



DOI: 10.22184/1993-7296.FROs.2020.14.3.226.232

## ЗЛГ с одним газоразрядным промежутком в каждом плече: коррекция дрейфа нуля датчиков

А. А. Медведев, М. Е. Грушин  
АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха», Москва, Россия

Работа посвящена коррекции дрейфа нуля датчиков зеemanовских лазерных гироскопов (ЗЛГ) с одним газоразрядным промежутком в каждом плече при их самопрогреве и при изменении внешних температур. Показан метод, позволяющий корректировать дрейф нуля, улучшая точностные характеристики прибора до  $10^3$  раз. Впервые при испытаниях ЗЛГ были получены результаты лучше  $0,01^\circ/\text{ч}$  при скорости изменения внешней температуры  $0,3^\circ/\text{мин}$ .

**Ключевые слова:** зеemanовский лазерный гироскоп, дрейф нуля, температурная коррекция

Статья получена: 25.02.2020  
Принята к публикации: 08.04.2020

### ВВЕДЕНИЕ

Современная лазерная гироскопия, основанная на использовании интерференционных явлений, позволяет с высокой точностью измерять угловые скорости и углы в инерциальном пространстве. Особое место в семействе лазерных гироскопов (ЛГ) занимают зеemanовские лазерные гироскопы (ЗЛГ), в которых частотная подставка создается за счет эффекта Зеemана при наложении продольного магнитного поля на газоразрядные промежутки [1].

Известно, что дополнительные погрешности ЗЛГ определяются рядом факторов. Эти факторы связаны с нестабильностью тока накачки активной среды, наводками в системе регули-

## ZLG Sensors with one Gas Discharge Gap in Each Sensor Half: Correction of Zero Drift

A. A. Medvedev, M. E. Grushin  
Research Institute «Polyus» named after M. F. Stelmakh, JSC,  
Moscow, Russia

The paper presents the results of correction the non-magnetic component of zero-drift sensors with changing external temperatures and self-heating. Method is shown that allows to adjust the zero-drift improving accuracy characteristics of the device up to  $10^3$  times. For the first time, testing ZLG were obtained results better than  $0.01^\circ/\text{h}$  at the rate of change the external temperature  $0.3^\circ/\text{min}$ .

**Key words:** Laser Gyroscope, ZLG, zero drift, temperature correction

Received on: 25.02.2020  
Accepted on: 08.04.2020

### INTRODUCTION

Modern laser gyroscope, based on the use of interference phenomena, makes it possible to measure angular velocities and angles in inertial space with high accuracy. A special place in the family of laser gyroscopes (LG) is hold by Zeeman laser gyroscopes (ZLG), where a dithering is created due to the Zeeman effect when a longitudinal magnetic field is applied to gas-discharge gaps [1].

It is known that additional ZLG errors are determined by a number of factors. These factors are associated with instability of the pump current of the active medium, interference in the perimeter adjustment system, instability of external and internal magnetic fields. The ZLG must maintain their accuracy and performance in a wide range of temperature effects. The dynamics of the zero bias of ring lasers, its non-magnetic and magnetic components is influenced by the ambient temperature and thermal processes occurring inside the ring lasers.

ровки периметра, нестабильностью внешних и внутренних магнитных полей. ЗЛГ должны сохранять свои точностные и эксплуатационные характеристики в широком диапазоне температурных воздействий. На динамику смещения нуля кольцевых лазеров, ее немагнитной и магнитной составляющих оказывает влияние температура окружающей среды и тепловые процессы, протекающие внутри кольцевых лазеров.

Наибольшее влияние на дрейф нуля, а точнее на его немагнитную составляющую, оказывает асимметрия распределения температуры вдоль активной среды. При создании градиента температуры вдоль стенок у ее поверхности возникает поток газа, направленный из более холодной области к более горячей. Это явление называется термоскольжением [2].

Вопрос о температурной коррекции с использованием показаний разности температур термодатчиков (от двух до пяти), установленных в горячую и холодную часть, рассматривался в работах [3–5]. В этих работах были представлены результаты с использованием термокоррекции дрейфа нуля ( $\Omega_{\text{дн}}$ ) на модификациях ЛГ на виброподвесе, в которых отсутствует дополнительный внешний нагревательный элемент. После математической обработки ошибка дрейфа нуля не превышает  $0,01^\circ/\text{ч}$ .

Коренным отличием датчиков ЗЛГ от датчиков на виброподвесе является наличие катушек, создающих продольное магнитное поле в активной среде. При протекании тока через катушки в них выделяется тепло, что приводит к перераспределению тепловых полей в резонаторе.

### НОВЫЙ МЕТОД ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРЕКЦИИ ДРЕЙФА НУЛЯ

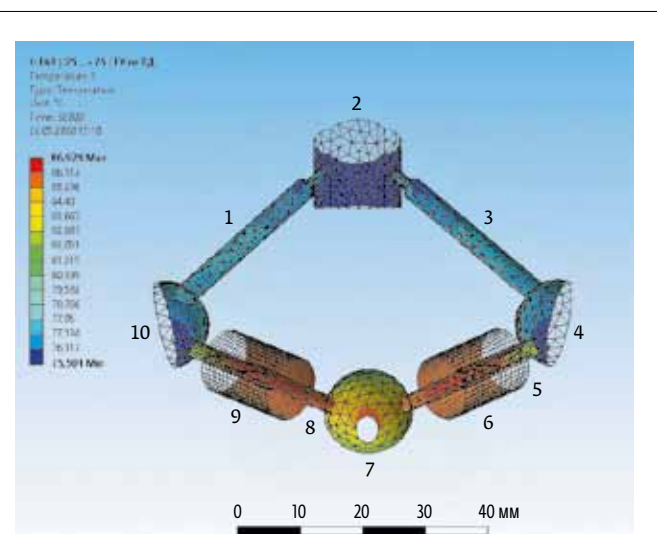
В данной работе рассмотрены датчики ЗЛГ К-4М и К-5М, работающие с одним ГРП в каждом плече, наполненном 50% смесью изотопов  $\text{Ne}^{20}$  и  $\text{Ne}^4$ . Для данного типа ЗЛГ была проведена температурная коррекция дрейфа нуля при скорости изменения внешней температуры  $0,3^\circ/\text{мин}$  с температурными переходами от 218 до 298К, от 298 до 348К, от 348 до 298К, от 298 до 218К. При коррекции были использованы данные двух термодатчиков.

Результаты проведенного расчета тепловых полей ЗЛГ К-5М представлены на рис. 1. Графическое представление показывает, что основное тепловыделение происходит в катушечных выборках (позиции 5 и 9). В этом месте был

The asymmetry of the temperature distribution along the active medium has the greatest influence on the zero drift, or rather on its nonmagnetic component. When creating a temperature gradient along the walls, a gas flow arises at its surface, directed from the colder region to the hotter one. This phenomenon is called thermal slip [2].

The issue of temperature correction using the readings of the temperature difference of thermal sensors (from two to five), installed in the hot and cold parts, was considered in [3–5]. In these works, results were presented using thermal correction of zero drift ( $\Omega_{\text{zd}}$ ) on LG modifications on a vibro-suspension, without additional external heating element. After mathematical processing, the zero drift error does not exceed  $0.01^\circ/\text{h}$ .

The fundamental difference between ZLG sensors and sensors on a vibro-suspension is the presence of coils that create a longitudinal magnetic field in the active medium. When current flows through the coils, heat is released in them, which leads to a redistribution of thermal fields in the resonator.



**Рис. 1.** Тепловые поля в газоразрядных каналах ЗЛГ (с одним газоразрядным промежутком): 1, 3 – пассивные каналы; 2, 4, 7, 10 – подзеркальные выборки; 5, 9 – катушки невязимного устройства (НУ); 6, 8 – рабочие газоразрядные каналы (ток разряда 1,2 мА в каждом плече датчика; ток в катушке НУ – 0,5 А)

**Fig. 1.** Thermal fields in the ZLG gas-discharge channels (with one gas-discharge gap): 1, 3 – passive channels; 2, 4, 7, 10 – sub-mirror samples; 5, 9 – non-reciprocal device (NRD) coils; 6, 8 – working gas-discharge channels (discharge current 1.2 mA in each sensor half; current in the NRD coil – 0.5 A)

установлен термодатчик ( $T_2$ ). Датчик температуры  $T_1$  был установлен на дно металлической испытательной оснастки, к которой механически крепится ЗЛГ (позиция 2).

Исследования провели на развязанном фундаменте в камере тепла и холода типа Aquitas, модель ADS-V\_TM с разведенным компрессором. ЗЛГ защитили конструкцией магнитного экрана для снижения влияния внешних магнитных полей на стабильность выходного сигнала. На дно магнитного экрана установили термодатчик для определения температуры холодной части ЗЛГ. Измерения точностных параметров ЗЛГ проводили при токе разряда 1,2 мА и токе в катушках невзаимного устройства 0,5 А.

При разработке модели температурной коррекции было предложено разделить эффект влияния самопрогрева ЗЛГ на эффект, вызванный нагревом катушек невзаимного устройства, и эффект, вызванный изменением внешней температуры в камере тепла и холода.

Для проведения коррекции теплового скольжения, связанного с самопрогревом, использовали разность температур холодной и горячей областей датчика ( $\Delta T = T_2 - T_1$ ). Для этого проводили часовые измерения при стационарных значениях внешних температур ( $T$ ). Для каждой внешней температуры ( $-55\text{ }^\circ\text{C} = 218\text{K}$ ,  $25\text{ }^\circ\text{C} = 298\text{K}$ ,  $75\text{ }^\circ\text{C} = 348\text{K}$ ) были построены зависимости  $\Omega_{\text{дн}}$  от  $\Delta T$ .

Изначально постулировано, что зависимость дрейфа нуля ЗЛГ от температуры подчиняется полиномиальной зависимости:  $\Omega_{\text{дн}} = A + B \cdot \Delta T + C \cdot \Delta T^2$ . На рис. 2 приведены зависимости дрейфа нуля ЗЛГ ( $\Omega_{\text{дн}}$ ) от разницы температур холодной ( $T_1$ ) и горячей ( $T_2$ ) частей ЗЛГ для трех усредненных значений внешних стационарных температур. Важно отметить, что аппроксимирующую функцию необходимо строить с учетом весовых характеристик ( $w$ ) полученных точечных результатов. Принимаем, что  $w = 1/i^2$ , где  $i$  – порядковый номер точки.

Температурная зависимость коэффициентов полиномов II порядка ( $\Omega_{\text{дн}} = A + B \cdot \Delta T + C \cdot \Delta T^2$ ), аппроксимирующих зависимость  $\Omega_{\text{дн}}$  от  $\Delta T$ , определяли методом наименьших квадратов для каждой внешней стационарной температуры ( $T$ ).

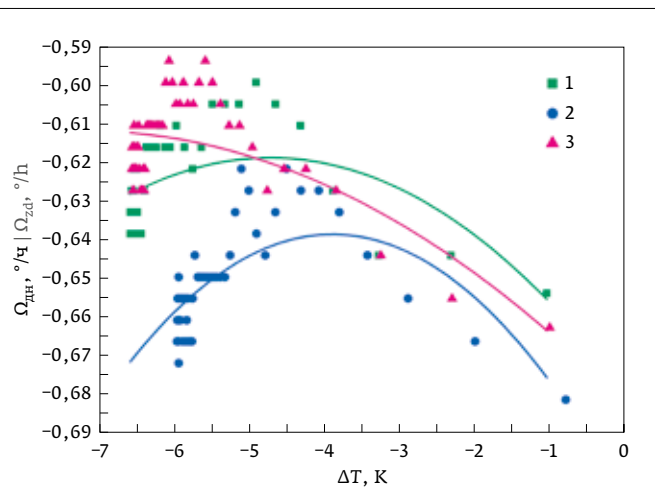
На рис. 3 представлены температурные зависимости коэффициентов полиномов II порядка ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ), полученных при аппроксимации  $\Omega_{\text{дн}} = A + B \cdot \Delta T + C \cdot \Delta T^2$ . Анализ графических зави-

## NEW ZERO DRIFT TEMPERATURE CORRECTION METHOD

In this research, we consider KL-4M and K-5M ZLG sensors working with one GDC in each sensor half filled with a 50% mixture of  $\text{Ne}^{20}$   $\text{Ne}^{22}$  and  $\text{He}^4$  isotopes. For this type of ZLG, a temperature correction of zero drift was carried out at a rate of change of external temperature of 0.3 rpm with temperature transitions from 218 to 298 K, from 298 to 348 K, from 348 to 298 K, from 298 to 218 K. During the correction, the data of two temperature sensors were used.

The results of the calculation of the thermal fields of K-5M ZLG are presented in Fig. 1. A graphical representation shows that the main heat generation occurs in coil samples (items 5 and 9). At this point, a temperature sensor ( $T_2$ ) was installed. The temperature sensor  $T_1$  was installed at the bottom of a metal test rig, to which the ZLG is mechanically attached (posit. 2).

The studies were carried out on an untied foundation in the heat and cold chamber of the Aquitas type model ADS-V\_TM with outside compressor. ZLG was protected by the design of the magnetic screen to reduce the influ-



**Рис. 2.** Зависимость дрейфа нуля ЗЛГ ( $\Omega_{\text{дн}}$ ) от разницы температур холодной ( $T_1$ ) и горячей ( $T_2$ ) частей ЗЛГ (см. рис. 1) для трех усредненных значений внешних стационарных температур: 1 – 298K; 2 – 218K; 3 – 348K (точками обозначены экспериментальные данные; сплошные линии соответствуют аппроксимации дрейфа нуля функцией  $\Omega_{\text{дн}} = A + B \cdot \Delta T + C \cdot \Delta T^2$ )

**Fig. 2.** Dependence of ZLG zero drift ( $\Omega_{\text{zd}}$ ) on the temperature difference between the cold ( $T_1$ ) and hot ( $T_2$ ) parts of the ZLG (see Fig. 1) for three averaged values of the external stationary temperatures: 1 – 298K; 2 – 218K; 3 – 348K (experimental data are indicated by dots; solid lines correspond to the approximation of zero drift by the function  $\Omega_{\text{zd}} = A + B \cdot \Delta T + C \cdot \Delta T^2$ )

симостей (рис. 3) показал, что температурная зависимость коэффициентов полиномов II порядка  $A$ ,  $B$ ,  $C$  хорошо описывается линейной зависимостью. Подставим полученные коэффициенты в уже полученную ранее функцию  $\Omega_{\text{дн}} = A + B \cdot \Delta T + C \cdot \Delta T^2$ . В итоге для коррекции самопрогрева ЗЛГ из дрейфа вычитаем функцию

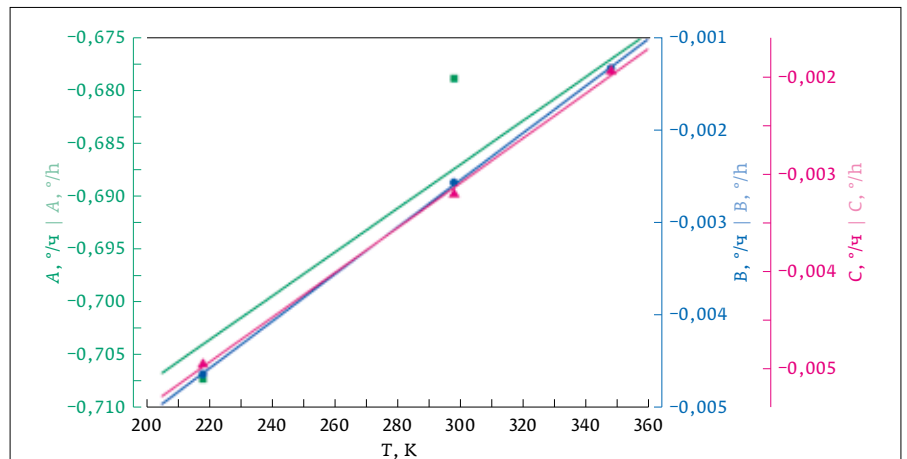
$$\Omega^* = (A_1 + A_2 \cdot T_2) + (B_1 + B_2 \cdot T_2) \cdot \Delta T + (C_1 + C_2 \cdot T_2) \cdot \Delta T^2. \quad (1)$$

Для введения температурной коррекции дрейфа нуля при изменяющихся внешних температурах измерения дрейфа нуля проводили по следующей циклограмме:

- Температура камеры 298K (3 часа) → скорость изменения температуры 0,3 °/мин
- Температура камеры 218K (3 часа) → скорость изменения температуры 0,3 °/мин
- Температура камеры 298K (3 часа) → скорость изменения температуры 0,3 °/мин
- Температура камеры 348K (3 часа) → скорость изменения температуры 0,3 °/мин
- Температура камеры 298K (3 часа).

После измерения дрейфа нуля по вышеприведенной циклограмме исключение самопрогрева проводили путем вычитания значений, вычисленных по зависимости (1).

В данной работе впервые было предложено описывать процессы, протекающие в камере тепла и холода, так называемый внешний прогрев прибора, с помощью производной функции показаний термодатчика с катушки невзаимного устройства ( $\Delta T_2 / dt$ ). Для этого после учета величины самопрогрева методом наименьших квадратов для всех температурных переходов (от 218 до 298K, от 298 до 348K,

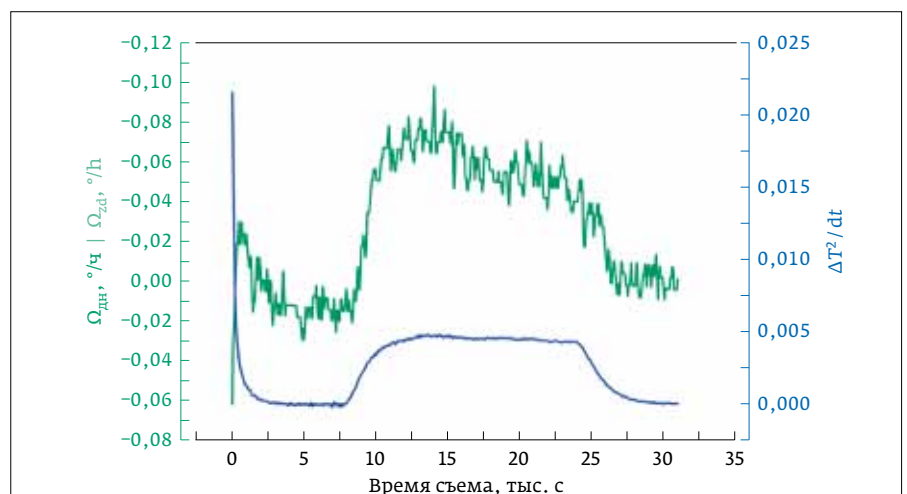


**Рис. 3.** Температурные зависимости коэффициентов полиномов II порядка ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ), полученных при аппроксимации  $\Omega_{\text{дн}} = A + B \cdot \Delta T + C \cdot \Delta T^2$  (точками обозначены экспериментальные данные)

**Fig. 3.** Temperature dependences of the coefficients of polynomials of the second order ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) obtained by approximation  $\Omega_{\text{zd}} = A + B \cdot \Delta T + C \cdot \Delta T^2$  (the experimental data are indicated by dots)

ence of external magnetic fields on the stability of the output signal. A temperature sensor was installed at the bottom of the magnetic screen to determine the temperature of the cold part of the ZLG. The accuracy parameters of the ZLG were measured at a discharge current of 1.2 mA and a current in the coils of a nonreciprocal device of 0.5 A.

When developing a model of temperature correction, it was proposed to separate the effect of the self-heating of ZLG on the effect caused by heating of the



**Рис. 4.** Зависимость дрейфа нуля после учета самопрогрева и зависимость производной температуры катушки от времени

**Fig. 4.** Dependence of zero drift after taking into account self-heating and the time dependence of the derivative coil temperature

от 348 до 298К, от 298 до 218К) определяли температурную зависимость коэффициентов полиномов II порядка, аппроксимирующих зависимость  $\Omega_{\text{дн}}$  от  $\Delta T_2/dt$ .

На рис. 4 в качестве примера для температурного перехода от 218 до 298К приведена зависимость дрейфа нуля после учета самопро-

coils of a nonreciprocal device and the effect caused by a change in the external temperature in the heat and cold chamber.

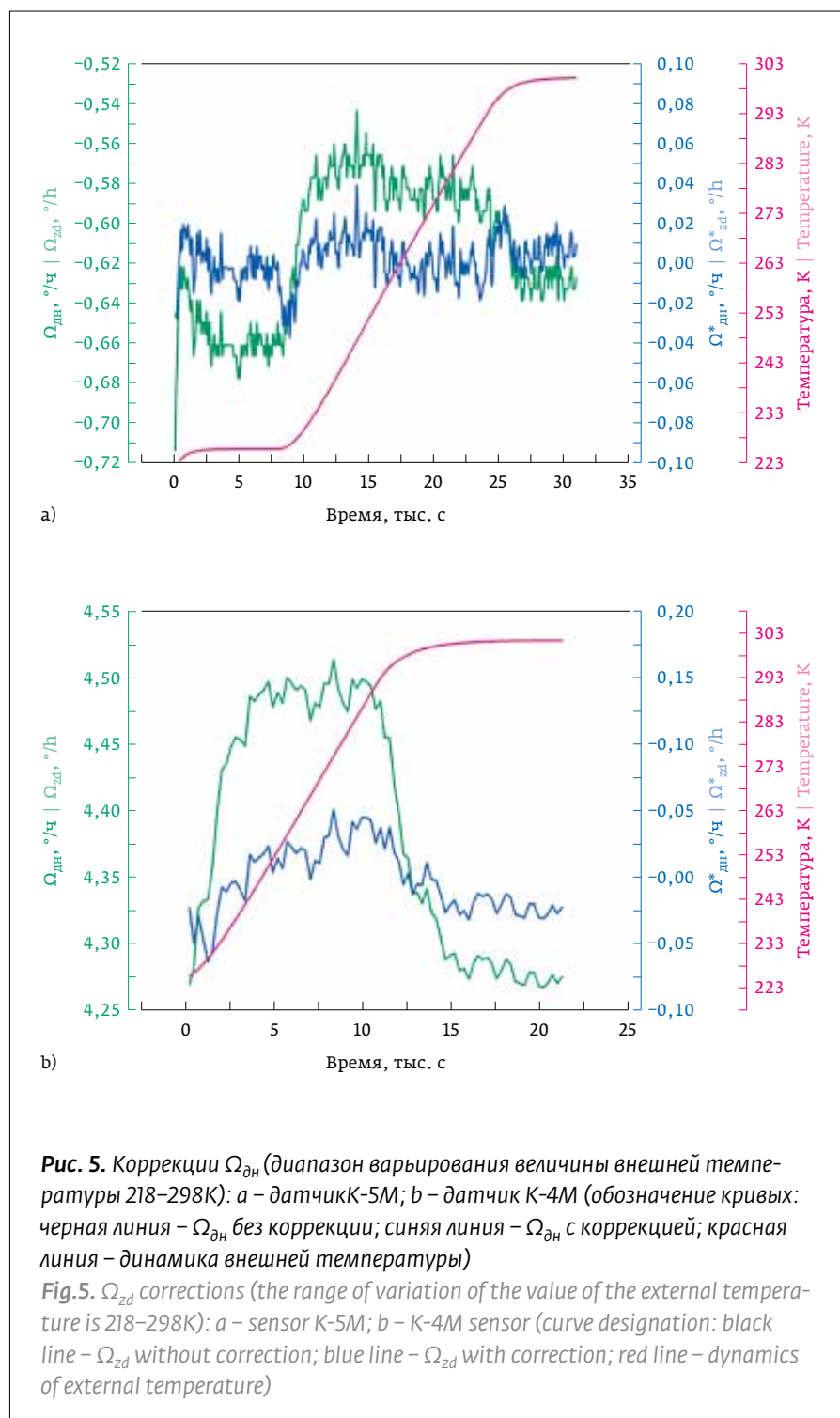
To correct the thermal slip associated with self-heating, we used the temperature difference between the cold and hot regions of the sensor ( $\Delta T=T_2-T_1$ ). For this, hourly measurements were carried out at stationary

values of external temperatures ( $T$ ). For each external temperature ( $-55\text{ }^\circ\text{C} = 218\text{ K}$ ,  $25\text{ }^\circ\text{C} = 298\text{ K}$ ,  $75\text{ }^\circ\text{C} = 348\text{ K}$ ), the dependences of  $\Omega_{\text{zd}}$  on  $\Delta T$  were constructed.

Initially, it was postulated that the temperature dependence of the ZLG zero drift obeys the polynomial dependence:  $\Omega_{\text{zd}}=A+B\cdot\Delta T+C\cdot\Delta T^2$ . Figure 2 shows the dependences of ZLG zero drift ( $\Omega_{\text{zd}}$ ) on the temperature difference between the cold ( $T_1$ ) and hot ( $T_2$ ) parts of the ZLG for three averaged values of external stationary temperatures. It is important to note that the approximating function must be constructed taking into account the weight characteristics ( $w$ ) of the obtained point results. We assume that  $w=1/i^2$ , where  $i$  is the serial number of the point.

The temperature dependence of the coefficients of the second-order polynomials ( $\Omega_{\text{zd}}=A+B\cdot\Delta T+C\cdot\Delta T^2$ ), approximating the dependence of  $\Omega_{\text{zd}}$  on  $\Delta T$ , was determined by the least squares method for each external stationary temperature ( $T$ ).

Figure 3 shows the temperature dependences of the coefficients of polynomials of the second order ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) obtained by approximating  $\Omega_{\text{zd}}=A+B\cdot\Delta T+C\cdot\Delta T^2$ . An analysis of the graphical dependencies (Fig. 3) showed that the temperature dependence of the coefficients of the second-order polynomials  $A$ ,  $B$ ,  $C$  is well described with a linear dependency. We substitute the obtained coefficients into the previously obtained function  $\Omega_{\text{zd}}=A+B\cdot\Delta T+C\cdot\Delta T^2$ . As a result, to correct the self-heating of ZLG from the drift, we subtract the function



**Рис. 5.** Коррекции  $\Omega_{\text{дн}}$  (диапазон варьирования величины внешней температуры 218–298К): а – датчик К-5М; б – датчик К-4М (обозначение кривых: черная линия –  $\Omega_{\text{дн}}$  без коррекции; синяя линия –  $\Omega_{\text{дн}}$  с коррекцией; красная линия – динамика внешней температуры)

**Fig.5.**  $\Omega_{\text{zd}}$  corrections (the range of variation of the value of the external temperature is 218–298K): a – sensor K-5M; б – K-4M sensor (curve designation: black line –  $\Omega_{\text{zd}}$  without correction; blue line –  $\Omega_{\text{zd}}$  with correction; red line – dynamics of external temperature)

Результаты температурной коррекции  $\Omega_{дн}$  при изменяющихся внешних температурах (218K ↔ 298K ↔ 348K)

The results of temperature correction  $\Omega_{zd}$  at varying external temperatures (218K ↔ 298K ↔ 348K)

Температура Temperature	Ошибка $\Omega_{дн}$ без коррекции, °/ч Error $\Omega_{zd}$ without correction, °/h		Ошибка $\Omega_{дн}$ с коррекцией, °/ч Error $\Omega_{zd}$ with correction, °/h	
	К-5М	К-4М	К-5М	К-4М
298 К → 348 К	0,61	4,27	0,0006	0,0636
298 К → 218 К	0,68	4,10	0,0049	0,0555
218 К → 298 К	0,61	4,34	0,0016	0,0054
348 К → 298 К	0,65	4,27	0,0060	0,0138

грева и зависимость производной температуры катушки от времени.

В результате проведенных математических процедур над функциями температурной коррекции при самопрогреве и изменения внешних температур (выражение 1) получена итоговая функция:

$$\Omega_{дн}^* = \Omega_{дн} - (A_1 + A_2 \cdot T_2) + (B_1 + B_2 \cdot T_2) \cdot \Delta T + (C_1 + C_2 \cdot T_2) \cdot \Delta T^2 - [A_3 - B_3 \cdot (\Delta T_2 / dt) + C_3 \cdot (\Delta T_2 / dt^2)]. \quad (2)$$

где  $A_1 + A_2 \cdot T_2$ ,  $B_1 + B_2 \cdot T_2$ ,  $C_1 + C_2 \cdot T_2$  – температурные зависимости коэффициентов полиномов II порядка, аппроксимирующие зависимость  $\Omega_{дн}$  от  $\Delta T$ ;  $T_2$  – температура термодатчика установленного в катушечном пазу;  $\Delta T$  – разность холодной и горячей области датчика ЗЛГ;  $(\Delta T_2 / dt)$  – производная по времени показаний температуры термодатчика, установленного в катушечном пазу.

В таблице представлены результаты температурной коррекции  $\Omega_{дн}$ , выполненные по зависимости (2) при изменяющихся внешних температурах (от 218 до 298К, от 298 до 348К, от 348 до 298К, от 298 до 218К).

На рис. 5 для примера представлены результаты коррекции  $\Omega_{дн}$ , выполненные в соответствии с зависимостью (2), при варьировании величины внешней температуры от 218 до 298К.

$$\Omega^* = (A_1 + A_2 \cdot T_2) + (B_1 + B_2 \cdot T_2) \cdot \Delta T + (C_1 + C_2 \cdot T_2) \cdot \Delta T^2. \quad (1)$$

To introduce temperature correction of zero drift at varying external temperatures, zero drift was measured using the following sequence diagram:

- Chamber temperature 298K (3 hours) → rate of temperature change 0.3 °/min
- Chamber temperature 218K (3 hours) → rate of temperature change 0.3 °/min
- Chamber temperature 298K (3 hours) → rate of temperature change 0.3 °/min
- Chamber temperature 348K (3 hours) → rate of temperature change 0.3 °/min
- Chamber temperature 298K (3 hours)

After measuring the zero drift according to the above sequence diagram, the exclusion of self-heating was carried out by subtracting the values calculated according to dependence (1).

In this research, for the first time, it was proposed to describe the processes occurring in the heat and cold chamber, the so-called external heating of the device, using the derivative function of the readings of the temperature sensor from a non-reciprocal device coil ( $\Delta T_2 / dt$ ). For this, after taking into account the self-heating value by the least squares method for all temperature transitions (from 218 to 298 K, from 298 to 348 K, from 348 to 298 K, from 298 to 218 K), the temperature dependence of the coefficients of the second-order polynomials was determined, which approximate the dependence of  $\Omega_{zd}$  on  $\Delta T_2 / dt$ . Fig. 4 shows the dependence of zero drift after taking into account self-heating and the time derivative of the coil temperature are taken into account as an example for the temperature transition from 218 to 298 K.

As a result of the mathematical procedures performed on the temperature correction functions during self-heating and changes in external temperatures (expression 1), the resulting function is obtained:

$$\Omega_{zd}^* = \Omega_{zd} - (A_1 + A_2 \cdot T_2) + (B_1 + B_2 \cdot T_2) \cdot \Delta T + (C_1 + C_2 \cdot T_2) \cdot \Delta T^2 - [A_3 - B_3 \cdot (\Delta T_2 / dt) + C_3 \cdot (\Delta T_2 / dt^2)]. \quad (2)$$

where  $A_1 + A_2 \cdot T_2$ ,  $B_1 + B_2 \cdot T_2$ ,  $C_1 + C_2 \cdot T_2$  are the temperature dependences of the coefficients of polynomials of the second order, approximating the dependence of  $\Omega_{zd}$  on  $\Delta T$ ;  $T_2$  is the temperature of the temperature sensor installed in the coil groove;  $\Delta T$  is the difference between the cold and hot regions of the ZLG sensor;  $(\Delta T_2 / dt)$  is the time derivative of the temperature readings of the temperature sensor installed in the coil groove.

The table presents the results of the temperature correction  $\Omega_{zd}$ , made according to dependence (2) at varying



Из представленных в таблице и на рис. 5 результатов становится очевидным, что предложенный метод коррекции  $\Omega_{\text{дн}}$  снижает ошибку, вызванную эффектом термоскольжения до  $10^3$  раз.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для датчиков ЗЛГ К-4М и К-5М была проведена температурная коррекция дрейфа нуля при скорости изменения внешней температуры  $0,3$  °/мин. ЗЛГ работают с одним газоразрядным промежутком в каждом плече, наполненном 50% смесью изотопов  $\text{Ne}^{20}$ ,  $\text{Ne}^{22}$  и  $\text{He}^4$ . При разработке алгоритма температурной коррекции эффект влияния самопрогрева ЗЛГ был разделен на эффект, вызванный нагревом катушек невзаимного устройства, и эффект, вызванный изменением внешней температуры в камере тепла и холода.

Впервые предложено описывать процессы, протекающие в камере тепла и холода, так называемый внешний прогрев прибора, с помощью производной функции разности температур показаний термодатчика с катушки невзаимного устройства ( $\Delta T_2/dt$ ). Таким образом, предложенный в работе метод температурной коррекции дрейфа нуля с использованием двух термодатчиков, позволяет улучшать точностные характеристики ЗЛГ до  $10^3$  раз при изменении внешних температур и самопрогреве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Азарова В. В., Голяев Ю. Д., Савельев И. И.** Зеemanовские лазерные гироскопы. *Квантовая электроника*. 2015; 45(2): 171–179.
2. **Грю К. Э., Иббс Т. Л.** *Термическая диффузия в газах* / Пер. с англ. И. С. Максимовской / Под ред. А. В. Лыкова. – М.: Гостехиздат, 1956.
3. **Суханов С. В.** Алгоритмы компенсации погрешностей выходного сигнала лазерного гироскопа. Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011; 3–4:134–140.
4. **Han Jeong Youp, Son Seong Hyun.** The compensation method for thermal bias of ring laser gyro. Proceedings of LEOS. 2008. 21-st Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, Acapulco. 2008; 723–724. DOI: 10.1109/LEOS.2008.4688823.
5. **Geng Li, Fei Wang, Guangzong Xiao, Guo Wei, Pengfei Zhang, Xingwu Long.** Temperature compensation method using readout signals of ring laser gyroscope. *Opt. Express*. 2015; 23(10): 13320–13332. DOI: 10.1364/OE.23.013320.

## АВТОРЫ

Медведев Алексей Александрович, alexdyn92@yandex.ru, АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стелмаха» (Москва); специалист в области инерциальной навигации и лазерной гироскопии.  
ORCID: 0000-0002-7308-1839

Грушин Михаил Евгеньевич, к. ф. - м. н., mihail.grushin1968@gmail.com, АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стелмаха» (Москва); специалист в области физики газового разряда, плазмохимии, плазменной медицины и инерциальной навигации и лазерной гироскопии.  
SCOPUS id: 6603354719

external temperatures (from 218 to 298K, from 298 to 348K, from 348 to 298K, from 298 to 218K).

Fig. 5 shows the example results of the  $\Omega_{\text{zd}}$  correction performed in accordance with dependence (2) with the external temperature varying from 218 to 298 K. From the results presented in the table and in Fig. 5, it becomes obvious that the proposed correction method  $\Omega_{\text{zd}}$  reduces the error caused by the thermal skid effect up to  $10^3$  times.

## CONCLUSION

For ZLG sensors K-4M and K-5M, a temperature correction of zero drift was carried out at a rate of change of external temperature of  $0.3$  °/min. ZLG operate with one gas-discharge gap in each sensor half filled with a 50% mixture of the  $\text{Ne}^{20}$ ,  $\text{Ne}^{22}$  and  $\text{He}^4$  isotopes. When developing the temperature correction algorithm, the effect of the self-heating of ZLG was divided into the effect caused by heating of the coils of a non-reciprocal device, and the effect caused by a change in the external temperature in the heat and cold chamber.

For the first time, it was proposed to describe the processes occurring in the heat and cold chamber, the so-called external heating of the device, using the derivative of the temperature difference of the temperature sensor readings from a non-reciprocal device coil ( $\Delta T_2/dt$ ). Thus, the method of temperature correction of zero drift using two temperature sensors proposed in the work allows improving the accuracy characteristics of ZLG up to  $10^3$  times with changing external temperatures and self-heating.

## REFERENCES

1. **Azarova V. V., Golyaev YU. D., Savel'ev I. I.** Zeeman laser gyroscopes. *Quantum Electronics*. 2015; 45(2): 171–179. DOI: 10.1070/QE2015v045n02ABEH015539.
2. **Grew K. E., Ibbs T. L.** *Thermal diffusion in gases*. Cambridge Univ. Press. 1952. RuMoRGB.
3. **Suhanov S. V.** Algoritmy kompensacii pogreshnostej vyhodnogo signala lazernogo giroskopa. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo*. 2011; 3–4:134–140.
4. **Han Jeong Youp, Son Seong Hyun.** The compensation method for thermal bias of ring laser gyro. Proceedings of LEOS. 2008. 21-st Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, Acapulco. 2008; 723–724. DOI: 10.1109/LEOS.2008.4688823.
5. **Geng Li, Fei Wang, Guangzong Xiao, Guo Wei, Pengfei Zhang, Xingwu Long.** Temperature compensation method using readout signals of ring laser gyroscope. *Opt. Express*. 2015; 23(10): 13320–13332. DOI: 10.1364/OE.23.013320.

## ABOUT AUTHORS

Medvedev Aleksey Aleksandrovich, alexdyn92@yandex.ru, Polyus Research Institute of M. F. Stelmakh JSC; Specialist in inertial navigation and laser gyroscope, Moscow, Russia.  
ORCID id: 0000-0002-7308-1839.

Grushin Mikhail Evgenievich, Cand. of Science (Phys. & Math.), mihail.grushin1968@gmail.com, Polyus Research Institute of M. F. Stelmakh JSC (Moscow); Specialist in gas discharge physics, plasma chemistry, plasma medicine and inertial navigation and laser gyroscope, Moscow, Russia.  
SCOPUS id: 6603354719.

## TERA-2020

В конце лета 24–26 августа 2020 года в Томске в он-лайн формате пройдет 4-я Международная конференция «Терагерцевое и микроволновое излучение: генерация, детектирование и применение». Организаторы научного мероприятия: Томский Государственный Университет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Институт оптики атмосферы им В.Е. Зуева, Институт лазерных и информационных технологий РАН.

Конференция TERA-2020 посвящена обсуждению фундаментальных и прикладных проблем, связанных с генерацией и обнаружением терагерцевого и микроволнового излучения, а также его взаимодействием с веществом. Секции конференции будут работать в рамках направлений:

- фундаментальная физика;
- электроника;
- оптоэлектроника;
- материалы;



- источники высокоомощного излучения;
- терагерцевые системы;
- исследования в области астрономии, астрофизики и атмосферы;
- терагерцевые системы прикладного значения.

Сопредседатели конференции:

Юрий Кистенев, д.ф.-м.н., Томский Государственный Университет; Дмитрий Хохлов, член-корреспондент РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова; Александр Шкуринов, член-корреспондент РАН, Институт лазерных и информационных технологий РАН; Михаил Глявин, д.ф.-м.н., Институт прикладной физики Российской академии наук.

Контактная информация: [tera2020@gmail.com](mailto:tera2020@gmail.com).

[tera2020.tsu.ru](http://tera2020.tsu.ru)

## Енисейская фотоника – 2020



С 14 по 19 сентября 2020 года в Красноярске пройдет Всероссийская научная конференция с международным участием «Енисейская фотоника – 2020». Организаторами выступают Институт инженерной физики и радиоэлектроники (ИИФирЭ) Сибирского федерального университета (СФУ) и Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН. Организационный комитет возглавляет директор ИИФирЭ СФУ д.ф.-м.н., проф. Патрин Геннадий Семенович. Председатель программного комитета научный руководитель ФИЦ КНЦ СО РАН академик РАН Шабанов Василий Филиппович. Мероприятие будет работать по направлениям:

- спектроскопия конденсированных сред;
- когерентная оптика и лазерная физика;
- фотонные кристаллы и топологические фазы;
- нанопотоника и метаматериалы.

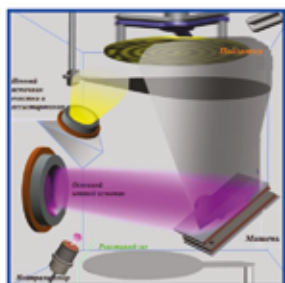
Сайт конференции: [www.conf.sfu-kras.ru/yenisey-photonics2020](http://www.conf.sfu-kras.ru/yenisey-photonics2020).

Контактная информация: [yenisey-photonics@sfu-kras.ru](mailto:yenisey-photonics@sfu-kras.ru); тел.: +7 (391) 249-74-22. E-mail: [yenisey-photonics@sfu-kras.ru](mailto:yenisey-photonics@sfu-kras.ru). Ученый секретарь конференции: к.ф.-м.н. Алексей Сергеевич Ципотан.

*д.ф.-м.н. И.В. Тимофеев, лаборатория фотоники молекулярных систем ИФ СО РАН*



## В АВАНГАРДЕ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» является крупнейшим в России научным центром в области квантовой электроники, обладает многими уникальными технологиями, в том числе предоставляет услуги по нанесению оптических покрытий.

На сегодняшний день наиболее прогрессивным и высокотехнологичным способом нанесения оптических покрытий является ионно-лучевой метод. Неоспоримыми преимуществами данного метода являются высокая адгезия покрытий, ультранизкие потери оптического излучения на рассеяние и поглощение, прецизионность и стабильность оптических параметров.

В каталоге предприятия представлены все основные виды оптических покрытий: просветляющие покрытия (включая широкополосные), высоко-отражающие зеркала с ультранизкими потерями, поляризаторы (включая с высокой лучевой стойкостью), фильтры, параметрические и светоделительные покрытия.

Точные расчеты оптических характеристик и отлаженные технологии напыления позволяют изготовить продукцию любой сложности по техническому заданию заказчика.

АО «НИИ «ПОЛЮС» ИМ. М.Ф. СТЕЛЬМАХА»  
г. Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1

Телефон: +7 (495) 333-91-44

E-mail: [bereg@niipolyus.ru](mailto:bereg@niipolyus.ru)

[www.polyus.info](http://www.polyus.info)