

*Д.В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, С.О. ПАЩЕНКО, В.Б. УСПЕНСЬКИЙ*

### **АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМИ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОХИБОК ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ГІРОСКОПІВ, ВСТАНОВЛЕНИХ НА ШТУЧНИХ СУПУТНИКАХ ЗЕМЛІ**

Надано опис розроблених алгоритмів та програм, що застосовуються для калібрування волоконно-оптичних гіроскопів, які працюють в умовах тепловміни при русі літального апарату навколоземною орбітою. Наведено математичну постановку задачі нестационарної теплопровідності, яку розв'язано комбінацією методу скінченних елементів та різницевого методу інтегрування за часом. За допомогою розробленого програмного засобу визначено розподіл температур у корпусі супутника та безпосередньо у волоконно-оптичному гіроскопі у вигляді часової залежності. Знайдений розподіл дає змогу, по-перше, обґрунтувати вимоги до наземного калібрування гіроскопів для побудови відповідних компенсуючих моделей; по-друге, використовувати такі моделі в умовах невизначеності поточної температури гіроскопу за причин, скажімо, відмови термодатчика. Таким чином здійснюється мінімізація температурної похибки приладів під час їх функціонування у складі бортових систем орієнтації та навігації та підвищується їхня відмовостійкість.

**Ключові слова:** алгоритм, програма, нестационарна теплопровідність, штучний супутник Землі, волоконно-оптичний гіроскоп, температурна модель похибок, калібрування.

*Д.В. БРЕСЛАВСКИЙ, С.А. ПАЩЕНКО, В.В. УСПЕНСКИЙ*

### **АЛГОРИТМ И ПРОГРАММЫ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКАХ ЗЕМЛИ**

Представлено описание разработанных алгоритмов и программ, используемых для калибровки волоконно-оптических гироскопов, работающих в условиях тепловміни при движении летательного аппарата по околоземной орбите. Приведена математическая постановка задачи нестационарной теплопроводности, решаемой с помощью комбинации метода конечных элементов и разностного метода интегрирования по времени. С помощью разработанного программного средства определено распределение температур в корпусе спутника и непосредственно в волоконно-оптическом гироскопе в виде временной зависимости. Найденное распределение дает возможность, во-первых, обосновать требования к наземной калибровке гироскопов для построения соответствующих компенсирующих моделей; во-вторых, использовать подобные модели в условиях неопределенности температуры гироскопа, например, по причине отказа термодатчика. Таким образом, производится минимизация температурной погрешности приборов во время их функционирования в составе бортовых систем ориентации и навигации и улучшается их отказоустойчивость.

**Ключевые слова:** алгоритм, программа, нестационарная теплопроводность, искусственный спутник Земли, волоконно-оптический гироскоп, температурная модель ошибок, калибровка.

*D.V. BRESLAVSKY, S.O. PASHCHENKO, V.B. USPENSKY*

### **ALGORITHM AND SOFTWARE FOR MINIMIZATION OF TEMPERATURE ERRORS OF FIBER-OPTIC GYROSCOPES, MOUNTED ON ARTIFICIAL EARTH SATELLITES**

The description of the developed algorithms and programs, which are used for calibration of fiber-optic gyroscopes working in the conditions of heat varying during spacecraft's motion in circumterrestrial orbit, is discussed. The mathematical statement for problem of non-stationary heat conduction for the satellite frame and on-board devices is presented. The method of numerical solution is based on the combination of Finite Element Method for boundary value problem and finite difference time integration method for initial one. The developed approach which allows use the parallel calculations in heat problems, is described. The information about developed software is presented by description of main functions written in C++ language. The temperature distribution in dependence on time in the satellite frame and directly in fiber-optic gyroscope's shell is found by use of developed software. Found distribution makes an opportunity at first to justify demands for ground calibration of gyroscopes for obtaining the compensation models. Secondly, the use of similar models in the conditions of uncertain value of gyroscope's temperature, which can be, for example, in the case of heat-sensing device's failure, can be done. The mathematical model of fiber-optic gyroscope snap data is discussed. The hypothesis of the linear dependence of the drift motion from temperature is suggested. The description of calibration algorithm for temperature model of fiber-optic gyroscope is presented. It was concluded that the main influence on the errors of fiber-optic gyroscope measurements is caused by temperature gradient and influence of absolute temperature is not so significant. Thereby, the minimization of temperature error of devices, which are affiliated in orientation and navigation on-board systems, can be performed as well as fail safety of such systems can be increased by use of the presented methods and algorithms.

**Key words:** algorithm, program, non-stationary heat conduction, artificial Earth satellite, fiber-optic gyroscope, temperature model of errors, calibration.

**Вступ.** Забезпечення стабільного функціонування систем управління та навігації сучасних космічних

літальних апаратів (КЛА) є практично важливою задачею. Нові умови експлуатації КЛА, зокрема штуч-

них супутників Землі (ШСЗ), пов'язані з застосуванням негерметичних корпусів. При цьому розташовані в них прилади та обладнання знаходяться у більш несприятливих температурних умовах. Це пов'язано з рухом ШСЗ навколоземною орбітою, при якому він періодично знаходиться в областях сонячного нагрівання та остигання у тіні Землі. Працездатність волоконно-оптичних гіроскопів (ВОГ) [1], які є важливим елементом систем управління та навігації, істотно залежить від експлуатаційної температури [1, 2]. Її перевищення над заданим діапазоном може призвести до суттєвих і неприпустимих похибок, та у граничному випадку – до втрати працездатності.

У зв'язку з цим питанням мінімізації температурних похибок ВОГ приділяється велика увага [2-5]. Однак у всіх існуючих на теперішній час роботах застосовано підхід, в якому компенсуючі моделі будуються виходячи з даних щодо вимірюваної датчиком ВОГ температури. Вочевидь, що такі моделі стають непрацездатними при відмові термодатчика.

У даній роботі представлено новий підхід, в якому запропоновано закласти в компенсуючу модель похибок ВОГ дані чисельного моделювання температури в його корпусі та елементах приладів та устаткування, що розміщені в ньому, включно з температурою в самому ВОГ. Чисельне моделювання задачі нестационарної теплопровідності проводиться з застосуванням методу скінченних елементів спільно з різницею методом інтегрування за часом. Це дозволяє з необхідним рівнем точності врахувати всі особливості розподілу теплових потоків та складну геометрію приладу. Визначена залежність змінювання температури від часу застосовується, по-перше, для формування вимог у вигляді робочих діапазонів температури та її градієнту, у яких потрібно проводити наземне калібрування моделей датчиків, по-друге, для використання під час орбітального функціонування систем у компенсуючих моделях, у вигляді спрогнозованої оцінки температури при ймовірній відмові відповідного термодатчика. Все це у сукупності дозволяє мінімізувати остатню похибку гіроскопів та підвищити показники відмовостійкості системи у цілому.

### Математична постановка задачі нестационарної теплопровідності корпусу супутника

Розглянемо тривимірну континуальну область з об'ємом  $\Omega$ , що обмежене деякою поверхнею  $S$ .

Для опису процесу перерозподілу теплової енергії у корпусах супутників та приладів застосовано рівняння нестационарної теплопровідності [1, 6]:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + f(x, y, z, t), \quad (1)$$

де  $k_x = k_x(T)$ ,  $k_y = k_y(T)$ ,  $k_z = k_z(T)$  – коефіцієнти теплопровідності, що є функціями температури;  $c = c(T)$ ,  $\rho = \rho(T)$  – розподілена теплоємність та густина матеріалу відповідно, які також є функціями те-

мператури;  $f(x, y, z, t)$  – узагальнені об'ємні термодинамічні сили, що моделюють дію теплового джерела.

Вважається, що на поверхні  $S_3$  для задачі нестационарної теплопровідності відповідно мають місце крайові умови Дирихле у вигляді заданого температурного режиму; на поверхні  $S_4$  мають місце крайові умови Неймана, які описують дію теплового потоку; на поверхні  $S_5$  мають місце крайові умови Ньютона-Ріхмана, що описують процеси теплопередачі шляхом конвективного теплообміну; на поверхні  $S_6$  мають місце крайові умови Стефана-Больцмана, що описують процеси теплопередачі шляхом променевого теплообміну:

$$\begin{aligned} T|_{S_3} &= \theta(t) \text{ } ^\circ\text{C}; \\ \frac{\partial T}{\partial n}|_{S_4} &= q(t) \frac{Bm}{M^2}; \\ \frac{\partial T}{\partial n}|_{S_5} &= \alpha_{Conv} \cdot (T_{Env} - T) \frac{Bm}{M^2}; \\ \frac{\partial T}{\partial n}|_{S_6} &= \varepsilon_{Black} \cdot \delta_{SB} \cdot (T_{Env}^4 - T^4) \frac{Bm}{M^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\theta(t)$  – заданий температурний режим,  $^\circ\text{C}$ ;  $q(t)$  – заданий тепловий потік,  $\frac{Bm}{M^2}$ ;  $\alpha_{Conv} = \alpha_{Conv}(T)$  – коефіцієнт теплопередачі, що залежить від температури, швидкості та густини оточуючого середовища,  $\frac{Bm}{M^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ ;  $T_{Env}$  – температура оточуючого середовища,  $^\circ\text{C}$ ;  $\varepsilon_{Black} = \varepsilon_{Black}(T)$  – коефіцієнт чорноти;  $\delta_{SB} = 5.670367 \cdot 10^{-8}$  – константа Стефана-Больцмана,  $\frac{Bm}{M^2 \cdot ^\circ\text{C}^4}$ .

В початковий момент часу розподіл температурного поля є функцією координат:

$$T(x, y, z, 0) = \psi(x, y, z) \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3)$$

**Програма для моделювання температурних розподілів.** Як й у роботі [6], застосуємо для моделювання розподілу температур у корпусі ШСЗ комп'ютерну програму *FEM Temperature* [7], розроблену для розв'язання задач нестационарної та стационарної теплопровідності трьохвимірних тіл. В програмі використовується трилінійний восьмивузловий скінченний елемент. На кожному кроці за часом при розв'язанні задачі нестационарної теплопровідності система лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) відносно невідомих значень вузлових температур розв'язується методом спряжених градієнтів. При цьому реалізовано блочний алгоритм обчислення матричних та скалярних добутків із можливістю застосування технології розподіленого обчислення за допомогою бібліотеки багатопотоковості Thread стандарту C++ 11 та обчислювальної уніфікованої архітектури GPU-прискорювачів CUDA. Для розв'язання задачі нестационарної теплопровідності застосовано метод скінченних елементів. Отримується варіаційний функціонал за методом Гальоркіна, для якого матриця системи є додатно визначеною. Остаточні перетво-

рення призводять до системи алгебраїчних рівнянь:

$$A \cdot x = b, \quad (4)$$

де  $A$  – матриця системи;  $b$  – вектор правих частин;  $x$  – вектор шуканих невідомих.

Матриця системи повинна бути симетричною та додатно визначеною. Функціонал будується у наступному вигляді:

$$(A \cdot x, x) - (b, x) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Отриманий функціонал є собою додатно визначеною квадратичною формою, а його мінімум є розв'язком системи (4). Пошук мінімуму функціоналу (5) проводиться у два етапи:

1) початкова ітерація. На даному етапі здійснюється вибір початкового вектору пошуку  $x^0$ . Визначення вектору поправки та вектору корекції відповідно:

$$r^0 = b - A \cdot x^0, \quad z^0 = r^0. \quad (6)$$

2)  $k$ -та ітерація. Визначення коефіцієнту поправки, уточнення вектору-розв'язку, уточнення вектору поправки, визначення коефіцієнту корекції, уточнення вектору корекції:

$$\alpha_k = \frac{(r^k, r^k)}{(Az^{k-1}, z^{k-1})}; \quad x^k = x^{k-1} + \alpha_k z^{k-1}; \quad (7)$$

$$r^k = r^{k-1} - \alpha_k Az^{k-1}; \quad \beta_k = \frac{(r^k, r^k)}{(r^{k-1}, r^{k-1})};$$

$$z^k = r^k + \beta_k z^{k-1}.$$

Умовою завершення алгоритму є виконання не-

рівності:  $\frac{\|r^k\|}{\|b\|} \leq \delta$ , де  $\delta$  – наперед задана похибка.

Наведений алгоритм дозволяє з легкістю реалізувати процес паралельних обчислень [8].

Програмний засіб складається із наступних основних методів:

Input temperature data – функція, яка зчитує фізичні параметри задачі: коефіцієнти теплопровідності, густину матеріалу, коефіцієнт теплоємності, коефіцієнт конвективного теплообміну та початковий розподіл температури, крок інтегрування і кінцевий час розрахунку.

Temperature matrix – функція, в якій формуються елементи локальних матриць теплопровідності, теплоємності, конвекції та променевого теплообміну на елементі, що представляють собою інтеграли від добутків базисних функцій та їх похідних. Формується узагальнений вектор термодинамічних сил.

Temperature assembly – функція знаходження глобальних матриць теплопровідності, теплоємності, конвекції та променевого теплообміну. На підставі вхідної матриці індексів формується глобальна матриця системи, що представляє собою СЛАР і глобальний вектор узагальнених термодинамічних сил.

Output data – функція, що виводить у файл знайдений розподіл температурного поля для кожного тактового моменту часу.

Gradient solve system – функція, яка по отриманій матриці системи проводить розв'язання СЛАР. Для задачі нестационарної теплопровідності глобальна система представляє собою лінійну комбінацію матриць

теплопровідності, теплоємності, конвекції та променевого теплообміну, а вектор правих частин – узагальнений вектор термодинамічних сил.

### Визначення температурного поля штучного супутника Землі

Розглянемо результати розв'язання задачі нестационарної теплопровідності корпусу ШСЗ з розташованими у ньому приладами та устаткуванням. Задачу сформульовано наступним чином: розглядається нерухомий корпус супутника, а теплові потоки змінюються за законом косинуса орбітального кута. ШСЗ обертається за круговою орбітою, радіус якої складає 700 км, а час руху складає 90 хв. Закон зміни інтенсивності теплового потоку має такий вигляд:

$$Q = q \cdot \cos(\varphi), \quad \varphi \in (0^\circ, 90^\circ).$$

Детальний опис задачі надано у [6]. Результати розв'язання представлено на рис. 1, 2. Рис. 1 містить залежність температури від часу у точці корпусу на зовнішньому, спрямованому на Сонце, боці, а на рис. 2 цю залежність надано для точок котушки (крива 1) та полімерного волокна ВОГ (крива 2). Із аналізу отриманих результатів видно, що незважаючи на істотне зменшення температурних перепадів та абсолютних значень температури, має місце суттєва часова неоднорідність її значень – від  $+44,25^\circ\text{C}$  до  $-33,19^\circ\text{C}$ .

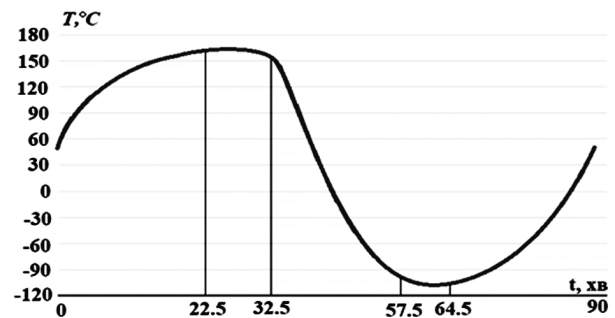


Рисунок 1 – Залежність температури корпусу від часу

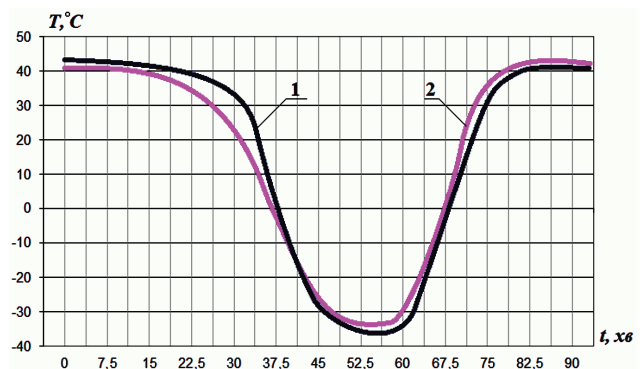


Рисунок 2 – Залежність температури у волоконно-оптичному гіроскопі від часу

Отримані результати представляють собою усталений розподіл температурного поля, що має місце після завершення перехідних процесів, пов'язаних з виводом супутника на орбіту.

Важливо, що отриманий температурний розподіл є циклічним, тобто повторюваним від одного оберту

ШСЗ навколо Землі до іншого. Таким чином, за розглянутих умов бажаного орбітального руху ШСЗ під час планування калібрувальних експериментів для обчислення параметрів температурних моделей ВОГ достатньо реалізовувати нагрів та охолодження приладу у діапазоні від  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Безпосередньо залежність температури, скажімо, котушки, від часу (рис. 2) за умов прив'язування у декілької точці, яка далі вважається початковою, можна використовувати для прогнозування оцінки поточної температури приладу. Така оцінка може використовуватись у компенсуючих моделях в умовах невизначеності щодо фактичної температури, яку, зазвичай, вимірює вбудований термодатчик. Описаний підхід компенсації за температурної програмою забезпечує мінімізацію теплового впливу на похибку ВОГ при апаратній або параметричній відмові термодатчику.

### Калібрування температурної моделі ВОГ

Мінімізація похибок поточних вимірів ВОГ в умовах орбітального руху ШСЗ покладається на так звану компенсуючу модель, яка відображає залежність адитивної систематичної похибки виміру від поточного значення внутрішньої температури гіроскопу та її градієнту. Структура такої залежності, зазвичай, вводиться евристично, а її параметри визначаються шляхом оптимальної апроксимації реальних вимірів, отриманих експериментально, модельної функцією. Процедура отримання вихідних даних в лабораторних умовах та їхньої обробки складає задачу калібрування ВОГ.

Миттєві виміри ВОГ можна представити у вигляді

$$\omega(t_k) = \omega^* + \delta\omega(\tau_k, \Delta\tau_k) + \xi(t_k),$$

де  $t_k$  – дискретний момент часу, до якого актуалізується вимір;  $\omega^*$  – дійсне значення абсолютної кутової швидкості, яке вимірюється гіроскопом. В умовах калібрування воно є відомим, в умовах експлуатації – є питомим та визначається із наявних вимірів ВОГ;  $\delta\omega(\tau_k, \Delta\tau_k)$  – значення систематичної адитивної похибки, так званого дрейфу ВОГ;  $\tau_k, \Delta\tau_k$  – параметри внутрішньої температури ВОГ;  $\xi$  – шумова складова вимірів.

В цих умовах мінімізація похибки для кожного дискретного моменту часу складається із алгоритмічного видалення з апаратно отриманого виміру  $\omega$  прогнозованого за деякою моделлю значення похибки  $\delta\omega$ , яке, у свою чергу, обчислюється на основі поточного значення температури.

Висунемо гіпотезу щодо залежності дрейфу від температурних параметрів. Нехай така залежність є лінійною

$$\delta\omega(\tau_k, \Delta\tau_k) = K_{00} + K_{10} \cdot \tau_k + K_{01} \cdot \Delta\tau_k, \quad (8)$$

де  $\tau_k = \frac{(T_d(t_k) - T^0)}{(T^+ - T^-)}$  – безрозмірна відносна температура;

$\Delta\tau_k = \frac{(\Delta T_d(t_k) - \Delta T^0)}{(\Delta T^+ - \Delta T^-)}$  – безрозмірний градієнт температури;  $T^-, T^+, \Delta T^-, \Delta T^+$  – нижні та верхні межі

діапазону калібрування для температури та її градієнту відповідно;  $T^0, \Delta T^0$  – середні значення діапазонів;  $T_d(t_k)$  – значення внутрішньої температури ВОГ у момент часу  $t_k$ ;  $\Delta T_d(t_k)$  – обчислене значення градієнту такої температури;  $K_{00}, K_{10}, K_{01}$  – коефіцієнти моделі (8), які саме і визначаються під час калібрування ВОГ на підставі експериментальних вимірів ВОГ в умовах примусової зміни зовнішньої температури за допомогою спеціального лабораторного обладнання. Найбільш поширеним методом розв'язання такої задачі є метод найменших квадратів.

Зауважимо, що у загальному випадку модель (8) може представляти собою поліном від  $\tau, \Delta\tau$  досить високого ступеню, як, наприклад, у [9]. У даному випадку наведена для прикладу лінійна форма не має принципового значення, оскільки мова йде про загальну технологію алгоритмічної мінімізації температурної похибки.

Центральним моментом вказаної технології є використання результатів, зображених на рис.2.

По-перше, отримані вище дані, а саме, межі діапазонів можливої температури та її градієнту, в яких проводиться калібрування, безпосередньо увійшли в алгоритм (8). По-друге, значення  $T_d(t_k)$  внутрішньої температури ВОГ при штатному функціонуванні бортової системи отримується з поточних вимірів вбудованого в ВОГ термодатчика, але при відмові останнього це значення може формуватися безпосередньо із залежності 1 на рис. 2, тобто прогнозуватися на основі розрахункових даних. Істотно, що в останньому випадку якість компенсації може бути дещо нижчою, але вказаний підхід відкриває можливість зберегти у цілому точнісні характеристики при можливих відмовах обладнання у ході орбітального руху.

Для аналізу впливу температурних змін на точність визначення орієнтації та оцінки ефективності підходу, що розроблено, було створено моделюючу програму за функціональною схемою, як на рис. 3.

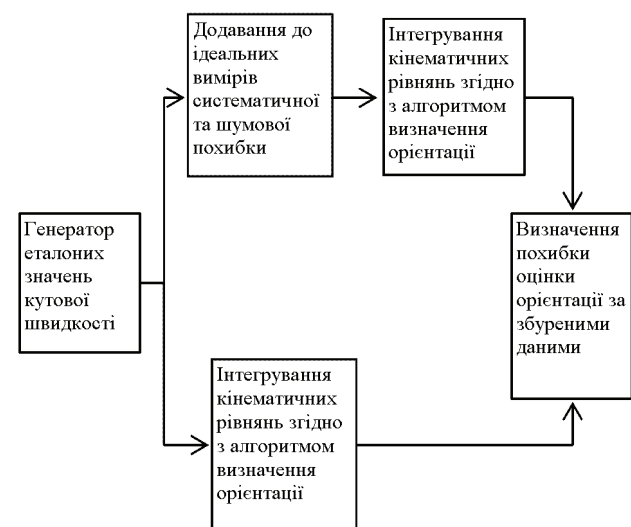


Рисунок 3 – Функціональна схема моделюючої програми

Важливим є те, що систематичні та шумові похибки, які додаються до ідеальних значень при моделю-

ванні, були реальними, тобто отриманими експериментально для ВОГ середнього класу точності у всьому температурному діапазоні. В цих умовах встановлено, що з точки зору похибки ВОГ градієнт температури на порядок впливовіший, ніж сама змінна температура, а ефективність використання компенсуючої моделі за описаною вище технологією дозволяє зменшити швидкість зростання кутової похибки орієнтації у 3-5 разів, ніж за умов відсутності компенсації.

### Опис алгоритму

Отже, загальний алгоритм мінімізації температурної похибки можливо представити наступним чином. На першому етапі розв'язується задача нестационарної теплопровідності корпусу супутника з урахуванням значень теплових потоків від сонячного нагрівання та відповідних крайових умов. З урахуванням відповідних теплоізоляцій приладів визначається температура всередині корпусу ВОГ для кожного моменту часу руху ШСЗ навколоземною орбітою. Ця залежність далі використовується, по-перше, для вибору та обґрунтування діапазонів температури та її градієнта, для яких потрібно проводити експериментальну калібровку ВОГ в наземних умовах, по-друге, для прогнозування поточних значень температури у разі відмови термодатчика у процесі функціонування ШСЗ.

**Висновки.** В статті надано опис алгоритму мінімізації температурних похибок волоконно-оптичного гіроскопу, встановленого на ШСЗ типу «СІЧ-2». Описано програми, що застосовуються для чисельного моделювання. За розв'язанням задачі нестационарної теплопровідності визначено залежність температури всередині корпусу ВОГ від часу. Дана залежність дозволяє в наземних умовах спланувати калібрувальний експеримент у частині вибору температурного діапазону для обчислення параметрів компенсуючої моделі, а в умовах функціонування – замінити реальні виміри вбудованого термодатчика у разі його відмови. Зазначений комплекс заходів забезпечує мінімізацію впливу змінної температури на точність функціонування бортової системи орієнтації та навігації та сприяє підвищенню її відмовостійкості.

### Список літератури

1. Черненко В.Д. Оптомеханика волоконных световодов / В.Д. Черненко. – СПб.: Политехника, 2010. – 291 с.
2. Mckenzie, N. Karafolas Fiber optic sensing in space structures: the experience of the European Space Agency, Proc. SPIE 5855 / Mckenzie, N. Karafolas // 17th International Conference on Optical Fibre Sensors, 23 May 2005. – 8 p.
3. Chen X. Study on error calibration of fiber optic gyroscope under intense ambient temperature variation / X. Chen, C. Shen // Appl Opt. – 2012 Jun 10. – Vol. 51 (17). – PP. 3755-62.
4. Xiao T. Temperature Drift Modeling and Compensating of Fiber Optic Gyroscope / T. Xiao, M.H. Pan, G.L. Zhu // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vols. 220-223. – PP. 1911-1916.
5. Мешковский И.К. Исследование влияния тепловых

воздействий на работу волоконно-оптического датчика угловой скорости / И.К. Мешковский, Г.П. Мирошниченко, А.В. Рупасов, В.Е. Стригалева, И.А. Шарков // XXI Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ОАО "Концерн ЦНИИ Электроприбор", 2014. – С. 191-202.

6. Динамика полета и управление: 50 лет в ХПИ / Д.В. Бреславский, В.Б. Успенский, А.А. Ларин и др. Под общ. ред. Д.В. Бреславского. – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – 488 с.

7. А.с. № 66556. Україна. Комп'ютерна програма "Finite Element Method Temperature" ("FEM Temperature") / Д.В. Бреславський, С.О. Пащенко. – Заявл. 13.05.16, № 67169. – Опубл. 12.07.16.

8. Уильямс Э. Параллельное программирование на C++ в действии. Практика разработки многопоточных программ / Э. Уильямс // ДМК Пресс. – 2012. – 673 с.

9. Кузнецов Ю.А. Исследование температурной зависимости дрейфа ВОГ / Ю.А. Кузнецов, С.В. Олейник, В.Б. Успенский, Н.Е. Хацько // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. – №2(27). – С. 152–156.

### References (transliterated)

1. Chernenko V.D. Optomechanika volokonnykh svetovodov [Optomechanics of optical fibers]. SPb, Politekhnik Publ., 2010, 291 p.
2. Mckenzie, N. Karafolas. Fiber optic sensing in space structures: the experience of the European Space Agency, Proc. SPIE 5855, 17th International Conference on Optical Fibre Sensors, 23 May 2005. 8 p.
3. Chen X, Shen C. Study on error calibration of fiber optic gyroscope under intense ambient temperature variation. Appl Opt. 2012 Jun 10;51(17): 3755-62.
4. Xiao T., Pan M.H., Zhu G.L. Temperature Drift Modeling and Compensating of Fiber Optic Gyroscope, Applied Mechanics and Materials, 2012, Vols. 220-223, pp. 1911-1916.
5. Meshkovskiy I.K., Miroshnichenko G.P., Rupasov A.V., Strigalev V.Ye., Sharkov I.A. Issledovaniye vliyaniya teplovykh vozdeystviy na rabotu volokonno-opticheskogo datchika uglovooy skorosti [Investigation of the influence of thermal effects on the operation of the fiber-optic sensor for angular velocity], XXI Mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam, SPb, OJSC Kontsern "Elektropribor" Publ., 2014, 191-202 p.
6. Breslavskiy D.V., Uspenskiy V.B., Larin A.A. Dinamika poleta i upravleniye: 50 let v KhPI [Dynamics of flight and control: 50 years in KhPI], Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2014, 488 p.
7. Uilyams E. Parallelnoye programmirovaniye na C++ v deystvii. Praktika razrabotki mnogopotochnykh programm [Parallel Programming in C++ in Action. The practice of developing multi-threaded programs]. Moscow, DMK Press Publ., 2012, 673 p.
8. Kuznetsov YU.A., Oleynik S.V., Uspenskiy V.B., Khats'ko N.Ye. Issledovaniye temperaturnoy zavisimosti dreyfa FOG [Investigation of the temperature dependence of the FOG drift], Zaporizhzhya, Radioelektronika, informatyka upravlinnya, 2012, 152-156 p.
9. Breslavskyy D.V., Pashchenko S.O., Komp'yuterna prohrama "Finite Element Method Temperature" ("FEM Temperature") [Computer program "Finite Element Method Temperature" ("FEM Temperature")], Ukrayina, Zayavl. 13.05.16, № 67169, Opubl. 12.07.16., A. s. № 66556.

Надійшла (received) 30.07.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Бреславський Дмитро Васильович (Бреславський Дмитрій Васильевич, Breslavsky Dmytro Vasylovych)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, НТУ

«ХПШ»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: brdm@kpi.kharkov.ua.

**Пащенко Сергій Олександрович (Пащенко Сергей Александрович, Pashchenko Serhii Oleksandrovych)** – аспірант, НТУ «ХПШ»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: sergeypaschenkospu@gmail.com.

**Успенський Валерій Борисович (Успенский Валерий Борисович, Uspensky Valerii Borysovich)** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, НТУ «ХПШ»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: uspensky61@gmail.com.

УДК 539.3

DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2018.33.151220>

**Д.В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, С.О. ПАЩЕНКО**

### **ПОВЗУЧИСТЬ ТРІЙНИКОВОГО З'ЄДНАННЯ ТРУБОПРОВОДУ ПРИ СПІЛЬНІЙ ДІЇ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВИХ ТА РАДІАЦІЙНИХ ПОЛІВ**

У статті надано математичну постановку трьохвимірної задачі повзучості, що відбувається при дії температурно-силових та радіаційних полів. Для розв'язання задачі прийнято метод скінченних елементів, що використовується спільно з різницевим методом інтегрування за часом. Для чисельного аналізу застосовано розроблений програмний комплекс, що використовує восьмивузловий об'ємний скінченний елемент. Досліджено вплив повзучості та радіаційного розпухання на напружено-деформований стан фрагменту системи охолодження ядерного реактору. Встановлено, що отримані розв'язки для задач температурно-силової повзучості та радіаційного розпухання у районі стику труб є принципово відмінними від результатів комплексного розв'язку. Розрахунками виявлено, що вплив радіаційного розпухання істотно уповільнює релаксацію напружень при повзучості та підвищує їхній рівень у місці стику труб.

**Ключові слова:** повзучість, температура, радіаційне розпухання, рівняння стану, ядерний реактор, трійникове з'єднання трубопроводу, метод скінченних елементів.

**Д.В. БРЕСЛАВСКИЙ, С.О. ПАЩЕНКО**

### **ПОЛЗУЧЕСТЬ ТРОЙНИКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВЫХ И РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ**

В статье представлена математическая постановка трехмерной задачи ползучести, происходящей под действием температурно-силовых и радиационных полей. Для решения задачи принят метод конечных элементов, используемый совместно с разностным методом интегрирования по времени. Для численного анализа применен разработанный программный комплекс, использующий восьмивузловый объемный конечный элемент. Исследовано влияние ползучести и радиационного распухания на напряженно-деформированное состояние фрагмента системы охлаждения ядерного реактора. Установлено, что полученные решения для задач температурно-силовой ползучести и радиационного распухания в районе стыка труб принципиально отличаются от результатов комплексного решения. Расчетами установлено, что влияние радиационного распухания существенно замедляет релаксацию напряжений при ползучести и повышает их уровень в месте стыка труб.

**Ключевые слова:** ползучесть, температура, радиационное распухание, уравнение состояния, ядерный реактор, тройниковое соединение трубопровода, метод конечных элементов.

**D.V. BRESLAVSKY, S.O. PASHCHENKO**

### **CREEP OF T-JOINT OF PIPELINE UNDER JOINT ACTION OF TEMPERATURE-FORCE AND RADIATION FIELDS**

The mathematical statement of three-dimensional problem of creep, which is running under the action of temperature, force and radiation fields, is presented in a paper. The total strain is considered as a sum of elastic, temperature, creep and swelling parts. The non-homogeneous temperature fields are considered for determining the strain distribution as well as for obtaining the value of the neutron fluence function. The case of long term deformation under the creep with isotropic properties was analyzed by use of Norton law. The Finite Element Method, which is used jointly with finite differences method for time integration, was accepted for the problem's solution. The volume finite element with eight nodes is used in numerical analysis. The approach uses the algorithm of parallel computing for the system of linear algebraic equations, which is solved by Choletski method. The program complex in C++ programming language was developed in order to realize the method and algorithms. It has been applied for numerical analysis. The influence of creep and radiation swelling on the stress-strain state of the cooling system fragment from nuclear reactor was investigated. The von Mises stress distributions are presented for different cases of nonlinearities both for tube's volume and for the place of stress concentration.

© Д.В. Бреславський, С.О. Пащенко, 2018