

УДК 681.787+681.7.063+ 681.7.068+53.082.54

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-809-817

ОБНАРУЖЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА

А.А. Власов, А.С. Алейник, Ф.А. Шуклин, А.Н. Никитенко, Е.А. Моторин, А.Ю. Киреев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
 Адрес для переписки: salusnetklim@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 27.05.19, принята к печати 30.06.19

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Власов А.А., Алейник А.С., Шуклин Ф.А., Никитенко А.Н., Моторин Е.А., Киреев А.Ю. Обнаружение ультразвуковых воздействий с применением волоконных решеток Брэгга // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 809–817. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-809-817

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты экспериментального исследования возможности применения одиночных волоконных брэгговских решеток в качестве чувствительных элементов для обнаружения ультразвуковых воздействий в газообразных или жидких средах, а также при размещении волоконных брэгговских решеток в различных материалах и конструкциях с целью мониторинга их состояния. **Метод.** Ультразвуковое воздействие с основной частотой 65 кГц оказывалось поочередно на два чувствительных элемента на основе двух волоконных брэгговских решеток с различающимися параметрами — физической длиной решетки, коэффициентом отражения и крутизной наклона линейного участка спектральной характеристики. Произведен сравнительный анализ полученных данных с данными от опорного пьезоэлектрического ультразвукового датчика. Оценка результатов производилась в частотной области до 200 кГц, исследовались три первые гармоники сигнала — 65, 130 и 195 кГц. Оценивались соотношение сигнал-шум для каждого чувствительного элемента, а также отношения значений сигналов, полученных с различных чувствительных элементов. **Основные результаты.** Создана измерительная установка на основе малогабаритного перестраиваемого вертикально излучающего лазерного диода и программируемой логической интегральной схемы. Показано, что одиночные волоконные брэгговские решетки пригодны для построения чувствительных элементов ультразвуковых датчиков и обладают сопоставимыми с пьезоэлектрическими датчиками значениями чувствительности и динамического диапазона. Проведена теоретическая оценка диапазона детектируемых частот и оценка влияния параметров брэгговской решетки на чувствительность датчика к ультразвуковому воздействию. Отношения сигналов, измеренных брэгговской решеткой с крутизной наклона спектральной характеристики 142 1/нм и коэффициентом отражения 100 %, к сигналам от решетки с наклоном 44 1/нм и отражением 40 % — 5,8, 3,8, 7,1 для 65, 130 и 195 кГц соответственно. Отношения сигналов, измеренных опорным пьезоэлектрическим датчиком, к сигналам, измеренным брэгговской решеткой с крутизной наклона спектральной характеристики 142 1/нм и коэффициентом отражения 100 % — 3,8, 6,2, 7,7 для 65, 130 и 195 кГц соответственно. **Практическая значимость.** Результаты исследования показывают возможность применения волоконных брэгговских решеток в качестве чувствительных элементов пороговых и измерительных ультразвуковых датчиков для размещения в объеме и на поверхности исследуемых материалов. Особенности и преимущества волоконно-оптических измерительных систем обеспечивают простоту монтажа массивов чувствительных элементов в исследуемый материал или конструкцию в процессе производства, нечувствительность к внешним электромагнитным помехам и возможность мультиплексирования большого числа чувствительных элементов на одном оптическом волокне.

Ключевые слова

волоконно-оптический датчик, волоконная брэгговская решетка, датчик акустической эмиссии, ультразвуковой датчик

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-809-817

ULTRASOUND DETECTION BY APPLYING FIBER BRAGG GRATINGS

A.A. Vlasov, A.S. Aleynik, P.A. Shuklin, A.N. Nikitenko, E.A. Motorin, A. Yu. Kireenkov

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
 Corresponding author: salusnetklim@yandex.ru

Article info

Received 27.05.19, accepted 30.06.19

Article in Russian

For citation: Vlasov A.A., Aleynik A.S., Shuklin P.A., Nikitenko A.N., Motorin E.A., Kireenkov A.Yu. Ultrasound detection by applying fiber Bragg gratings. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 809–817 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-809-817

Abstract

Subject of Research. This paper presents the results of an experimental study on the possibility of applying single fiber Bragg gratings as sensitive elements for detecting ultrasonic impacts in gaseous or liquid media and at placing fiber Bragg gratings into various materials and structures for their status monitoring. **Method.** During the experiment, an ultrasonic impact with a fundamental frequency of 65 kHz was alternately turned on two sensitive elements based on two fiber Bragg gratings with different parameters: the physical grating length, reflection coefficient, and slope of the linear part of spectral characteristics. Comparative analysis of the obtained data with data from the reference piezoelectric ultrasonic sensor was performed. The results were evaluated in the frequency domain, at the range up to 200 kHz. The three first harmonics of the signal were studied: 65, 130 and 195 kHz. The signal-to-noise ratio for each sensor element and the ratio of signal values obtained from various sensor elements were evaluated. **Main Results.** The measurement setup was created on the basis of a small-sized tunable VCSEL and FPGA. It is shown that single fiber Bragg gratings are suitable for creation of sensitive elements for ultrasonic sensors and have values of sensitivity and dynamic range comparable to piezoelectric sensors. The range of detected frequencies was theoretically estimated and the assessment of the FBG parameters effect on the sensor sensitivity to ultrasonic action was performed. The ratios of the signals measured by the Bragg grating with a slope of the spectral characteristics equal to 142 1/nm and a reflection coefficient equal to 100%, to the signals from the grating with a slope of 44 1/nm and a reflection of 40% are equal to 5.8, 3.8, 7.1 for 65, 130 and 195 kHz, respectively. The ratios of the signals measured by the reference piezoelectric sensor to the signals measured by Bragg grating with a slope of the spectral characteristics equal to 142 1/nm and a reflection coefficient of 100% are 3.8, 6.2, 7.7 for 65, 130 and 195 kHz, respectively. **Practical Relevance.** The results of this study show the possibility of applying fiber Bragg gratings as the sensitive elements of threshold and measuring ultrasonic sensors for the placement in the volume and on the surface of the materials under study. The features and advantages of fiber-optic measuring systems provide the ease of installation for the arrays of sensors in the material or structure under research during production, insensitivity to external electromagnetic interference and the possibility of multiplexing a large number of sensitive elements on a single optical fiber.

Keywords

fiber-optic sensor, fiber Bragg grating, acoustic emission sensor, ultrasound sensor

Введение

По мере совершенствования технологий все более острой становилась необходимость в точном и своевременном измерении различных физических величин и полей, прежде всего, при протекании производственных процессов — температуры, давления, освещенности, напряженностей электрического и магнитного полей и многих других, необходимых для обеспечения технологии параметров. И если при ручном производстве контроль параметров в основном производился эмпирическим методом, то при увеличении масштабов и сложности производства такой метод переставал удовлетворять соображениям точности, достоверности и повторяемости результатов, так как он крайне субъективен и не основан на прямом измерении физических величин. Кроме того, проведение измерений эмпирическими методами противоречит принципам стандартизации и унификации производства.

Естественным образом технический прогресс был направлен в область разработки устройств, которые позволят быстро и точно производить измерения необходимых параметров, их изменения, временные и спектральные характеристики и тем самым позволят вести контроль над производственным процессом и его автоматизацию. По мере развития технологий велись поиски способов повышения точности и эксплуатационных характеристик датчиков и измерительных систем. На сегодняшний день наиболее совершенными с точки зрения точностных, массогабаритных и эксплуатационных параметров являются волоконно-оптические измерительные системы [1].

Актуальной задачей в различных отраслях науки и техники на сегодняшний день является детектирование ультразвуковых колебаний (акустической эмиссии) в различных материалах для мониторинга состояния, целостности, структурной исправности, деформации и усталостных явлений различных конструкций и оборудования [2–10].

В настоящее время данная задача, как правило, решается путем применения измерительных систем с чувствительными элементами, принцип действия которых основан на прямом пьезоэлектрическом эффекте. Помимо восприимчивости к электромагнитным помехам, данные датчики обладают высокими массогабаритными параметрами, осложняющими их применение внутри объема исследуемого вещества, высокой стоимостью, а также требуют выделения индивидуального канала для каждого датчика, либо применения дополнительной аппаратуры мультиплексирования.

Целью данной работы является экспериментальная проверка возможности применения волоконных брэгговских решеток, свободных от упомянутых недостатков, в качестве чувствительных элементов для обнаружения ультразвуковых воздействий.

Волоконные брэгговские решетки в качестве чувствительных элементов измерительных систем

Волоконная брэгговская решетка (ВБР) представляет собой участок оптического волокна (ОВ) с наведенной модуляцией показателя преломления (ПП) в продольном направлении ОВ. Являясь спектрально

селективным элементом, ВБР выполняет отражение оптического излучения с длиной волны λ_B , удовлетворяющей следующему условию [1, 11, 12]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \tag{1}$$

где λ_B — длина волны брэгговского резонанса (главного максимума отражения ВБР), м; n_{eff} — эффективный ПП основной моды сердцевины ОВ для центральной длины волны отражения решетки, Λ — период ВБР, м.

Принцип построения измерительных систем с ВБР в качестве чувствительного элемента (ЧЭ) состоит в детектировании сдвига λ_B (1) под воздействием измеряемой физической величины. Типовые значения чувствительности ВБР к внешним физическим воздействиям приведены в табл. 1 ($uStrain$ — удлинение образца длиной 1 м на 1 мкм, т. е. относительное удлинение, равное 10^{-6} или 0,0001 %) [13–17]. При необходимости увеличения или уменьшения чувствительности применяются различные покрытия ОВ [18, 19]. Отсутствие механических и токопроводящих частей, низкие массогабаритные параметры и возможность мультиплексирования большого количества датчиков на одном оптическом волокне привели к широкому развитию измерительных систем на основе ВБР, годового оборот рынка которых исчисляется миллиардами долларов [1].

Таблица 1. Типичные значения чувствительности ВБР к различным воздействиям

Тип воздействия	Порядок чувствительности ВБР
Температура	10–12 пм/К
Натяжение	1–1,2 пм/ $uStrain$
Давление	3–100 пм/МПа

Принцип применения ВБР в качестве ЧЭ датчика ультразвуковых (УЗ) воздействий состоит в следующем: длина волны λ_0 источника оптического излучения (ИИ) с узким спектром выбирается таким образом, чтобы она попадала в середину линейной области (рис. 1, а) кривой отражения ВБР (рис. 1, а, б) [20, 21].

$$\lambda_S/L \gg 1. \tag{2}$$

При этом если длина волны возбуждающего воздействия λ_S (м) намного больше физической длины ВБР L (м), т. е. выполняется условие (2), то ВБР целиком испытывает равномерные циклы сжатия-растяжения с изменением периода $\Delta\Lambda = \Lambda_{max} - \Lambda_{min}$ (рис. 1, в, з) относительно исходного периода Λ_0 в такт возбуждающему воздействию, что приводит к амплитудной модуляции интенсивности оптического сигнала на фотоприемнике (ФП) по причине флуктуации центральной волны отражения ВБР λ_B на величину $\pm\delta\lambda$ (рис. 1, з, д) и в соответствии с характеристикой наклона линейного участка спектральной характеристики ВБР (отношение коэффициентов отражения (К. отражения) в начале и конце линейного участка к соответствующему приращению длины волны, 1/нм или дБ/нм, рис. 1, а, д) [20, 21], при этом R_{max} — максимальное значение коэффициента отражения, $FWHM$ — ширина спектра отражения ВБР на его полувысоте, т. е. при коэффициенте отражения, равном $R_{max}/2$.

При невыполнении условия (2) наблюдается разрушение спектра отражения ВБР, и извлечение информации из него становится невозможным. При применении ВБР с π -сдвигом чувствительность ЧЭ к УЗ воздействию возрастает по причине близкого к нормали коэффициента наклона линейного участка спектра отражения такой ВБР (рис. 1, а, з, д) [22].

Типовые значения физической длины ВБР L составляют от 0,5 до 50 мм соответственно, это накладывает ограничения на частотный диапазон обнаружения колебаний. В соответствии с этими значениями и условием (2) были теоретически рассчитаны частотные диапазоны обнаружения ультразвуковых волн при размещении ЧЭ в различных материалах, представленные в табл. 2. Стоит отметить, что указанные теоретические диапазоны носят справочный характер, фактическое прохождение ультразвуковых волн имеет сложную зависимость от свойств среды, взаимного расположения источника и приемника сигнала, способа их закрепления в среде и многих других факторов [20–21].

Экспериментальное исследование возможности применения ВБР в качестве чувствительного элемента для детектирования ультразвуковых воздействий

Для экспериментальной проверки данного эффекта была собрана измерительная установка, блок-схема, основные параметры которой представлены на рис. 2, а и в табл. 3. В качестве ИИ применялся полупроводниковый лазер с вертикальным резонатором (ВИЛ — вертикально излучающий лазер, VCSEL — vertical cavity surface emitting laser), подстройка центральной длины волны которого выполнялась путем регулировки температуры его активной области при помощи встроенного термоэлектрического контроллера (thermoelectric controller, TEC) [23–25].

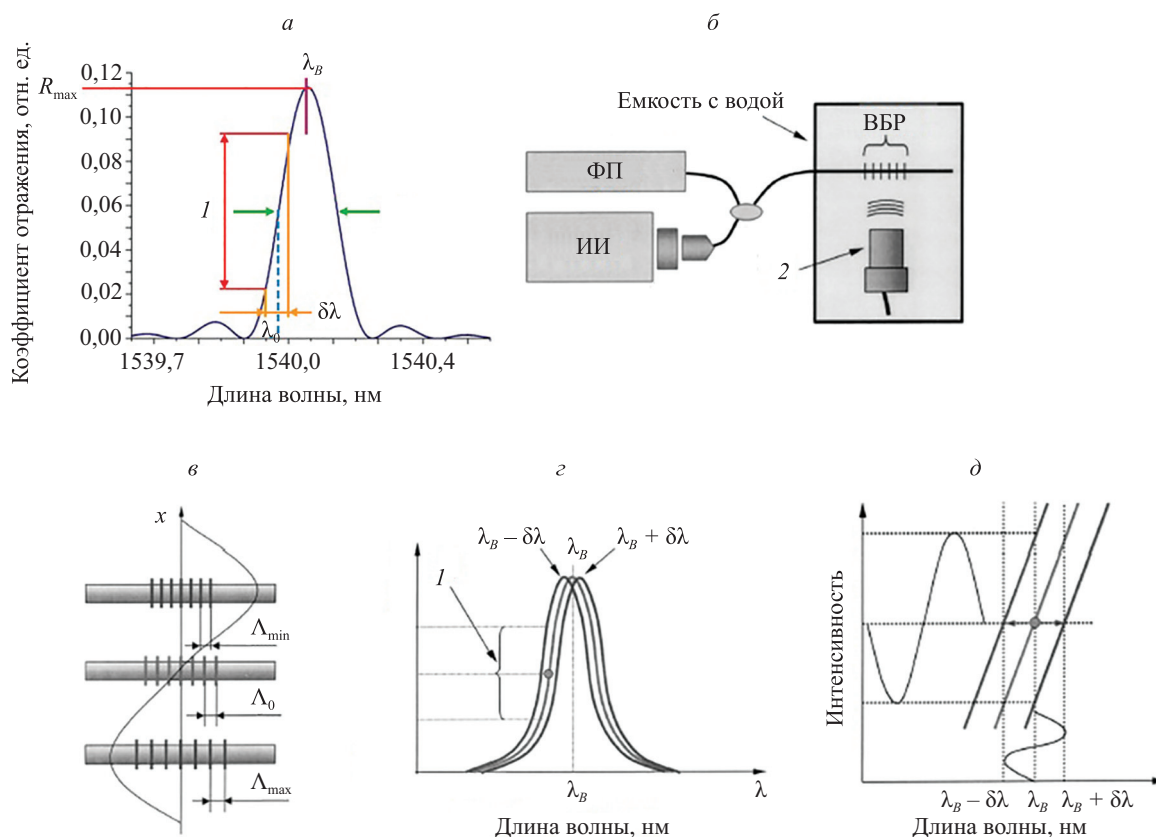


Рис. 1. а — спектр отражения волоконной брэгговской решетки, б — блок-схема датчика ультразвукового воздействия, в — равномерный цикл сжатия-растяжения структуры волоконной брэгговской решетки при ультразвуковом воздействии, г — сдвиг спектра отражения волоконной брэгговской решетки при ультразвуковом воздействии, д — амплитудная модуляция интенсивности оптического излучения на фотоприемнике при ультразвуковом воздействии. I — линейная область спектра отражения волоконной брэгговской решетки; 2 — источник ультразвукового воздействия

Таблица 2. Теоретически рассчитанные диапазоны частот обнаружения ультразвуковых воздействий в различных материалах

Свойства	Материал							
	Воздух	Алюминий	Медь	Сталь	Пластик	Бетон	Каучук	Вода
Скорость звука, м/с	340	5240	3790	5150	2400	5000	1000	1500
Диапазон детектируемых частот	680 Гц	10,5 кГц	7,5 кГц	10,3 кГц	4,8 кГц	10 кГц	2 кГц	3 кГц
	68 кГц	1 МГц	750 кГц	1 МГц	480 кГц	1 МГц	200 кГц	300 кГц

Обработка принятого сигнала и управление параметрами ИИ осуществлялась при помощи программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). В качестве ЧЭ использовались две ВБР (ВБР1 и ВБР2) с различными значениями их физической длины L , коэффициента отражения и крутизны наклонной спектральной характеристики отражения. Данные ВБР были записаны в телекоммуникационное оптическое волокно SMF-28 стандарта G.657.A1 (диаметр световедущей жилы — около 10 мкм, диаметр оболочки — 125 мкм, диаметр защитного акрилатного покрытия — 250 мкм) при помощи схемы записи в интерферометре Тальбота [26]. Основная частота источника УЗ воздействия составляла 65 кГц, электрическая мощность — около 35 Вт. Оба ЧЭ были закреплены на металлической оправе и размещены в непосредственной близости от источника УЗ воздействия (рис. 2, б), при этом соблюдался принцип идентичности физического расположения ЧЭ по отношению к источнику воздействия.

Прием сигнала от ФП производился в условиях отсутствия и при наличии УЗ воздействия для каждого из двух ЧЭ. При отсутствии воздействия производилась оценка уровня собственных шумов измерительной системы, а при подаче воздействия — амплитудные и спектральные параметры сигнала. Таким образом, сравнивая уровень сигнала на аналогово-цифровом преобразователе (АЦП), возможно оценить зависимость чувствительности датчика от параметров ВБР. Настройка оптимальной рабочей точки измерительной системы производилась путем задания длины волны ИИ в соответствии со спектральными характеристиками

отражения ВБР1 и ВБР2 в точках с максимальными значениями их первых производных (точки равенства нулю вторых производных) (рис. 1, а, з, д; рис. 2. в). Зависимость центральной длины волны применяемого ИИ от температуры его активной области (в градусах Цельсия) представлена на рис. 3. На этот же рисунок схематично нанесены нормированные спектры отражения ВБР1 и ВБР2.

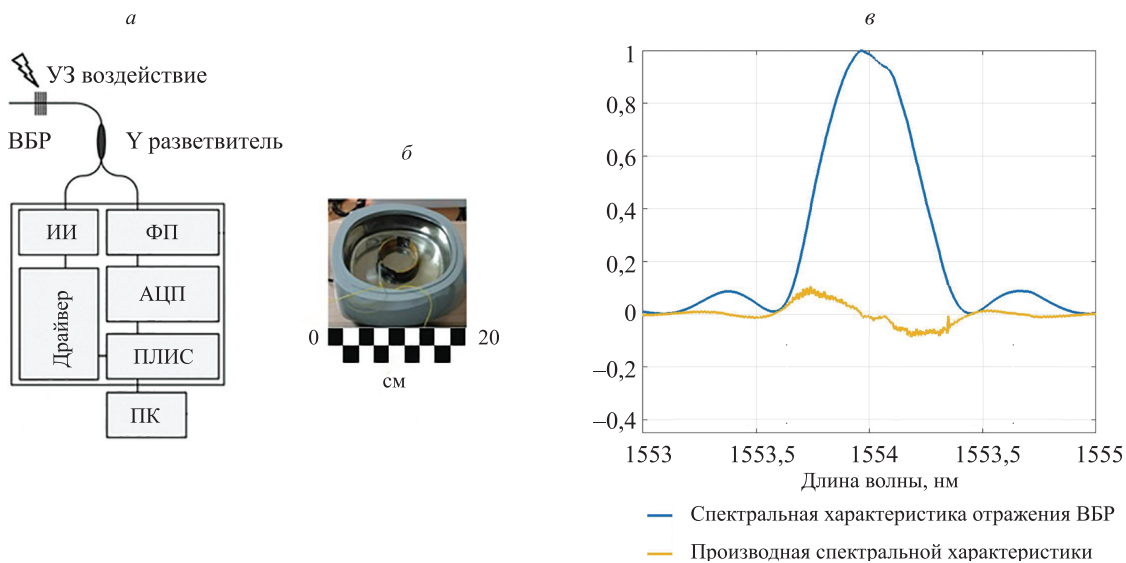


Рис. 2. а — блок-схема проведения экспериментальной проверки, б — источник ультразвукового воздействия, в — нахождение оптимальной рабочей точки по максимуму производной спектральной характеристики волоконной брэгговской решетки

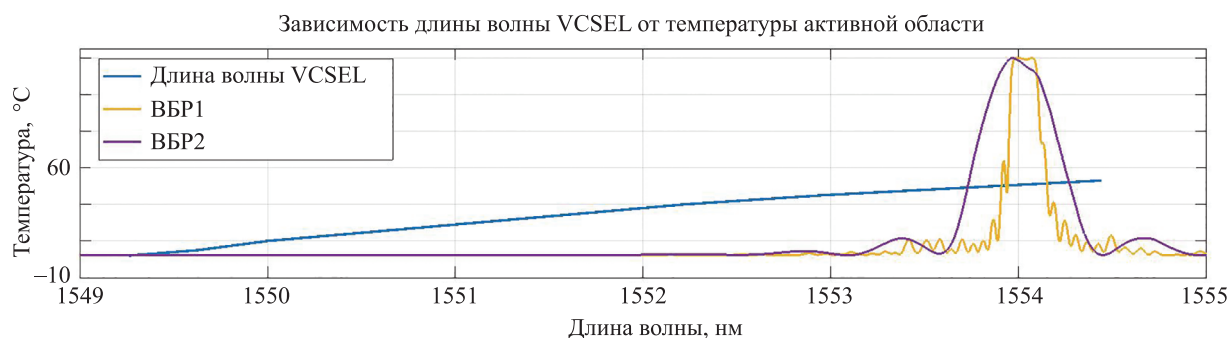


Рис. 3. Зависимость длины волны источника излучения от температуры его активной области

Таблица 3. Параметры измерительной установки и чувствительных элементов (ВБР)

Частота опроса АЦП, кГц	Пик отражения ВБР λ_B , нм	Коэффициент отражения ВБР R_{max} , %		Физическая длина ВБР L , мм		Наклон линейного участка спектра, 1/нм		Диапазон перестройки длины волны ИИ, нм
		ВБР1	ВБР2	ВБР1	ВБР2	ВБР1	ВБР2	
400	1554	100 (ВБР1)	40 (ВБР2)	14 (ВБР1)	2 (ВБР2)	142 (ВБР1)	44 (ВБР2)	1550–1555

Для количественной и качественной оценки результатов данного эксперимента в точку физического расположения ЧЭ был помещен пьезоэлектрический преобразователь акустической эмиссии GT301 (частотный диапазон работы: 50–500 кГц, чувствительность около 50 дБ относительно 1 В при виброскорости 1 м/с, электрическая емкость 150 пФ) с целью применения в качестве опорного датчика. Ввиду невозможности точного воспроизведения амплитудно-временной структуры зондирующего сигнала при многократных измерениях, обусловленной особенностями задающего генератора источника ультразвукового воздействия, сравнение параметров сигнала, измеренного различными чувствительными элементами, производилось в частотной области.

Результаты произведенной экспериментальной проверки представлены на рис. 4 и в табл. 4. Построенные спектральные зависимости позволяют установить, что при применении в качестве ЧЭ ВБР1 соотношение сигнал-шум (signal-to-noise ratio, SNR) для первой гармоники УЗ сигнала (65 кГц) составляет 38,3, для второй 130 кГц—10,4, для третьей (195 кГц) — 13,3; при применении в качестве ЧЭ ВБР2 — 7,2, 3,6 и 2,1 для тех же гармоник соответственно. Данные значения SNR позволяют сделать вывод о том, что доста-

верное детектирование ультразвуковых воздействий при помощи указанного эффекта является возможным. Кроме того, отношения сигналов для ЧЭ на основе двух ВБР с различными параметрами позволяют сделать вывод о том, что применение ВБР с большей крутизной наклона спектральной характеристики отражения (142 1/нм и 44 1/нм для ВБР1 и ВБР2 соответственно) и большим коэффициентом отражения (100 и 40 % для ВБР1 и ВБР2 соответственно) позволяют существенно повысить чувствительность ЧЭ — в 5,8, 3,8 и 7,1 соответственно для трех первых гармоник применяемого УЗ воздействия.

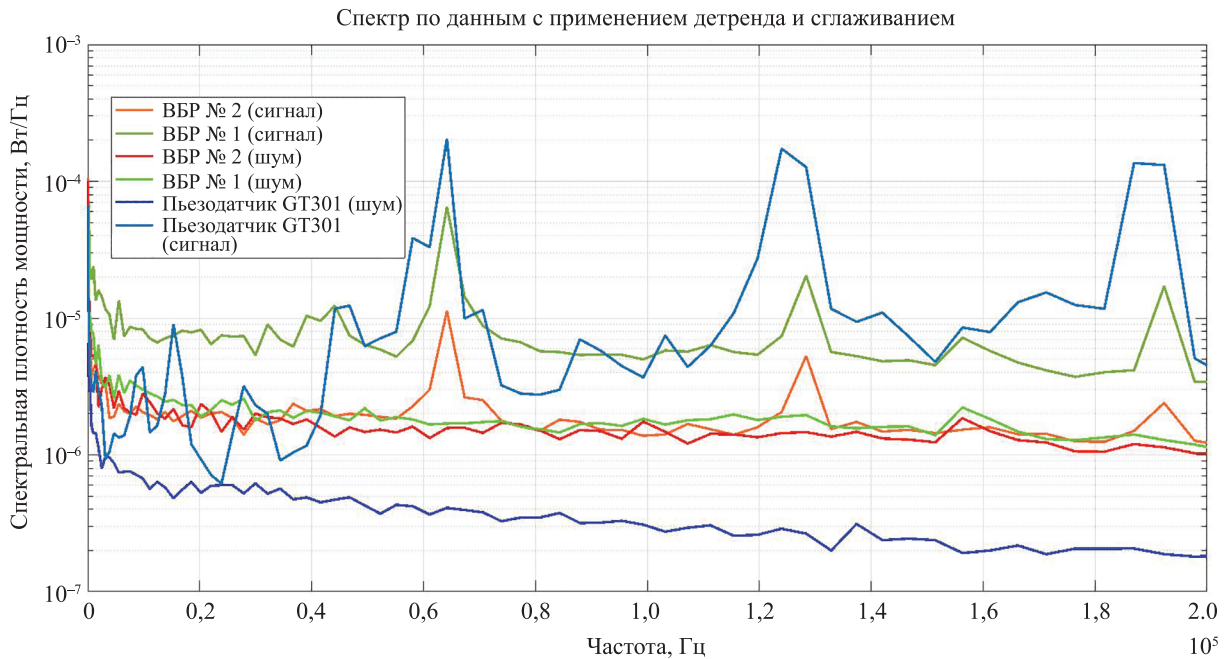


Рис. 4. Сводный график спектральных характеристик принятого сигнала при подаче ультразвукового сигнала и без него для различных чувствительных элементов

Таблица 4. Результаты сравнительного исследования ЧЭ на основе ВБР и пьезоэлектрического датчика

Частота	65 кГц			130 кГц			195 кГц			
	Датчик	GT301	ВБР1	ВБР2	GT301	ВБР1	ВБР2	GT301	ВБР1	ВБР2
Сигнал		$2,5 \times 10^{-4}$	$6,5 \times 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-5}$	$5,3 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-5}$	$2,4 \times 10^{-6}$
Шум		$4,1 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$2,7 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$2,1 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-6}$
SNR		610,2	38,3	7,2	477,2	10,4	3,6	636,5	13,3	2,1
Отношение сигналов		GT301/ВБР1	GT301/ВБР2	ВБР1/ВБР2	GT301/ВБР1	GT301/ВБР2	ВБР1/ВБР2	GT301/ВБР1	GT301/ВБР2	ВБР1/ВБР2
		3,8	22,3	5,8	6,2	24,0	3,8	7,7	54,8	7,1
Отношение SNR		GT301/ВБР1	GT301/ВБР2	ВБР1/ВБР2	GT301/ВБР1	GT301/ВБР2	ВБР1/ВБР2	GT301/ВБР1	GT301/ВБР2	ВБР1/ВБР2
		15,9	84,8	5,3	46,8	132,6	2,9	47,9	303,1	6,3

Сравнение данных, полученных от ЧЭ на основе ВБР с полученными от пьезодатчика GT301, позволяют сделать следующие выводы: отношение сигнала, полученного от GT301, к сигналу, полученному с ЧЭ, на основе ВБР1 для первой гармоники составляет 3,8, для второй — 6,2, для третьей — 7,7; к сигналу, полученному с ЧЭ на основе ВБР2 для первой гармоники — 22,3, для второй — 24, для третьей — 54,8. Отношения SNR для GT301 и ВБР1 — 15,9, 46,8, 47,9; для GT301 и ВБР2 — 84,8, 132,6, 303,1 для 65, 130 и 195 кГц соответственно.

Таким образом, несмотря на несколько более низкую чувствительность и более узкий динамический диапазон, их значения сопоставимы со значениями соответствующих параметров пьезоэлектрических ультразвуковых датчиков и соответственно ЧЭ на основе ВБР могут успешно применяться в качестве датчиков ультразвукового воздействия на поверхности и внутри объема исследуемого объекта: ВБР2 — в качестве порогового, а ВБР1 — в том числе и в качестве измерительного датчика. Стоит отметить, что требования к коэффициенту отражения ВБР R_{max} должны предъявляться в том числе и исходя из оптического бюджета измерительной системы, особенно в случае построения массива из многих чувствительных элементов.

Указанный способ обнаружения ультразвуковых воздействий при помощи чувствительного элемента на основе волоконной брэгговской решетки обладает перспективой широкого применения в различных отраслях промышленности ввиду простоты оптической схемы, отсутствия необходимости применения сложных алгоритмов демодуляции полученных данных, отсутствия механических и токопроводящих частей, нечувствительности к внешним электромагнитным помехам, низких массогабаритных параметров, возможности мультиплексирования большого количества датчиков на одном оптическом волокне, а значит, построения пространственных измерительных массивов, а также простоты монтажа массивов ЧЭ в исследуемый материал или конструкцию в процессе производства [2–10].

Заключение

В ходе данной работы на основе проведенного обзора рынка волоконно-оптических измерительных систем выявлены типовые значения чувствительности датчиков на волоконных брэгговских решетках к различным видам воздействий.

Показан способ применения волоконных брэгговских решеток в качестве чувствительного элемента для детектирования ультразвуковых сигналов на поверхности и в объеме различных материалов, основанный на поддержании рабочей точки (длины волны) источника оптического излучения в центре линейного участка спектральной характеристики отражения волоконной решетки Брэгга.

Для экспериментальной проверки данного способа была создана измерительная установка на основе программируемой логической интегральной схемы и источника оптического излучения, подстройка длины волны которого осуществлялась путем цифровой регулировки температуры его активной области. Экспериментальные образцы включали в себя два чувствительных элемента на основе двух волоконных брэгговских решеток с отличающимися параметрами (физическая длина решетки, коэффициент отражения, наклон линейного участка спектральной характеристики отражения), записанными в телекоммуникационное оптическое волокно SMF-28 при помощи схемы записи в интерферометре Тальбота. Результаты измерения данными чувствительными элементами ультразвукового воздействия с основной частотой 65 кГц сравнивались с данными от пьезоэлектрического датчика. В ходе экспериментальной проверки чувствительных элементов на основе волоконных брэгговских решеток показали сопоставимые с пьезоэлектрическим датчиком значения чувствительности и динамического диапазона, что показывает возможность их применения в качестве пороговых и измерительных датчиков ультразвуковых воздействий на поверхности и внутри объема исследуемого объекта. Отношения сигналов, измеренных брэгговской решеткой с крутизной наклона спектральной характеристики 142 1/нм и коэффициентом отражения 100 %, к сигналам от решетки с наклоном 44 1/нм и отражением 40 % — 5,8, 3,8, 7,1; отношения сигналов, измеренных опорным пьезоэлектрическим датчиком, к сигналам, измеренным брэгговской решеткой с крутизной наклона спектральной характеристики 142 /нм и коэффициентом отражения 100% — 3,8, 6,2, 7,7; отношения SNR для GT301 и ВБР1 — 15,9, 46,8, 47,9; для GT301 и ВБР2 — 84,8, 132,6, 303,1 для 65, 130 и 195 кГц соответственно.

Таким образом, применение волоконных решеток Брэгга для решения задач обнаружения ультразвуковых воздействий в различных материалах обладает рядом преимуществ за счет малых габаритов чувствительного элемента, абсолютной нечувствительности волоконно-оптических датчиков к электромагнитным шумам и помехам, возможности построения пространственных измерительных массивов на одном оптическом волокне, а также возможности интеграции чувствительных элементов в исследуемый материал на стадии его производства.

Литература

1. Cusano A., Cutolo A., Albert J. *Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation*. Bentham Science Publishers, 2011. 322 p. doi: 10.2174/97816080508401110101
2. Jiang M., Sui Q., Jia L., Peng P., Cao Y. FBG-based ultrasonic wave detection and acoustic emission linear location system // *Optoelectronics Letters*. 2012. V. 8. N 3. P. 220–223. doi: 10.1007/s11801-012-1190-4
3. Tsuda H., Lee J.-R., Guan Y., Takatsubo J. Investigation of fatigue crack in stainless steel using a mobile fiber Bragg grating ultrasonic sensor // *Optical Fiber Technology*. 2007. V. 13. N 3. P. 209–214. doi: 10.1016/j.yofte.2006.12.003
4. Ефимов М.Е., Волков А.В., Литвинов Е.В. Метод контроля деформаций композитных конструктивных элементов с помощью волоконно-оптического датчика акустической эмиссии // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 2. С. 212–219. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-212-219
5. Di Sante R. Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: Recent advances and ap-

References

1. Cusano A., Cutolo A., Albert J. *Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation*. Bentham Science Publishers, 2011, 322 p. doi: 10.2174/97816080508401110101
2. Jiang M., Sui Q., Jia L., Peng P., Cao Y. FBG-based ultrasonic wave detection and acoustic emission linear location system. *Optoelectronics Letters*, 2012, vol. 8, no. 3, pp. 220–223. doi: 10.1007/s11801-012-1190-4
3. Tsuda H., Lee J.-R., Guan Y., Takatsubo J. Investigation of fatigue crack in stainless steel using a mobile fiber Bragg grating ultrasonic sensor. *Optical Fiber Technology*, 2007, vol. 13, no. 3, pp. 209–214. doi: 10.1016/j.yofte.2006.12.003
4. Efimov M.E., Volkov A.V., Litvinov E.V. Deformation control method of composite structural elements by fiber-optic acoustic emission sensor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no 2, pp. 212–219. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-212-219
5. Di Sante R. Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: Recent advances and appli-

- lications // *Sensors*. 2015. V. 15. N 8. P. 18666–18713. doi: 10.3390/s150818666
6. Baker A., Dutton S., Kelly D. *Composite materials for aircraft structures*. 2nd ed. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. 597 p.
 7. Kachlakev D. *Strengthening Bridges Using Composite Materials*. Report FHWA-OR-RD-98-08. Oregon: Oregon State University, 1998. 186 p.
 8. Roberts J.E. *Composite Materials for Bridge Construction*. 2002 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.quakewrap.com/frp%20papers/CompositeMaterials-For-Bridge-Construction.pdf> (дата обращения: 25.03.2019).
 9. Sheno R.A., Dulieu-Barton J.M., Quinn S., Blake J.I.R., Boyd S.W. Composite materials for marine applications: key challenges for the future // *Composite Materials*. 2011. P. 69–89. doi: 10.1007/978-0-85729-166-0_3
 10. De Oliveira R., Ramos C.A., Marques A.T. Health monitoring of co structures by embedded FBG and interferometric Fabry-Pérot sensors // *Computers & structures*. 2008. V. 86. N 3-5. P. 340–346. doi: 10.1016/j.compstruc.2007.01.040
 11. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. San Diego: Academic Press, 1999. 459 p.
 12. Варжель С.В. Волоконные брэгговские решетки. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 65 с.
 13. Jung J., Nam H., Lee B., Byun J.O., Kim N.S. Fiber Bragg grating temperature sensor with controllable sensitivity // *Applied Optics*. 1999. V. 38. N 13. P. 2752–2754. doi: 10.1364/AO.38.002752
 14. 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. (in press). doi:10.1088/1361-6501/ab2290
 15. Kumari S., Roy T.K. Comparative Study of Different Type of Physical Sensors Based on Application // *International Journal of Scientific Research and Review*. 2019. V. 7. N 3.
 16. Liu L., Zhang H., Zhao Q., Liu Y., Li F. Temperature-independent FBG pressure sensor with high sensitivity // *Optical Fiber Technology*. 2007. V. 13. N 1. P. 78–80. doi: 10.1016/j.yofte.2006.09.001
 17. Butov O.V., Golant K.M., Grifer V.I., Gusev Y.V., Kholodkov A.V., Lanin A.V., Maksutov R.A., Orlov G.I. Versatile in-fiber Bragg grating pressure sensor for oil and gas industry // *Proc. Optical Fiber Sensors, OFS 2006*. Cancun, Mexico. Optical Society of America Publishing, 2006. P. TuB6. doi: doi.org/10.1364/OFS.2006.TuB6
 18. Lavrov V.S., Kulikov A.V., Plotnikov M.U., Efimov M.E., Varzhel S.V. Study of influence of the fiber optic coatings parameters on optical acoustic sensitivity // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. V. 735. N 1. P. 012014. doi: 10.1088/1742-6596/735/1/012014
 19. Власов А.А., Алейник А.С., Аширов А.Н., Плотников М.Ю., Варламов А.В. Волоконно-оптические кабели с высокой акустической изоляцией // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 15. С. 29–32. doi: 10.21883/PJTF.2019.15.48083.17839
 20. Fomitchov P.A., Krishnaswamy S. Response of a fiber Bragg grating ultrasonic sensor // *Optical Engineering*. 2003. V. 42. N 4. P. 956–964. doi: 10.1117/1.1556372
 21. Betz D.C., Thursby G., Culshaw B., Staszewski W.J. Acousto-ultrasonic sensing using fiber Bragg gratings // *Smart Materials and Structures*. 2003. V. 12. N 1. P. 122–128. doi: 10.1088/0964-1726/12/1/314
 22. Liu T., Han M. Analysis of π -phase-shifted fiber bragg gratings for ultrasonic detection // *IEEE Sensors Journal*. 2012. V. 12. N 7. P. 2368–2373. doi: 10.1109/JSEN.2012.2189383
 23. Алейник А.С., Киреев А.Ю., Мехренгин М.В., Чиргин М.А., Беликин М.Н. Подстройка центральной длины волны источника оптического излучения в интерферометрических датчиках на основе волоконных брэгговских решеток // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 5. С. 809–816. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-5-809-816
 24. Погорелая Д.А., Алейник А.С., Куликов А.В., Беликин М.Н. Разработка портативного регистратора показаний волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках // Сборник тезисов участников форума «Наука будущего — наука мочения». *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 8, pp. 18666–18713. doi: 10.3390/s150818666
 6. Baker A., Dutton S., Kelly D. *Composite materials for aircraft structures*. 2nd ed. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. 597 p.
 7. Kachlakev D. *Strengthening Bridges Using Composite Materials*. Report FHWA-OR-RD-98-08. Oregon, Oregon State University, 1998. 186 p.
 8. Roberts J.E. *Composite Materials for Bridge Construction*. 2002. Available at: <http://www.quakewrap.com/frp%20papers/CompositeMaterials-For-Bridge-Construction.pdf> (accessed: 25.03.2019).
 9. Sheno R.A., Dulieu-Barton J.M., Quinn S., Blake J.I., Boyd S.W. Composite materials for marine applications: key challenges for the future. *Composite Materials*, 2011, pp. 69–89. doi: 10.1007/978-0-85729-166-0_3
 10. De Oliveira R., Ramos C.A., Marques A.T. Health monitoring of composite structures by embedded FBG and interferometric Fabry-Pérot sensors. *Computers & structures*, 2008, vol. 86, no. 3-5, pp. 340–346. doi: 10.1016/j.compstruc.2007.01.040
 11. Kashyap R. *Fiber Bragg Gratings*. San Diego, Academic Press, 1999, 459 p.
 12. Varzhel S.V. *Fiber Bragg Gratings*. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2015, 65 p. (in Russian)
 13. Jung J., Nam H., Lee B., Byun J.O., Kim N.S. Fiber Bragg grating temperature sensor with controllable sensitivity. *Applied optics*, 1999, vol. 38, no. 13, pp. 2752–2754. doi: 10.1364/AO.38.002752
 14. 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. (in press). doi:10.1088/1361-6501/ab2290
 15. Kumari S., Roy T.K. Comparative Study of Different Type of Physical Sensors Based on Application. *International Journal of Scientific Research and Review*, 2019, vol. 7, no. 3.
 16. Liu L., Zhang H., Zhao Q., Liu Y., Li F. Temperature-independent FBG pressure sensor with high sensitivity. *Optical fiber technology*, 2007, vol. 13, no. 1, pp. 78–80. doi: 10.1016/j.yofte.2006.09.001
 17. Butov O.V., Golant K.M., Grifer V.I., Gusev Y.V., Kholodkov A.V., Lanin A.V., Maksutov R.A., Orlov G.I. Versatile in-fiber Bragg grating pressure sensor for oil and gas industry. *Proc. Optical Fiber Sensors, OFS 2006*. Cancun, Mexico. Optical Society of America Publishing, 2006, pp. TuB6. doi: doi.org/10.1364/OFS.2006.TuB6
 18. Lavrov V.S., Kulikov A.V., Plotnikov M.U., Efimov M.E., Varzhel S.V. Study of influence of the fiber optic coatings parameters on optical acoustic sensitivity. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 735, no. 1, pp. 012014. doi: 10.1088/1742-6596/735/1/012014
 19. Vlasov A.A., Aleinik A.S., Ashirov A.N., Plotnikov M.Yu., Varlamov A.V. Fiber Optic Cables with High Acoustic Insulation. *Technical Physics Letters*, 2019, vol. 45, no. 8, pp. 769–772. doi: 10.1134/S1063785019080157
 20. Fomitchov P.A., Krishnaswamy S. Response of a fiber Bragg grating ultrasonic sensor. *Optical Engineering*, 2003, vol. 42, no. 4, pp. 956–964. doi: 10.1117/1.1556372
 21. Betz D.C., Thursby G., Culshaw B., Staszewski W.J. Acousto-ultrasonic sensing using fiber Bragg gratings. *Smart Materials and Structures*, 2003, vol. 12, no. 1, pp. 122–128. doi: 10.1088/0964-1726/12/1/314
 22. Liu T., Han M. Analysis of π -phase-shifted fiber bragg gratings for ultrasonic detection. *IEEE Sensors Journal*, 2012, vol. 12, no. 7, pp. 2368–2373. doi: 10.1109/JSEN.2012.2189383
 23. Aleynik A.S., Kireenkova A.Yu., Mekhregin M.V., Chirgin M.A., Belikin M.N. Central wavelength adjustment of light emitting source in interferometric sensors based on fiber-optic Bragg gratings. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 5, pp. 809–816. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-5-809-816
 24. Pogorelaya D.A., Aleinik A.S., Kulikov A.V., Belikin M.N. Development of a portable data logger of fiber-optic sensors on Bragg gratings. *Collection of thesis of participants in the forum «Science of the Future - Science of the Young»*, Nizhni Novgorod, 2017, pp. 222–224. (in Russian)

- лодых». Нижний Новгород: ООО «Инконсалт К», 2017. С. 222–224.
25. Беликин М.Н., Куликов А.В., Стригалева В.Е., Алейник А.С., Киреевков А.Ю. Исследование малогабаритного источника излучения для волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиков // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 12. С. 34–40.
26. Gribaev 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. doi: 10.1007/s11082-016-0816-3
25. Belikin M.N., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Aleinik A.S., Kireenkov A.Yu. Study of a compact radiation source for fiber-optic interferometric phase sensors. *Journal of Optical Technology*, 2015, vol. 82, no. 12, pp. 805–809. doi: 10.1364/JOT.82.000805
26. Gribaev 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. doi: 10.1007/s11082-016-0816-3

Авторы

Власов Александр Андреевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-8839-6721, salusnetklim@yandex.ru

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

Шуклин Филипп Александрович — инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-7139-5204, shuklin.philipp@gmail.com

Никитенко Александр Николаевич — младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-2441-473X, a.n.nikitenko.1@gmail.com

Моторин Евгений Анатольевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-7901-3933, kaktuss001@yandex.ru

Киреевков Александр Юрьевич — кандидат технических наук, инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57188592273, ORCID ID: 0000-0002-6440-5344, Alexkir49@gmail.com

Authors

Alexander A. Vlasov — engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-8839-6721, salusnetklim@yandex.ru

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

Philipp A. Shuklin — research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-7139-5204, shuklin.philipp@gmail.com

Alexander N. Nikitenko — Junior scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-2441-473X, a.n.nikitenko.1@gmail.com

Evgeniy A. Motorin — engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-7901-3933, kaktuss001@yandex.ru

Alexander Yu. Kireenkov — PhD, research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57188592273, ORCID ID: 0000-0002-6440-5344, Alexkir49@gmail.com