

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-913-922

УДК 681.7.068, 62-555.621

Исследование метода измерения веса подвижных объектов на основе квазираспределенных волоконных решеток Брэгга с температурной компенсацией

Янина Дмитриевна Моор¹✉, Александра Игоревна Козлова²,
Ульяна Руслановна Коробкова³, Сергей Владимирович Варжель⁴,
Андрей Владимирович Куликов⁵

^{1,2,3,4,5} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ moorID@itmo.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-1624-2659>

² sashakozlova80@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1941-6861>

³ urkorobkova@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2402-0413>

⁴ svvarzhel@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

⁵ avkulikov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8882-7253>

Аннотация

Введение. В отрасли грузоперевозок активно применяются датчики веса. В системах взвешивания при движении автотранспортных средств в качестве чувствительных элементов используются керамические, полимерные, кварцевые пьезоэлектрические сенсоры, нагрузочные или гидравлические ячейки, тензометрические датчики. Однако большинство электрических датчиков подвержены влиянию электромагнитных помех. В настоящее время наиболее активно развиваются и внедряются в эксплуатацию волоконно-оптические датчики, благодаря их относительно низкой стоимости, малым массогабаритным параметрам, высокой точности измерений и полной пассивности к электромагнитным возмущениям. Волоконно-оптические датчики, как правило, основаны на применении волоконных решеток Брэгга с учетом удобства их мультиплексирования. Механические деформации чувствительного элемента датчика приводят к сдвигу длины волны брэгговского резонанса решетки. При этом проблема применения волоконных решеток связана с их чувствительностью к температуре. Для достижения высокой точности измерений величины деформации, соответственно, и весовых характеристик объекта, требуется устранение или компенсация влияния температуры датчика на его показания. Большинство современных исследований дают описание датчиков, работающих в лабораторных условиях, или используют дополнительный сенсор для измерения температуры. **Метод.** В работе предложен метод решения проблемы перекрестной чувствительности волоконной дифракционной структуры к температуре и деформации. Метод основан на применении в чувствительном элементе датчика пары близкорасположенных решеток. Одна из решеток имеет постоянный период по длине, а другая — переменный. Конструкция чувствительного элемента обеспечивает передачу механической нагрузки только на волоконную решетку с постоянным периодом, а изменение температуры одинаково влияет на обе дифракционные структуры. **Основные результаты.** Предложено конструктивное решение чувствительного элемента, которое позволило осуществить компенсацию температурного воздействия без использования дополнительных элементов. Приведена математическая модель температурного воздействия, позволяющая оценить зависимость температурного градиента от времени при различных толщинах чувствительного элемента. Моделирование показало, что для образца толщиной 0,95 см температурный градиент внутри подложки незначителен. При резком изменении температуры выравнивание температурного поля в пределах подложки на уровне 90 % происходит не более, чем за 2,5 с. Механическая нагрузка на чувствительный элемент может проходить относительно волоконной решетки под различными углами, в связи с чем детально исследована величина сдвига центральной длины волны брэгговского резонанса в зависимости от точки приложения и направления нагрузки. **Обсуждение.** Предлагаемая технология может представлять интерес при разработке и эксплуатации автоматических систем весогабаритного контроля с температурной компенсацией без применения дополнительных датчиков. Предложенная система проста в эксплуатации и обладает невысокой стоимостью.

© Моор Я.Д., Козлова А.И., Коробкова У.Р., Варжель С.В., Куликов А.В., 2024

Ключевые слова

температурная компенсация, метод измерения веса, волоконные брэгговские решетки, датчик веса, моделирование чувствительного элемента, повреждения дорог, автомобильный весовой контроль

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2024-0006).

Ссылка для цитирования: Моор Я.Д., Козлова А.И., Коробкова У.Р., Варжель С.В., Куликов А.В. Исследование метода измерения веса подвижных объектов на основе квазираспределенных волоконных решеток Брэгга с температурной компенсацией // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 6. С. 913–922. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-913-922

Investigation of the method of moving object weight measurement based on quasi-distributed fiber Bragg gratings with temperature compensation

Ianina D. Moor^{1✉}, Alexandra I. Kozlova², Uliana R. Korobkova³, Sergey V. Varzhel⁴,
Andrei V. Kulikov⁵

^{1,2,3,4,5} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ moorID@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-1624-2659>

² sashakozlova80@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1941-6861>

³ urkorobkova@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2402-0413>

⁴ svvarzhel@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

⁵ avkulikov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8882-7253>

Abstract

Weight sensors are widely used in the freight transportation industry. In the systems for weighing vehicles while moving, ceramic, polymer, quartz piezoelectric sensors, load or hydraulic cells, strain gauges are used as sensitive elements. However, most electric sensors are susceptible to electromagnetic interference. Currently, fiber-optic sensors are most actively developed and put into operation due to their relatively low cost, small weight and size parameters, high measurement accuracy and complete passivity to electromagnetic disturbances. Fiber-optic sensors are most often implemented using fiber Bragg gratings, taking into account the convenience of their multiplexing. Mechanical deformations lead to a shift in the wavelength of the Bragg resonance of the grating. At the same time, the problem of using fiber gratings is associated with their sensitivity to temperature. To achieve high accuracy in measuring the deformation value, and accordingly, the weight characteristics of the object, it is necessary to eliminate or compensate for the effect of the sensor temperature on its readings. Most modern studies describe sensors that either operate in laboratory conditions or involve the use of an additional sensor that complicates the circuit for measuring temperature. The paper proposes a method for solving the problem of cross-sensitivity of a fiber diffraction structure to temperature and deformation. The method is based on the use of a pair of closely spaced gratings in the sensitive element of the sensor. One of the gratings has a constant period along the length, and the other has a variable one. The design of the sensitive element ensures the transfer of mechanical load only to the fiber grating with a constant period, and the temperature change equally affects both diffraction structures. A design solution for the sensitive element is proposed that allows for temperature effects compensation without using additional elements. A mathematical model of temperature effects is presented, allowing estimating the dependence of the temperature gradient on time for different thicknesses of the sensitive element. Modeling has showed that for a sample 0.95 cm thick, the temperature gradient inside the substrate is insignificant. With a sharp change in temperature, the equalization of the temperature field within the substrate at a level of 90 % occurs in no more than 2.5 s. The mechanical load on the sensitive element can pass relative to the fiber grating at different angles in connection with which the value of the shift of the central wavelength of the Bragg resonance was studied in detail depending on the point of application and direction of the load. The proposed technology may be of interest in the development and operation of automatic weight and size control systems with temperature compensation without the use of additional sensors. The proposed system is easy to operate and it has a low cost.

Keywords

temperature compensation, weight measurement method, fiber Bragg gratings, weight sensor, sensing element modeling, road damage, auto weight control

Acknowledgements

The research was carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSER-2024-0006).

For citation: Moor I.D., Kozlova A.I., Korobkova U.R., Varzhel S.V., Kulikov A.V. Investigation of the method of moving object weight measurement based on quasi-distributed fiber Bragg gratings with temperature compensation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 6, pp. 913–922 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-913-922

Введение

В отрасли автомобильных грузоперевозок существуют ограничения, которые влияют на грузоподъемность и сказываются на безопасности, топливной эффективности и экологии. Несоблюдение весовых норм приводит к чрезмерному износу дорожной инфраструктуры, и, что более важно, может являться причиной дорожно-транспортных происшествий.

Перегруз транспортных средств (ТС) и несоблюдение автомобилистами обозначенных весовых ограничений способствуют разрушению дорожного покрытия, углублению (колея) на автомагистралях или износу мостов. По данным Федеральной службы государственной статистики в России около 72 тыс. мостов, половина из которых требуют ремонта и не рассчитаны на актуальные весогабаритные нормы, и поэтому подвержены обрушению.

В работах [1–5] проведен анализ возможных проблем, вызванных с влиянием повышенной нагрузки ТС на дорожное покрытие, а также содержится перечень соответствующих исследований, проводимых за рубежом. Среди наиболее существенных проблем, вызванных нарушением весовых норм, выделяют структурные повреждения дорог и мостов, для восстановления которых требуется дорогостоящий ремонт; повышение вероятности возникновения дорожно-транспортных происшествий; поломка основных частей грузовых автомобилей при неравномерном распределении веса. Соответственно, для решения этих проблем важно обеспечить регулирование таких параметров ТС, как общая масса, скорость и вертикальные силы воздействия оси на дорожное полотно, с помощью автомобильного весового контроля [6, 7].

Современные дорожные системы измерения веса ТС, в частности на территории Российской Федерации, можно разделить на три основных типа: стационарные пункты весогабаритного контроля, передвижные и автоматизированные¹. Автоматизированная система или система взвешивания в движении Weight In Motion (WIM) предназначена для анализа параметров ТС без снижения текущей скорости движения и предполагает возможность мониторинга при отсутствии сотрудников контрольно-надзорных органов, что минимизирует влияние человеческого фактора.

В работах [8, 9] представлены основные положения применения систем WIM, а также исследования их преимуществ и ограничений при получении данных о параметрах ТС для различных приложений. Например, статистика нагрузки ТС может быть использована для оптимального проектирования дорог и мостов. Также анализ измерения веса в движении и скорости каждого колесного ТС в составе транспортного потока эффективен для применения административных воздействий.

Система WIM, как правило, содержит несколько сенсоров в дорожном покрытии и соответствующее

аппаратное и программное обеспечение. В качестве чувствительных элементов (ЧЭ) системы применяются пьезоэлектрические сенсоры (керамические, полимерные, кварцевые), нагрузочные или гидравлические ячейки, а также тензометрические и волоконно-оптические датчики. В случае использования пьезоэлектрических или тензометрических сенсоров не всегда обеспечивается нормативная точность измерений и возможен выход из строя датчика раньше установленного срока.

Волоконно-оптические сенсоры на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) активно интегрируются в коммерчески-доступные WIM-системы. Например, в работах² [10–12] представлены способы установки данной системы в дорожное полотно и показано, что для оценки веса ТС можно применять анализ сдвига центральной длины волны брэгговского резонанса ВБР. В работе [13] предложена система мониторинга дорожного движения, основанная на мультиплексированном массиве волоконно-оптических датчиков.

В настоящей работе для системы по измерению веса колесных ТС разработан ЧЭ, выполненный в виде многослойной подложки с применением различных ВБР. Уникальность предлагаемого ЧЭ представлена в патенте [14]. Поскольку динамическое измерение веса подразумевает влияние груза на различные участки ЧЭ, в настоящей работе необходимо было провести исследование влияния расположения груза на уровень сигнала. В связи с тем, что на результаты работы ЧЭ влияют температурные воздействия, возникает необходимость в температурной компенсации системы. Результаты температурного влияния приведены в настоящей работе, а исследование стабильности работы системы описаны в работе [15].

При эксплуатации оптических датчиков на основе ВБР необходимо учитывать такие параметры, как тип оптического волокна, расстояние между датчиками, материал для защиты датчика, количество осей, а также внешнее температурное воздействие на систему. При оценивании механического воздействия на ЧЭ существует необходимость компенсации (фиксации) температурного влияния, что является ключевой задачей при реализации волоконно-оптического датчика на основе ВБР. Температурная компенсация может быть получена различными методами [16, 17]. Например, в работе [18] в качестве тестовой платформы разработана система на основе оптического волокна, в которой основная часть расположена в металлическом корпусе в виде матрицы датчиков и представляет собой запатентованное коммерческое решение, включающее 36 ВБР. Данное количество ВБР предназначено для измерения нагрузки, а также в системе предусмотрено несколько дополнительных ВБР для температурной компенсации.

Анализ известных научных работ показал, что во многих работах, направленных на разработку датчиков на основе ВБР для приложений WIM-систем, отсутствует решение проблемы, связанной с температурным

¹ Распоряжение 1328-р. Технические требования к оборудованию автоматических пунктов весогабаритного контроля на автомобильных дорогах общего пользования федерального значения. 2023.

² Optromix, Fiber Bragg Grating Sensors for Weigh-in-Motion strips [Электронный ресурс]. URL: <https://fibergratings.com/fiber-bragg-grating-sensors-for-weigh-in-motion-strips/> (дата обращения: 24.09.2024).

влиянием на ЧЭ. В связи с этим актуальной задачей является исследование различных конструктивных подходов для определения оптимального способа опроса ЧЭ и решение задачи, связанной с температурной компенсацией.

Методика опроса чувствительного элемента волоконно-оптической схемы для измерения веса объектов

В рамках эксперимента был зарегистрирован поток излучения при различной нагрузке на ВБР, инкапсулированной в оптический компаунд. Схема опроса ЧЭ представлена на рис. 1. Излучение широкополосного источника 4 попадает на порт 1 оптического циркулятора 5, далее через порт 2 — на chirпированную ВБР (ЧВБР) 6; через порт 3 излучение проходит через Y-ответвители 7 к ВБР 8 и 9. Отраженное от ВБР излучение проходит через Y-ответвители на опросное устройство 10, с помощью которого фиксируется увеличение отраженной оптической мощности, формируемое при сдвиге длины волны брэгговского резонанса ВБР в длинноволновую область и попадании на возрастающую область спектрального отклика ЧВБР. Данное изменение оптической мощности, т. е. значение амплитуды мощности отраженного оптического сигнала, является ключевым показателем. По величине этого изменения можно определить, какая нагрузка была приложена.

Отметим, что для измерения веса ТС достаточно, например ВБР1. В схеме опроса ЧЭ показаны две ВБР, чтобы WIM-система имела возможность измерять скорость ТС.

Как правило, временной отклик ВБР и сдвиг центральной длины волны брэгговского резонанса регистрируются с помощью устройств опроса трех типов: анализатора оптического спектра, интерферометра или измерителя оптической мощности (фотоприемного

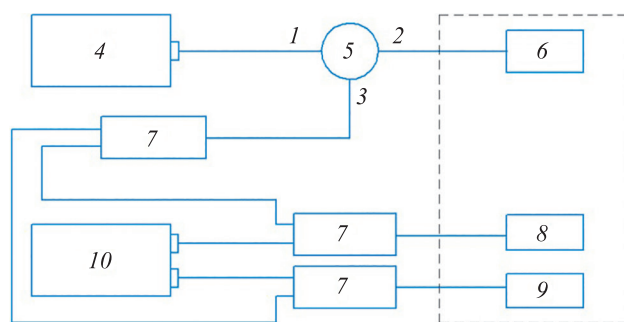


Рис. 1. Схема опроса чувствительного элемента:

1, 2 и 3 — порты оптического циркулятора; 4 — источник широкополосного излучения; 5 — оптический циркулятор; 6 — chirпированная волоконная брэгговская решетка; 7 — оптический Y-ответвитель; 8 — ВБР1; 9 — ВБР2; 10 — приемное устройство

Fig. 1. Interrogation scheme of the sensitive element, where 1, 2 and 3 are the ports of the optical circulator; 4 is the source of broadband radiation; 5 is the optical circulator; 6 is the chirped Fiber Bragg Grating (FBG); 7 is the optical Y-coupler; 8 is the FBG1; 9 is the FBG2; 10 is the receiving device

устройства). При этом первый тип устройства опроса является дорогостоящим и требовательным к условиям эксплуатации, второй — сложен в реализации и обработке выходных данных, а третий — прост, надежен и имеет самую высокую скорость опроса. Исходя из этого, для реализации системы, представленной в настоящей работе, использовался двухканальный измеритель мощности 10 Thorlabs PM320E Dual Channel Optical Power and Energy Meter.

В качестве источника широкополосного излучения 4 применен широкополосный суперлюминесцентный диод марки Thorlabs S5FC1005S, с центральной длиной волны 1557 нм, шириной спектра на полувысоте 67 нм и мощностью 15,6 мВт.

В предлагаемой схеме ЧВБР 6 расположена вне области взаимодействия исследуемого объекта с подложкой, таким образом, сдвиг спектра отражения ЧВБР не происходит из-за отсутствия внешней нагрузки.

Эффективный показатель преломления и период ВБР могут изменяться при влиянии температуры или деформации. В случае, если оба фактора влияют на решетку, изменение центральной длины волны брэгговского резонанса определяется выражением [19, 20]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial \epsilon} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial \epsilon} \right) \Delta\epsilon + \left(\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T, \quad (1)$$

где λ_B — длина волны брэгговского резонанса; n — показатель преломления оптического волокна; ϵ — деформация оптического волокна; Λ — период ВБР; T — температура внешней среды.

Первое слагаемое в правой части уравнения (1) отражает изменение центральной длины волны брэгговского резонанса под действием деформации оптического волокна, что соответствует изменению расстояния между штрихами ВБР и значением показателя преломления материала. Второе слагаемое в правой части уравнения (1) соответствует изменению центральной длины волны брэгговского резонанса под действием температуры.

Влияние деформации на центральную длину волны резонанса ВБР можно записать в виде:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(1 - \frac{n^2}{2} (p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})) \right) \epsilon_z, \quad (2)$$

где p_{11} и p_{12} — компоненты тензора оптической деформации; ν — коэффициент Пуассона; ϵ_z — относительное удлинение. Для стандартного одномодового оптического волокна с параметрами $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$ и $n = 1,482$ при длине волны $\lambda_B = 1550$ нм расчетная чувствительность к деформации составляет 1,2 пм при относительном удлинении $\epsilon_z = 10^{-6}$ [21].

Таким образом, при смещении центральной длины волны резонанса ВБР можно регистрировать нагрузку, которая вызывает деформацию оптического волокна (2).

Для записи ВБР использовалось телекоммуникационное одномодовое оптическое волокно стандарта G.657.A2, подвергнутое водородной обработке, которое отличается повышенной стойкостью к изгибам для

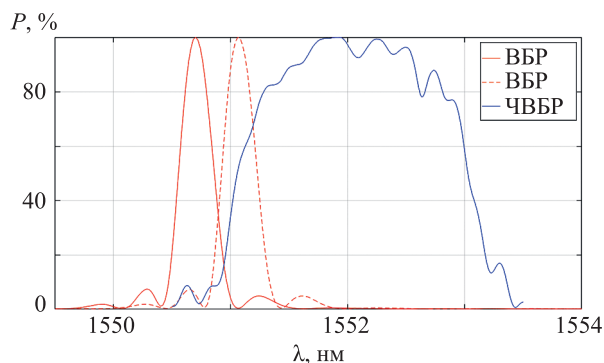


Рис. 2. Графики спектров отражения волоконной брэгговской решетки (ВБР) без (сплошная красная линия) и с (пунктирная красная линия) нагрузкой и чирпированной волоконной брэгговской решетки (ЧВБР), где P — коэффициент отражения оптической мощности излучения

Fig. 2. The reflectance spectra of a FBG without (solid red line) and with (dashed red line) loading and a chirped FBG, where P is the reflectivity of the optical radiation power

того, чтобы избежать дополнительных потерь во время инкапсулирования оптического волокна с ВБР в упругодеформируемый материал Сурэл-СЛ1.

Запись ВБР осуществлялась в интерферометре Тальбота с использованием поворотных зеркал и фазовой маски. В качестве источника излучения применена эксимерная лазерная система МОРА CL7550 (OptoSystems, Россия) [22, 23].

На рис. 2 представлены графики, демонстрирующие спектральные отклики дифракционных структур. Спектр отражения ВБР (сплошная красная линия) сдвигается в длинноволновую сторону при приложении нагрузки (пунктирная красная линия). Чем выше значение нагрузки, тем сильнее происходит сдвиг центральной длины волны резонанса ВБР, что ведет к наложению спектрального отклика ВБР на область более широкого спектра отражения ЧВБР. Значение оптической мощно-

сти (P), приходящее на устройство опроса, становится равным интенсивности излучения перекрестного участка двух спектральных откликов дифракционных структур.

Моделирование и экспериментальное исследование чувствительного элемента для оценки градиента температурной компенсации

Температурное воздействие оказывает влияние на каждую из ВБР в составе ЧЭ и эквивалентно изменяет спектральную характеристику ЧВБР. За счет близкого расположения ВБР и ЧВБР их спектральный отклик идентично смещается при влиянии температуры, а воздействие силы объекта оказывается только на ЧЭ, расположенный в упругодеформируемом слое. Такое расположение оптических волокон позволяет решить проблему теплового воздействия на ЧЭ без необходимости применения дополнительных датчиков температурной компенсации, что значительно упрощает технологию изготовления ЧЭ.

Для определения наилучшего конструктивного решения относительно оптического волокна с индуцированной ЧВБР в составе ЧЭ проведен эксперимент по оценке коэффициента температурной чувствительности. Оптическое волокно с ВБР, закрепленное между двумя слоями компаунда Сурэл-СЛ1, помещалось в сушильный шкаф с изначально установленной температурой 298 К. Далее задавался режим нагрева до 373 К со скоростью 300 К/ч. Аналогичным образом исследован коэффициент температурной чувствительности оптического волокна синдуцированной ВБР, неинкапсулированного в оптический компаунд. Полученные зависимости представлены на рис. 3.

Изменение температуры приводит к изменению показателя преломления материала вследствие термооптического эффекта, а также происходит изменение периода ВБР из-за температурного расширения мате-

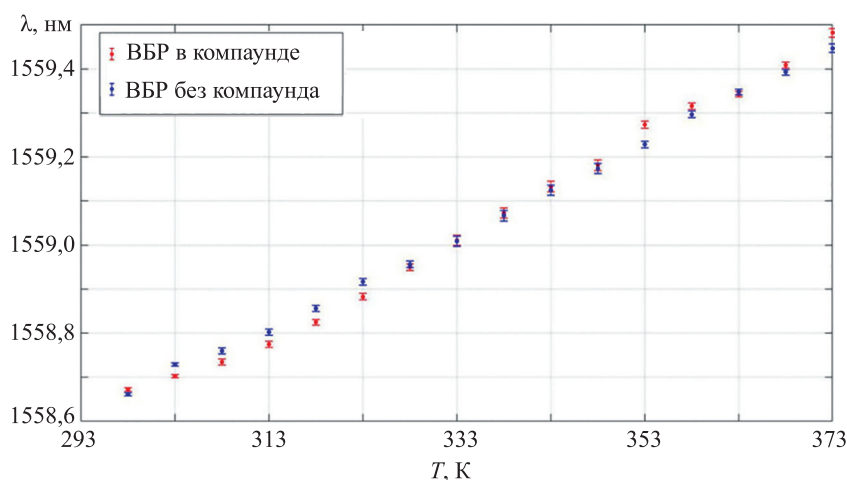


Рис. 3. Зависимость центральной длины волны брэгговского резонанса волоконной брэгговской решетки (ВБР) при изменении температуры окружающей среды, инкапсулированной в оптический компаунд (красные метки) и без инкапсуляции (синие метки)

Fig. 3. Dependence of the central wavelength of the Bragg resonance of the FBG with a change in the ambient temperature for an FBG encapsulated in an optical compound (red) and without encapsulation (blue)

риала. Эти факторы приводят к сдвигу центральной длины волны брэгговского резонанса [21].

Из зависимости (рис. 3) следует, что для ВБР, которая нагревалась в составе упругодеформируемого материала, коэффициент температурной чувствительности $\Delta\lambda/\Delta T$ составил 10,79 пм/К, а для ВБР без инкапсуляции в оптический компаунд 10,48 пм/К.

В связи с небольшой разницей между коэффициентами температурной чувствительности (порядка 0,3 пм/К) можно предположить, что адгезия компаунда и оптического волокна минимальны. Таким образом, при изготовлении ЧЭ, потенциально устанавливаемого в дорожное полотно, оптическое волокно с индуцированной ЧВБР, не принимающей нагрузку объектов, может быть конструктивно выполнено в двух вариантах: инкапсулировано в оптический компаунд или располагаться в полый канавке металлической оснастки, предназначенной для защиты оптического волокна от воздействия механической нагрузки.

При установке датчика на основе ВБР в дорожное полотно существует вероятность повреждения сенсора, что необходимо учитывать при разработке конструкции ЧЭ. Исходя из этого, для эксплуатации волоконно-оптического датчика при мониторинге дорожного движения необходимо наличие корпуса или защитного слоя. Выполненный обзор показал, что для защиты оптического волокна от повреждений с возможностью восприятия нагрузки следует использовать такие упругодеформируемые материалы как полимеры, силиконовые трубки или полые кабели [9, 10, 24]. В случае проведенного исследования в настоящей работе в качестве упруго-деформируемого материала был выбран силикон, информация о котором доступна в библиотеке материалов Comsol Multiphysics (Steel AISI 4340, Aluminum, Silicon).

В результате моделирования создана 3D-модель ЧЭ системы (рис. 4) в программной среде Comsol

Multiphysics. Модель включает три слоя различных материалов и содержит стеклянный стержень с показателем преломления 1,45 (расчетный аналог оптического волокна).

Расчеты модели выполнены для ЧЭ толщиной 1 и 8 см. В первом случае габаритные размеры подобраны в соответствии с изготовленным экспериментальным натурным лабораторным образцом. Толщина упругодеформируемых слоев составила 0,4 см. Образец толщиной 8 см был смоделирован с целью сравнения температурного градиента для дальнейшего конструирования датчика.

Конструкция (рис. 4) содержит два оптических волокна: закрепленное между двумя слоями упругодеформируемого материала и волокно, закрепленное в упругодеформируемом материале в металлической оснастке.

Выполнена оценка температурного градиента подложки, для чего применен интерфейс Heat Transfer Solids, позволяющий моделировать процесс теплопередачи в твердых телах за счет проводимости, конвекции и излучения.

Использовались следующие параметры моделирования:

- начальная температура 293 К, конечная температура 323 К, время моделирования 10 с и 10 мин для ЧЭ толщиной 0,95 см и 8 см соответственно;
- параметры материала для упругодеформируемого слоя: силикон (коэффициент термического расширения (КТР) $2,6 \cdot 10^{-6}$ 1/К, плотность 2329 кг/м³, теплопроводность 130 Вт/(м·К), модуль Юнга 170 ГПа, коэффициент Пуассона 0,28);
- параметры металлической оснастки: КТР $12,3 \cdot 10^{-6}$ 1/К, теплопроводность 44,5 Вт/(м·К);
- параметры алюминиевой пластинки: КТР $23 \cdot 10^{-6}$ 1/К, теплопроводность 238 Вт/(м·К).

Отметим, что в реальных условиях температура окружающей среды изменяется равномерно, что по-

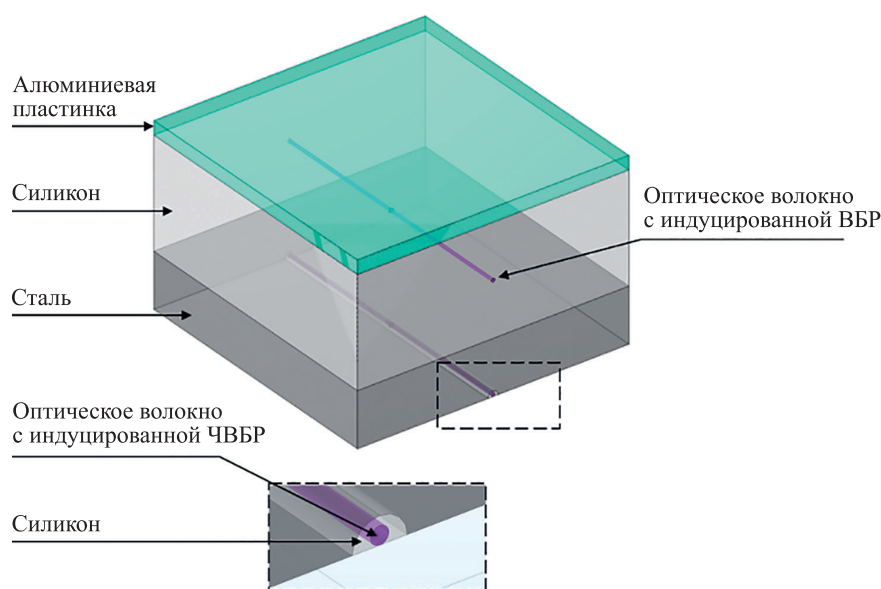


Рис. 4. Тепловая модель чувствительного элемента системы

Fig. 4. Thermal model of the sensitive element of the system

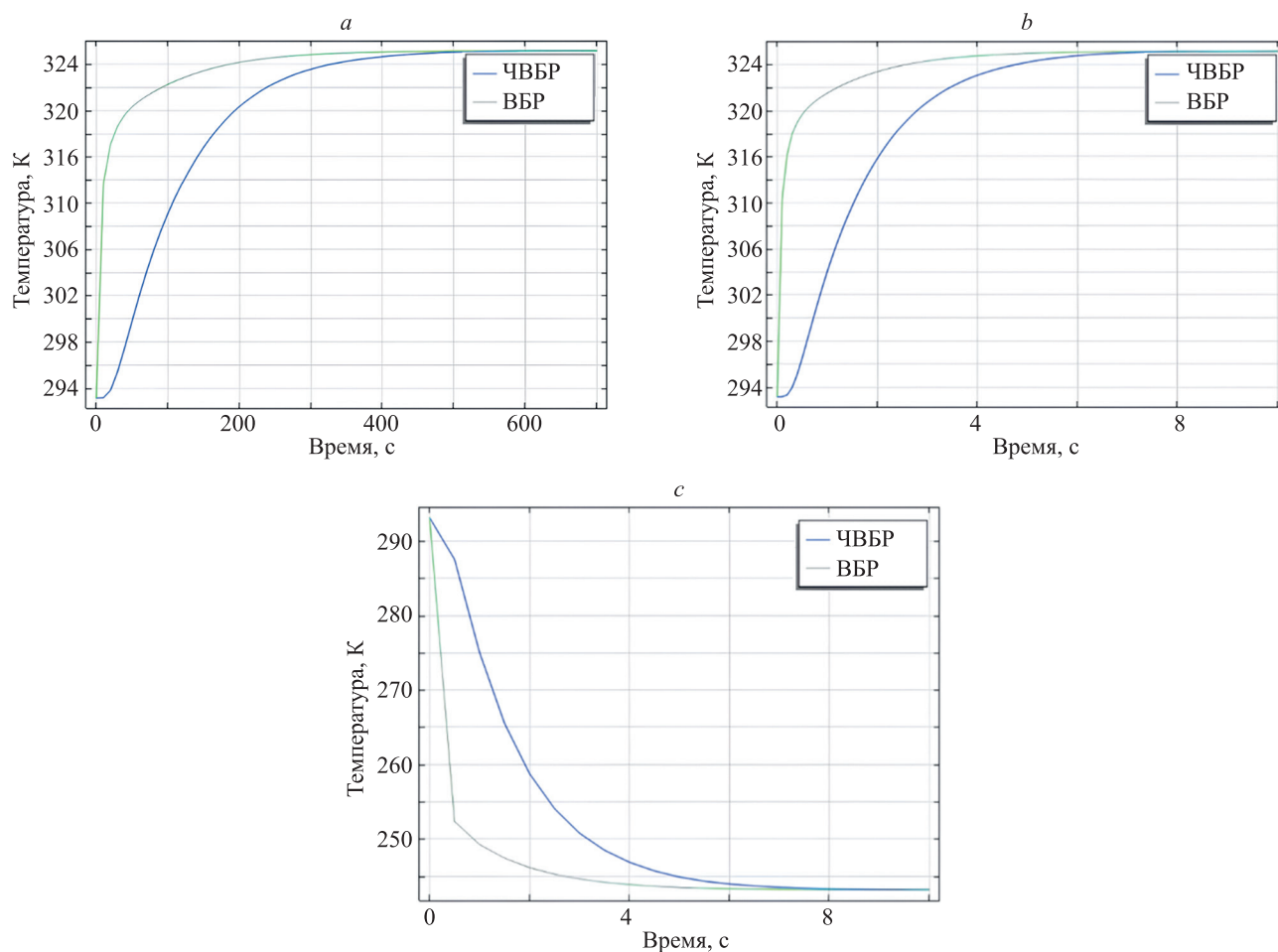


Рис. 5. Графики изменения температуры от времени при нагреве образцов толщинами 8 см от 293 до 323 К (а) и 0,95 см от 293 до 323 К (б) и охлаждения образца 0,95 см от 323 до 293 К (с)

Fig. 5. Temperature change graph over time during heating of 8 cm thick samples from 293 to 323 K (a) and 0.95 cm thick samples from 293 to 323 K (b) and cooling of a 0.95 cm thick sample from 323 to 293 K (c)

тенциально вызывает незначительные изменения в результатах измерений. При этом резкое торможение ТС, быстрое изменение погодных условий может привести к ошибке в результатах измерений. В связи с этим поставлена и решена задача моделирования резкого изменения температуры за короткое время.

Результаты моделирования представлены на рис. 5. Образец толщиной 8 см стабилизировался по температуре 322 К ориентировочно за 8 мин. При толщине образца 0,95 см — за 8 с. Задержка нагрева ЧВБР относительно ВБР при толщине образца 8 см составляет около 2,5 мин, а при 0,95 см уменьшается до 2,5 с.

Так как температурное воздействие оказывает влияние на каждую из ВБР в составе ЧЭ и эквивалентно изменяет спектральную характеристику ЧВБР, оптические волокна следует располагать на таком расстоянии, чтобы минимизировать влияние температурного градиента подложки на спектральные отклики ВБР и ЧВБР. Полученные результаты моделирования следует учитывать при дальнейшей разработке конструкции подложки. Предложенная концепция позволяет решить проблему температурной стабилизации ЧЭ без использования дополнительных датчиков.

Экспериментальное исследование влияния области воздействия нагрузки на чувствительный элемент

Нагрузка объекта на ЧЭ не всегда может проходить по той же оси, на которой расположено оптическое волокно. Для оценки изменения сдвига центральной длины волны брэгговского резонанса при нагрузке на разные части внешней поверхности экспериментального образца ЧЭ проведен эксперимент, схема которого представлена на рис. 6.

К областям подложки 1–9 прикладывалась нагрузка 250 г путем установки на них гири соответствующей массы в форме цилиндра диаметром 26 мм. По результатам эксперимента получены данные о сдвиге брэгговского резонанса ($\Delta\lambda$) в зависимости от области воздействия нагрузки (таблица).

Результаты эксперимента показали, что для областей воздействия вдоль оптического волокна (1, 6 и 8) наблюдался сдвиг центрального резонанса решетки в длинноволновую область спектра. На опросном устройстве это изменение выражалось увеличением оптической мощности. Для остальных областей сдвиг

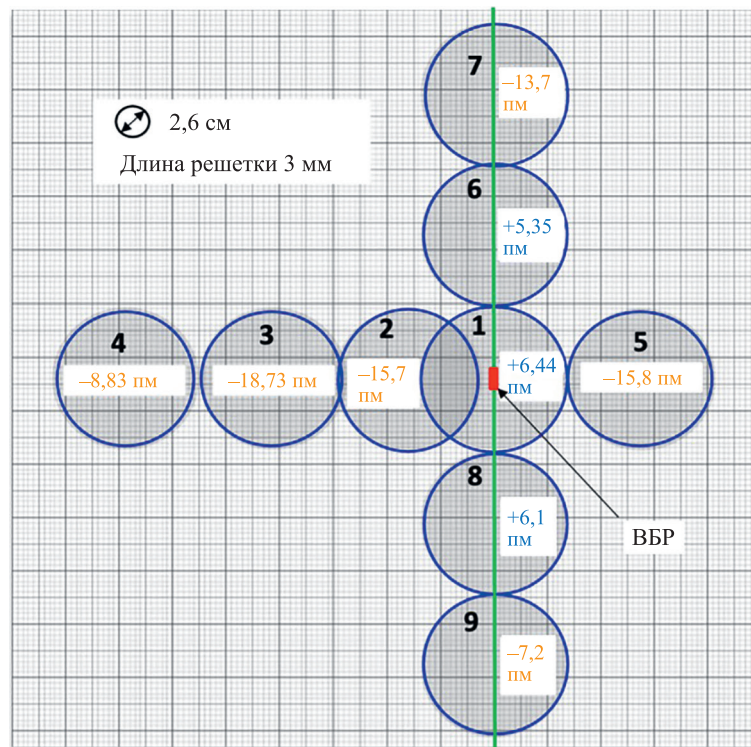


Рис. 6. Схематическое изображение областей 1–9 расположения нагрузки цилиндрической формы для определения сдвига центральной длины волны брэгговского резонанса (ВБР) (размер подложки 210×297 мм, оптическое волокно расположено на расстоянии 50 мм от края подложки, диаметр исследуемого объекта (цилиндра) 26 мм)

Fig. 6. Schematic representation of the cylinder location areas 1–9 for determining the shift in the central wavelength of the Bragg resonance of the FBG (substrate size 210×297 mm, optical fiber is located at a distance of 50 mm from the edge of the substrate, the diameter of the object under study is 26 mm)

Таблица. Результаты измерений сдвига центральной длины волны брэгговского резонанса для разных областей
Table. Results of measurements of the shift of the central wavelength of the Bragg resonance for different regions

Область воздействия	$\Delta\lambda$, пм
1	+6,44
2	-15,65
3	-18,73
4	-8,83
5	-15,75
6	+5,35
7	-13,73
8	+6,10
9	-7,20

центрального резонанса ВБР происходил в коротковолновую область спектра и отражался уменьшением значения сигнала на опросном устройстве. На основании полученных результатов данного эксперимента можно предположить, что чувствительную часть датчика сле-

дует располагать внутри дорожного покрытия таким образом, чтобы движение колес ТС осуществлялось преимущественно вдоль оси ВБР.

Заключение

Предложен новый метод измерения параметров (нагрузки) движущихся объектов с использованием волоконно-оптических компонентов, включающий температурную компенсацию чувствительного элемента без использования дополнительных элементов. Проведены экспериментальные исследования и моделирование чувствительного элемента для оценки градиента температурной компенсации и исследование влияния области воздействия нагрузки на чувствительный элемент.

В рамках исследования изготовлен экспериментальный образец чувствительного элемента в составе волоконно-оптической схемы для измерения параметров движущихся объектов. Рассмотренная технология может представлять интерес при разработке и эксплуатации автоматических систем весогабаритного контроля с температурной компенсацией без применения дополнительных датчиков. Предложенная система проста в эксплуатации и обладает невысокой стоимостью.

Литература

1. Citir N., Gopiseti P., Ceylan H., Kim S. Evaluating the impact of overweight trucks on rigid pavement performance using AASHTOWare pavement ME design // *Road Materials and Pavement Design*. 2024. V. 25. N 1. P. 168–185. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2199879>
2. Rys D., Judycki J., Jaskula P. Analysis of effect of overloaded vehicles on fatigue life of flexible pavements based on weigh in motion (WIM) data // *International Journal of Pavement Engineering*. 2016. V. 17. N 8. P. 716–726. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1019493>
3. Бекенов Т.Н., Мухамбетова А.И. К оценке воздействия автомобильной нагрузки на износ дорожного покрытия // Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения: Материалы XI Международной научно-практической конференции. 2023. С. 124–127.
4. Каменчуков А.В., Кормилицына Л.В., Лопашук В.В., Цупикова Л.С. Влияние сверхнормативной нагрузки на износ и разрушение дорожной одежды // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021. № 4-1(106). С. 57–63. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.106.4.009>
5. Wang J., Wu M. An overview of research on weigh-in-motion system // *Proc. of the Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (IEEE cat. no. 04EX788)*. V. 6. 2004. P. 5241–5244. <https://doi.org/10.1109/wcica.2004.1343721>
6. Brzozowski K., Maczyński A., Rygula A., Konior T. A weigh-in-motion system with automatic data reliability estimation // *Measurement*. 2023. V. 221. P. 113494. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113494>
7. Szinyéri B., Kővári B., Völgyi I., Kollár D., Joó A.L. A strain gauge-based Bridge Weigh-In-Motion system using deep learning // *Engineering Structures*. 2023. V. 277. P. 115472. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115472>
8. Sujon M., Dai F. Application of weigh-in-motion technologies for pavement and bridge response monitoring: State-of-the-art review // *Automation in Construction*. 2021. V. 130. P. 103844. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103844>
9. Adresi M., Abedi M., Dong W., Yekrangnia M. A review of different types of weigh-in-motion sensors: State-of-the-art // *Measurement*. 2024. V. 225. P. 114042. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.114042>
10. Al-Tarawneh M., Huang Y., Lu P., Bridgelall R. Weigh-in-motion system in flexible pavements using fiber Bragg grating sensors part a: Concept // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2020. V. 21. N 12. P. 5136–5147. <https://doi.org/10.1109/tits.2019.2949242>
11. Wang K., Wei Z., Chen B., Cui H.-L. A fiber-optic weigh-in-motion sensor using fiber Bragg gratings // *Proceedings of SPIE*. 2005. V. 6004. P. 60040S. <https://doi.org/10.1117/12.629372>
12. Alamandala S., Puth K., Sai Prasad R.L.N., Kumar P.R. FBG sensing system to study the bridge weigh-in-motion for measuring the vehicle parameters // *Proc. of the 2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP)*. 2018. P. 1–2. <https://doi.org/10.1109/icmap.2018.8354527>
13. Hill D., Nash P. Road traffic monitoring system. Patent US20040080432A1. 2004.
14. Моор Я.Д., Варжель С.В., Козлова А.И., Дмитриев А.А., Савин В.В., Токарева В.Д. Чувствительный элемент волоконно-оптического датчика и способ динамического измерения скорости, веса и расстояния между колесами транспортных средств. Патент RU2816110C1. Бюл. 2024. № 9.
15. Козлова А.И., Моор Я.Д., Варжель С.В., Комисаров В.А., Калязина Д.В., Савин В.В. Разработка и исследование метода измерения скорости и веса движущихся объектов с применением волоконных решеток Брэгга // *Оптический журнал*. 2024. Т. 91. № 4. С. 50–59. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-04-50-59>
16. Jeon S.-J., Park S.Y., Kim S.T. Temperature compensation of fiber Bragg grating sensors in smart strand // *Sensors*. 2022. V. 22. N 9. P. 3282. <https://doi.org/10.3390/s22093282>
17. Velazquez-Carreón F., Perez-Alonzo A., Sandoval-Romero G.E. Temperature-compensated fiber Bragg grating sensor based on curvature sensing for bidirectional displacements measurement // *Optical Fiber Technology*. 2023. V. 77. P. 103257. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2023.103257>
18. Dubovan J., Litvik J., Markovic M., Fmriak M. Utilization of FBG's in experimental weighing in motion systems // *Proc. of the 2018 ELEKTRO*, 2018, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/elektro.2018.8398252>

References

1. Citir N., Gopiseti P., Ceylan H., Kim S. Evaluating the impact of overweight trucks on rigid pavement performance using AASHTOWare pavement ME design. *Road Materials and Pavement Design*, 2024, vol. 25, no. 1, pp. 168–185. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2199879>
2. Rys D., Judycki J., Jaskula P. Analysis of effect of overloaded vehicles on fatigue life of flexible pavements based on weigh in motion (WIM) data. *International Journal of Pavement Engineering*, 2016, vol. 17, no. 8, pp. 716–726. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1019493>
3. Bekenov T.N., Mukhambetova A.I. Towards assessing the impact of the vehicle loads on the road surface wear. *Proceedings of the XI international scientific-practice conference "Actual Problems of Transport And Energy: The Ways of Its Innovative Solutions"*, 2023, pp. 124–127. (in Russian)
4. Kamenchukov A.V., Kormilitsyna L.V., Lopashuk V.V., Tsupikova L.S. Influence of excess load on the wear and tear of the road surface. *International Research Journal*, 2021, no. 4-1(106), pp. 57–63. (in Russian). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.106.4.009>
5. Wang J., Wu M. An overview of research on weigh-in-motion system. *Proc. of the Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (IEEE cat. no. 04EX788)*. V. 6, 2004, pp. 5241–5244. <https://doi.org/10.1109/wcica.2004.1343721>
6. Brzozowski K., Maczyński A., Rygula A., Konior T. A weigh-in-motion system with automatic data reliability estimation. *Measurement*, 2023, vol. 221, pp. 113494. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113494>
7. Szinyéri B., Kővári B., Völgyi I., Kollár D., Joó A.L. A strain gauge-based Bridge Weigh-In-Motion system using deep learning. *Engineering Structures*, 2023, vol. 277, pp. 115472. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115472>
8. Sujon M., Dai F. Application of weigh-in-motion technologies for pavement and bridge response monitoring: State-of-the-art review. *Automation in Construction*, 2021, vol. 130, pp. 103844. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103844>
9. Adresi M., Abedi M., Dong W., Yekrangnia M. A review of different types of weigh-in-motion sensors: State-of-the-art. *Measurement*, 2024, vol. 225, pp. 114042. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.114042>
10. Al-Tarawneh M., Huang Y., Lu P., Bridgelall R. Weigh-in-motion system in flexible pavements using fiber Bragg grating sensors part a: Concept. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, vol. 21, no. 12, pp. 5136–5147. <https://doi.org/10.1109/tits.2019.2949242>
11. Wang K., Wei Z., Chen B., Cui H.-L. A fiber-optic weigh-in-motion sensor using fiber Bragg gratings. *Proceedings of SPIE*, 2005, vol. 6004, pp. 60040S. <https://doi.org/10.1117/12.629372>
12. Alamandala S., Puth K., Sai Prasad R.L.N., Kumar P.R. FBG sensing system to study the bridge weigh-in-motion for measuring the vehicle parameters. *Proc. of the 2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP)*, 2018, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/icmap.2018.8354527>
13. Hill D., Nash P. Road traffic monitoring system. *Patent US20040080432A1*, 2004.
14. Moor Ia.D., Varzhel S.V., Kozlova A.I., Dmitriev A.A., Savin V.V., Tokareva V.D. Sensitive element of fiber-optic sensor and method of dynamic measurement of speed, weight and distance between wheels of vehicles. *Patent RU2816110C1*, 2024. (in Russian)
15. Kozlova A., Moor I., Varzhel S., Komisarov V., Kaliazina D., Savin V. Development and investigation of a method for measuring the speed and weight of moving objects using fiber Bragg gratings. *Journal of Optical Technology*, 2024, vol. 91, no. 4, pp. 242–246. <https://doi.org/10.1364/JOT.91.000242>
16. Jeon S.-J., Park S.Y., Kim S.T. Temperature compensation of fiber Bragg grating sensors in smart strand. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 9, pp. 3282. <https://doi.org/10.3390/s22093282>
17. Velazquez-Carreón F., Perez-Alonzo A., Sandoval-Romero G.E. Temperature-compensated fiber Bragg grating sensor based on curvature sensing for bidirectional displacements measurement. *Optical Fiber Technology*, 2023, vol. 77, pp. 103257. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2023.103257>
18. Dubovan J., Litvik J., Markovic M., Fmriak M. Utilization of FBG's in experimental weighing in motion systems. *Proc. of the 2018 ELEKTRO*, 2018, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/elektro.2018.8398252>

- ELEKTRO. 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/elektro.2018.8398252>
19. Wang J.-N., Tang J.-L. Using fiber bragg grating sensors to monitor pavement structures // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2005. V. 1913. N 1. <https://doi.org/10.1177/0361198105191300116>
 20. Wang J., Han Y., Cao Z., Xu X., Zhang J., Xiao F. Applications of optical fiber sensor in pavement Engineering: A review // *Construction and Building Materials*. 2023. V. 400. P. 132713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132713>
 21. Othonos A. Fiber Bragg gratings // *Review of Scientific Instruments*. 1997. V. 68. N 12. P. 4309–4341. <https://doi.org/10.1063/1.1148392>
 22. Griboev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // *Optical and Quantum Electronics*. 2016. V. 48. N 12. P. 540. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0816-3>
 23. Dmitriev A.A., Griboev A.I., Varzhel S.V., Konnov K.A., Motorin E.A. High-performance fiber Bragg gratings arrays inscription method // *Optical Fiber Technology*. 2021. V. 63. P. 102508. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102508>
 24. Fajkus M., Fridrich M., Nedoma J., Kahankova R., Martinek R., Bednar E., Kolarik J. PDMS-FBG-based fiber optic system for traffic monitoring in urban areas // *IEEE Access*. 2020. V. 8. P. 127648–127658. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3006985>
 19. Wang J.-N., Tang J.-L. Using fiber bragg grating sensors to monitor pavement structures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2005, vol. 1913, no. 1. <https://doi.org/10.1177/0361198105191300116>
 20. Wang J., Han Y., Cao Z., Xu X., Zhang J., Xiao F. Applications of optical fiber sensor in pavement Engineering: A review. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 400, pp. 132713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132713>
 21. Othonos A. Fiber Bragg gratings. *Review of Scientific Instruments*, 1997, vol. 68, no. 12, pp. 4309–4341. <https://doi.org/10.1063/1.1148392>
 22. Griboev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, vol. 48, no. 12, pp. 540. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0816-3>
 23. Dmitriev A.A., Griboev A.I., Varzhel S.V., Konnov K.A., Motorin E.A. High-performance fiber Bragg gratings arrays inscription method. *Optical Fiber Technology*, 2021, vol. 63, pp. 102508. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102508>
 24. Fajkus M., Fridrich M., Nedoma J., Kahankova R., Martinek R., Bednar E., Kolarik J. PDMS-FBG-based fiber optic system for traffic monitoring in urban areas. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 127648–127658. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3006985>

Авторы

Моор Янина Дмитриевна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57214998978](https://orcid.org/0000-0002-1624-2659), <https://orcid.org/0000-0002-1624-2659>, moorID@itmo.ru

Козлова Александра Игоревна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-1941-6861>, sashakozlova80@gmail.com

Коробкова Ульяна Руслановна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0009-2402-0413>, urkorobkova@itmo.ru

Варжель Сергей Владимирович — кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 55247304200](https://orcid.org/0000-0002-3120-8109), <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>, svvarzhel@itmo.ru

Куликов Андрей Владимирович — кандидат технических наук, доцент, директор института, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7103154362](https://orcid.org/0000-0001-8882-7253), <https://orcid.org/0000-0001-8882-7253>, avkulikov@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 03.07.2024
Одобрена после рецензирования 16.10.2024
Принята к печати 30.11.2024

Authors

Ianina D. Moor — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57214998978](https://orcid.org/0000-0002-1624-2659), <https://orcid.org/0000-0002-1624-2659>, moorID@itmo.ru

Alexandra I. Kozlova — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1941-6861>, sashakozlova80@gmail.com

Uliana R. Korobkova — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0009-2402-0413>, urkorobkova@itmo.ru

Sergey V. Varzhel — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 55247304200](https://orcid.org/0000-0002-3120-8109), <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>, svvarzhel@itmo.ru

Andrei V. Kulikov — PhD, Associate Professor, Director of Institute, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7103154362](https://orcid.org/0000-0001-8882-7253), <https://orcid.org/0000-0001-8882-7253>, avkulikov@itmo.ru

Received 03.07.2024
Approved after reviewing 16.10.2024
Accepted 30.11.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»