругооптические константы светопроводящей жилы; $\dot{\varepsilon}_\theta, \dot{\varepsilon}_r, \dot{\varepsilon}_z$ – скорости упругих деформаций соответственно вдоль волокна, в радиальном направлении катушки и в вертикальном.

Для вычисления (1), (2) необходимо знать распределение температуры $T(f(l))$ и напряжений $\dot{\varepsilon}_\theta(f(l)), \dot{\varepsilon}_r(f(l)), \dot{\varepsilon}_z(f(l))$ вдоль нити оптического волокна в случае наиболее распространенного, квадрупольного, способа намотки волокна на катушку [1]. Полагая распределение этих параметров в пределах одного слоя волокна постоянным, функцию распределения можно записать в виде [5]

$$f(l) = i = \begin{cases} \left[\frac{(L/2-l)/l_c}{2} \right] + 2 \left[\frac{\left[\frac{(L/2-l)/l_c}{2} \right]}{2} \right] + 1 & \text{при } 0 \leq l < \frac{L}{2} \\ \left[\frac{(l-L/2)/l_c}{2} \right] + 2 \left[\frac{\left[\frac{(l-L/2)/l_c}{2} \right]}{2} \right] + 1 & \text{при } \frac{L}{2} \leq l \leq L, \end{cases} \quad (3)$$

где l_c – длина волокна в одном слое катушки. Квадратными скобками здесь обозначена целая часть от вычисленного значения заключенного в них выражения.

Пример расчетов на основе построенной модели при нагреве катушки до 60 °С приведен на рисунке 1.

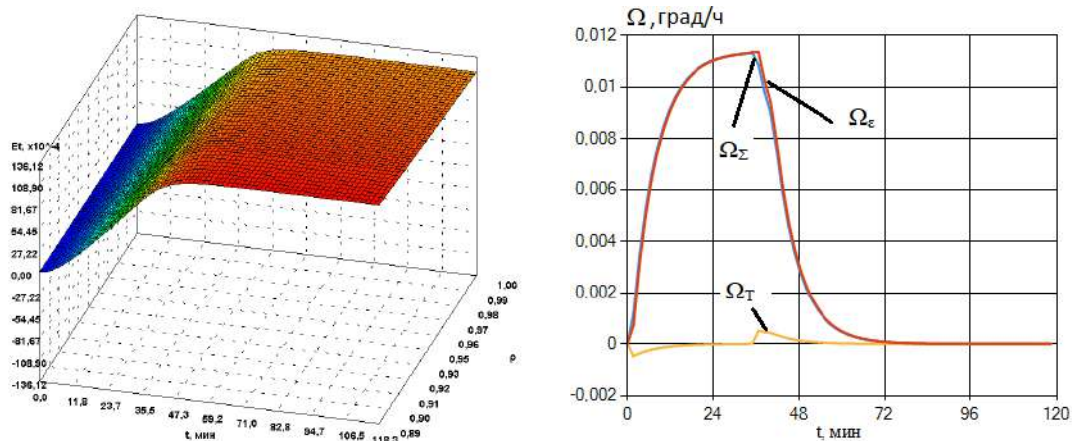


Рисунок 1 – Диаграмма деформаций и тепловой дрейф

Достоинствами предложенного подхода являются возможность реализации соотношений математической модели в любом доступном программном обеспечении, в том числе свободно распространяемом; отсутствие необходимости значительных вычислительных ресурсов; возможность в процессе расчета нестационарных температурных полей оценить тепловой дрейф и напряженно-деформированное состояние чувствительного элемента практически любого ВОГ типовой кон-

струкции, что может помочь разработчикам ВОГ в борьбе с температурными возмущениями. Кроме того, возможна разработка алгоритмов термокомпенсации на основе разработанной комплексной модели теплового дрейфа.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках темы государственного задания министерства образования и науки РФ № 125020501400-6.

Список литературы

- 1 Lefevre, H. C. The Fiber-Optic Gyroscope / H. C. Lefevre. – Boston : Artech House, 2014. – 343 p.
- 2 Джашитов, В. Э. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / В. Э. Джашитов, В. М. Панкратов. – СПб. : ГНЦРФЦНИИ «Электроприбор», 2005. – 404 с.
- 3 Есипенко, И. А. Математическая модель теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа и ее экспериментальная верификация / И. А. Есипенко, Д. А. Лыков // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Сер. «Приборостроение». – 2017. – № 5 (116). – С. 728–732.
- 4 Коваленко, А. Д. Основы термоупругости / А. Д. Коваленко. – Киев : Наук. думка, 1970. – 307 с.
- 5 Голиков, А. В. Математическая модель теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа с учетом квадрупольной намотки волокна / А. В. Голиков, В. С. Попов, Е. В. Панкратова // Вестник Самарского государственного технического университета. – Сер. «Технические науки». – 2025. – Т. 33, № 2 (86). – С. 63–78.

УДК 532.517:539.3

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРУГИХ СООСНЫХ ОБОЛОЧЕК С ВЯЗКОЙ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТЬЮ

С. А. ГРИГОРЬЕВ

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Российская Федерация

В условиях стремительного технологического прогресса особую актуальность приобретают задачи исследования динамики взаимодействия различных сред. Одна из таких задач – анализ динамики взаимодействия вязкой сжимаемой жидкости и упругих соосных оболочек.

Как правило, сжимаемость жидкостей настолько мала, что при построении математических моделей ею можно пренебречь. Однако в случае жидкостей с наполнителями либо газонасыщенных жидкостей, а также в условиях повышенных температур или перепадов давления сжимаемость становится заметной [1]. Большая сжимаемость жидкости может привести к таким негативным последствиям, как гидравлический удар, неточность работы гидравлических систем и потеря энергии. Поэтому задачи моделирования динамики вязкой сжимаемой жидкости имеют весомое прикладное значение для отраслей по производству автомобильного, железнодорожного и авиационного транспорта. Итоги исследования могут использоваться при проектировании и оптимизации устройств и систем, в состав которых входят соосные оболочки со слоем жидкости между ними.

Исследуемая механическая система включает две соосные упругие замкнутые оболочки, жёстко закреплённые на торцах, и слой вязкой сжимаемой жидкости между ними (рисунок 1). Отсутствует перемещение оболочек на торцах, а также продольные перемещения по всей длине. На систему действуют внешний источник вибраций и гармонические по времени перепады давления.

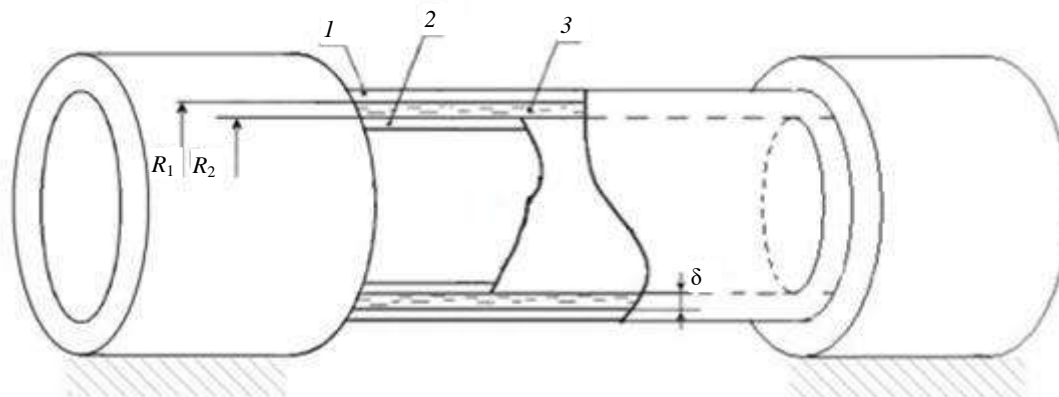


Рисунок 1 – Физическая модель