

ПУТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕРМОИНВАРИАНТНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Построены математические модели тепловых процессов базового и модернизированного ВОГ-035 с учетом ориентации гироскопа в поле ускорений и изменения давления окружающей среды. Модели позволяют имитировать космические условия вакуума и невесомости. Разработано поддерживающее программное обеспечение. Проверена адекватность моделей на основе сравнения с экспериментальными данными. Проведен тепловой анализ волоконно-оптического гироскопа ВОГ-035. Получены качественные и количественные оценки влияния на температурную ситуацию в ВОГ-035 теплового экрана, экстремальных условий вакуума и невесомости, различной ориентации прибора. Разработаны и исследованы пассивные способы обеспечения термоинвариантности датчика.

Введение

Волоконно-оптические гироскопы широко применяются в бесплатформенных инерциальных системах навигации космических летательных аппаратов. В космосе эти датчики функционируют в условиях температурных возмущений в сочетании с условиями вакуума и невесомости. Применение системы терморегулирования гироскопов не всегда возможно, потому что энергетические ресурсы на борту космических летательных аппаратов ограничены. Исследованиям температурных полей и тепловых погрешностей волоконно-оптических гироскопов уделяется большое внимание [2, 3, 6-8].

Объект исследования – негерметичный волоконно-оптический гироскоп ВОГ-035 с внутренними источниками тепла, без системы терморегулирования и принудительной вентиляции.

Базовая конструкция гироскопа не имеет теплового экрана.

Модернизированная конструкция гироскопа содержит тепловой экран.

Джашитов Виктор Эмануилович. Доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем точной механики и управления РАН (г. Саратов). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Панкратов Владимир Михайлович. Доктор технических наук, профессор, зам. директора по науке Института проблем точной механики и управления РАН. Действительный член Академии навигации и управления движением.

Голиков Алексей Викторович. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем точной механики и управления РАН.

Губанов Александр Георгиевич. Кандидат технических наук, зам. директора по науке Научно-производственного предприятия «Антарес» (г. Саратов).

Ефремов Максим Владимирович. Ведущий инженер Научно-производственного предприятия «Антарес».

Статья по докладу на XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

Гироскоп работает в условиях ступенчато или гармонически изменяющейся температуры окружающей среды ($-15 \div +50$)°С в земных (нормальное давление и сила тяжести) или космических (вакуум, невесомость) условиях. Дно гироскопа крепится на основании и теплоизолировано от него. Теплоотвод в среду от элементов гироскопа осуществляется свободной конвекцией и излучением.

Цель работы – тепловой анализ волоконно-оптического гироскопа ВОГ-035, разработка и исследование пассивных способов обеспечения термоинвариантности этого датчика.

Решаемые задачи.

- Построение математических моделей тепловых процессов базового и модернизированного ВОГ-035 с учетом ориентации гироскопа в поле ускорений и изменения давления окружающей среды. Проверка адекватности моделей на основе сравнения с экспериментальными данными.
- Разработка поддерживающего программного обеспечения.
- Получение и анализ оценок влияния на температурную ситуацию в ВОГ-035 теплового экрана, экстремальных условий вакуума и невесомости, различной ориентации прибора.
- Выработка рекомендаций по улучшению температурной ситуации в ВОГ-035 и обеспечению термоинвариантности гироскопа.

Математические модели тепловых процессов в ВОГ-035 и программный комплекс

Рассматриваемые волоконно-оптические гироскопы (ВОГ-035), акселерометры и другие элементы входят в состав бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИУС-М) космических летательных аппаратов (рис. 1).

Тепловой анализ всего прибора БИУС-М проведен на первом этапе исследований. Результаты этих исследований докладывались в 2010 году на XXVII конференции памяти Н.Н. Острякова [1].

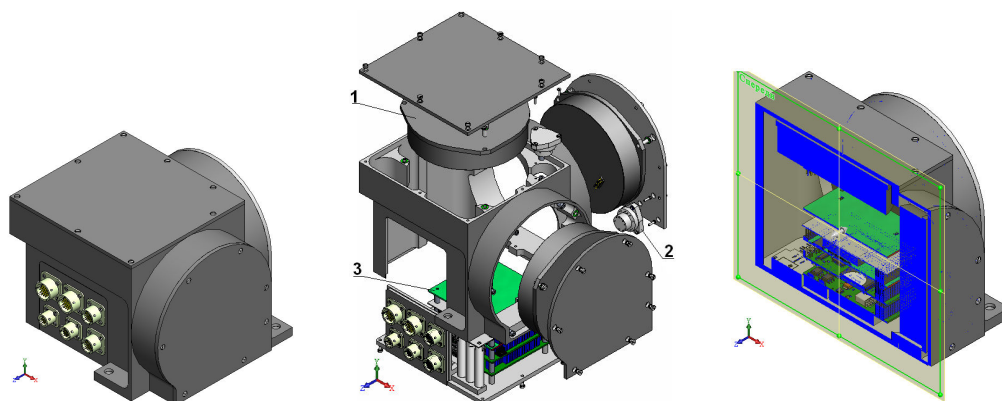


Рис. 1. Общий вид, компоновка и основные элементы прибора БИУС-М:
1 – волоконно-оптический гироскоп ВОГ-035; 2 – акселерометр; 3 – стойка с электронными платами

На данном этапе исследуется нестационарное, неоднородное температурное поле отдельного ВОГ-035, содержащего три платы с источниками тепла, излучатель – суперлюминесцентный диод (СЛД), крышку с радиатором, основание и другие элементы.

Общий вид, компоновка и элементы ВОГ-035 показаны на рис. 2.

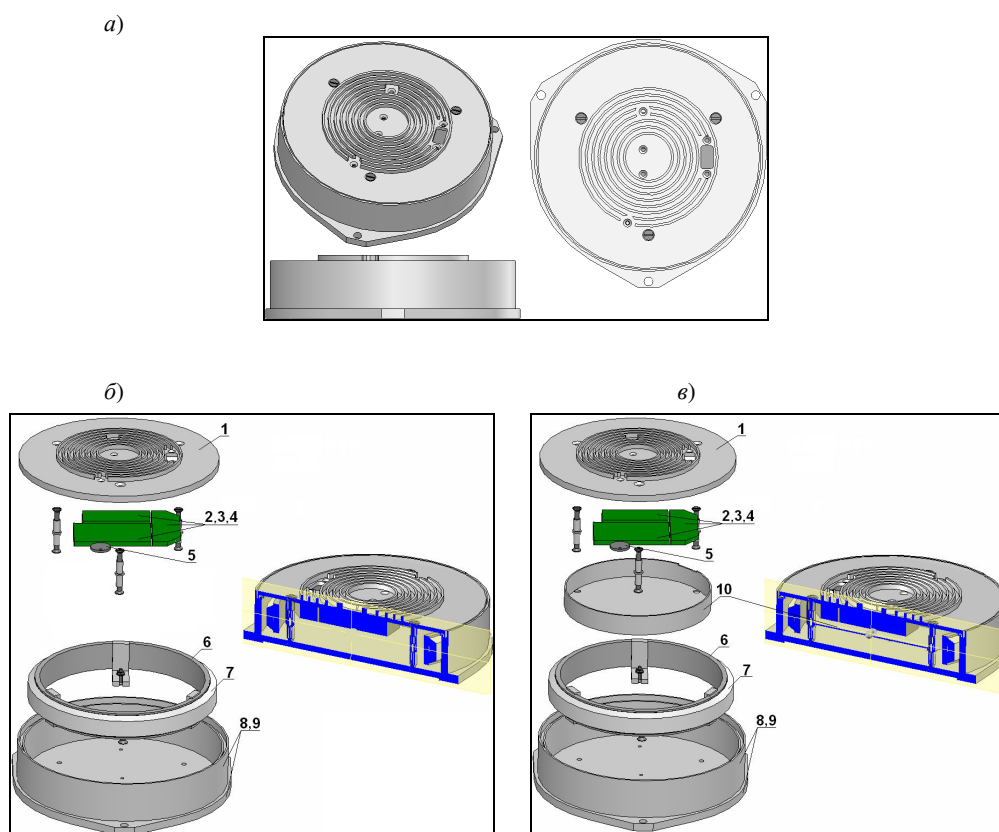


Рис. 2. Общий вид (а), компоновка и элементы ВОГ-035 без теплового экрана (б) и с тепловым экраном (в): 1 – крышка; 2,3,4 – платы; 5 – СЛД; 6 – кольцо для волоконной бухты; 7 – волоконная бухта; 8,9 – основание; 10 – тепловой экран

Для расчета неоднородных, трехмерных, нестационарных температурных полей ВОГ-035 предлагается использовать модифицированный вариант [2-5] метода «элементарных» балансов. Для составления тепловых балансов используются такие основные законы теплообмена, как закон сохранения энергии, закон Фурье, закон Ньютона, закон Стефана–Больцмана и другие.

Основной алгоритм расчета температурного поля, полученный на основе метода тепловых балансов и принятых допущений для рассматриваемого типа датчиков, состоящих из твердотельных элементарных объемов, имеет следующий вид [2, 3]:

$$T_i(t + \Delta t) = \left[1 - \frac{\Delta t}{c_i} \left(\sum_{j=1}^M q_{ij} + q_{ic} \right) \right] T_i + \frac{\Delta t}{c_i} \left(\sum_{j=1}^M q_{ij} T_j + q_{ic} T_c + Q_i \right), \quad (1)$$

где $T_i(t)$, $T_i(t + \Delta t)$ – температуры i -го объема в настоящий и последующий моменты времени; c_i – теплоемкость; q_{ij} – теплопроводимости между объемами i, j ; q_{ic} – теплопроводимость между i -м объемом и окружающей средой; Q_i – мощность источников или стоков тепла; Δt – шаг расчета; M – количество объемов, имеющих тепловой контакт с i -м объемом; N – количество объемов; $i = 1, \dots, N$.

Суммарная тепловая проводимость, характеризующаяся входящими в (1) коэффициентами теплопроводимости q_{ij} , может быть представлена в виде

$$q_{ij} = q_T + q_K + q_I, \quad (2)$$

где q_T , q_K , q_I – теплопроводимости, учитывающие теплопроводность, конвекцию и излучение.

Число элементарных объемов (расчетных точек) варьируется в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен и тысяч в зависимости от требуемой точности решения, типа исследуемого прибора, степени сложности поставленных температурных задач. Платы и излучатель расположены под крышкой ВОГ-035 и плотно прилегают к ней. Эти элементы могут быть закрыты тепловым экраном.

Тепловые модели и основные элементы ВОГ-035 представлены на рис. 3.

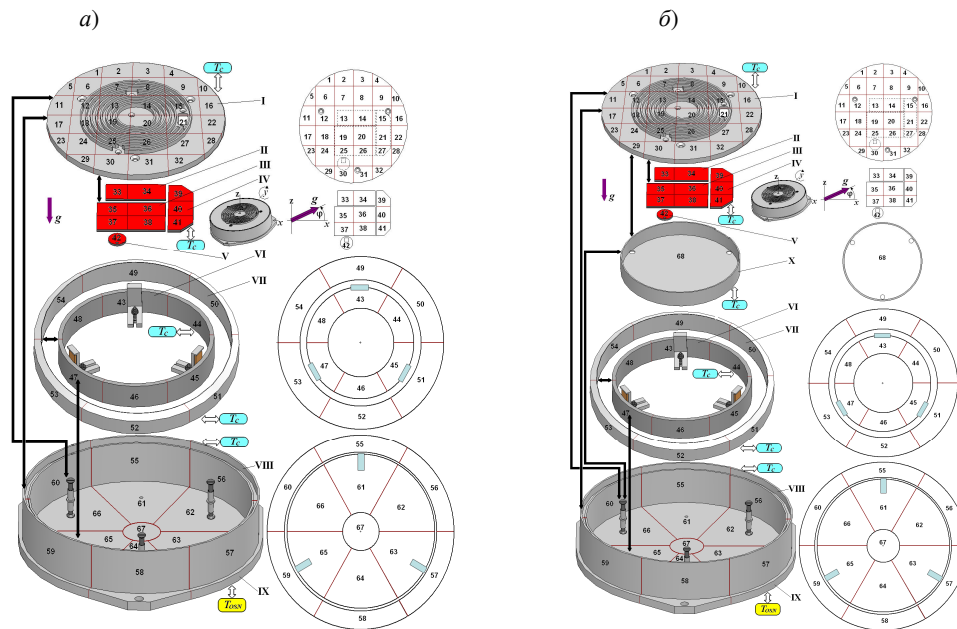


Рис. 3. Тепловые модели ВОГ-035 без теплового экрана (а) и с тепловым экраном (б):

I – крышка (1-32); II – плата 1 управления (33, 34); III – плата 2 аналоговая (35-38); IV – плата 3 разъема (39-41); V – излучатель (42); VI – кольцо для волоконной бухты (43-48); VII – волоконная бухта (49-54); VIII – бок основания (55-60); IX – дно основания (61-67); X – тепловой экран (68); T_C – температура окружающей среды; T_{OSN} – температура платы; g – ускорение свободного падения; $\longleftrightarrow$ – тепловые связи между объемам $\langle \rangle$ – тепловые связи с окружающей средой

Мощности источников тепла в ВОГ-035 представлены в табл. 1.

Мощности источников тепла в ВОГ-035

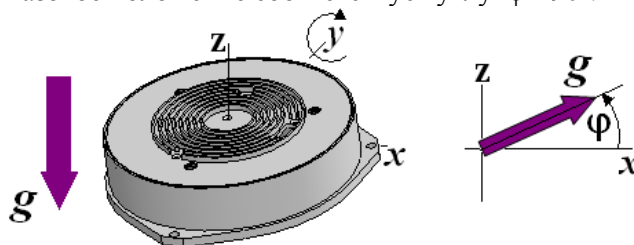
Источники тепла		Мощности тепловыделения, Вт
1	Плата 1 управления	$\leq 0,25$
2	Плата 2 аналоговая	$\leq 0,45$
3	Плата 3 разъема	$\leq 0,01$
4	Излучатель	$\leq 0,25$
Σ		0,96

Особенности построенных тепловых моделей.

- Возможность вариации коэффициентов теплопроводности в окружающую среду от основных элементов ВОГ-035 с учетом его ориентации относительно g .

При наличии силы тяжести и давления среды коэффициенты теплоотдачи свободной конвекцией и излучением от элементов гироскопа зависят от ориентации гироскопа в поле сил тяжести [2–4].

Положение ВОГ-035 относительно вектора силы тяжести g определяется углом φ (рис. 4). Базовое положение соответствует углу $\varphi = -90^\circ$.

Рис. 4. Базовое положение и определение ориентации гироскопа относительно g

Формулы для теплопроводностей q_{ci} от элементов ВОГ-035 в среде имеют следующий вид.

Теплоотдача от крышки:

$$\begin{aligned}
 q_{ci} &= S_{tzkr} \cdot 0,4S_6 \left(2\alpha_H + (1 - 0,3\sin\varphi)\alpha_k g_V \sqrt{D_N} + (1 + 0,3\sin\varphi)\alpha_k g_V \sqrt{D_V} \right), \\
 &\quad i = 1, 4, 5, 10, 23, 28, 29, 32; \\
 q_{ci} &= S_{tzkr} \cdot 0,8S_6 \left(2\alpha_H + (1 - 0,3\sin\varphi)\alpha_k g_V \sqrt{D_N} + (1 + 0,3\sin\varphi)\alpha_k g_V \sqrt{D_V} \right), \\
 &\quad i = 2, 3, 11, 16, 17, 22, 30, 31; \\
 q_{ci} &= (S_6 + S_{RAD}) \left(\alpha_H + (1 - 0,3\sin\varphi)\alpha_k g_V \sqrt{D_N} \right) + S_6 \left(\alpha_H + (1 + 0,3\sin\varphi)\alpha_k g_V \sqrt{D_V} \right), \\
 &\quad i = 6-9, 12, 18, 24; \\
 q_{ci} &= (S_6 + S_{RAD}) \left(\alpha_H + (1 - 0,3\sin\varphi)\alpha_k g_V \sqrt{D_N} \right), \quad i = 13, 14, 15, 19, 20, 21, 25; \\
 q_{ci} &= (S_6 + S_{RAD}) \left(\alpha_H + (1 - 0,3\sin\varphi)\alpha_k g_V \sqrt{D_N} \right) + 0,5S_6 \left(\alpha_H + (1 + 0,3\sin\varphi)\alpha_k g_V \sqrt{D_V} \right), \\
 &\quad i = 26, 27.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Теплоотдача от плат 1, 2, 3 и СЛД:

$$q_{ci} = S_{tzl} \cdot S_i \left(\alpha_H + (1 + 0,3\sin\varphi)\alpha_k g_V \sqrt{D_V} \right), \quad i = 33-42. \tag{4}$$

Теплоотдача от кольца для волокна:

$$q_{ci} = S_{tzkol} \cdot S_i \left(\alpha_H + \alpha_k g_V \sqrt{D_V} \right), \quad i = 43, 46;$$

$$\begin{aligned} q_{ci} &= S_{tzkol} \cdot S_i (\alpha_H + (1 + 0,3 \cos \varphi) \alpha_k g_V \sqrt{D_V}), \quad i=44, 45; \\ q_{ci} &= S_{tzkol} \cdot S_i (\alpha_H + (1 - 0,3 \cos \varphi) \alpha_k g_V \sqrt{D_V}), \quad i = 47, 48. \end{aligned} \quad (5)$$

Теплоотдача от волокна:

$$\begin{aligned} q_{ci} &= S_{tzvol} \cdot S_i (\alpha_H + \alpha_k g_V \sqrt{D_V}), \quad i = 49, 52; \\ q_{ci} &= S_{tzvol} \cdot S_i (\alpha_H + (1 - 0,3 \cos \varphi) \alpha_k g_V \sqrt{D_V}), \quad i=50, 51; \\ q_{ci} &= S_{tzvol} \cdot S_i (\alpha_H + (1 + 0,3 \cos \varphi) \alpha_k g_V \sqrt{D_V}), \quad i = 53, 54. \end{aligned} \quad (6)$$

Теплоотдача от боковой поверхности основания:

$$\begin{aligned} q_{ci} &= S_{tzbokV} \cdot S_{iV} (\alpha_H + \alpha_k g_V \sqrt{D_V}) + S_{tzbokN} \cdot S_{iN} (\alpha_H + \alpha_k g_V \sqrt{D_N}), \quad i = 55, 58; \\ q_{ci} &= S_{tzbokV} \cdot S_{iV} (\alpha_H + (1 + 0,3 \cos \varphi) \alpha_k g_V \sqrt{D_V}) + \\ &+ S_{tzbokN} \cdot S_{iN} (\alpha_H + (1 - 0,3 \cos \varphi) \alpha_k g_V \sqrt{D_N}), \quad i = 56, 57; \\ q_{ci} &= S_{tzbokV} \cdot S_{iV} (\alpha_H + (1 - 0,3 \cos \varphi) \alpha_k g_V \sqrt{D_V}) + \\ &+ S_{tzbokN} \cdot S_{iN} (\alpha_H + (1 + 0,3 \cos \varphi) \alpha_k g_V \sqrt{D_N}), \quad i = 59, 60. \end{aligned} \quad (7)$$

Теплоотдача от дна:

$$q_{ci} = S_i \gamma_T k_T + S_{tzosn} \cdot S_{ci} (\alpha_H + (1 - 0,3 \sin \varphi) \alpha_k g_V \sqrt{D_V}), \quad i = 61-67. \quad (8)$$

Теплоотдача от теплового экрана:

$$q_{ci} = S_{tzekr} \cdot S_i (\alpha_H + \alpha_k g_V \sqrt{D_V}), \quad i = 68. \quad (9)$$

В формулах (3)–(9) используются обозначения: α_k, α_H – коэффициенты теплоотдачи свободной конвекцией и излучением; S_i, S_{RAD} – площади теплоотдачи объемов и площадь радиатора на крышке; γ_T – плотность теплового потока от посадочной плоскости дна; $0 \leq k_T \leq 1$ – коэффициент теплоизоляции дна от плиты (0 – полная теплоизоляция); $D_V = D_{VNI}/D_0$, $D_N = D_{NAR}/D_0$ – относительные давления; $g_V = g/g_0$ – относительное ускорение; $S_{tzkr}, S_{tzl}, S_{tzkol}, S_{tzvol}, S_{tzbokV}, S_{tzbokN}, S_{tzosn}, S_{tzekr}$ – коэффициенты, позволяющие варьировать теплопроводности в среде от крышки, от источников тепла, от кольца для волокна, от волокна, от внутренней и наружной боковой поверхности основания, от дна, от теплового экрана.

• Возможность моделирования различных законов изменения температуры окружающей среды и плиты, на которой крепится дно ВОГ-035.

Температура среды и плиты может изменяться по линейному закону с течением времени

$$T_c(t) = at + b, \quad (10)$$

где a, b – заданные параметры.

Температура среды и плиты может изменяться по гармоническому закону

$$T_c = T_{OSN} = 0,5(\Delta T_{cmax} + \Delta T_{cmin}) + 0,5(\Delta T_{cmax} - \Delta T_{cmin}) \sin(\omega t),$$

$$\text{где} \quad \Delta T_{cmax} = 30^0 C; \quad \Delta T_{cmin} = 20^0 C. \quad (11)$$

Частота варьируется в пределах: $\omega = 0,00035 \div 0,00035 \text{ с}^{-1}$ (период $\tau = 2\pi/\omega = 300 \div 30 \text{ мин}$).

Данные, представленные на рис. 2–4, в табл. 1, в формулах (1)–(11), вместе с геометрическими и теплофизическими характеристиками элементов гироскопа составляют основу базы данных математических моделей тепловых процессов ВОГ-035.

Для реализации разработанных алгоритмов разработан и адаптирован к вычислительной среде персональных компьютеров программный комплекс ВОГ-035 (1,6 Мб).

Основное диалоговое окно и окна исходных и выходных данных программного комплекса показаны на рис. 5.

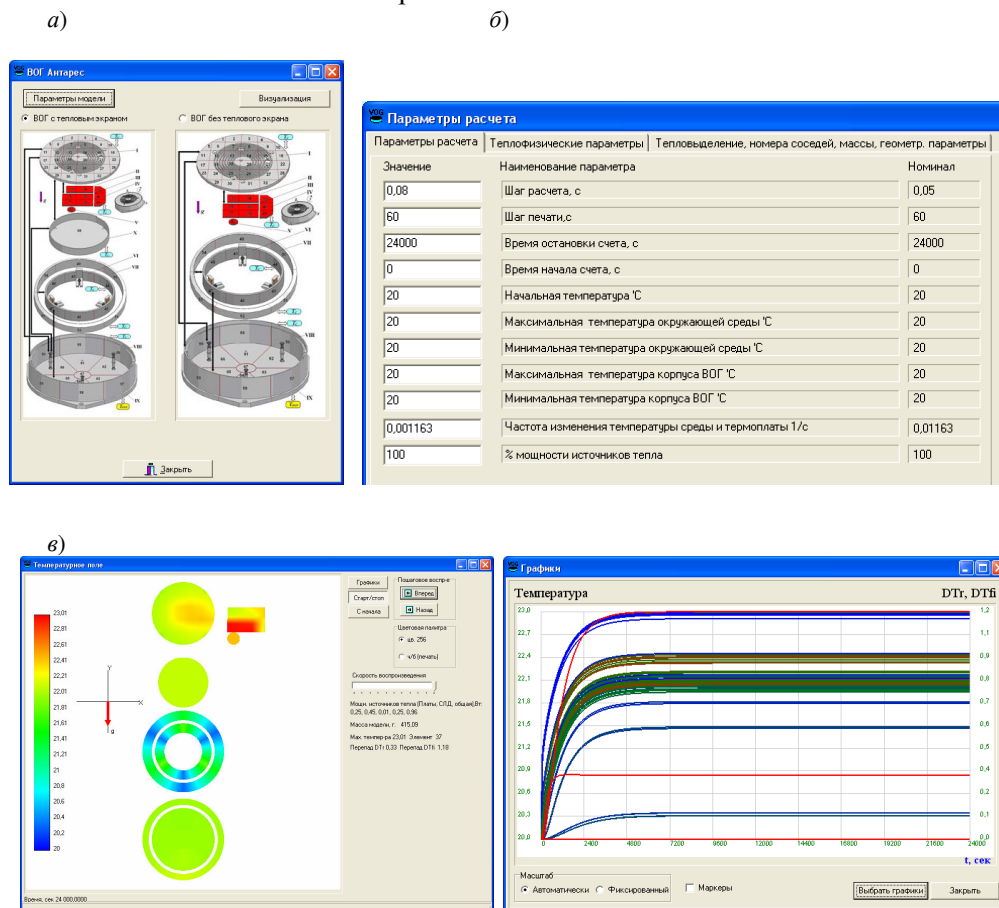


Рис. 5. Основное диалоговое окно (а) и окна исходных (б) и выходных (в) данных программного комплекса ВОГ-035

Компьютерные эксперименты, анализ результатов, рекомендации

Проверка адекватности моделей

Для проверки адекватности построенных математических моделей тепловых процессов в ВОГ-035 использовался линейный закон (10) изменения температуры окружающей среды. Такой характер изменения температуры с заданными параметрами a и b использовался и при экспериментальном исследовании теп-

ловых процессов в базовой модели гироскопа без теплового экрана в условиях нормальной силы тяжести и нормального давления среды.

Поставлена и решена задача сравнительной оценки результатов аналитических и экспериментальных исследований с результатами, полученными на построенных моделях. Для приближенной аналитической оценки характера тепловых процессов в приборе будем идеализировать его в виде одного элементарного объема со своими теплофизическими характеристиками.

Уравнение тепловых балансов:

$$c\dot{T} + q_c(T - T_c) = Q; \quad T_c(t) = at + b; \quad T(0) = T_0. \quad (12)$$

Решение уравнения (12):

$$T(t) = \left(T_0 - b - \frac{Q - ca}{q_c} \right) \exp\left(-\frac{q_c}{c} t \right) + at + b + \frac{Q - ca}{q_c};$$

$$T(\infty) = at + b + \frac{Q - ca}{q_c} = T_c(t) + \frac{Q - ca}{q_c}. \quad (13)$$

Текущая температура «отслеживает» линейный закон изменения температуры среды. При низком темпе нагрева ($Q > ca$) температура объема больше температуры среды, при высоком темпе нагрева ($Q < ca$) температура объема меньше температуры среды. При остывании прибора и законе $T_c(t) = at + b$ параметр $a < 0$ и температура объема всегда больше температуры среды в соответствии с решением (13). Полученные качественные оценки *полностью подтвердились* на построенных тепловых моделях ВОГ-035.

Результаты количественного сравнения экспериментальных и расчетных данных показаны на рис. 6.

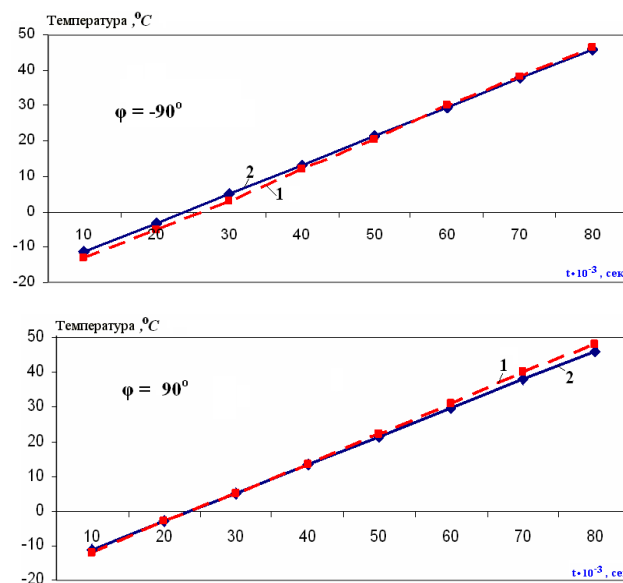


Рис. 6. Температуры в зонах источников тепла на платах ВОГ-035 без теплового экрана в условиях $T_c(t) = at + b$ при $\varphi = -90^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$, нормальном давлении и силе тяжести:

1 – эксперимент; 2 – построенная модель

Полученные данные эксперимента и расчета хорошо совпадают. Таким образом, построенные модели тепловых процессов в ВОГ-035 можно считать адекватными реальным физическим процессам.

Моделирование тепловых режимов

Проведено моделирование следующих тепловых режимов волоконно-оптического гироскопа.

1. **ВОГ-035 без теплового экрана.** Земные “комфортные” условия: нормальное давление и сила тяжести. Базовая ориентация $\varphi = -90^\circ$; $T_0 = T_{\text{ном}} = +20^\circ\text{C}$; $T_c = T_{\text{OSN}} = T_{\text{ном}} = \text{const} = +20^\circ\text{C}$; $D_N = 1$, $D_V = 1$, $g_V = 1$. Включение источников тепла на платах 1, 2, 3 и СЛД с максимальными мощностями ($\Sigma \approx 0,96$ Вт) (см. табл. 1).

Определяются максимальные перегревы $\Delta T_{\text{max}} = T_{\text{max}} - T_c$ элементов над окружающей средой и температурные окружные ΔT_ψ и радиальные ΔT_R перепады в волоконной бухте.

2. **ВОГ-035 с тепловым экраном.** Остальные условия, как в 1-м режиме.

3. **ВОГ-035 без теплового экрана.** Космические экстремальные условия: вакуум, невесомость. Остальные условия, как в 1-м режиме.

4. **ВОГ-035 с тепловым экраном.** Космические экстремальные условия: вакуум, невесомость. Остальные условия, как в 1-м режиме.

5. **Гармоническое изменение температуры** среды ВОГ-035. Остальные условия, как в 3-м режиме.

Графики текущих температур и температурных перепадов во всех расчетных точках тепловых моделей, построенные по результатам моделирования 1–4 тепловых режимов, представлены на рис. 7. Цветовые топограммы установившихся температурных полей, построенные по результатам моделирования 1–4 тепловых режимов, показаны на рис. 8. Для сравнительного анализа основные температурные характеристики тепловых режимов 1–4 сведены в табл. 2.

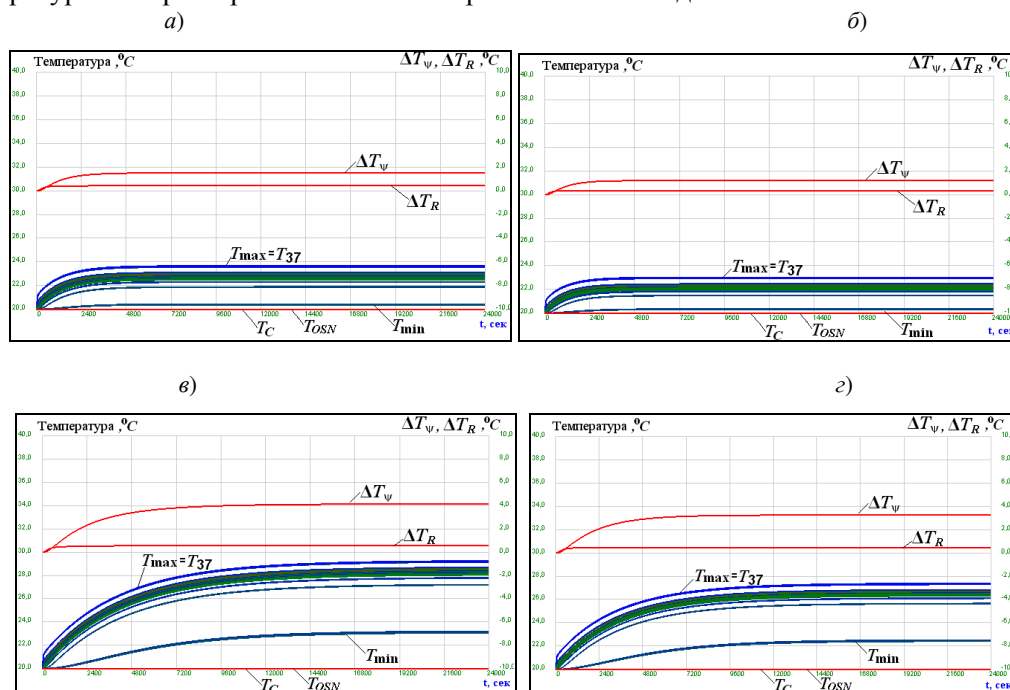


Рис. 7. Температуры и температурные перепады во всех элементах ВОГ-035:

- а) без теплового экрана, нормальное давление и сила тяжести; б) тепловой экран, нормальное давление и сила тяжести; в) без теплового экрана, вакуум и невесомость; г) тепловой экран, вакуум и невесомость

Таблица 2

Температурные характеристики ВОГ-035 в тепловых режимах 1-4

№	Давление и сила тяжести	Тепловой экран	ΔT_{ψ} , °C	ΔT_R , °C	$\Delta T_{\max}$, °C
1	Нормальные	Нет	1,5	0,42	3,64
2	Нормальные	Есть	1,18	0,33	2,99
3	Вакуум, невесомость	Нет	4,14	0,59	9,2
4	Вакуум, невесомость	Есть	3,24	0,46	7,32

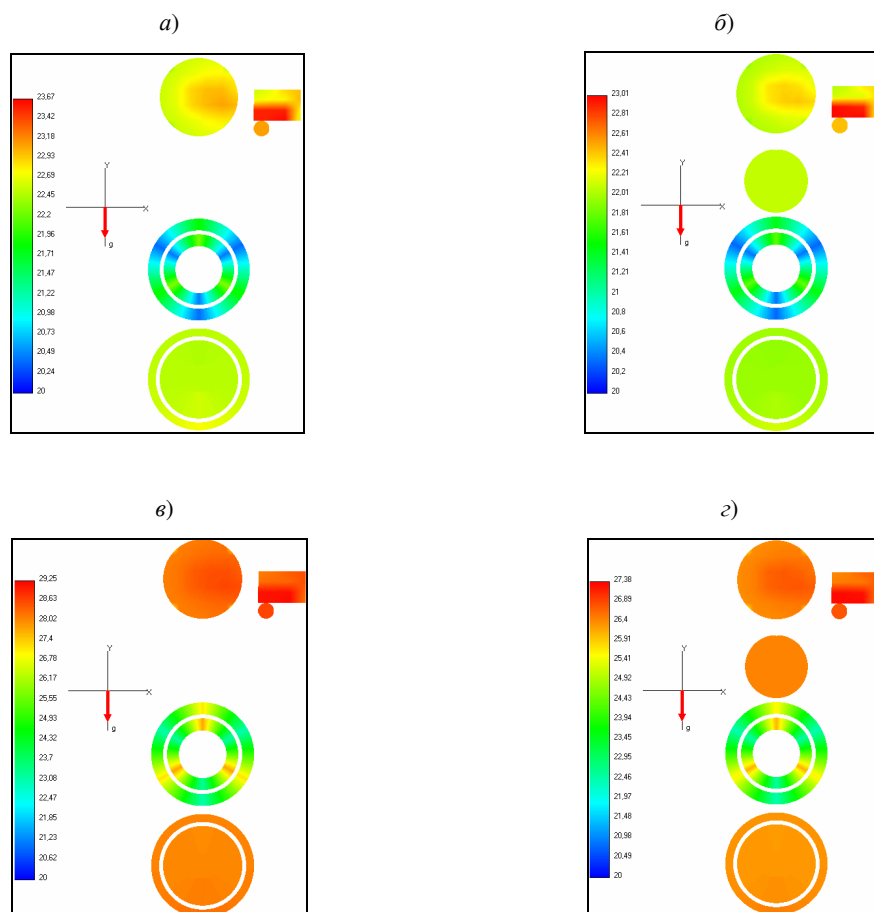


Рис. 8. Установившиеся температурные поля ВОГ-035:

- а) без теплового экрана, нормальное давление и сила тяжести; б) тепловой экран, нормальное давление и сила тяжести;
 в) без теплового экрана, вакуум и невесомость; з) тепловой экран, вакуум и невесомость

В условиях нормального давления и силы тяжести (1-й тепловой режим) проведена оценка влияния на температурные характеристики ВОГ-035 его ориентации относительно g .

Результаты представлены на рис. 9.

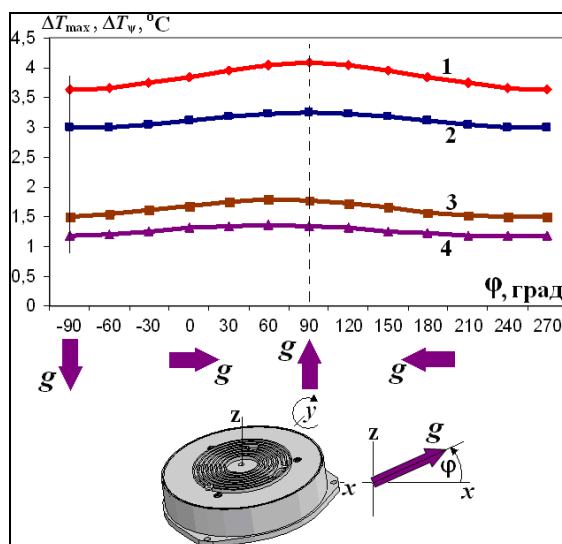


Рис. 9. Зависимости температурных характеристик ВОГ-035 от его ориентации относительно g :
1, 3 – $\Delta T_{\max}(\varphi)$, $\Delta T_{\psi}(\varphi)$ без теплового экрана; 2, 4 – $\Delta T_{\max}(\varphi)$, $\Delta T_{\psi}(\varphi)$ с тепловым экраном

Полученные данные (табл. 2, рис. 7–9) позволили сделать следующие выводы.

1. В условиях нормального давления и силы тяжести максимальные перегревы элементов ВОГ-035 над температурой окружающей среды принимают значения $\leq 4^\circ\text{C}$. Установившиеся окружающие температурные перепады в зоне оптоволоконной бухты не превышают 2°C .

Применение теплового экрана улучшает температурную ситуацию: перегревы и перепады уменьшаются примерно на 20% по сравнению с ВОГ-035 без экрана.

Выявлена наиболее неблагоприятная с тепловой точки зрения ориентация ВОГ-035 относительно g в условиях нормального давления и силы тяжести (вниз крышкой). В этом положении значения перегревов элементов ВОГ-035 над температурой окружающей среды и температурных перепадов по окружной координате в зоне волоконной бухты отличаются от значений в базовом положении соответственно на 12 и 18%.

2. В условиях вакуума и невесомости температурная ситуация в гироскопе существенно ухудшается по сравнению с условиями нормального атмосферного давления и силы тяжести. Перегревы над окружающей средой и температурные перепады в 2,5÷3 раза превышают перегревы и перепады, полученные в условиях нормального давления и силы тяжести.

Построенные модели позволили оценить влияние площади радиатора на крышке ВОГ-035 на температурные характеристики $\Delta T_{\max}$, ΔT_{ψ} . Зависимости $\Delta T_{\max}(\eta)$, $\Delta T_{\psi}(\eta)$ от относительной площади радиатора $\eta = S_{RAD}/S_{kr}$ в неблагоприятном 3-м тепловом режиме ВОГ-035 представлены на рис. 10.

3. Эти зависимости носят линейный характер в рассмотренном диапазоне. Перегрев $\Delta T_{\max}$ над температурой среды и окружной перепад ΔT_{ψ} уменьшаются примерно на 32÷34% при увеличении относительной площади радиатора на 300%.

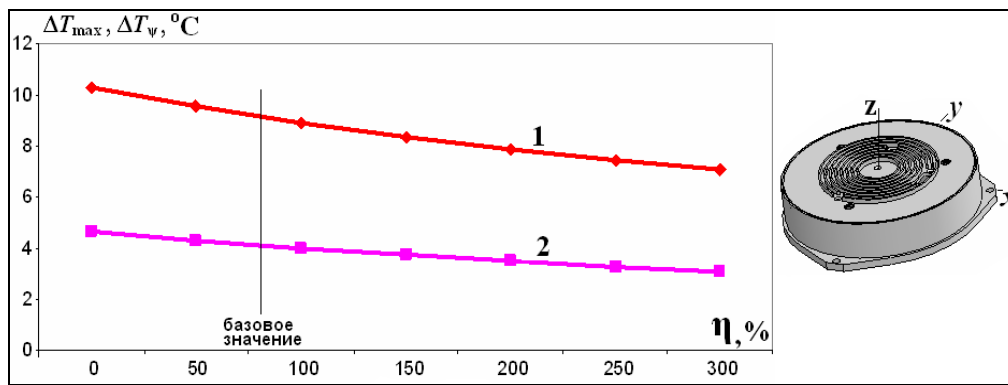


Рис. 10. Зависимости температурных характеристик от относительной площади радиатора на крышке ВОГ-035 без теплового экрана в условиях вакуума и невесомости: 1 – $\Delta T_{\max}(\eta)$; 2 – $\Delta T_{\psi}(\eta)$

В реальных условиях температура среды и плиты может изменяться с течением времени, например, по *гармоническому закону* (5-й тепловой режим).

Графики текущих температур, построенные по результатам моделирования 5-го теплового режима, при различных частотах внешних гармонических температурных возмущений, представлены на рис. 11.

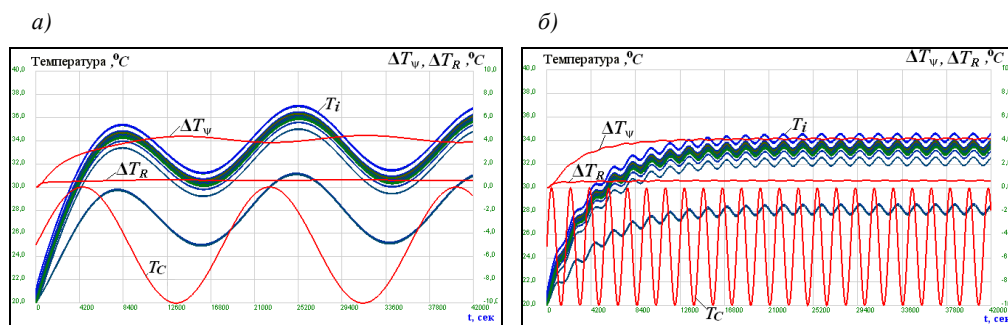


Рис. 11. Температуры T_i и температурные перепады в элементах ВОГ-035 при гармоническом (11) возмущении T_c в условиях вакуума и невесомости: а) период $\tau = 300$ мин; б) период $\tau = 30$ мин

4. Гармонически изменяющаяся внешняя температура *улучшает* температурную ситуацию в ВОГ-035 при определенных частотах колебаний внешней температуры.

Рекомендации по улучшению температурной ситуации в ВОГ-035

Ставится задача улучшения температурной ситуации в ВОГ-035. Улучшение температурной ситуации – это уменьшение перегревов основных элементов прибора над окружающей средой; уменьшение температурных окружных перепадов в зоне волоконной бухты; минимизация зависимости температурных характеристик ВОГ-035 от ориентации относительно g .

Для решения этой задачи необходимо определить оптимальные характеристики (теплоемкость, теплопроводность) теплового экрана; выявить основные элементы ВОГ-035, увеличение (или уменьшение) теплоотдачи от которых наиболее эффективно улучшает температурную ситуацию.

Результаты исследования влияния на перегрев $\Delta T_{\max}$ коэффициента теплопроводности материала теплового экрана представлены на рис. 12.

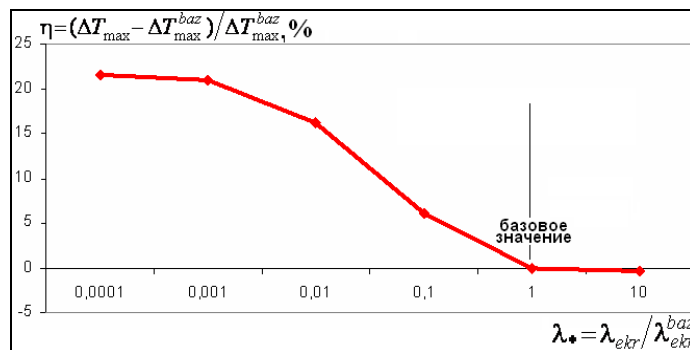


Рис. 12. Зависимость относительного максимального перегрева $\eta = \eta(\lambda_*)$, % от относительного коэффициента теплопроводности материала теплового экрана

Здесь $\Delta T_{\max}^{\text{baz}}$, $\lambda_{\text{ekr}}^{\text{baz}}$ – значения перегрева и коэффициента теплопроводности для материала теплового экрана в базовой конструкции ВОГ-035. Для уменьшения $\Delta T_{\max}$ надо увеличивать теплопроводность материала экрана. Выбранный материал (Д16Т) в базовой конструкции ВОГ-035 имеет достаточно большую теплопроводность $\lambda = 1,3 \text{ Вт/см}^\circ\text{С}$ и обеспечивает минимальное значение $\Delta T_{\max}$.

На рис. 13 построены диаграммы перегревов $\Delta T_{\max}$ для основных элементов ВОГ-035 и экстремальных значений (6 или 0) относительных коэффициентов теплоотдачи, например $S_{tze\text{kr}} = q_{ci} / q_{ci}^{\text{baz}} = 6$.

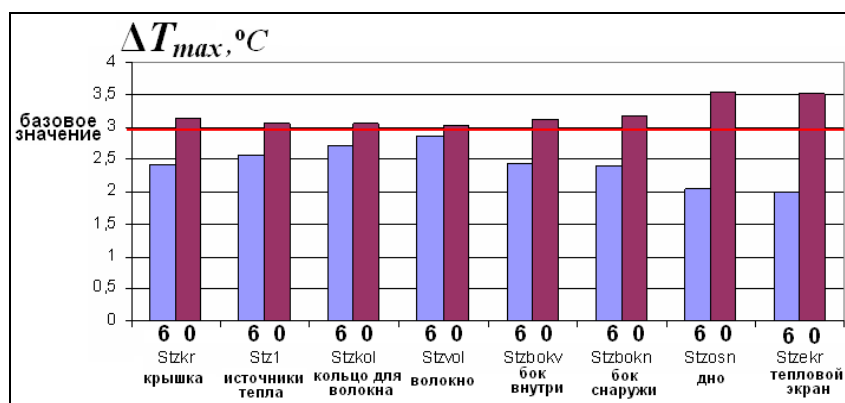


Рис. 13. Диаграммы максимальных перегревов $\Delta T_{\max}$ для основных элементов ВОГ-035 и экстремальных относительных коэффициентов теплоотдачи в среде

Наиболее эффективный (наибольший разброс $\Delta T_{\max}$ относительно базового значения) – это коэффициент теплоотдачи S_{tzekr} в среду от *теплового экрана* (крайняя правая колонка диаграммы).

Наименее эффективный (наименьший разброс $\Delta T_{\max}$) – коэффициент S_{tzevol} в среду от *волокон* (4 слева колонка).

Для уменьшения $\Delta T_{\max}$ надо *увеличивать* теплоотдачу от элементов в окружающую среду.

Полученные результаты находятся в полном соответствии с фундаментальными физическими законами теплообмена и сохранения энергии. Поскольку в приборе имеются внутренние источники тепла постоянной мощности и все элементы ВОГ-035 связаны в тепловом отношении между собой, то увеличение теплоотдачи от элементов ВОГ-035 в среду приведет к улучшению температурной ситуации в приборе.

Зависимости $\Delta T_{\max\phi} = \Delta T_{\max}(90^\circ) - \Delta T_{\max}(-90^\circ)$ и $\Delta T_{\psi\phi} = \Delta T_{\psi}(90^\circ) - \Delta T_{\psi}(-90^\circ)$ от относительной теплоотдачи S_{tzekr} для ВОГ-035 с тепловым экраном и нормальных условий представлены на рис. 14.

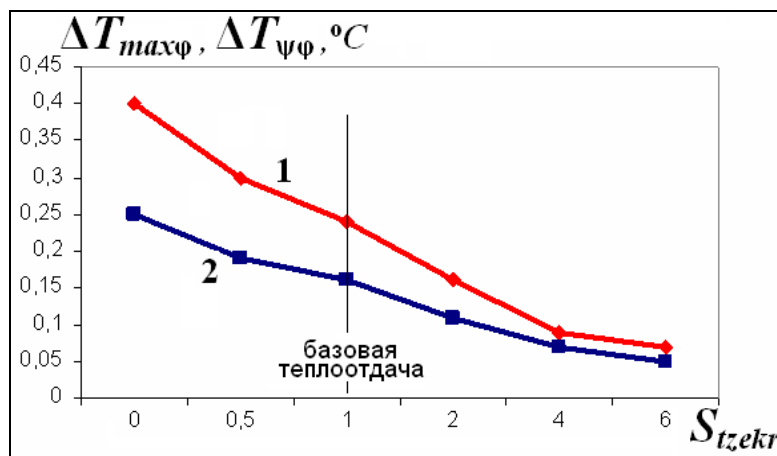


Рис. 14. Зависимости температурных характеристик от относительной теплоотдачи S_{tzekr} в среду от теплового экрана при нормальном давлении и силе тяжести:
1 – $\Delta T_{\max\phi}(S_{tzekr})$; 2 – $\Delta T_{\psi\phi}(S_{tzekr})$

Для минимизации зависимости температурных характеристик $\Delta T_{\max\phi}$ и $\Delta T_{\psi\phi}$ от ориентации ВОГ-035 и для улучшения температурной ситуации в целом (уменьшения перегревов и перепадов) надо *увеличивать теплоотдачу* от теплового экрана в среду (по данным моделирования в четыре и более раз).

Реализация этого вывода возможна, например, при применении радиаторов на тепловом экране, при принудительном обдуве теплового экрана потоком воздуха и другими способами.

Таким образом, предлагаемые меры (применение теплового экрана с оптимальными характеристиками, увеличение теплоотдачи в среду от теплового экрана и дна гироскопа и др.) позволяют существенно (в 1,2–4 раза) улучшить температурную ситуацию в гироскопе ВОГ-035, функционирующем в земных и космических условиях.

Заключение

Построены математические модели тепловых процессов базового и модернизированного ВОГ-035 с учетом ориентации гироскопа в поле ускорений и изменения давления окружающей среды. Разработано поддерживающее программное обеспечение в виде программного комплекса VOG035. Проведен тепловой анализ волоконно-оптического гироскопа ВОГ-035. Получены оценки влияния на температурную ситуацию в ВОГ-035 теплового экрана, экстремальных условий вакуума и невесомости, различной ориентации прибора и др. Разработаны и исследованы пассивные способы обеспечения термоинвариантности датчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Джашитов, В.Э.** Тепловой анализ бесплатформенной инерциальной навигационной системы с волоконно-оптическими гироскопами и блока управления реактивными двигателями / В.Э.Джашитов [и др.] //Гироскопия и навигация", 2010.- №4(71).- С. 82.
2. **Дульнев, Г.Н.** Методы расчета теплового режима приборов / Г.Н.Дульнев, В.Г.Парфенов, А.В.Сигалов.- М.: Радио и связь, 1990. - 312 с.
3. **Дульнев, Г.Н.** Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах / Г.Н.Дульнев, Э.М.Семяшкин. - Л.: Энергия, 1968. - 360 с.
4. **Джашитов, В.Э.** Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем / В.Э.Джашитов, В.М. Панкратов / Под общ. ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова. - СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ "Электроприбор", 2001.-150 с.
5. **Джашитов, В.Э.** Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / В.Э.Джашитов, В.М. Панкратов / Под общ. ред. акад. РАН В.Г.Пешехонова. - С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор".- 2005. - 404 с.
6. **M. Li, X. Zhao (CHINE)** "A Novel 3-D Model for Thermal Transient Effects in Fiber Gyro Coils" // "Symposium Gyro Technology, 21-22 September, 2010", Karlsruhe, Germany.
7. **E. Quatraro, A. Pizzarulli, M. Catasta, G. Crescenti, E. Spinozzi, A. Cingolani (ITALY)** "High Performance FOG for Non Temperature Stabilized Environment" // "Inertial Sensors and Systems – Symposium Gyro Technology, 20-21 September, 2011", Karlsruhe, Germany.
8. **F. Schadt, F. Mohr (GERMANY)** "Error Signal Formation in FOGs Through Thermal and Elastooptical Environment Influence on the Sensing Coil" // "Inertial Sensors and Systems – Symposium Gyro Technology, 20-21 September, 2011", Karlsruhe, Germany.

Abstract. Mathematical models of the thermal processes for the base gyro FOG-035 and for the modernized gyro are constructed. In the models the orientation of the gyro in a field of accelerations and pressure variations of an environment are considered. Models allow to simulate space conditions of vacuum and weightlessness. The supporting software is developed. Adequacy of models on the basis of comparison with experimental data is checked up. The thermal analysis of fiber-optical gyro FOG-035 is conducted. Qualitative and quantitative estimations of influence on a temperature situation in FOG-035 of the thermal screen, of extreme conditions of vacuum and weightlessness, of various orientation of the device, etc., are received. Passive methods of thermal invariance of the sensor are developed and studied.

Key words: fiber-optic gyro, nonstationary thermal processes, thermal insensitivity, vacuum, weightlessness, mathematical models