



УДК 681.7.063

## ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ВОЛОКОННОЙ РЕШЕТКИ БРЭГГА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЕЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

А.С. Мунько<sup>а</sup>, С.В. Варжель<sup>а</sup>, С.В. Архипов<sup>а</sup>, А.Н. Забиякин<sup>а</sup><sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: Qveenanna-93@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила в редакцию 08.10.14, принята к печати 04.02.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-2-241-245

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Мунько А.С., Варжель С.В., Архипов С.В., Забиякин А.Н. Защитные покрытия волоконной решетки Брэгга для уменьшения влияния механического воздействия на ее спектральные характеристики // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 2. С. 241–245.

**Аннотация.** Предложена схема исследования зависимости сдвига длины волны брэгговского резонанса от приложенной растягивающей силы. Исследованы образцы волоконных решеток Брэгга с различными покрытиями: восстановленное акрилатное покрытие, комплект для защиты сварного соединения без металлического стержня, комплект для защиты сварного соединения с металлическим стержнем, металлический капилляр, поливинилхлоридная трубка. Для различных вариантов покрытий дифракционной структуры получены зависимости сдвига длины волны брэгговского резонанса решетки от величины растягивающей силы, приложенной к концам участка оптического волокна. Определено, что рассмотренные в работе варианты покрытий волоконной брэгговской решетки позволяют уменьшить влияние внешнего механического воздействия на сдвиг длины волны брэгговского резонанса в 1,1–15 раз по сравнению с незащищенным световодом. Наиболее эффективным вариантом покрытий волоконной брэгговской решетки является комплект защиты сварного соединения с металлическим стержнем. При приложении к участку оптического волокна длиной 100 мм с записанной дифракционной структурой силы 6 Н сдвиг длины волны брэгговского резонанса составил 7,5 нм для незащищенного световода и 0,5 нм для световода, покрытого комплектом защиты сварного соединения.

**Ключевые слова:** фазовый интерферометрический датчик, волоконная брэгговская решетка, сдвиг длины волны Брэгга, чувствительный элемент, эллиптическая напрягающая оболочка, двулучепреломляющее оптическое волокно, фазовая маска.

**Благодарности.** Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 02.G25.31.0044).

## PROTECTIVE COATINGS OF FIBER BRAGG GRATING FOR MINIMIZING OF MECHANICAL IMPACT ON ITS WAVELENGTH CHARACTERISTICS

A.S. Munko<sup>а</sup>, S.V. Varzhel<sup>а</sup>, S.V. Arkhipov<sup>а</sup>, A.N. Zabyakin<sup>а</sup><sup>а</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Qveenanna-93@mail.ru

**Article info**

Received 08.10.14, accepted 04.02.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-2-241-245

Article in Russian

**For citation:** Munko A.S., Varzhel S.V., Arkhipov S.V., Zabyakin A.N. Protective coatings of fiber Bragg grating for minimizing of mechanical impact on its wavelength characteristics. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 2, pp. 241–245. (in Russian)

**Abstract.** The paper deals with the scheme for the study of the Bragg wavelength shift dependence on the applied tensile force. Samples of fiber Bragg gratings with different coatings have been studied: the restored acrylate coating, the heat-shrinkable fusion splice protection sleeve without metal rod, the heat-shrinkable fusion splice protection sleeve with a metal rod, the metal capillary, polyvinylchloride tube. For different coatings of diffractive structure, dependences of wavelength shift for the Bragg grating resonance have been obtained on the tensile strength applied to the ends of an optical fiber. It was determined that the studied FBG coatings give the possibility to reduce the mechanical impact on the Bragg wavelength shift for 1.1-15 times as compared to an uncoated waveguide. The most effective version of coated fiber Bragg grating is the heat-shrinkable fusion splice protection sleeve with a metal rod. When the force (equal to 6 N) is applied to the 100 mm optical fiber area with the inscribed diffractive structure, the Bragg wavelength shift is 7.5 nm for the unprotected sample and 0.5 nm for the one coated with the heat-shrinkable fusion splice protection sleeve.

**Keywords:** phase interferometric sensor, fiber Bragg grating, Bragg wavelength shift, sensing element, elliptical stress cladding, birefringent optical fiber, phase mask.

**Acknowledgements.** The work was carried out in ITMO University under financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project #02.G25.31.0044)

### Введение

Первая волоконная брэгговская решетка (ВБР) была получена в 1978 году [1]. Примерно 10 лет спустя впервые ВБР была записана через боковую поверхность оптического волокна (ОВ) [2]. В настоящий момент во многих высокотехнологичных сферах идет интенсивное внедрение волоконно-оптических датчиков (ВОД) [3, 4] на основе решеток Брэгга по причине их устойчивости к электромагнитным возмущениям, малых массогабаритных параметров и относительно низкой себестоимости. Одними из наиболее точных ВОД считаются фазовые интерферометрические датчики (ФИД) [5]. Так, системы акустического мониторинга, использующие массивы волоконно-оптических гидрофонов, мультиплексированных с помощью ВБР, способны полностью заменить существующие аналоги на пьезокерамических элементах.

Проблема, с которой сталкиваются разработчики ФИД на основе ВБР, связана с изменением длины волны брэгговского резонанса при воздействии на оптическое волокно силы сжатия/растяжения [6].

Чувствительным элементом волоконно-оптического ФИД является отрезок ОВ  $L$ , заключенный между двумя ВБР (рис. 1). Но если растяжению подвергаются не только чувствительный элемент, но и решетки, могут возникнуть различные проблемы в работе датчика [6].

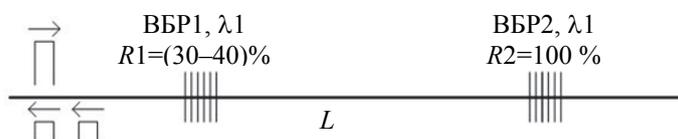


Рис. 1. Одиночный фазовый интерферометрический датчик на двух волоконных брэгговских решетках.  
 $R_1$ ,  $R_2$  – коэффициенты отражения;  $\lambda_1$  – длина волны брэгговского резонанса

Растяжение волокна с ВБР силой в 1 Н может вызвать сдвиг длины волны брэгговского резонанса на 1,5 нм для незащищенной решетки, что критично для работы датчика [7] (рис. 2). Для стабильной работы ФИД требуется уменьшить чувствительность ВБР к растяжению до такого уровня, чтобы максимальный сдвиг длины волны брэгговского резонанса в диапазоне действующих на датчик сил растяжения не превышал четверти ширины спектра на полувысоте ВБР. Так, при ширине спектра на полувысоте ВБР, равной 2 нм, сдвиг не должен превышать 0,5 нм.

На сдвиг длины волны Брэгга также влияет и температура, примерно 0,0123 нм / К [8], однако это влияние не столь критично. Так, чтобы вызвать сдвиг длины волны брэгговского резонанса на 1,5 нм, потребуется изменение температуры примерно на 120 К. При работе датчика в условиях относительно постоянных температур (например, в морской воде) это несущественно, а там, где это необходимо, можно применить специальные способы пассивной термокомпенсации ВБР, предложенные в работах [9, 10].

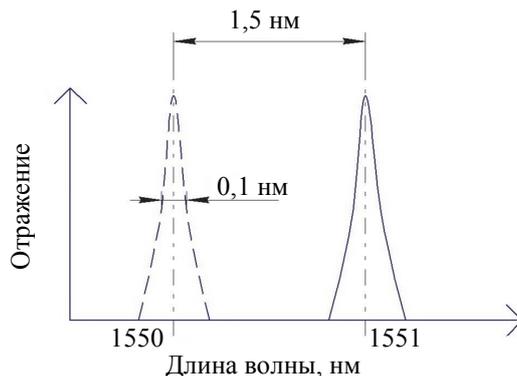


Рис. 2. Спектр ВБР в оптическом волокне без растяжения (пунктирная линия); с растяжением (сплошная линия)

### Экспериментальная установка

Волоконные брэгговские решетки, исследуемые в настоящей работе, были записаны одиночным импульсом КгФ эксимерного лазера методом фазовой маски [11, 12]. Схема записи представлена в работе [13]. Для записи решеток Брэгга типа II [14, 15] применялось двулучепреломляющее ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой [16–18].

Для исследования влияния растяжения ОВ на спектр ВБР была собрана схема (рис. 3), в которой использовался оптический спектроанализатор (ОСА) Yokogawa AQ6370C с диапазоном измерений 600–1700 нм и разрешающей способностью в 0,02 нм. Оптическое излучение с широкополосного источ-

ника вводилось через  $Y$ -ответвитель в образец с записанной решеткой. Для растяжения волоконного световода с записанной в нем ВБР использовалась функция «проверки прочности» аппарата для восстановления акрилатного покрытия оптического волокна Fujikura FSR-02, имеющая возможность растягивать волокно с силой в диапазоне от 4 Н до 20 Н с шагом в 0,1 Н. С помощью клемм 1 (рис. 3) оптическое волокно закреплялось, и на ВБР воздействовала сила натяжения.

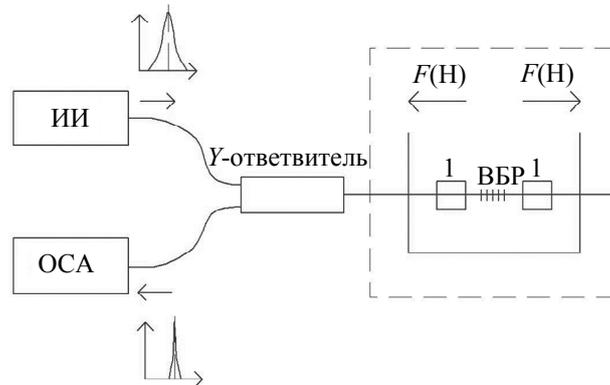


Рис. 3. Оптическая схема с источником излучения (ИИ) и оптическим спектроанализатором (ОСА) для исследования влияния растяжения оптического волокна с силой  $F(H)$  на спектр ВБР

### Варианты защитного покрытия ВБР

Вначале была получена зависимость сдвига длины волны брэгговского резонанса решетки от приложенной силы натяжения для ОВ с незащищенной ВБР. Далее исследовались образцы с различными вариантами покрытия, в том числе: восстановленное акрилатное покрытие; металлический капилляр (диаметром 900 мкм), приклеенный эпоксидным клеем; металлический капилляр, приклеенный клеем, отверждаемым ультрафиолетовым (УФ) излучением; поливинилхлоридная (ПВХ) трубка (диаметром 900 мкм), приклеенная УФ-отверждаемым клеем; комплект для защиты сварного соединения (КДЗС)<sup>1</sup> с металлическим стержнем; КДЗС с металлическим стержнем, приклеенный эпоксидным клеем; КДЗС с металлическим стержнем, приклеенный УФ-отверждаемым клеем; КДЗС без металлического стержня.

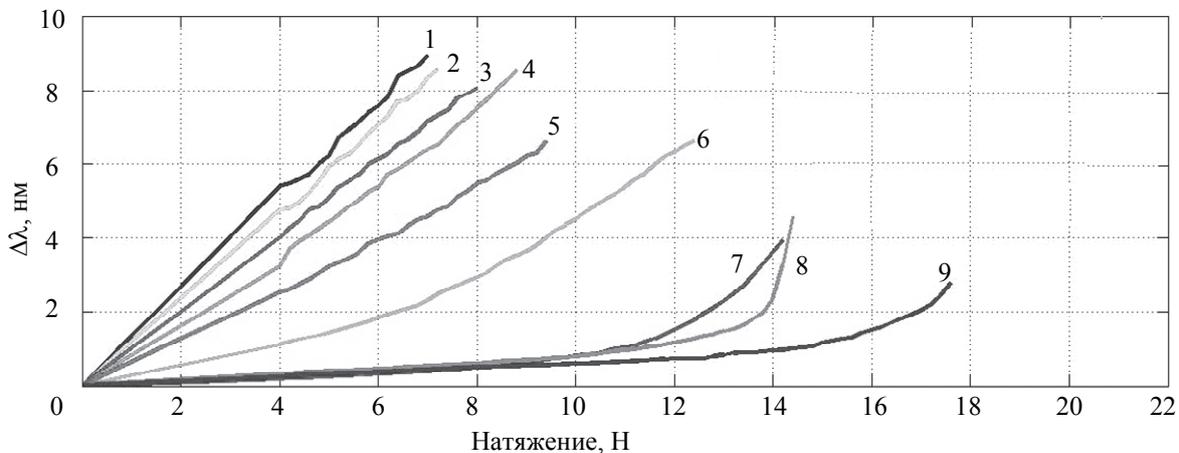


Рис. 4. Зависимость величины сдвига брэгговского резонанса решетки от силы натяжения для различных покрытий волоконной решетки Брэгга (1 – незащищенное волокно; 2 – восстановленное акрилатное покрытие; 3 – КДЗС без металлического стержня; 4 – металлический капилляр + эпоксидный клей; 5 – ПВХ трубка (900 мкм) + УФ клей; 6 – металлический капилляр + УФ клей; 7 – КДЗС с металлическим стержнем + эпоксидный клей; 8 – КДЗС с металлическим стержнем; 9 – КДЗС с металлическим стержнем + УФ клей)

Использованы следующие технологии создания защитных покрытий:

- акрилатное покрытие создавалось с помощью аппарата для восстановления акрилатного покрытия оптического волокна Fujikura FSR-02 с использованием УФ-отверждаемого покрытия DeSolute DS-2015;
- КДЗС как с металлическим стержнем, так и без него закреплялась на ОВ с ВБР с помощью печи для термоусадки Fujikura SH-7; металлический капилляр и ПВХ трубка надевались на область световода с

<sup>1</sup> Гильза из термоусадочного материала с металлической трубкой в роли сердцевины, внутри которой есть еще одна трубка из композитного материала. При нагреве высокой температурой всей гильзы внутренняя трубка расплавляется и осаждается на оптическое волокно. Металлический сердечник служит надежной защитой от изгиба. Внешняя термоусадочная трубка защищает от влаги и пыли, препятствует растяжению защищенной области.

записанной ВБР и приклеивались к ОВ либо эпоксидным клеем, либо УФ-отверждаемым клеем по краям.

На основе измерений построены зависимости величины изменения длины волны брэгговского резонанса решетки от приложенной силы натяжения для всех образцов (рис. 4). Все изученные в работе покрытия уменьшают величину сдвига от приложенной силы натяжения. КДЗС с металлическим стержнем эффективнее других защищает ВБР от внешнего воздействия. Кроме того, из рис. 4 видно, что использованные покрытия увеличивают механическую прочность ОВ с записанными ВБР. Так, для незащищенной ВБР обрыв произошел при приложении силы в 7 Н к концам участка ОВ длиной 100 мм, а для ВБР, защищенной осажденной КДЗС с металлическим стержнем, приклеенной УФ-отверждаемым клеем, обрыв произошел только при приложении силы в 17,5 Н.

Рис. 5 демонстрирует разницу между сдвигом длины волны брэгговского резонанса волоконной решетки без защитного покрытия (рис. 5, а) и решетки, защищенной осажденной КДЗС (рис. 5, б), при равных условиях силы натяжения.

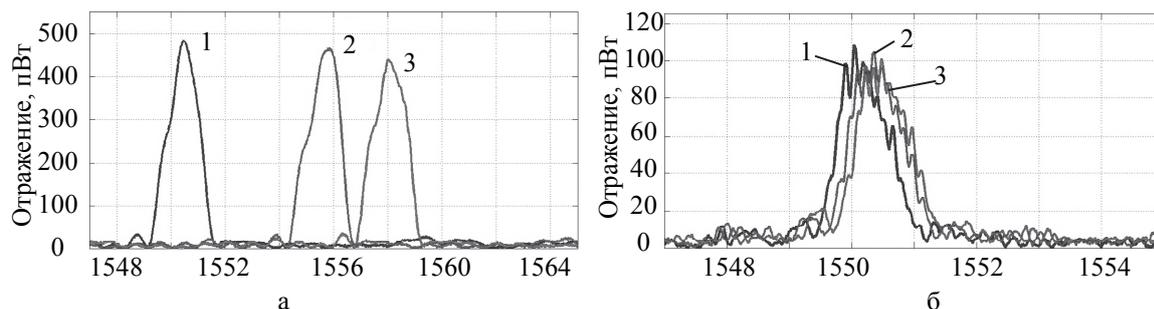


Рис. 5. Спектры волоконной брэгговской решетки типа II, приложении к оптическому волокну продольной силы ( $F$ ) для: ВБР без защитного покрытия (а); ВБР с осажденным на оптическое волокно комплектом для защиты сварного соединения (б) (1 –  $F=0$ , 2 –  $F=4$ Н, 3 –  $F=6$ Н)

На рис. 5, а, растяжение волокна с ВБР силой в 6 Н вызвало сдвиг длины волны брэгговского резонанса незащищенной решетки на 7,5 нм. Из рис. 5, б, видно, что сдвиг длины волны уменьшился до 0,5 нм. Следовательно, термоусаживаемая гильза КДЗС с металлическим стержнем, приклеенная УФ-отверждаемым клеем, уменьшила сдвиг длины волны Брэгга от приложенной растягивающей силы в 15 раз по сравнению с незащищенным образцом. Гильза КДЗС имеет внешний диаметр 2 мм и длину 60 мм и может использоваться без каких-либо ограничений в продольных датчиках, например, в протяженной волоконно-оптической гидроакустической антенне. Однако данное покрытие может стать препятствием при использовании его в датчиках, где требуется намотка волокна на сравнительно небольшие диаметры.

### Заключение

Получена зависимость сдвига длины волны брэгговского резонанса волоконной решетки показателя преломления от приложенной растягивающей силы. Исследованы варианты защитных покрытий брэгговской решетки. Предложенные покрытия увеличивают механическую прочность оптического волокна с записанными волоконными брэгговскими решетками. Наименьший сдвиг длины волны брэгговского резонанса от приложенного механического растягивающего воздействия был у решетки, закрытой комплектом для защиты сварного соединения, приклеенным с двух сторон клеем, отверждаемым ультрафиолетовым излучением. Подобное покрытие может быть использовано для уменьшения внешнего воздействия на брэгговскую решетку в составе фазовых интерферометрических датчиках. Кроме того, данные варианты покрытий могут быть использованы в спектрально чувствительных датчиках на основе волоконных брэгговских решеток, где для различных задач может потребоваться различная чувствительность решетки к приложенной растягивающей силе.

### References

1. Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication. *Applied Physics Letters*, 1978, vol. 32, no. 10, pp. 647–649. doi: 10.1063/1.89881
2. Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Optics Letters*, 1989, vol. 14, no. 15, pp. 823–825. doi: 10.1364/OL.14.000823
3. Okosi T., Okamoto K., Otsu M., Nisihara H., Kuma K., Hatate K. *Fiber-Optic Sensors*. Leningrad, Energoatomdat Publ., 1991, 256 p. (in Russian)
4. Lefevre H. *The Fiber-Optic Gyroscope*. London, Artech House, 1992, 314 p.
5. Varzhel S.V., Strigalev V.E. Metod ustraneniya vliyaniya signala pomekhi na chuvstvitel'nost' priema gidroakusticheskoi anteny na osnove volokonnykh Breggovskikh reshetok [Method for eliminating the noise signal influence on the sensitivity of receiving hydroacoustic antenna based on fiber Bragg gratings].

- Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2010, no. 5 (69), pp. 5–8.
6. Meshkovsky I.K., Varzhel S.V., Belikin M.N., Kulikov A.V., Brunov V.S. Termicheskiy otzhig reshetok Bregga pri izgotovlenii volokonno-opticheskikh fazovykh interferometricheskikh datchikov [Thermal Annealing of Bragg Grating on Manufacturing of Fiber-Optic Phase Sensor]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2013, vol. 56, no. 5, pp. 91–93.
  7. Lawrence C.M., Nelson D.V., Udd E., Bennett T. A fiber optic sensor for transverse strain measurement. *Experimental Mechanics*, 1999, vol. 39, no. 3, pp. 202–209.
  8. Meltz G., Morey W.W. Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1991, vol. 1516, pp. 185–199. doi: 10.1117/12.51164
  9. Yoffe G.W., Krug P.A., Ouellette F., Thorncraft D.A. Passive temperature-compensating package for optical fiber gratings. *Applied Optics*, 1995, vol. 34, no. 30, pp. 6859–6861.
  10. Lee S.M., Gu X. Passive temperature compensating package for optical long period fiber gratings. *Journal of the Optical Society of Korea*, 1999, vol. 3, no. 2, pp. 74–79.
  11. Othonos A. Fiber Bragg gratings. *Review of Scientific Instruments*, 1997, vol. 68, no. 12, pp. 4309–4341.
  12. Malo B., Johnson D.C., Bilodeau F., Albert J., Hill K.O. Single-excimer-pulse writing of fiber gratings by use of a zero-order nulled phase mask: grating spectral response and visualization of index perturbations. *Optics Letters*, 1993, vol. 18, no. 15, pp. 1277–1279.
  13. Varzhel S.V., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Meshkovsky I.K. Recording Bragg gratings in a birefringent optical fiber with a single 20-ns pulse of an excimer laser. *Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal)*, 2012, vol. 79, no. 4, pp. 257–259. doi: 10.1364/JOT.79.000257
  14. Meshkovskiy I.K., Strigalev V.E., Kulikov A.V., Varzhel' S.V. Bragg gratings induced in birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding. *Journal of Photonics*, 2013, art. 936036. doi: 10.1155/2013/936036
  15. Archambault J.-L., Reekie L., Russell P.St.J. 100% reflectivity Bragg reflectors produced in optical fibres by single excimer laser pulses. *Electronics Letters*, 1993, vol. 29, no. 5, pp. 453–455. doi: 10.1049/el:19930303
  16. Eron'jan M.A. *Process of Manufacture of Fibrous Light Guides Preserving Radiation Polarization*. Patent RF, no. RU2155359, 2000.
  17. Bureev S.V., Dukel'skii K.V., Eronyan M.A., Komarov A.V., Levit L.G., Khokhlov A.V., Zlobin P.A., Strakhov V.I. Processing large blanks of anisotropic single-mode lightguides with elliptical cladding. *Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal)*, 2007, vol. 74, no. 4, pp. 297–298.
  18. Aksarin S.M., Arkhipov S.V., Varzhel S.V., Kulikov A.V., Strigalev V.E. Issledovanie zavisimosti parametrov anizotropnykh odnomodovykh volokonnykh svetovodov ot diametra namotki [Dependence investigation of the anisotropic single-mode fiber parameters on a windings diameter]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 6 (88), pp. 22–26.

<b>Мунько Анна Сергеевна</b>	– студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Qveenanna-93@mail.ru
<b>Варжель Сергей Владимирович</b>	– кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, vsv187@gmail.com
<b>Архипов Сергей Владимирович</b>	– аспирант, инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, thinkingcreature@yandex.ru
<b>Забиякин Александр Николаевич</b>	– студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, krazaha@gmail.com
<b>Anna S. Munko</b>	– student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Qveenanna-93@mail.ru
<b>Sergei V. Varzhel</b>	– PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, vsv187@gmail.com
<b>Sergei V. Arkhipov</b>	– postgraduate, engineer-researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, thinkingcreature@yandex.ru
<b>Alexander N. Zabiyaikin</b>	– student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, krazaha@gmail.com