

◆ В ПОМОЩЬ ИССЛЕДОВАТЕЛЮ И РАЗРАБОТЧИКУ ◆

УДК 531.383:681.78
EDN XZOJDB

Д. А. ЕГОРОВ, Р. Л. НОВИКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ h -ПАРАМЕТРА КАТУШКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

В статье описываются результаты исследования зависимости h -параметра катушек волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) от температуры. Показано, что термозависимость h -параметра катушки ВОГ имеет разную природу в диапазонах отрицательных и положительных температур. Отмечается, что при работе в широком температурном диапазоне серьезно ограничить точность ВОГ может поляризационный эффект. Предлагаются способы его устранения.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, h -параметр.

Введение

Широкое применение ВОГ в системах навигации и управления движением во многом обусловлено высокими точностными характеристиками при относительно небольших массе, габаритах и стоимости [1]. К примеру, величина смещения нулевого сигнала для прецизионных датчиков различных российских и зарубежных фирм варьируется от 10^{-2} до $5 \cdot 10^{-4}$ град/ч [2–8]. В то же время даже лидеры отрасли пока не вполне приблизились к предельной точности этих приборов, что позволяет прогнозировать продолжение активных исследований и разработок в этой области.

Один из факторов, ограничивающих сегодня точность ВОГ, – поляризационный эффект в различных его элементах, прежде всего в чувствительной катушке и фазовом модуляторе на ниобате лития [9–20]. Этот эффект представляет собой рассогласование состояния поляризации интерферирующих световых волн под действием неоднородностей в оптическом волокне, создающих в нем слабую механическую анизотропию со случайной в общем случае ориентацией главных осей напряжения. Его наличие ведет к появлению сигнала, не связанного с вращением гироскопа, что вызывает смещение нуля даже при неизменных условиях окружающей среды [12]. Как показано в [9], подавление этого эффекта возможно за счет использования поля-

Егоров Дмитрий Александрович. Ведущий инженер, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Новиков Роман Леонидович. Кандидат технических наук, научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

ризатора. Однако коэффициент экстинкции существующих поляризаторов на много порядков ниже требуемого чтобы обеспечить при подавлении навигационный класс точности ВОГ [21].

В связи с этим в современных ВОГ для борьбы с поляризационным эффектом применяется специальное двулучепреломляющее (ДЛП) волокно и широкополосный источник света. ДЛП-волокно обладает сильной заданной анизотропией, благодаря которой линейно-поляризованное излучение, введенное в одну из двух осей двулучепреломления, сохраняется по всей его длине. Вместе с тем необходимо отметить, что в реальных световодах даже при такой конфигурации возникают поляризационные преобразования, которые происходят в результате взаимной перекачки оптической мощности излучения между основным состоянием поляризации (т.е. осью, в которую ввели световую волну) и ортогональным на вышеуказанных неоднородностях. Это несколько ослабляет требования к поляризатору, однако существенного снижения влияния поляризационных эффектов на выходной сигнал можно добиться только с помощью широкополосного источника. Его используют для того, чтобы хорошую видность интерференционной картины давали только световые волны, имеющие близкие значения фазового набега (таковые в первую очередь обусловлены вращением гироскопа). Так как в ортогональных осях ДЛП-волокна эффективный показатель преломления разный и, как следствие, между волнами, распространяющимися по ним, непрерывно будет нарастать разность фаз (типичное значение – 2π на каждых 3 мм), то в большинстве случаев две волны – первичная и та, что преобразовалась из ортогональной оси, – не будут интерферировать и создавать паразитный сигнал.

То же касается и встречных паразитных волн, если они возникли на неоднородностях, разница оптических путей от которых до разветвителя превышает так называемую длину деполяризации (отношение квадрата длины волны источника излучения к ширине его спектра и величине двулучепреломления волокна). В противном случае они будут способны интерферировать, но только между собой. Паразитная разность фаз, возникающая при этом, зависит от интенсивности преобразования поляризации света на участке световода с длиной, равной длине деполяризации [21]. Сама эта интенсивность пропорциональна величине, которая характеризует способность оптического волокна сохранять поляризацию на всем его протяжении, – h -параметру. Как показано в работе [21], при типичном для него значении от $1 \cdot 10^{-5}/\text{м}$ до $3 \cdot 10^{-5}/\text{м}$ и достаточно распространенных для ВОГ средней точности значениях параметров источника излучения, поляризатора, а также стыковочного узла фазового модулятора с чувствительной катушкой поляризационная фазовая погрешность составит порядка 10^{-7} рад. Например, в гироскопе с диаметром катушки 180 мм и длиной волокна 1,5 км она приводит к постоянному смещению нуля около $0,05^\circ/\text{ч}$ (согласно известной формуле Саньяка, приведенной, например, в [21] и других работах). Однако непостоянство влияющих на эту величину внешних факторов вызовет долговременный дрейф сигнала. В связи с этим вопрос снижения зависимости этих характеристик от тех или иных воздействий является очень важным.

В рамках настоящей работы будет рассмотрен только h -параметр катушки. Численно он равен доле мощности оптического излучения, которая преобразовалась из основной поляризационной оси в ортогональную и приведена к единице длины. h -параметр зависит от свойств упомянутых ранее неоднородностей, которые можно разделить на две группы.

К первой относятся собственные неоднородности оптического волокна, обусловленные несовершенством технологии изготовления световода. Нарушения геометрии опорных кварцевых труб, недостатки технологии производства из них заготовок-преформ и вытяжки из последних оптического волокна приводят к дефектам его структуры. Флуктуации показателя преломления и скрутка волокна вокруг своей оси, вызванные этими дефектами, в конечном счете влекут за собой увеличение h -параметра.

Вторая группа причин связана с конструкцией и особенностями изготовления чувствительной катушки ВОГ. Она формируется путем специальной намотки [13, 21] оптического волокна на каркас или разборную оснастку (в случае бескаркасного варианта). На h -параметр это влияет следующим образом:

1) как показано в [12], его значение увеличивается с уменьшением диаметра намотки, поскольку усиливается индуцированное двулучепреломление, связанное с изгибом волокна под натяжением;

2) большинство используемых методов намотки предполагают наличие в структуре катушки локальных участков с микроизгибом световода, характеризующихся повышенным уровнем преобразования поляризации [20];

3) дефекты намотки, также характеризующиеся локальным микроизгибом волокна, часто возникают по причине его собственной кривизны, нестабильности диаметра и величины натяжения, а также других недостатков процесса намотки;

4) наконец, как показано в работе одного из авторов текущей статьи [18], сама величина натяжения влияет на уровень h -параметра.

Изменчивость характеристик световода определяется факторами среды, в которой его применяют: ударами, вибрацией, давлением и т.д. При этом важнейшее место среди них занимает температура, которая, во-первых, имеет большое значение практически при любом применении ВОГ (в силу этого в ряде случаев прибегают к термостатированию навигационных приборов), во-вторых, влияет на характеристики не только волоконной катушки, но и других элементов гироскопа.

В [14] показано, что при повышении температуры от -40°C до $+40^{\circ}\text{C}$ растет и величина h -параметра. В ходе исследования использовалось двулучепреломляющее волокно типа PANDA длиной 350 м, которое было смотано в свободную бухту без связующего компаунда.

Авторы [19, 22], наоборот, получили резкий рост величины h -параметра при охлаждении световода от комнатной температуры до -70°C – на два-три порядка для разных образцов. При этом аналогичный эксперимент на нагрев также от комнатной температуры, но до $+70^{\circ}\text{C}$ привел лишь к незначительному его изменению. Исследовались несколько образцов оптического волокна типа Tiger-Eye (с напрягающей эллиптической оболочкой) и один типа Bow-Tie – все по 10 м длиной.

Чувствительные катушки ВОГ навигационного класса точности имеют сравнительно большую длину оптического волокна (от 1 км и более), каркас и пропиточный компаунд в своем составе. Это означает композитную структуру со сложным характером модификации механических и оптических свойств в условиях изменения температуры. Таким образом, выявление закономерностей в характере изменения h -параметра подобного типа катушек – важная и актуальная задача, которой в литературе не было уделено должного внимания.

В настоящей работе исследуется температурная зависимость величины h -параметра чувствительных катушек ВОГ.

Описание эксперимента

Объектом изучения стали чувствительные катушки ВОГ, изготовленные из волокна типа Tiger-Eye с эллиптической напрягающей оболочкой производства АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Были задействованы четыре образца световода длиной по 1,5 км каждый и один длиной 3 км.

Вначале каждый из них был намотан на каркас из кварцевой керамики без использования пропиточного компаунда (образцы №№1–5). Идея этой части эксперимента состояла в проверке гипотезы, что температурное расширение и сжатие каркаса со столь малым температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) ($0,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$) и достаточно большим диаметром (около 170 мм) не оказывает существенного воздействия на характеристики волокна (при условии намотки с минимальной величиной натяжения). Исходя из этого, измеренный у такой катушки h -параметр (а также его температурную чувствительность) можно использовать для анализа влияния на него других факторов.

Затем четыре образца и половина длины пятого были перемотаны на аналогичные каркасы, но уже с применением силиконового связующего компаунда (образцы №№1*–5*). Из оставшейся половины пятого образца изготовили бескаркасную катушку (образец №5**), для того чтобы оценить, как сказывается наличие (или отсутствие) каркаса на температурной чувствительности h -параметра катушки при наличии в ее составе компаунда.

Намотка во всех случаях производилась с одинаковой величиной натяжения (10 г), чтобы исключить влияние этого фактора на результаты эксперимента. Выбранное значение, как показано в работе [18], соответствует наименьшей величине h -параметра при прочих равных условиях.

Измерение h -параметра производилось методом скрещенных поляризаторов согласно схеме, показанной на рис. 1. Катушка помещалась в термокамеру, концы волокон были выведены наружу.

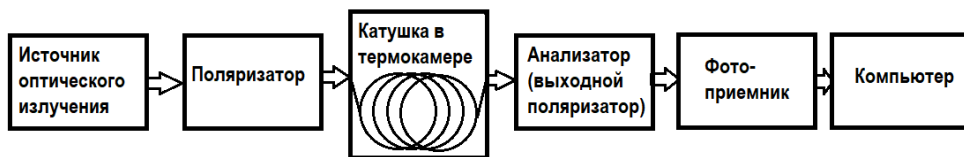


Рис. 1. Схема измерения h -параметра и его температурной зависимости

Методика измерений вкратце заключалась в следующем. Световой пучок от источника оптического излучения (линейно-поляризованное с помощью поляризатора) вводится в одну из поляризационных осей двулучепреломляющего волокна катушки, далее с помощью анализатора (на выходе катушки) и фотоприемника определяется, какая доля оптического излучения в результате поляризационно-модовых преобразований перетекает в другую моду (паразитную). По полученным данным оценивается величина h -параметра при различных значениях температуры, устанавливаемой в термокамере.

Температура изменялась в следующей последовательности: $+23^\circ\text{C}$, 0°C , -25°C , -30°C , -35°C , -40°C , 0°C , $+23^\circ\text{C}$, $+35^\circ\text{C}$, $+40^\circ\text{C}$, $+45^\circ\text{C}$, $+50^\circ\text{C}$. Перед каждым измерением h -параметра при заданном значении температуры катушка выдерживалась около часа.

Температуры, кроме нулевой и комнатной, были выбраны исходя из того, что в этих диапазонах зависимость h -параметра сравнительно неплохо линейризуется. В диапазоне от -20°C до $+30^{\circ}\text{C}$ изменений происходит мало, и они имеют существенно нелинейный характер.

Результаты эксперимента

На рис. 2 приведен график зависимости h -параметра от температуры для оптических волокон, которые были намотаны на каркас без использования компаунда. Можно заметить, что у образцов №4 и 5 поляризационные свойства существенно не меняются в заданном диапазоне. Наличие оптического волокна с таким характером зависимости подтверждает гипотезу, сформулированную выше. Что касается остальных образцов, то в области отрицательных температур их h -параметр увеличивается заметнее, чем в области положительных (от 2 до 5 раз). При этом разница в разбросе значений при температурах -40°C и $+50^{\circ}\text{C}$ невелика.

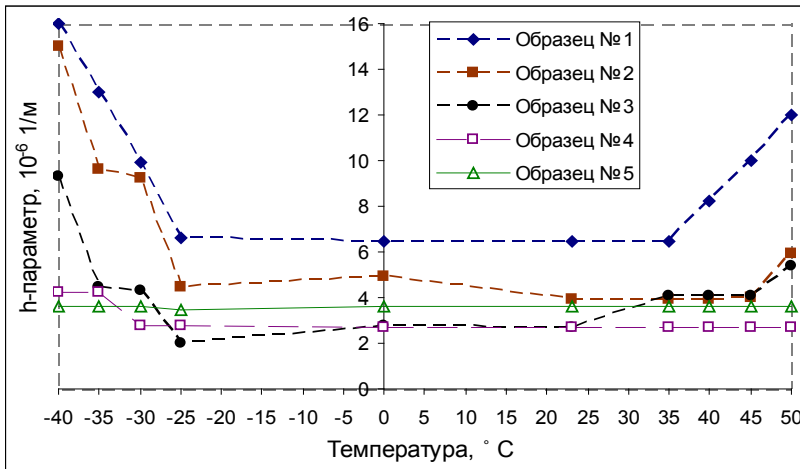


Рис. 2. Графики температурной зависимости h -параметра световода на каркасе без компаунда

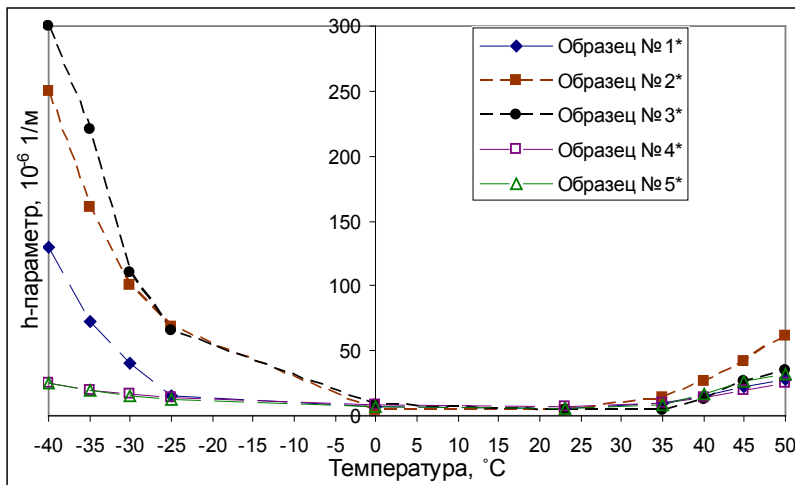


Рис. 3. Графики температурной зависимости h -параметра световода чувствительной катушки на каркасе с компаундом

Для волоконных контуров, включающих и каркас, и компаунд, температурная чувствительность заметно изменилась. Как видно из рис. 3, у образцов с первого по третий при отрицательных температурах она много больше, чем при положительных, а для образца №3 при -40°C h -параметр принимает максимальное значение, что означает потерю им свойства сохранять линейное состояние поляризации.

Особое внимание снова привлекли образцы 4* и 5* (рис. 3 и 4): их h -параметр также стал изменяться. Однако если при положительных температурах они теперь мало отличаются от других контуров, то при отрицательных зависимость все же оказывается заметно слабее.

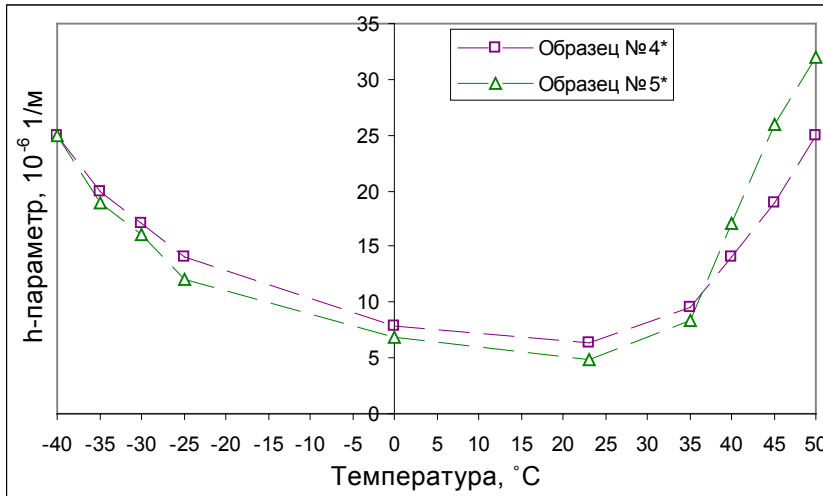


Рис. 4. Графики температурной зависимости h -параметра световода чувствительной катушки на каркасе с компаундом для образцов 4* и 5* (увеличено)

В табл. 1 представлена чувствительность h -параметра катушек к температуре до и после намотки. Она была оценена путем нахождения тангенсов углов наклона отрезков, полученных с помощью линейной аппроксимации данных в диапазонах $(-40 \dots -25)^{\circ}\text{C}$ и $(+35 \dots +50)^{\circ}\text{C}$. Как видно, между значениями без компаунда и с компаундом отсутствует корреляция.

Таблица 1

Оценка чувствительности h -параметра оптического волокна к температуре и ее изменению в зависимости от наличия компаунда

№ образца	Оценка чувствительности, $10^{-6}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$			
	в диапазоне $(-40 \dots -25)^{\circ}\text{C}$		в диапазоне $(+35 \dots +50)^{\circ}\text{C}$	
	без компаунда	с компаундом	без компаунда	с компаундом
1	0,61	9,00	0,37	1,23
2	0,58	12,06	0,12	3,12
3	0,44	16,24	0,08	2,17
4	0,01	0,84	0,00	1,60
5	0,11	0,72	0,00	1,02

Напомним, что один из отрезков оптического волокна имел длину 3 км (образец №5), при этом из одной его половины изготовили контур на каркасе (образец №5*),

из второй – бескаркасный контур (образец №5**). На рис. 5, где температурные зависимости h -параметра всех трех образцов сравниваются между собой, видно, что при положительных температурах компаунд существенно деформирует световод только при наличии каркаса, который препятствует его тепловому расширению. В то же время при отрицательных температурах наличие или отсутствие каркаса не влияет существенным образом на форму зависимости h -параметра – она обусловлена только влиянием компаунда и собственными свойствами волокна.

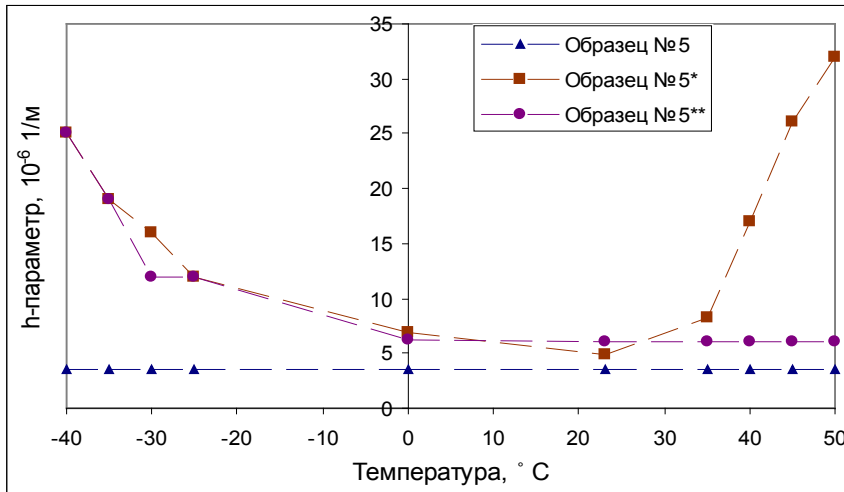


Рис. 5. Графики температурной зависимости h -параметра световода чувствительной катушки на каркасе без компаунда, на каркасе с компаундом и без каркаса (с компаундом)

Полученные к настоящему времени результаты исследований не дают ясного ответа на вопрос, какие именно факторы, связанные с технологией изготовления световода, влияют на его поляризационные свойства. К примеру, образцы 4 и 5 имеют полимерное покрытие, несколько отличное от образцов 1–3. Вместе с тем, согласно последующей статистике, применение этого перспективного материала при изготовлении оптического волокна далеко не всегда демонстрировало такие же хорошие результаты, как описанные в настоящей работе.

Эта комплексная задача требует дальнейшего скрупулезного изучения с анализом всех технических и технологических параметров – начиная от обработки опорной кварцевой трубы и заканчивая перемоткой готового световода на намоточной машине.

Заключение

Проведенные исследования показали, что термозависимость h -параметра чувствительной катушки ВОГ имеет разную природу при отрицательных и положительных температурах. В диапазоне отрицательных температур она обусловлена собственными механическими свойствами световода, полученными в ходе его изготовления, а также влиянием пропиточного компаунда. Первый фактор вызван неоднородностями оптического волокна, связанными с несовершенством технологии изготовления световода, в результате чего меняется анизотропия напряжения в его сердцевине. Кроме того, у полимерного покрытия ТКЛР больше, чем у самого волокна, что приводит к сжатию последнего. К качественному усилению этого эффек-

та приводит пропитка волоконной катушки компаундом. Так, для некоторых отрезков h -параметр возрастал почти до своего максимального значения при температуре -40°C , и даже у лучшего образца, который не был чувствителен к температуре в «свободном» состоянии, он увеличился в четыре раза.

В области положительных температур изменение h -параметра, вероятно, происходит вследствие того, что каркас препятствует тепловому расширению компаунда, а тот в свою очередь начинает деформировать волокно. При этом свойства последнего имеют в данном случае существенно меньшее влияние, в силу чего при температуре $+50^{\circ}\text{C}$ наблюдается заметно меньшая разница h -параметра у разных образцов, чем при -40°C .

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что точность ВОГ при работе в широком температурном диапазоне (например, от -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$) серьезно ограничивается не только хорошо изученным упруго-оптическим, но и поляризационным эффектом, также проявляющимся в чувствительной катушке. Для борьбы с этим необходимо, во-первых, использовать качественное оптическое волокно с h -параметром, по возможности нечувствительным или малочувствительным к температуре. Для этого важно детально проанализировать влияние особенностей технологического процесса изготовления световода на его характеристики с целью поиска ключевых факторов снижения температурной чувствительности h -параметра. Во-вторых, компаунд должен иметь минимальный ТКЛР, однако здесь нужно учесть влияние других его характеристик, например модуля Юнга и коэффициента температуропроводности, в том числе и на упомянутый упруго-оптический эффект. В-третьих, требуется либо модернизировать конструкцию каркаса, с тем чтобы минимизировать температурную деформацию катушки, либо вовсе исключить каркас (применить бескаркасную технологию изготовления чувствительной катушки ВОГ).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г.** Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №2 (109). С. 3–10. DOI 10.17285/0869-7035.0028.
2. **Лефевр Э.К.** Волоконно-оптический гироскоп: достижения и перспективы // Гироскопия и навигация. 2012. №4 (79). С. 3–9.
3. **ООО НПК «Оптолинк».** [Электронный ресурс]. URL: <http://www.optolink.ru>. Дата последнего обращения: 21.09.2023.
4. **Филиал АО «ЦЭНКИ» – НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.russian.space/filialy/nii-pm.html>. Дата последнего обращения: 21.09.2023.
5. **KVH Industries, Inc.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kvh.com>. Дата последнего обращения: 21.09.2023.
6. **Cielo inertial Solutions Ltd.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cielo-inertial.com>. Дата последнего обращения: 21.09.2023.
7. **Exail Company.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.exail.com>. Дата последнего обращения: 21.09.2023.
8. **Унтилов А.А., Егоров Д.А., Рупасов А.В., Новиков Р.Л., Нефоросный С.Т., Азбелева М.П., Драницына Е.В.** Результаты испытаний волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №2 (109). С. 78–85. DOI 10.17285/0869-7035.2017.25.3.078-085.
9. **Ulrich, R.,** Polarization and Depolarization in the Fiber-Optic Gyroscope, S. Ezekiel et al. (eds.), *Fiber-Optic Rotation Sensors and Related Technologies*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1982. P. 52–77.
10. **Kaminow, I.P.,** Polarization-maintaining fibers, *Applied Scientific Research*, 1984, vol. 41, no. 3–4, pp. 257–270, doi: 10.1007/BF00382456.
11. **Shute Sr., M.W., Brown, C.S., Jarzynski, J.,** Polarization model for a helically wound optical fiber, *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, vol. 14, no. 12, pp. 3251–3261.

12. **Малыкин Г.Б., Позднякова В.И.** Поляризационные эффекты в кольцевых интерферометрах. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 2008. 208 с.
13. **Jia, M., Yang, G.,** Research of optical fiber coil winding model based on large-deformation theory of elasticity and its application, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2011, vol. 24, no. 5, pp. 640–647.
14. **Ding, Z., Meng, Z., Yao, X.S., Chen, X., Liu, T., Qin, M.,** Accurate method for measuring the thermal coefficient of group birefringence of polarization-maintaining fibers, *Optics Letters*, 2011, vol. 36, no. 11, pp. 2173–2175.
15. **Аксарин С.М., Архипов С.В., Варжель С.В., Куликов А.В., Стригалева В.Е.** Исследование зависимости параметров анизотропных одномодовых волоконных световодов от диаметра намотки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6 (88). С. 22–26.
16. **Шрамко О.А., Рупасов А.В., Новиков Р.Л., Аксарин С.М.** Метод исследования зависимости h -параметра анизотропного световода от радиуса изгиба // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1 (89). С. 26–31.
17. **Аксарин С.М.** Исследование поляризационных методов и технологий согласования волоконно-оптических и интегрально-оптических волноводов: диссертация ... к. ф.-м. н. СПб., 2014. 116 с.
18. **Мухтубаев А.Б., Аксарин С.М., Стригалева В.Е., Новиков Р.Л.** Исследование влияния намотки анизотропных оптических волокон с различной величиной натяжения на степень сохранения h -параметра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 5. С. 803–808. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-5-803-808.
19. **Мухтубаев А.Б., Аксарин С.М.** Исследование h -параметра анизотропного оптического волокна при температурном воздействии // Материалы XX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 246–248.
20. **Мухтубаев А.Б.** Влияние поляризационных преобразований на сдвиг фазы Саньяка в волоконно-оптическом гироскопе: диссертация ... к. т. н. СПб., 2020. 202 с.
21. **Lefevre, H.C.,** The Fiber Optic Gyroscope, 3rd ed. Norwood: Artech House Publishers, 2022, 512 p.
22. **Мухтубаев А.Б., Аксарин С.М., Калугин Е.Э.** Влияние значения температуры на величину h -параметра в двулучепреломляющих волокнах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 21–26. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-21-26.

Egorov, D.A., and Novikov, R.L. (Concern CSRI Elektropribor, JSC; St. Petersburg, Russia).

Studying the temperature dependency of h -parameter of the fiber-optic gyroscope coil, *Гироскопия и Навигация*, 2023, vol. 31, no. 4 (123), pp. 206–214.

Abstract. *The paper studies the temperature dependency of h -parameter of the fiber-optic gyroscope (FOG) coil. It has been shown that the thermal dependency of h -parameter behaves differently in positive and negative temperature ranges. It is noted that the polarization effect can severely limit the FOG accuracy in a broad temperature range. Ways to eliminate the polarization effect are proposed.*

Key words: fiber-optic gyroscope, h -parameter.

Материал поступил 19.10.2023