Сероваев Г.С., Кошелева Н.А. Исследование стабильности показаний волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках при различных климатических условиях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 4. С. 101–109. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.10

Serovaev G.S., Kosheleva N.A. Investigation of the Stability of FBG Sensor Measurements under Various Climatic Conditions. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2023, no. 4, pp. 101-109. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.10

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 4, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.10
УДК 53.087

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПОКАЗАНИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТКАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Г.С. Сероваев, Н.А. Кошелева

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 11 апреля 2023 г.
Одобрена: 14 июня 2023 г.
Принята к публикации: 31 августа 2023 г.

Ключевые слова:

волоконная брэгговская решетка, стабильность измерений, температура, относительная влажность, волоконно-оптические датчики, длительные испытания, оптическое волокно, погрешность измерений, датчики деформации, климатические условия.

АННОТАЦИЯ

Чувствительные элементы, используемые для измерения различных параметров, в том числе деформаций, должны не только обеспечивать достоверность измеряемых величин, но и стабильность показаний в течение длительного промежутка времени при воздействии различных условий окружающей среды. Приведены результаты исследования стабильности показаний точечных волоконно-оптических датчиков на основе волоконной брэгговской решетки при различных климатических условиях. В ходе исследования регистрировались деформации оптического волокна при различных уровнях температуры и относительной влажности воздуха под действием внешней нагрузки с помощью записанной в сердцевине волоконной брэгговской решетки. Для проведения экспериментов была изготовлена оснастка, позволяющая фиксировать оптическое волокно с записанной волоконной брэгговской решеткой и прикладывать внешнюю нагрузку в виде подвешенного груза. Длительность экспериментов варьировалась в пределах от 550 до 900 ч. Диапазоны влажности и температур соответствуют наиболее распространенным значениям, при которых эксплуатируются волоконно-оптические датчики.

Анализ полученных данных показал, что для исследуемых волоконно-оптических датчиков при различной относительной влажности и температуре воздуха, а также при нагрузках, соответствующих 50 и 70 % от предельной нагрузки для оптического волокна с записанной методом фазовой маски волоконной брэгговской решеткой, показания в течение исследуемого промежутка времени изменяются незначительно. Данный результат свидетельствует о возможности эффективного использования волоконно-оптических датчиков на основе волоконной брэгговской решетки для проведения долговременных измерений деформаций в диапазоне температур окружающей среды от -40 до + 80°С и относительной влажности воздуха от 5 до 95 %.

© ПНИПУ

© **Сероваев Григорий Сергеевич** – м.н.с., e-mail: serovaev@icmm.ru.
Кошелева Наталья Александровна – к.т.н., н.с., e-mail: kosheleva.n@icmm.ru.

Grigorii S. Serovaev – Junior Researcher, e-mail: serovaev@icmm.ru.
Natalia A. Kosheleva – PhD in Technical Sciences, Researcher, e-mail: kosheleva.n@icmm.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

INVESTIGATION OF THE STABILITY OF FBG SENSOR MEASUREMENTS UNDER VARIOUS CLIMATIC CONDITIONS

G.S. Serovaev, N.A. Kosheleva

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 11 April 2023
Approved: 14 June 2023
Accepted for publication: 31 August 2023

Keywords:

fiber Bragg grating, measurement stability, temperature, relative humidity, fiber-optic sensors, long-term testing, optical fiber, measurement error, strain sensors, climatic conditions.

ABSTRACT

The sensing elements used to measure various parameters, including strain, are not only expected to ensure the reliability of the measured values, but also the stability of the measurements over a long period of time when exposed to various environmental conditions. The paper presents the results of studying the stability of the readings of point fiber-optic sensors based on a fiber Bragg grating under various climatic conditions. During the study, strain of the optical fiber was measured at various levels of temperature and relative humidity, under an external load using a fiber Bragg grating inscribed in the core of the optical fiber. For the experiments, a special setup was created that allows fixing an optical fiber with fiber Bragg grating and applying an external load in the form of a suspended load. The duration of the experiments ranged from 550 to 900 hours. Humidity and temperature ranges correspond to the most common values at which fiber-optics sensors are operated.

The data analysis showed that for the fiber-optic sensors the readings do not change significantly during the time at different relative humidity and air temperature, as well as at loads corresponding to 50 and 70 % of the maximum load for an optical fiber with a fiber Bragg grating inscribed by the phase mask method. This result indicates the possibility of the effective use of fiber-optic sensors based on a fiber Bragg grating for long-term measurements of strain in the ambient temperature range from – 40 to + 80 °C and relative humidity from 5 to 95 %.

© PNRPU

Введение

В настоящее время волоконно-оптические датчики (ВОД) на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) широко востребованы для использования в области мониторинга механического состояния конструкций [1–5]. Данные датчики, благодаря компактным размерам, возможности быть интегрированными с конструкцией, устойчивости к электромагнитным и радиационным излучениям, высокой чувствительности, нашли множество приложений в таких сферах, как строительство [6–10], аэрокосмическая [11–14] и геотехническая [15–17] отрасли. Например, в работе [18] разработаны методики, которые включают в себя развертывание в полевых условиях датчиков ВБР для контроля устойчивости склонов и просадок грунта. В работе [19] представлен обзор более 80 источников, в которых приведены различные варианты датчиков на основе ВБР, предназначенные для мониторинга механического состояния геотехнических сооружений.

Использование ВОД на основе ВБР осуществляется в широком диапазоне температур и относительной влажности воздуха, при которых ВОД должны сохранять работоспособность и обеспечивать достоверность и стабильность измерений. В работе [20] показано, что отражательная способность ВБР, записанной в легированном германием оптическом волокне, снижается с увеличением температуры вплоть до полной потери сигнала от датчика при температуре 850 °C. Основное снижения отражательной способности ВБР в оптическом волокне без защитной оболочки наблюдается после 200 °C. Продемонстрирована нелинейная зависимость сдвига резонансной длины волны ВБР, записанной в оптическом волокне с позолоченной оболочкой при температурах 600–800 °C. Влияние нелинейной зависимости сдвига резонансной длины волны ВБР от температуры на результаты экспериментальных измерений деформаций исследуется в работе [21]. В работе [22] приводятся исследования применения регенерированных ВБР для высокотемпературных приложений. Анализ экспериментальных результатов по выдержке исследуемых ВБР в течение 9000 ч при температурах от 760 до 890 °C показал значительное изменение как отражательной способности ВБР, так и сдвига резонансной длины волны. В работе [23] отмечается, что на стабильность показаний ВБР датчиков также влияет расстояние от анализатора сигналов до брэгговской решетки. Авторы демонстрируют заметный разброс резонансной длины волны и мощности отраженного сигнала при расположении ВБР на расстоянии 25 км от интеррогатора. Для стабилизации показаний предложена волоконно-оптическая схема с использованием кольцевого лазера на легированном эрбием волокне.

Аналогичные исследования на проверку работоспособности ВБР проводились для отрицательных температур, в том числе и криогенных. Так, в работе [24] представлена модель, описывающая поведение оптического волокна, покрытого металлом. Металлическая оболочка служит как для защиты ВБР, так и в качестве исполнительного механизма для повышения чувствительности ВБР к изменению температуры. Работоспособность волоконно-оптических датчиков при криоген-

ных температурах открывает возможности для таких приложений, как мониторинг хранения сжиженного природного газа [25], а также для разработки сенсорных систем, работающих в космическом пространстве и в криогенных средах с несколькими источниками электромагнитных помех, таких как сверхпроводящие магниты [26–28].

Помимо использования ВБР в качестве датчика температуры или термокомпенсационного датчика исследуются возможности приложений ВБР, в качестве датчика влажности. В работе [29] представлены датчики относительной влажности на основе брэгговской решетки, предназначенные для обнаружения движения влаги через образцы различных типов конструкционного бетона. Интересное решение для непосредственного измерения содержания влаги в камнях при помощи волоконно-оптического датчика было предложено в [30]. Данная работа направлена на обеспечение раннего предупреждения о впитывании влаги и связанном с этим риском для сохранения целостности камня. При этом особый интерес вызывает изучение и выявление разрушения защитных гидрофобных слоев при помощи ВОД. Было изготовлено два прототипа датчиков влажности на основе ВБР и проведены эксперименты с целью изучения возможности мониторинга в режиме реального времени содержания воды и уровня влажности внутри камней вместе с износом защитного слоя.

Несмотря на большое разнообразие разработанных приложений для применения датчиков на основе ВБР в различных сферах, наблюдается недостаточное количество работ, которые бы описывали стабильность измеряемых с помощью ВБР деформаций в течение длительного промежутка времени при разных климатических условиях.

В настоящей работе было проведено исследование стабильности показаний ВОД при различных температурах и относительной влажности воздуха в течение длительного промежутка времени (550–900 ч). Для исследования выбраны нормальный (45–55 %) и повышенный уровни (85–95 %) относительной влажности воздуха и уровни отрицательной и положительной температуры, при которых наиболее вероятна эксплуатация рассматриваемых ВОД.

1. Результаты статических испытаний волоконно-оптических датчиков деформации при постоянной относительной влажности воздуха

Реализована серия экспериментов по длительному испытанию волоконно-оптических датчиков на основе брэгговских решеток при постоянном уровне растягивающей нагрузки и при разных уровнях относительной влажности воздуха.

При проведении экспериментов использовались одномодовые германосиликатные оптические волокна. Диаметр кварцевой сердцевины и светоотражающей оболочки составляет $0{,}125 \pm 0{,}002$ мм, толщина защитной полиимидной оболочки составляет $0{,}010 \pm 0{,}0025$ мм. Запись волоконных брэгговских решеток производилась посредством ультрафиолетового излучения методом фазовой маски, который включает в себя снятие внешней защитной оболочки оптического волокна в области, где записывается брэгговская решетка с последующим перепокрытием данного участка внешней поверхности оптического волокна полиимидным материалом. Используемые датчики имеют физическую длину брэгговской решетки 5 мм, коэффициент отражения 75–80 % и ширину пика отраженного спектра $0{,}25 \pm 0{,}03$ нм. В каждом из описанных в работе экспериментов использовались уникальные ВБР. Приложение внешней нагрузки к оптическому волокну с ВБР осуществлялось при помощи крепления груза соответствующей массы. В качестве груза использовались стальные цилиндры. Рассматривались два уровня постоянной нагрузки, составляющие 50 % (6 Н) и 70 % (8,4 Н) от предельной нагрузки оптического волокна с защитной оболочкой и записанной ВБР (12 Н). Данному нагружению соответствует уровень деформаций в оптическом волокне в диапазоне 0,67–0,93 %. Согласно результатам исследований, представленным в работах [31; 32], одномодовые германосиликатные оптические волокна демонстрируют линейно-упругий характер поведения вплоть до разрушения, без выраженной зоны пластичности.

Для проведения экспериментов были изготовлены специальные оснастки, позволяющие реализовать крепление оптического волокна и обеспечить передачу нагрузки на оптическое волокно под действием силы тяжести груза. Схема и фотография оснастки в камере влажности изображены на рис. 1. При проведении экспериментов были реализованы два уровня относительной влажности воздуха: 45–55 и 85–95 % при температуре 25–30 °С. Одно оптическое волокно с ВБР размещалось в экспериментальной установке в свободном состоянии без воздействия груза для температурной компенсации показаний волоконно-оптических датчиков деформации. Помимо этого, проводилась регистрация температуры и влажности посредством автономного регистратора температуры и влажности EClerk-M-RHT.

В табл. 1 приведены следующие параметры экспериментов: относительная влажности воздуха (RH, %), температура воздуха (T, °С), нагрузка, прикладываемая к оптическому волокну (F, Н), длительность эксперимента (D, ч) и начальный уровень деформаций оптического волокна (ε_0, %), после приложения нагрузки.

Для регистрации деформаций, которые определяются соотношением (1), использовался интеррогатор ASTRO A322 компании «Инверсия-Сенсор».

$$\varepsilon = \frac{1}{K_\varepsilon}\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} - \frac{\Delta\lambda^T}{\lambda_0^T}\right). \quad (1)$$

Здесь $\Delta\lambda$, $\Delta\lambda^T$ – разница между резонансной длиной волны ВБР в нагруженном и ненагруженном состояниях

(λ_0, λ_0^T) для датчика деформации и для термокомпенсационного датчика соответственно, K_ε – коэффициент деформационной чувствительности. Для исследуемого оптического волокна из кварца $K_\varepsilon = 0,78$ [33].

Таблица 1

Программа экспериментов при постоянной относительной влажности воздуха

Table 1

The program of experiments at constant relative humidity of air

Эксперимент №	ВБР №	F, Н	T, °C	RH, %	D, ч	ε_0, %
1	ВБР 1	6	25-30	45-55	800	0,669
	ВБР 2	6				0,667
	ВБР 3	8,4				0,928
2	ВБР 4	6	25-30	85-95	900	0,671
	ВБР 5					0,669
	ВБР 6					0,669

На рис. 2 для уровня относительной влажности 45–55 % приведены значения температуры и влажности в течение времени испытаний, полученные регистратором Eclerk-M-RHT. Общее время испытания при данном уровне влажности составило 800 ч. На данном интервале времени регистрация показаний с ВБР с частотой 1 Гц проводилась на нескольких временных промежутках. Результаты показаний ВБР после температурной компенсации представлены на рис. 3.

Здесь и далее на аналогичных графиках синим цветом показаны исходные значения, регистрируемые с волоконно-оптических датчиков на основе брэгговских решеток, а красным цветом – усредненные данные, полученные методом скользящего среднего на окне в 1000 измерений.

Аналогичные результаты получены при уровне влажности 85–95 %.

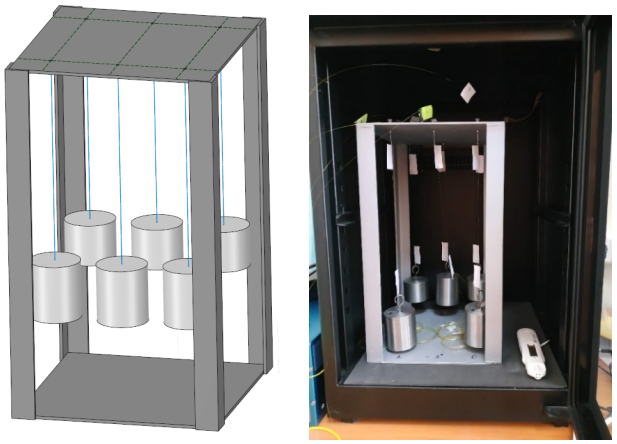


Рис. 1. Схема оснастки с оптическими волокнами и грузами и вид оснастки, помещенной в экспериментальную установку

Fig. 1. The scheme of the setup with optical fibers and weights and the view of the setup placed in the experimental facility

По результатам приведенных испытаний изменение деформаций в течение времени испытаний от их начального значения составило для влажности 45–55 % не более 0,25 %; для влажности 85–95 % не более 0,17 %. Следует отметить, что при заданном уровне деформаций при нормальных условиях может быть достигнут уровень приведенной погрешности измерений ВБР датчиков в 0,1 %. Тем не менее приведенная в работе схема нагружения приводит к разбросу показаний ВБР датчиков в силу наличия вибраций при работе камер влажности и температуры, что увеличивает погрешность измерений. Таким образом, зафиксированное в эксперименте изменение деформаций можно считать находящимся в пределах экспериментальной погрешности измерений.

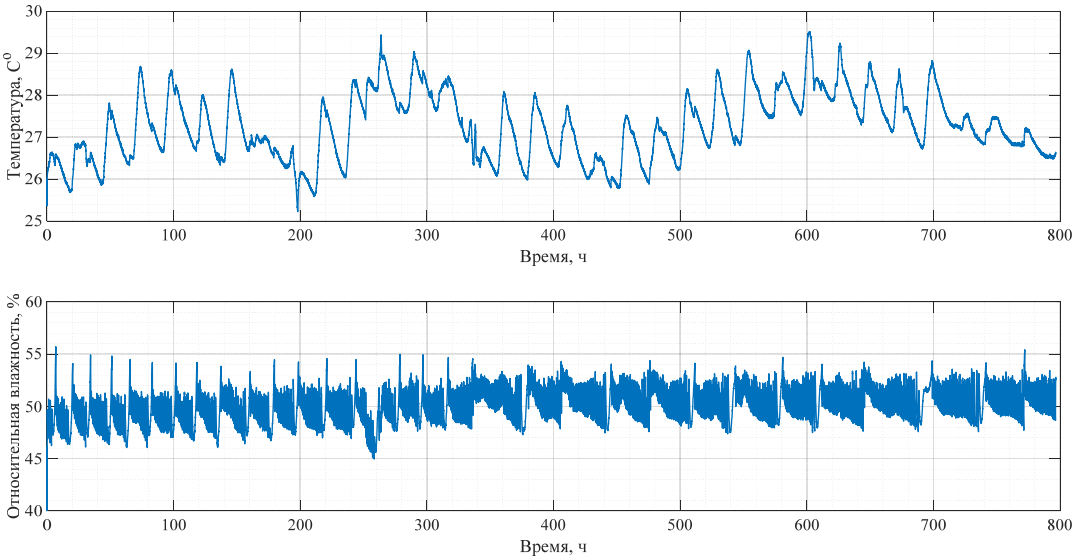


Рис. 2. Показания датчика температуры и влажности при уровне влажности 45–55 %

Fig. 2. Temperature and humidity sensor readings at a humidity level of 45–55 %

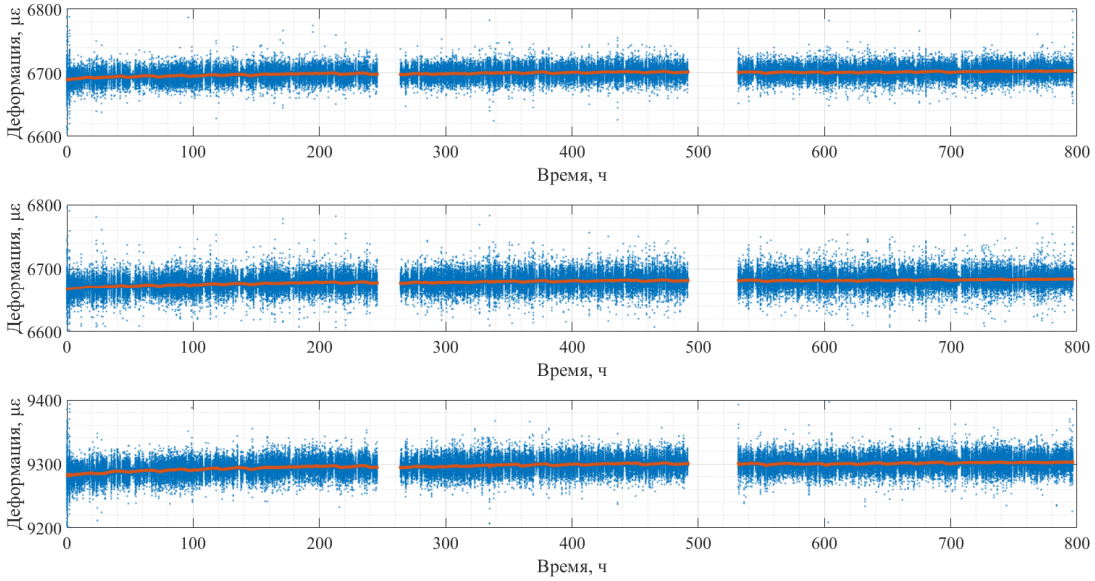


Рис. 3. Показания ВБР после температурной компенсации при уровне относительной влажности 45–55 %

Fig. 3. FBG readings after temperature compensation at a humidity level of 45–55 %

2. Результаты статических испытаний волоконно-оптических датчиков деформации при различных температурах

Схема проведения статических испытаний датчиков деформации при постоянной температуре аналогична испытаниям при постоянном уровне относительной влажности воздуха. Для экспериментов выбраны по два уровня в области положительных и отрицательных температур, отличные от нормальной комнатной температуры, рассмотренной в предыдущей главе, при которых наиболее вероятна эксплуатация рассматриваемых ВОД. При этом уровень относительной влажности воздуха в данных экспериментах не регулировался.

Для обеспечения заданного значения положительной температуры окружающей среды использовалась термокамера ТН2700. В данной камере выдерживались следующие уровни температуры: 50 и 80 °С. Фотография термокамеры с размещенной в ней оснасткой представлена на рис. 4.

Для испытаний ВОД при отрицательных температурах оснастка помещалась в морозильную камеру, где были проведены эксперименты по выдерживанию двух уровней температуры окружающей среды, –20 °С и –43 °С в течение 550 ч.

При выборе уровня нагрузки для испытаний ВОД при различных температурах установлено, что при нагрузке 8,4 Н, что составляет 70 % от предельной нагрузки, при температуре 50 °С происходит обрыв оптических волокон после 100 ч от начала нагружения. В связи с этим при длительных испытаниях результаты измерений приводятся только для нагрузки 6 Н. В табл. 2 приведены данные об экспериментах при постоянной температуре.



Рис. 4. Экспериментальная установка для длительного испытания ВОДД при постоянном уровне температуры

Fig. 4. Experimental setup for long-term testing of FOS at a constant temperature level

На рис. 5 и 6 приведены результаты измерений для регистратора температуры и влажности при температуре 80 °С.

При температурах 50, –20, –43 °С изменения температуры в течение времени испытаний были в аналогичных пределах, а средний уровень относительной влажности составил 12; 54 и 74 % соответственно.

На интервале времени каждого из экспериментов регистрация показаний ВБР с частотой 1 Гц проводилась на нескольких временных промежутках. Показания ВБР с учетом температурной компенсации представлены на рис. 6 для температуры 80 °С. Аналогичные результаты получены для температур окружающей среды 50, –20 и –43 °С.

Таблица 2

Программа экспериментов при постоянной температуре

Table 2

Program of experiments at constant temperature

Эксперимент №	ВБР №	F, Н	*T*, °С	RH, %	*D*, ч	ε_0, %
3	ВБР 7	6	50	12	770	0,667
	ВБР 8					0,668
	ВБР 9					0,666
4	ВБР 10	6	80	2	800	0,666
	ВБР 11					0,666
	ВБР 12					0,663
5	ВБР 13	6	-20	54	550	0,670
	ВБР 14					0,670
	ВБР 15					0,670
6	ВБР 16	6	-43	74	550	0,671
	ВБР 17					0,672
	ВБР 18					0,673

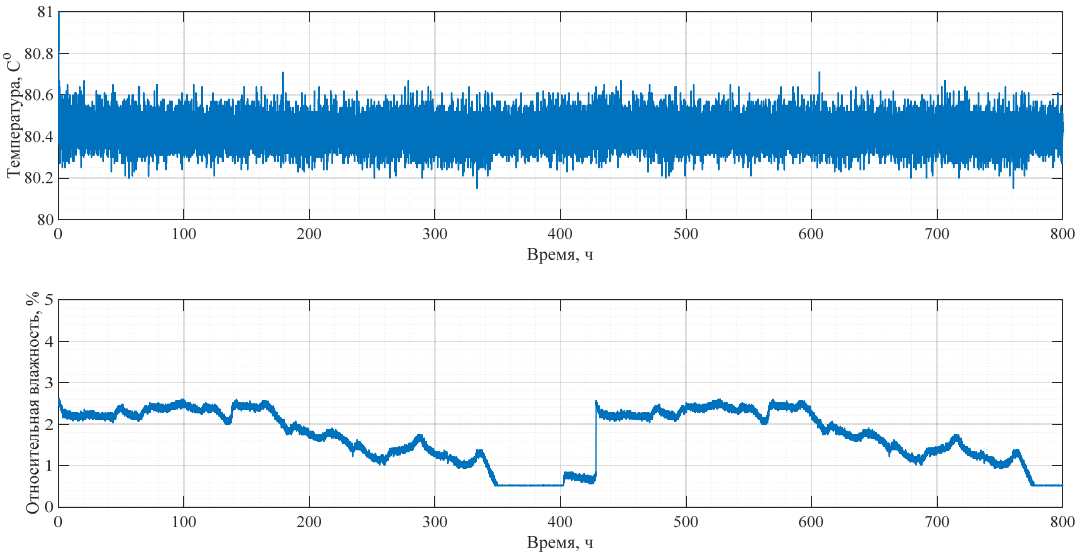


Рис. 5. Показания датчика температуры и влажности при уровне температуры 80 °С

Fig. 5. Temperature and humidity sensor readings at a temperature level of 80 °C

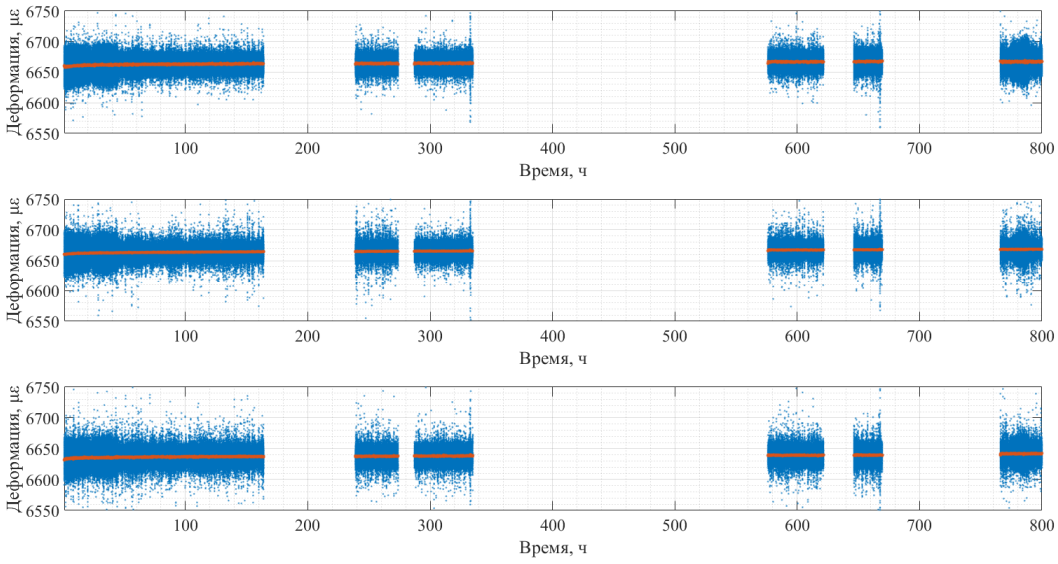


Рис. 6. Показания ВБР при температуре 80 °С

Fig. 6. FBG strain readings at a temperature of 80 °C

По результатам приведенных испытаний изменение деформаций в течение времени испытаний от их начального значения составило для температуры 50 °С не более 0,12 %, для температуры 80 °С не более 0,16 %, для температуры –20 °С не более 0,36 % и для температуры –43 °С не более 0,22 %.

Заключение

Выполнены эксперименты по регистрации деформаций ВОД на брэгговских решетках при статическом нагружении в течение длительного промежутка времени (от 550 до 900 ч) при различной относительной влажности и температуре окружающей среды. Диапазоны влажности и температур соответствуют наиболее распространенным значениям, при которых используются ВОД. Результаты испытаний показали, что ВОД при различной влажности и температуре и нагрузках, близких к предельным для испытываемых датчиков, изменяют свои показания в пределах 0,36 %. Это дает определенные гарантии на использование ВОД на брэгговских решетках в разных климатических условиях.

Библиографический список

1. Applications of Fiber Bragg Grating Sensors in the Industry / F. Sales, F. Mota, L. Moura, G. Guimarães, A. Alexandria // International Journal of Advanced Engineering Research and Science. – 2019. – Vol. 6, no. 12. – P. 238–250. DOI: 10.22161/ijaers.612.21

2. Recent progress of fiber-optic sensors for the structural health monitoring of civil infrastructure / T. Wu, G. Liu, S. Fu, F. Xing // Sensors (Switzerland). – 2020. – Vol. 20, no. 16. – P. 1–25. DOI: 10.3390/s20164517

3. Arena M., Viscardi M. Strain state detection in composite structures: Review and new challenges // Journal of Composites Science. – 2020. – Vol. 4, no. 2. DOI: 10.3390/jcs4020060

4. Дифференцирование дефектов в ПКМ по отклику волоконно-оптических сенсоров (обзор). Часть I / Л.А. Кашарина, В.В. Махсидов, О.И. Смирнов, И.А. Рузаков // Труды ВИАМ. – 2019. – № 2. – С. 97–104. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-97-104

5. Кашарина Л.А., Махсидов В.В. Дифференцирование дефектов в ПКМ по отклику волоконно-оптических сенсоров (обзор). Часть II // Труды ВИАМ. – 2019. – № 6. – С. 43–50. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-43-50

6. Applications of fiber optic sensors in traffic monitoring: a review / M. Tekinay, T. Sylvester, M. Brunton, T. Ganesh // Innovative Infrastructure Solutions. – 2023. – Vol. 8, no. 3. – P. 1–10. DOI: 10.1007/s41062-023-01057-1

7. Research on new FBG displacement sensor and its application in Beijing Daxing Airport project / J. Lv, Z. Hu, G. Ren, C. Zhang, Y. Liu // Optik (Stuttg). – 2019. – Vol. 178. – P. 146–155. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.09.117

8. Taheri S. A review on five key sensors for monitoring of concrete structures // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 204. – P. 492–509. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.172

9. Экспериментальные исследования возможности оценки ресурса эксплуатации композитных конструкций при их силовом нагружении и промышленных строительных конструкций / С.О. Козельская [и др.] // Вестник ТГТУ. – 2021. – № 1. – С. 132–148. DOI: 10.17277/vestnik.2021.01.pp.132-148

10. Мониторинг нагруженности композитной конструкции арочного моста на основе волоконно-оптических датчиков / А.Е. Раскутин [и др.] // Труды ВИАМ. – 2018. – № 3. – С. 49–59. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-49-59

11. Choi Y., Abbas S.H., Lee J.R. Aircraft integrated structural health monitoring using lasers, piezoelectricity, and fiber optics // Measurement. – 2018. – Vol. 125. – P. 294–302. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.04.067

12. Load monitoring of aircraft landing gears using fiber optic sensors / A. Iele, M. Leone, M. Consales, G.V. Persiano, A. Brindisi, S. Ameduri, A. Concilio, M. Ciminello, A. Apicella, F. Bocchetto, A. Cusano // Sensors and Actuators A: Physical. – 2018. – Vol. 281. – P. 31–41. DOI: 10.1016/j.sna.2018.08.023

13. Prediction of the business jet Global 7500 wing deformed shape using fiber Bragg gratings and neural network / T. Klotz, R. Pothie, D. Walch, T. Colombo // Results in Engineering. – 2021. – Vol. 9. DOI: 10.1016/j.rineng.2020.100190

14. Rocha H., Semprimoschnig C., Nunes J.P. Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: A review // Engineering Structures. – 2021. – Vol. 237. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112231

15. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring – Present status and applications / M. Majumder, T.K. Gangopadhyay, A.K. Chakraborty, K. Dasgupta, D.K. Bhattacharya // Sensors and Actuators A: Physical. – 2008. – Vol. 147, no. 1. – P. 150–164. DOI: 10.1016/j.sna.2008.04.008

16. Stability monitoring of surrounding rock mass on a forked tunnel using both strain gauges and FBG sensors / Y. Li, H. Wang, W. Cai, S. Li, Q. Zhang // Measurement. – 2020. – Vol. 153. – P. 107449. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107449

17. Review of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring / Y. Zheng, Z.W. Zhu, W. Xiao, Q.X. Deng // Optical Fiber Technology. – 2020. – Vol. 54. DOI: 10.1016/j.yofte.2019.102127

18. Applications of FBG-based sensors to ground stability monitoring / A.-B. Huang, C.-C. Wang, J.-T. Lee, Y.-T. Ho // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2016. – Vol. 8, no. 4. – P. 513–520. DOI: 10.1016/j.jrmge.2016.01.007

19. Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques / C.Y. Hong, Y.F. Zhang, M.X. Zhang, L.M.G. Leung, L.Q. Liu // Sensors and Actuators A: Physical. – 2016. – Vol. 244. – P. 184–197. DOI: 10.1016/j.sna.2016.04.033

20. Wu W., Liu X. Investigation on high temperature characteristics of FBG sensors // Optik. – 2015. – Vol. 126, no. 20. – P. 2411–2413. DOI: 10.1016/j.ijleo.2015.06.009

21. Estimation of nonlinear dependence of fiber Bragg grating readings on temperature and strain using experimental data / I. Shardakov, A. Shestakov, I. Glot, V. Epin, G. Gusev, R. Tsvetkov // Frattura ed Integrita Strutturale. – 2022. – Vol. 16, no. 62. – P. 561–572. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.62.38

22. Laffont G., Cotillard R., Ferdinand P. 9000 hours-long high temperature annealing of regenerated fiber Bragg gratings // Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors. – SPIE, 2013. – P. 87941X. DOI: 10.1117/12.2025838

23. Chang Y.J., Yeh C.H., Chow C.W. Reliability of stable fiber Bragg grating sensor system for monitoring temperature and strain individually // Measurement Science and Technology. – 2019. – Vol. 30, no. 10. DOI: 10.1088/1361-6501/ab2290

24. Vendittozzi C., Felli F., Lupi C. Modeling FBG sensors sensitivity from cryogenic temperatures to room temperature as a function of metal coating thickness // Optical Fiber Technology. – 2018. – Vol. 42. – P. 84–91. DOI: 10.1016/j.yofte.2018.02.017

25. A cryogenic sensor based on fiber Bragg grating for storage monitoring of liquefied natural gas / W. Hong, S. Shen, Z. Wang, Z. Wang, W. Cai // Cryogenics. – 2019. – Vol. 97. – P. 7–12. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2018.11.001

26. Fiber Bragg Gratings for Sensing Temperature and Stress in Superconducting Coils / R. Rajinikumar, K.G. Narayankhedkar, G. Krieg, M. Suber, A. Nyilas, K.P. Weiss // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2006. – Vol. 16, no. 2. – P. 1737–1740. DOI: 10.1109/TASC.2005.864332

27. Validation of a novel fiber optic strain gauge in a cryogenic and high magnetic field environment / B. Scott, L. M'hamed, M.T. Adrian, G. Yunxin, B. Hugh, G. Paul, L. Mengche // Cryogenics. – 2010. – Vol. 50, no. 10. – P. 700–707. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2010.07.005

28. Fiber Bragg Grating cryosensors for superconducting accelerator magnets / A. Chiuchiolo, M. Bajko, J.C. Perez, H. Bajas, M. Consales, M. Giordano, G. Breglio, A. Cusano // IEEE Photonics Journal. – 2014. DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2343994

29. Optical fiber sensors for monitoring ingress of moisture in structural concrete / T.L. Yeo, M.A.C. Cox, L.F. Boswell, T. Sun, K.T.V. Grattan // Review of Scientific Instruments. – 2006. DOI: 10.1063/1.2200744

30. Polymer-coated FBG humidity sensors for monitoring cultural heritage stone artworks / M. Caponero, R. D'Amato, A. Polimadei, G. Terranova // Measurement. – 2018. – Vol. 125. – P. 325–329. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.04.072

31. Mechanical Properties of Optical Fibers / P. Antunes, F. Domingues [et al.] // Selected Topics on Optical Fiber Technology. – London, InTech. – 2012. – 668 p. DOI: 10.5772/2429

32. Use of the mark-tracking method for optical fiber characterization / V. Chean, E. Robin, R. El Abdi, J-C. Sangleboeuf, P. Houizot // Optics & Laser Technology. – 2011. – Vol. 43, no. 7. – P. 1172–1178. DOI: 10.1016/j.optlastec.2011.03.004

Othonos A., Kalli K., Pureur D., Mugnier A. Fibre Bragg Gratings // Wavelength Filters in Fibre Optics. – Springer Berlin Heidelberg. – 2006. – P. 189–269. DOI: 10.1007/3-540-31770-8_6

References

1. Sales, F., Mota, F., Moura, L., Guimarães, G., Alexandria, A. Applications of Fiber Bragg Grating Sensors in the Industry, 2019, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 6 (12), pp. 238-250. doi: 10.22161/ijaers.612.21

2. Wu, T., Liu, G., Fu, S., Xing, F. Recent progress of fiber-optic sensors for the structural health monitoring of civil infrastructure, 2020, *Sensors*, 20 (16), pp. 1–25. doi: 10.3390/s20164517

3. Arena, M., Viscardi, M. Strain state detection in composite structures: Review and new challenges, 2020, *Journal of Composites Science*, 4 (2). doi: 10.3390/jcs4020060

4. Kasharina L.A., Makhsidov V.V., Smirnov O.I., Ruzakov I.A. Differencirovanie defektov v PKM po otkliku volokonno-opticheskih sensorov (obzor). Chast' I [Identification of defects in polymeric composite materials by fiber bragg grating response (review). Part I]. *Trudy VIAM*, 2019, No. 2, pp. 97-104. doi: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-97-104

5. Kasharina L.A., Makhsidov V.V. Differencirovanie defektov v PKM po otkliku volokonno-opticheskih sensorov (obzor). Chast' II [Identification of defects in polymeric composite materials by fiber bragg grating response (review). Part II]. *Trudy VIAM*, 2019, No. 6, pp. 43-50. doi: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-43-50

6. Tekinay, M., Sylvester, T., Brunton, M., Ganesh, T. Applications of fiber optic sensors in traffic monitoring: a review, 2023, *Innovative Infrastructure Solutions*, 8 (3), pp. 1-10. doi: 10.1007/s41062-023-01057-1

7. Lv, J., Hu, Z., Ren, G., Zhang, C., Liu, Y. Research on new FBG displacement sensor and its application in Beijing Daxing Airport project, 2019, *Optik*, 178, pp. 146-155. doi: 10.1016/j.ijleo.2018.09.117

8. Taheri, S. A review on five key sensors for monitoring of concrete structures, 2019, *Construction and Building Materials*, 204, pp. 492-509. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.172

9. Kozelskaya S.O., Kotelnikov V.V., Akimov D.A., Kutyurin Yu. G., Budadin O.N. Jeksperimental'nye issledovanija vozmozhnosti ocenki resursa jekspluatacii kompozitnyh konstrukcij pri ih silovom nagruzhenii i promyshlennyh stroitel'nyh konstrukcij [Experimental Studies Of The Possibility Of Estimating The Operating Resource Of Composite Structures Under Their Power Loading And Industrial Building Structures]. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, No. 1, pp. 132-148. doi: 10.17277/vestnik.2021.01

10. Raskutin A.E., Makhsidov V.V., Smirnov O.I., Kasharina L.A. Monitoring nagruzhennosti kompozitnoj konstrukcii arochnogo mosta na osnove volokonno-opticheskih datchikov [Monitoring Of The Deformability Of The Composite Structure Of The Arch Bridge Based On Fiber-Optic Sensors]. *Trudy VIAM*, 2018, No. 3, pp. 49-59. doi: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-49-59

11. Choi, Y., Abbas, S.H., Lee, J.R. Aircraft integrated structural health monitoring using lasers, piezoelectricity, and fiber optics, 2018, *Measurement*, 125, pp. 294-302. doi: 10.1016/j.measurement.2018.04.067

12. Iele, A., Leone, M., Consales, M., Persiano, G.V., Brindisi, A., Ameduri, S., Concilio, A. Ciminello, M., Apicella, A., Bocchetto, F.,Cusano, A. Load monitoring of aircraft landing gears using fiber optic sensors, 2018, *Sensors and Actuators A: Physical*, 281, pp. 31-41. doi: 10.1016/j.sna.2018.08.023

13. Klotz, T., Pothier, R., Walch, D., Colombo, T. Prediction of the business jet Global 7500 wing deformed shape using fiber Bragg gratings and neural network, 2021, *Results in Engineering*, 9. doi: 10.1016/j.rineng.2020.100190

14. Rocha, H., Semprimoschnig, C., Nunes, J.P. Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: A review, 2021, *Engineering Structures*, 237. doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112231

15. Majumder, M., Gangopadhyay, T.K., Chakraborty, A.K., Dasgupta, K., Bhattacharya, D.K. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications, 2008, *Sensors and Actuators A: Physical*, 147 (1), pp. 150-164. doi: 10.1016/j.sna.2008.04.008

16. Li, Y., Wang, H., Cai, W., Li, S., Zhang, Q. Stability monitoring of surrounding rock mass on a forked tunnel using both strain gauges and FBG sensors, 2020, *Measurement*, 153, p. 107449. doi: 10.1016/j.measurement.2019.107449

17. Zheng, Y., Zhu, Z.W., Xiao, W., Deng, Q.X. Review of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring, 2020, *Optical Fiber Technology*, 54. doi: 10.1016/j.yofte.2019.102127

18. Huang, A.-B., Wang, C.-C., Lee, J.-T., Ho, Y.-T. Applications of FBG-based sensors to ground stability monitoring, 2016,

Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8 (4), pp. 513-520. doi: 10.1016/j.jrmge.2016.01.007

19. Hong, C.Y., Zhang, Y.F., Zhang, M. X., Leung, L.M.G., Liu, L.Q. Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques, 2016, *Sensors and Actuators A: Physical*, 244, pp. 184-197. doi: 10.1016/j.sna.2016.04.033

20. Wu, W., Liu, X. Investigation on high temperature characteristics of FBG sensors, 2015, *Optik*, 126 (20), pp. 2411-2413. doi: 10.1016/j.ijleo.2015.06.009

21. Shardakov, I., Shestakov, A., Glot, I., Epin, V., Gusev, G., Tsvetkov, R. Estimation of nonlinear dependence of fiber Bragg grating readings on temperature and strain using experimental data, 2022, *Frattura ed Integrita Strutturale*, 16 (62), pp. 561-572. doi: 10.3221/IGF-ESIS.62.38

22. Laffont, G., Cotillard, R., Ferdinand, P. 9000 hours-long high temperature annealing of regenerated fiber Bragg gratings, 2013, *Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors*, SPIE, p. 87941X. doi: 10.1117/12.2025838

23. Chang, Y.J., Yeh, C.H., Chow, C.W. Reliability of stable fiber Bragg grating sensor system for monitoring temperature and strain individually, 2019, *Measurement Science and Technology*, 30 (10). doi: 10.1088/1361-6501/ab2290

24. Vendittozzi, C., Felli, F., Lupi, C. Modeling FBG sensors sensitivity from cryogenic temperatures to room temperature as a function of metal coating thickness, 2018, *Optical Fiber Technology*, 42, pp. 84-91. doi: 10.1016/j.yofte.2018.02.017

25. Hong, W., Shen, S., Wang, Z., Wang, Z., & Cai, W. A cryogenic sensor based on fiber Bragg grating for storage monitoring of liquefied natural gas, 2019, *Cryogenics*, 97, pp. 7-12. doi: 10.1016/j.cryogenics.2018.11.001

26. Rajinikumar, R., Narayankhedkar, K.G., Krieg, G., Suber, M., Nyilas, A., Weiss, K. P. Fiber Bragg Gratings for Sensing Temperature and Stress in Superconducting Coils, 2006, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 16 (2), pp. 1737-1740. doi: 10.1109/TASC.2005.864332

27. Scott, B., M'hamed, L., Adrian, M.T., Yunxin, G., Hugh, B., Paul G., Mengche L. Validation of a novel fiber optic strain gauge in a cryogenic and high magnetic field environment, 2010, *Cryogenics*, 50 (10), pp. 700-707. doi: 10.1016/j.cryogenics.2010.07.005

28. Chiuchiolo, A., Bajko, M., Perez, J. C., Bajas, H. Consales, M., Giordano, M., Breglio, G., Cusano, A. Fiber bragg grating cryosensors for superconducting accelerator magnets, 2014, *IEEE Photonics Journal*. doi: 10.1109/JPHOT.2014

29. Yeo, T.L., Cox, M.A.C., Boswell, L.F., Sun, T., Grattan, K. T. V. Optical fiber sensors for monitoring ingress of moisture in structural concrete, 2006, *Review of Scientific Instruments*, doi: 10.1063/1.2200744

30. Caponero, M., D'Amato, R., Polimadei, A., Terranova, G. Polymer-coated FBG humidity sensors for monitoring cultural heritage stone artworks, 2018, *Measurement*, doi: 10.1016/j.measurement.2018.04.072

31. Antunes P., Domingues F., et al. Mechanical Properties of Optical Fibers, Selected Topics on Optical Fiber Technology, London, InTech, 2012, 668 p. doi: 10.5772/2429

32. Chean V., Robin E., El Abdi R., Sangleboeuf J-C., Houizot P. Use of the mark-tracking method for optical fiber characterization, 2011, *Optics & Laser Technology*. , 43 (7), pp. 1172-1178. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.03.004

33. Othonos, A., Kalli, K., Pureur, D., Mugnier, A. Fibre Bragg Gratings, 2006, *Wavelength Filters in Fibre Optics,* pp. 189-269. doi: 10.1007/3-540-31770-8_6

Финансирование. Работа подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020–2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 21 апреля 2022 года № 075-15-2022-329).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Funding. The work was prepared as part of the implementation of the Program for the creation and development of a world-class scientific center "Supersound" for 2020–2025 with the financial support of the Russian Ministry of Education and Science (agreement dated April 21, 2022 No. 075-15-2022-329).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equivalent.