

УДК 535-45

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-507-514

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕГО ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА СДВИГ ФАЗЫ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ САНЬЯКА

А.Б. Мухтубаев, С.М. Аксарин, А.Н. Никитенко, И.Г. Дейнека, А.С. Алейник

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация  
 Адрес для переписки: Mukhtubaev.ab@gmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 18.05.20, принята к печати 30.06.20  
 Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Мухтубаев А.Б., Аксарин С.М., Никитенко А.Н., Дейнека И.Г., Алейник А.С. Исследование влияния внешнего относительного давления на сдвиг фазы в интерферометре Саньяка // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 4. С. 507–514. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-507-514

### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследовано влияние изменения относительного давления на величину  $H$ -параметра в двулучепреломляющем оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой ESC-4 и в контуре Саньяка диаметром 140 мм и длиной 700 м. Также проанализировано влияние изменения относительного давления на сдвиг фазы в интерферометре Саньяка. **Метод.** Для оценки  $H$ -параметра применен метод широкополосной интерферометрии. Использован поляризационный сканирующий интерферометр Майкельсона с широкополосным источником с центральной длиной волны 1560 нм и полушириной спектра 45 нм. Относительное давление изменялось в специальной барокамере в диапазоне от  $-80$  кПа до  $+300$  кПа. **Основные результаты.** Выявлено, что при изменении относительного давления возникают случайные скачки фазы в интерферометре Саньяка. При нормальных условиях такие случайные скачки фазы не наблюдаются. Также показано, что влияние повышенного относительного давления на сдвиг фазы Саньяка более ярко выражено, чем влияние пониженного относительного давления: частота скачков фазы больше в случае повышенного относительного давления. **Практическая значимость.** Анализ результатов исследования акцентирует внимание на задаче качественной намотки и укладки двулучепреломляющего оптического волокна в контуре Саньяка, что позволит повысить точностные характеристики волоконно-оптических датчиков на основе интерферометров Саньяка.

### Ключевые слова

оптическое волокно, двулучепреломление,  $H$ -параметр, относительное давление, интерферометр Саньяка, фаза Саньяка

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-507-514

## EFFECT OF EXTERNAL RELATIVE PRESSURE ON PHASE SHIFT IN SAGNAC INTERFEROMETER

A.B. Mukhtubaev, S.M. Aksarin, A.N. Nikitenko, I.G. Deyneka, A.S. Aleinik

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation  
 Corresponding author: Mukhtubaev.ab@gmail.com

### Article info

Received 18.05.20, accepted 30.06.20  
 Article in Russian

**For citation:** Mukhtubaev A.B., Aksarin S.M., Nikitenko A.N., Deyneka I.G., Aleinik A.S. Effect of external relative pressure on phase shift in Sagnac interferometer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 507–514 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-507-514

### Abstract

**Subject of Research.** The paper considers the effect of a relative pressure change on the  $H$ -parameter value in a birefringent optical fiber with ESC-4 elliptical straining cladding and in Sagnac coil with 140 mm diameter and 700 m length. We analyze the effect of a relative pressure change on the phase shift in Sagnac interferometer. **Method.** The broadband interferometry method was used for the  $H$ -parameter estimation. Michelson polarizing scanning interferometer with a broadband source with a 1560 nm central wavelength and a 45 nm bandwidth was applied. The relative pressure was varied in a special pressure chamber in the range from  $-80$  kPa to  $+300$  kPa. **Main Results.** It is found out that when the relative pressure changes, random phase jumps occur in Sagnac interferometer. Such random phase jumps are

not observed under normal conditions. It is also shown that the effect of increased relative pressure on Sagnac phase shift is more pronounced than the effect of reduced relative pressure; the frequency of phase jumps is greater in case of increased relative pressure. **Practical Relevance.** Analysis of research results is focused on the problem of high-quality winding and laying of birefringent optical fiber in Sagnac coil, which will improve the accuracy characteristics of fiber-optic sensors based on Sagnac interferometers.

#### Keywords

optical fiber, birefringence,  $H$ -parameter, relative pressure, Sagnac interferometer, Sagnac phase

### Введение

Активное развитие и совершенствование элементной базы привели к широкому распространению волоконно-оптических датчиков интерферометрического типа в различных отраслях промышленности. Такие волоконно-оптические датчики отличаются высокой чувствительностью и точностью, поскольку регистрируют, в отличие от датчиков амплитудного типа, сдвиг фазы между двумя оптическими волнами. Одним из таких датчиков является датчик угловой скорости, принцип действия которого основан на эффекте Саньяка [1]. Чувствительным элементом датчика является замкнутый волоконно-оптический контур, который образует интерферометр Саньяка (ИС), представляющий собой многослойную со специальной намоткой катушку с оптическим волокном. ИС регистрирует сдвиг фазы Саньяка — сдвиг фазы между двумя встречно распространяющимися оптическими волнами, обусловленный вращением интерферометра. Чаще всего в ИС используют двулучепреломляющее (ДЛП) оптическое волокно [1, 2]. В реальных условиях имеются неоднородности в двулучепреломлении таких волокон, вызванные различными внешними факторами и неидеальностью структуры волокна. На таких неоднородностях возникают преобразования поляризации распространяющегося оптического излучения, которые, в свою очередь, приводят к сдвигу фазы в ИС. Распределенные поляризационные преобразования в ДЛП волокнах характеризуются  $H$ -параметром [1, 3, 4]. Одним из внешних параметров, способным оказывать значительное влияние на сдвиг фазы Саньяка, является атмосферное давление, а именно, его изменение [1].

Изменение атмосферного давления приводит к механическим деформациям тела контура ИС, что может приводить к случайному смещению витков оптического волокна и, в свою очередь, к случайному локальному сдвигу фазы распространяющегося по ДЛП волокну оптического излучения. Поскольку контур ИС представляет собой многослойную катушку из ДЛП оптического волокна, витки которого скреплены между собой полимерным компаундом [5–7] и намотаны на твердый каркас, то такая конструкция, подвергаясь воздействию внешних факторов (температуры и давления) становится неустойчивой и испытывает механические деформации [8–10] вследствие изменения внешних условий. Одним из оптических способов оценки влияния внешних условий на контур является анализ распределенных поляризационных преобразований ( $H$ -параметр) в ДЛП волокне. Такой способ обладает высокой чувствительностью, поскольку даже незначительная деформация структуры кварцевой части волокна оказывает значительное влияние на степень

сохранения поляризации оптического излучения, что позволяет регистрировать малые воздействия от 0,1 Н [2], значительно превосходящее метод измерения только оптических потерь.

Цель работы состоит в оценке влияния изменения внешнего относительного давления на величину  $H$ -параметра ДЛП волокон, а также на величину сдвига фазы в интерферометре Саньяка.

### Методика проведения исследования

Для исследования влияния внешнего относительного давления на величину  $H$ -параметра и величину сдвига фазы в ИС проводились испытания с тремя экспериментальными образцами:

№1 — отрезок ДЛП оптического волокна с эллиптической напрягающей оболочкой ESC-4 [11] длиной 10 м, свернутый в свободно лежащую смотку диаметром 140 мм;

№2 — образец контура Саньяка диаметром 140 мм, изготовленным из ДЛП волокна типа ESC-4 длиной около 700 м (использовались специальный квадрупольный тип намотки и пропитка слоев контура специальным силиконовым компаундом RTV655);

№3 — интерферометр Саньяка диаметром 140 мм с контуром из ДЛП волокна типа ESC-4 длиной около 2000 м (использовались специальный квадрупольный тип намотки и пропитка слоев контура специальным силиконовым компаундом RTV655).

Для проведения испытаний по исследованию влияния изменения внешнего относительного давления на величину  $H$ -параметра для образцов №1 и №2 разработан и собран специальный экспериментальный стенд (рис. 1). Экспериментальный стенд позволяет проводить исследовательские работы в областях повышенного и пониженного давления.

Барокамера состоит из: бака, в который помещается исследуемый объект; ресивера объемом 30 л, который используется для устойчивого поддержания давления в баке; вакуумного насоса Value V-1 240SV; компрессора Vamibi BB15V (рис. 2, 3).

Для исследования влияния изменения внешнего относительного давления на величину  $H$ -параметра исследуемых образцов использовалась методика, основанная на широкополосной интерферометрии [12–14]. Линейно-поляризованное излучение (далее волновой пакет) от широкополосного источника ThorLabs S5FC1005SXL с центральной длиной волны 1560 нм и полушириной спектра 45 нм вводится в исследуемый образец в одну из поляризационных осей. На каждой неоднородности двулучепреломления в ДЛП волокне происходит перекачка оптической мощности из основной оси волокна в ортогональную. Далее два волновых

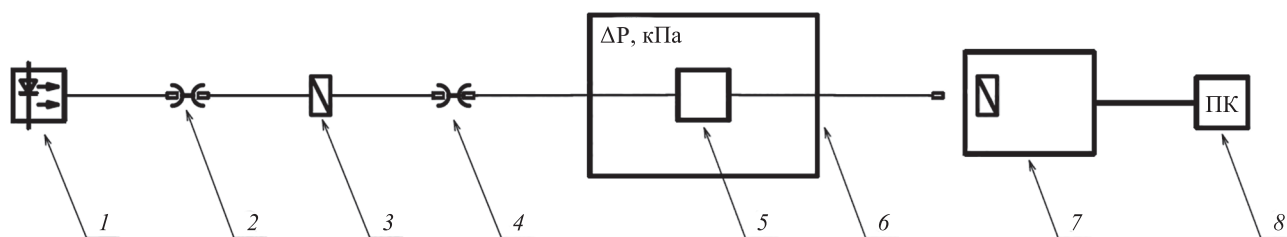


Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования влияния изменения относительного давления ( $\Delta P$ ) на величину  $H$ -параметра: 1 — широкополосный источник оптического излучения; 2, 4 — специальные оптические розетки для волокон с сохранением поляризации и для коннекторов типа FC/APC Thorlabs ADAFCPM2; 3 — волоконно-оптический поляризатор Lightcomm ILP-1\*1-X-1550-1-623-FC/APC\*2-5.5\*35-1M; 5 — исследуемый образец; 6 — барокамера; 7 — сканирующий поляризационный интерферометр Майкельсона; 8 — персональный компьютер

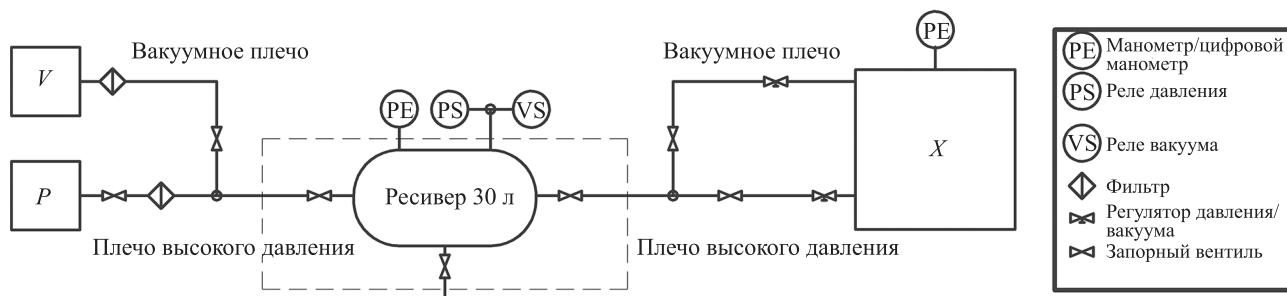


Рис. 2. Принципиальная схема барокамеры для изменения относительного давления:  $V$  — вакуумный насос;  $P$  — компрессор;  $X$  — бак



Рис. 3. Фотография барокамеры для изменения относительного давления: ресивер, вакуумный насос, компрессор (а); бак барокамеры в закрытом виде (б); бак барокамеры с образцом №2 (в)

пакета распространяются по двум ортогональным поляризационным осям. С помощью анализатора на входе в сканирующий интерферометр Майкельсона, который сориентирован к поляризационным осям образца под углом  $45^\circ$ , волновые пакеты приобретают одно состояние поляризации. При сканировании исследуемого образца смещением зеркала интерферометра компенсируется разность хода между двумя волновыми пакетами, и поскольку у них одно состояние поляризации, волновые пакеты интерферируют. Видность результата

интерференции двух волновых пакетов характеризует величину поляризационного преобразования. По среднему значению видности интерференционной картины определена величина  $H$ -параметра [1, 12]:

$$H = \frac{V_C^2}{L_d}$$

где  $V_C$  — среднее значение видности интерференционной картины;  $L_d$  — длина деполаризации исследуемого образца.

Значение длины деполаризации ДЛП волокна определялась как

$$L_d = \frac{\lambda B}{\Delta\lambda},$$

где  $\lambda$  — центральная длина волны источника оптического излучения (1560 нм);  $\Delta\lambda$  — полуширина спектра источника оптического излучения (45 нм);  $B$  — длина биений ДЛП волокна (2,6 мм).

**Результаты исследования**

Исследуемые образцы №1 и №2 помещались в барокамеру, в которой изменялось давление в следующих режимах: режим 1 — от относительного давления при нормальных условиях 0 до +300 кПа с шагом 100 кПа; режим 2 — от относительного давления при нормальных условиях 0 до -80 кПа с шагом 20 кПа.

На рис. 4 представлены полученные в ходе работы результаты исследования влияния изменения относительного давления на величину  $H$ -параметра для образцов №1 и №2.

Из полученных результатов (рис. 4) видно, что для образца №1 изменение относительного давления не приводит к существенному изменению величины  $H$ -параметра, среднее значение составляет  $8,0 \cdot 10^{-7}$  1/м. Для образца №2 величина  $H$ -параметра при нормальных условиях в 3,3 раза больше, чем у образца №1,

причем при уменьшении относительного давления величина  $H$ -параметра увеличивается до 3,9 раза. При увеличении относительного давления величина  $H$ -параметра образца №2 увеличивается до 1,4 раза.

Далее исследовалось влияние изменения относительного давления на сдвиг фазы в ИС. Для этого исследуемый образец №3 помещался в барокамеру, с помощью которой происходило изменение относительного давления. Перед проведением испытаний исследуемый образец 18 ч выдерживался в закрытой барокамере для стабилизации температуры внутри системы.

Проведены следующие испытания по влиянию изменения внешнего атмосферного давления на сдвиг фазы в ИС (рис. 5, 6).

Этап №1 — Повышенное давление (серия из трех испытаний без остановки):

- 1) примерно 1 ч при нормальных условиях;
- 2) примерно 5 ч при изменении относительного давления  $\Delta P = +75$  кПа;
- 3) примерно 18 ч при нормальных условиях;
- 4) повтор пп. 1–3 еще два раза.

Этап №2. Пониженное давление (серия из трех испытаний без остановки):

- 1) примерно 1 ч при нормальных условиях;
- 2) примерно 5 ч при изменении относительного давления  $\Delta P = -30$  кПа;
- 3) примерно 18 ч при нормальных условиях;
- 4) повтор пп. 1–3 еще два раза.

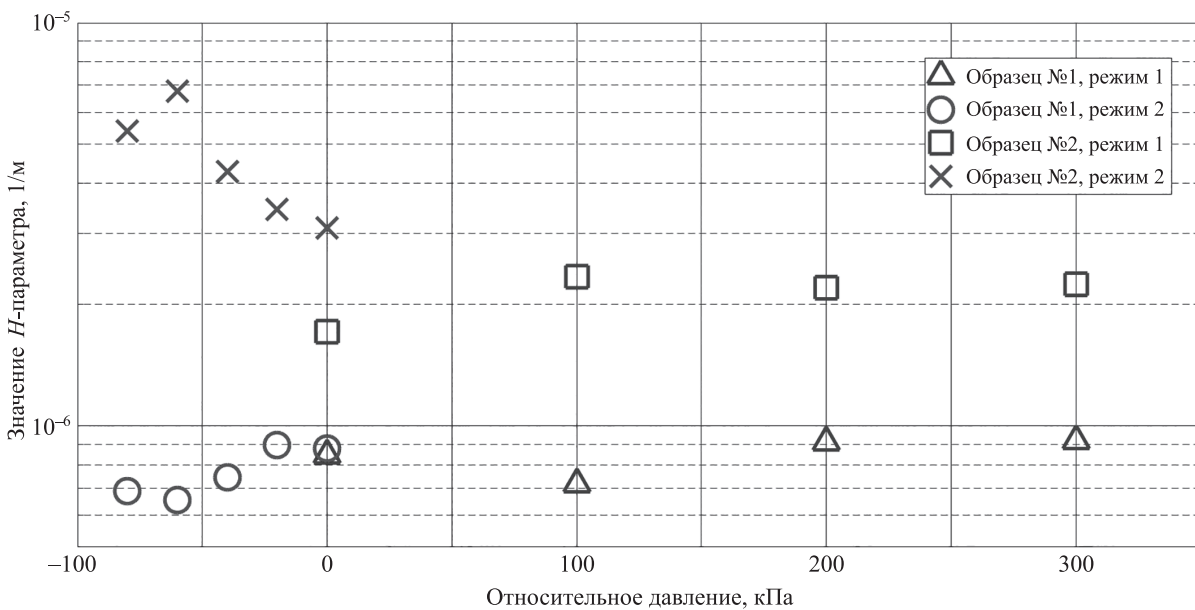


Рис. 4. Зависимость величины  $H$ -параметра от изменения относительного давления (образец №1 и №2)

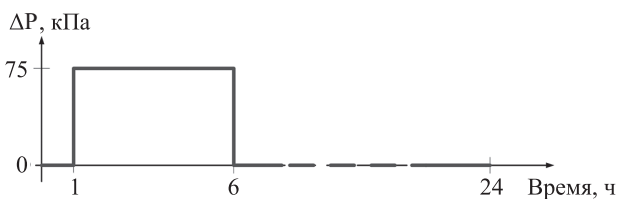


Рис. 5. График изменения относительного давления, этап №1

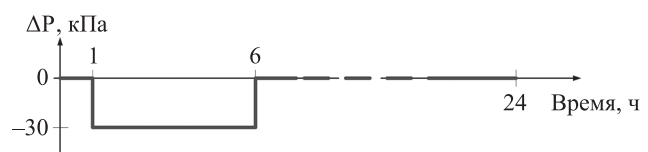


Рис. 6. График изменения относительного давления, этап №2

Во всех случаях частота сбора данных с испытываемого образца №3 составляла 100 Гц. На рис. 7, 8 приведены результаты проведенного исследования, данные усреднены по 1 с.

В таблице приведены рассчитанные значения сдвига фазы Саньяка и его среднеквадратическое отклонение (СКО). Расчет производился на отдельных временных интервалах, которые соответствовали значениям относительного давления: от 0 до 1 ч ( $\Delta P = 0$  кПа), от 1 до 6 ч ( $\Delta P_1 = +75$  кПа,  $\Delta P_2 = -30$  кПа) и от 6 до 24 ч ( $\Delta P = 0$  кПа). Значение фазы Саньяка рассчитывалось как среднее арифметическое на этих временных интервалах.

Для регистрации изменения давления внутри барокамеры на плате регистрации данных был предусмотрен датчик абсолютного давления компании Honeywell серии TruStability™ HSC, с точностью показаний в  $\pm 0,25\%$ , совмещающий в одной микросхеме дополнительно датчик температуры. На рис. 9 демонстрируются показания датчика давления, а также температура, регистрируемая этой же микросхемой.

Как видно по результатам исследования образца №3, влияние повышенного относительного давления более ярко выражено, чем влияние пониженного относительного давления: частота всплесков фазы в ИС больше в случае повышенного относительного давле-

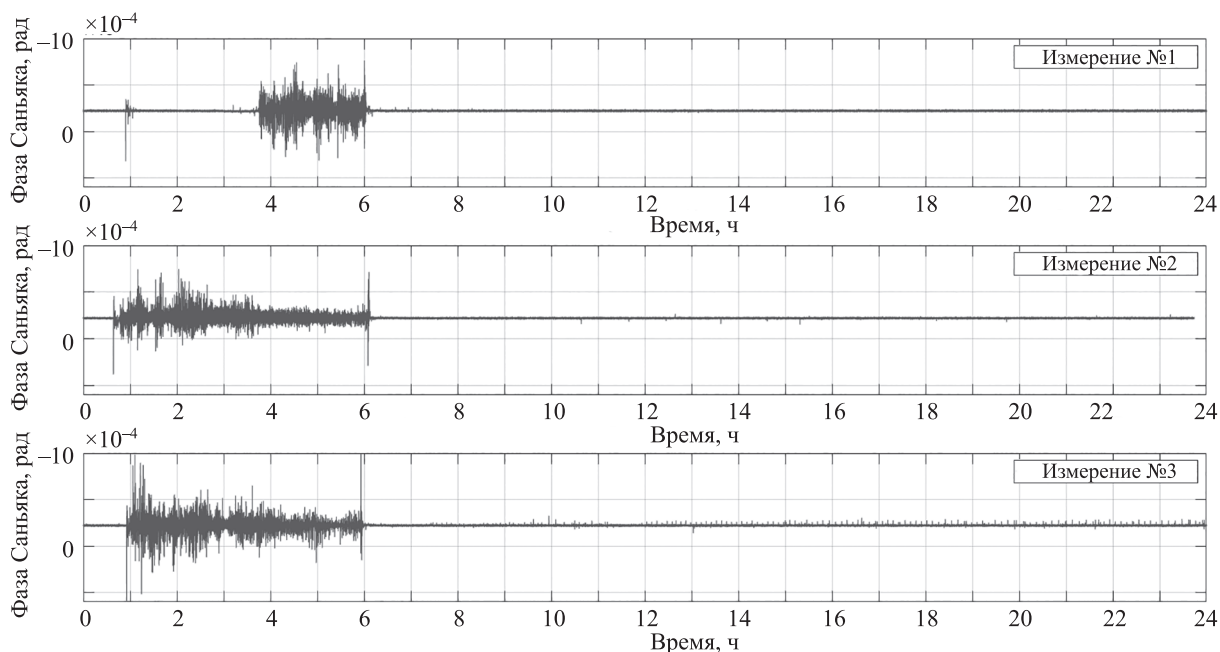


Рис. 7. Влияние изменения относительного давления на сдвиг фазы в интерферометре Саньяка, этап №1 (образец №3)

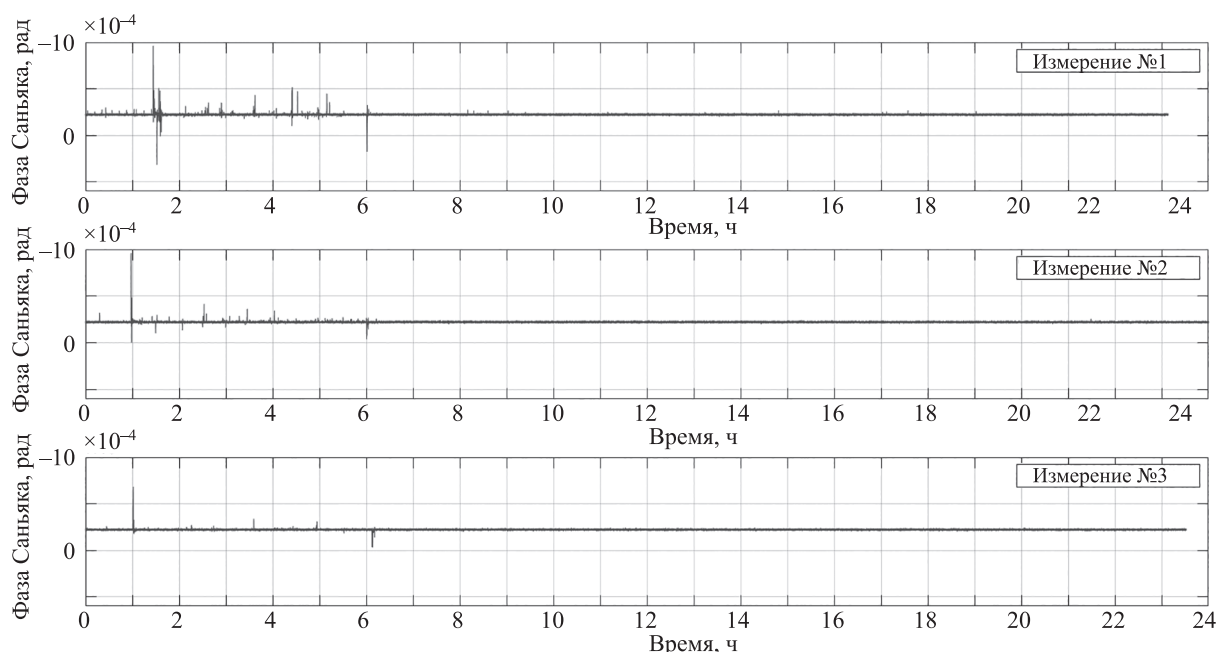


Рис. 8. Влияние изменения относительного давления на сдвиг фазы в интерферометре Саньяка, этап №2 (образец №3)

Таблица. Анализ результатов исследования влияния изменения внешнего атмосферного давления на сдвиг фазы в интерферометре Саньяка (образец №3)

Этап	Относительное давление $\Delta P$ , кПа	Фаза Саньяка (среднее значение), рад		СКО, рад	
		Среднее значение по трем измерениям, $10^{-4}$	СКО, $10^{-7}$	Среднее значение по трем измерениям, $10^{-5}$	СКО, $10^{-6}$
№1	0	2,20	27,58	1,38	13,48
	+75	2,21	8,21	4,66	3,34
	0	2,22	2,25	0,62	0,30
№2	0	2,23	0,68	0,62	0,38
	-30	2,23	5,00	1,05	6,78
	0	2,23	1,27	0,58	0,12

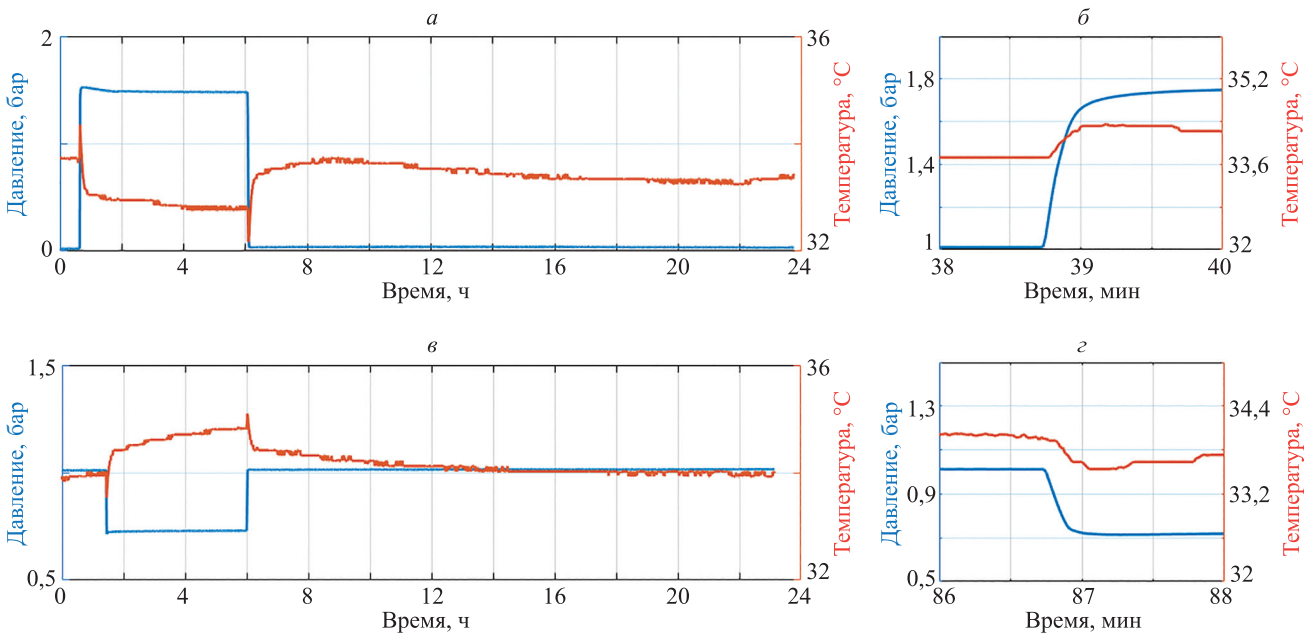


Рис. 9. Пример изменения относительного давления внутри барокамеры: повышенное давление (а); повышенное давление, увеличена область в момент подачи воздуха (б); пониженное давление (в); пониженное давление, увеличена область в момент откачки воздуха (г)

ния (рис. 7, 8). Так, среднее значение СКО при повышенном давлении составило  $4,66 \cdot 10^{-5}$  рад, тогда как до изменения давления среднее значение СКО составляло  $1,38 \cdot 10^{-5}$  рад, а после —  $0,62 \cdot 10^{-5}$  рад. При пониженном относительном давлении среднее значение СКО составило  $1,05 \cdot 10^{-5}$  рад, тогда как до изменения давления среднее значение СКО составляло  $0,62 \cdot 10^{-5}$  рад, а после —  $0,58 \cdot 10^{-5}$  рад. Однако от измерения к измерению результат не повторяется, что можно объяснить либо релаксацией механических воздействий внутри ИС в результате изменения относительного давления, либо, наоборот, их появлением.

**Заключение**

В ходе исследования выявлено, что для свободно уложенного отрезка двулучепреломляющего волокна с эллиптической напрягающей оболочкой ESC-4 с диаметром смотки 140 мм (образец №1) изменение относительного давления не приводит к существенно-

му изменению величины *H*-параметра, среднее значение составило  $8,0 \cdot 10^{-7}$  1/м. Однако, в случае контура Саньяка (образец №2), уменьшение относительного давления от 0 кПа до -80 кПа приводит к увеличению величины *H*-параметра в 3,9 раза, а при увеличении относительного давления до +300 кПа приводит к увеличению величины *H*-параметра в 1,4 раза. Причем величина *H*-параметра при нормальных условиях для образца №2 в 3,3 раза больше, чем для образца №1, что объясняется напряженным состоянием внутри волокон и между ними, вследствие намотки на каркас контура Саньяка. Такое напряжение может привести к расширению существующих пустот-пузырьков воздуха между слоями волокон, что приводит к их неустойчивому состоянию и вызывает дополнительные преобразования поляризации, ухудшающие *H*-параметр. Как показали результаты, повышенное давление в контуре Саньяка (образец №2), приводит к перераспределению напряжений внутри контура и незначительному отклонению величины *H*-параметра.

Для интерферометра Саньяка диаметром 140 мм (образец №3) можно сделать следующие выводы: при повышенном и пониженном относительных давлениях возникают случайные скачки фазы Саньяка. При нормальных условиях такие случайные скачки фазы не наблюдаются. Влияние повышенного внешнего относительного давления более ярко выражено, чем влияние пониженного относительного давления: частота скачков фазы в интерферометре Саньяка больше в случае повышенного относительного давления.

Основным фактором, влияющим на появление случайных скачков фазы в интерферометре Саньяка, по мнению авторов, является наличие воздушных пустот в контуре Саньяка, которые возникают в результате неравномерной пропитки слоев контура специальным силиконовым компаундом. Эти воздушные пустоты в зависимости от изменения относительного давления расширяются, сжимаются или резко схлопываются,

создавая точечные механические воздействия на двулучепреломляющее оптическое волокно контура Саньяка. Такие точечные механические воздействия также приводят к изменениям и перераспределениям поляризационных преобразований оптического излучения вдоль волокна, что, в свою очередь, приводит к скачкам фазы Саньяка. Поскольку количество и объем воздушных пустот в контуре случайны, то характер поведения фазы в интерферометре Саньяка становится непредсказуемым и преимущественно состоит в возникновении скачков.

Стоит отметить, что изучение влияния изменения относительного давления на интерферометр Саньяка, который используют в датчиках угловой скорости, требует дальнейших исследований, в частности, особый интерес представляет изменение характеристики температурного отклика сигнала при различных установившихся давлениях.

### Литература

1. Lefèvre H. *The Fiber-Optic Gyroscope*. Boston: Artech House, 1993. 313 p.
2. Meshkovsky I.K., Strigalev V.Y., Deineka G.B., Peshekhonov V.G., Volynsky D.V., Untilov A.A. Three-axis fiber-optic gyroscope: Development and test results // *Gyroscopy and Navigation*. 2011. V. 2. N 4. P. 208–213. doi: 10.1134/S2075108711040122
3. Аксарин С.М. Исследование поляризационных методов и технологий согласования волоконно-оптических и интегрально-оптических волноводов: диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. СПб.: НИУ ИТМО, 2014. 116 с.
4. Kaminow I.P. Polarization-maintaining fibers // *Applied Scientific Research*. 1984. V. 41. N 3–4. P. 257–270. doi: 10.1007/BF00382456
5. Cordova A. Bonded fiber optic gyro sensor coil including voids. Patent US5767970A. 1998.
6. Cordova A., Hoover R.J., McLean T., Patterson R.A., Rahn J.P. Potted gyro sensor coil with inter-turn stress relief. Patent US5742390A. 1998.
7. Новиков Р.Л. Технологическое оборудование и методы повышения качества намотки волоконного контура волоконно-оптического гироскопа: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. СПб.: НИУ ИТМО, 2014. 100 с.
8. 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
9. Mukhtubayev A.B., Aksarin S.M., Strigalev V.E. Polarization extinction ratio of the polarization crosstalk caused by point pressure force in the polarization-maintaining fiber // *Optical Fiber Technology*. 2017. V. 38. P. 119–122. doi: 10.1016/j.yofte.2017.09.010
10. Шарков И.А., Виноградов А.В., Козлов В.Н., Стригалева В.Е., Кикилич Н.Е. Влияние давления на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2017. Т. 17. № 3. С. 380–386. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-380-386
11. Буреєв С.В., Дукельский К.В., Ероньян М.А. Способ изготовления одномодовых волоконных световодов, сохраняющих поляризацию излучения. Патент RU2396580C1. Бюл. 2010. № 22.
12. Аксарин С.М., Стригалева В.Е. Методика и аппарат исследования локальных преобразований в оптических волокнах с двулучепреломлением // *Сборник тезисов докладов Конгресса молодых ученых*. Вып. 2. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. С. 44–45.
13. Martin P., Le Boudec G., Lefevre H.C. Test apparatus of distributed polarization coupling in fiber gyro coils using white light interferometry // *Proceedings of SPIE*. 1992. V. 1585. P. 173–179. doi: 10.1117/12.135045
14. Li Z., Yao X.S., Chen X., Chen H., Meng Z., Liu T. Complete characterization of polarization-maintaining fibers using distributed

### References

1. Lefèvre H. *The Fiber-Optic Gyroscope*. Boston, Artech House, 1993, 313 p.
2. Meshkovsky I.K., Strigalev V.Y., Deineka G.B., Peshekhonov V.G., Volynsky D.V., Untilov A.A. Three-axis fiber-optic gyroscope: Development and test results. *Gyroscopy and Navigation*, 2011, vol. 2, no. 4, pp. 208–213. doi: 10.1134/S2075108711040122
3. Aksarin S.M. *Study of Polarization Methods and Technologies of Fiber Optic and Integrated Optical Waveguides Matching*. Dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences. St. Petersburg, NIU ITMO, 2014, 116 p. (in Russian)
4. Kaminow I.P. Polarization-maintaining fibers. *Applied Scientific Research*, 1984, vol. 41, no. 3–4, pp. 257–270. doi: 10.1007/BF00382456
5. Cordova A. Bonded fiber optic gyro sensor coil including voids. *Patent US5767970A*, 1998.
6. Cordova A., Hoover R.J., McLean T., Patterson R.A., Rahn J.P. Potted gyro sensor coil with inter-turn stress relief. *Patent US5742390A*, 1998.
7. Nonikov R.L. *Technological Equipment and Quality Improvement Methods of Fiber Loop Winding for Fiber-Optic Gyroscope*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, NIU ITMO, 2014, 100 p. (in Russian)
8. Mukhtubayev A.B., Aksarin S.M., Kalugin E.E. Temperature value effect on h-parameter in birefringence fibers. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 21–26. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-21-26
9. Mukhtubayev A.B., Aksarin S.M., Strigalev V.E. Polarization extinction ratio of the polarization crosstalk caused by point pressure force in the polarization-maintaining fiber. *Optical Fiber Technology*, 2017, vol. 38, pp. 119–122. doi: 10.1016/j.yofte.2017.09.010
10. Sharkov I.A., Vinogradov A.V., Kozlov V.N., Strigalev V.E., Kikilich N.E. Atmosphere pressure effect on the fiber optic gyroscope output signal. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 380–386 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-380-386
11. Bureev S.V., Dukel'skiy K.V., Eron'yan M.A. Method of making single-mode fibre-optical waveguides which retain radiation polarisation. *Patent RU2396580C1*, 2010. (in Russian)
12. Aksarin S.M., Strigalev V.E. Method and apparatus for studying local changes in optical fibers with birefringence. *Proc. Congress of Young Scientists*. V. 2. St. Petersburg, NIU ITMO, 2012, pp. 44–45. (in Russian)
13. Martin P., Le Boudec G., Lefevre H.C. Test apparatus of distributed polarization coupling in fiber gyro coils using white light interferometry. *Proceedings of SPIE*, 1992, vol. 1585, pp. 173–179. doi: 10.1117/12.135045

polarization analysis // *Journal of Lightwave Technology*. 2015. V. 33. N 2. P. 372–380. doi: 10.1109/JLT.2014.2377091

14. Li Z., Yao X.S., Chen X., Chen H., Meng Z., Liu T. Complete characterization of polarization-maintaining fibers using distributed polarization analysis. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, vol. 33, no. 2, pp. 372–380. doi: 10.1109/JLT.2014.2377091

#### Авторы

**Мухтубаев Азамат Булатович** — инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57195632244, 57198779748, ORCID ID: 0000-0002-4848-0483, Mukhtubaev.ab@gmail.com

**Аксарин Станислав Михайлович** — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57191417852, ORCID ID: 0000-0002-7482-3072, staksar@gmail.com

**Никитенко Александр Николаевич** — кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57196353862, ORCID ID: 0000-0002-2441-473X, anikitenko@itmo.ru

**Дейнека Иван Геннадьевич** — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 6603305268, ORCID ID: 0000-0003-1557-8035, igdeyneka@itmo.ru

**Алейник Артем Сергеевич** — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 54793978900, ORCID ID: 0000-0002-7682-348X, yartemal@yandex.ru

#### Authors

**Azamat B. Mukhtubaev** — Research Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57195632244, 57198779748, ORCID ID: 0000-0002-4848-0483, Mukhtubaev.ab@gmail.com

**Stanislav M. Aksarin** — PhD, Laboratory Head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57191417852, ORCID ID: 0000-0002-7482-3072, staksar@gmail.com

**Alexander N. Nikitenko** — PhD, Junior Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57196353862, ORCID ID: 0000-0002-2441-473X, anikitenko@itmo.ru

**Ivan G. Deyneka** — PhD, Associate Professor, Laboratory Head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6603305268, ORCID ID: 0000-0003-1557-8035, igdeyneka@itmo.ru

**Artem S. Aleinik** — PhD, Associate Professor, Laboratory Head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 54793978900, ORCID ID: 0000-0002-7682-348X, yartemal@yandex.ru