

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-05-66-71

УДК 520.362, 535.417.22

Разработка и исследование волоконно-оптического датчика температуры на основе регенерированной волоконной брэгговской решетки

ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ КОННОВ¹✉, ИРИНА ДМИТРИЕВНА КАЗАЧКОВА²,
КИРИЛЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ КОННОВ³, ВАРВАРА АЛЕКСАНДРОВНА КУЛИКОВА⁴,
СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ВАРЖЕЛЬ⁵

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹dakonnov@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>

²irin.kazachkova@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3031-3625>

³kakonnov@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>

⁴kulikova_va@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0457-4517>

⁵svvarzhel@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

Аннотация

Предмет исследования. Волоконно-оптический датчик температуры на основе регенерированной волоконной брэгговской решетки. **Цель работы.** Разработка датчика высоких температур на основе регенерированной волоконной решетки Брэгга и проведение его температурного исследования до температуры 1000 °С. **Метод.** Регенерированная волоконная брэгговская решетка получена в результате отжига в высокотемпературной муфельной печи «затравочной» волоконной решетки Брэгга, записанной на нагруженное водородом оптическое волокно SMF-28, при непрерывно поднимающейся температуре от комнатной до 920 °С (температура регенерации в случае волокна SMF-28). Коэффициент отражения «затравочной» решетки максимально близок к 100%, длина структуры 15 мм. Скорость нагрева 500 град/час. **Основные результаты.** В ходе проведения работ и температурных исследований в диапазоне температур от +25 до +1000 °С с шагом в 100 °С разработан волоконно-оптический датчик температуры на основе регенерированной волоконной брэгговской решетки с коэффициентом отражения порядка 50%, температурная чувствительность которого составила 14,9 пм/град. **Практическая значимость.** Предложенный метод изготовления регенерированных волоконных решеток Брэгга позволяет использовать их в качестве чувствительного элемента датчика температуры. Его способность работать при таких высоких температурах открывает широкие возможности по применению в огромном спектре прикладных задач, сфер промышленности (например, в газотурбинных двигателях, на электростанциях, сталеплавильных заводах и др.). Простота его реализации позволяет получить волоконно-оптический датчик температуры без применения дополнительного оборудования и материальных затрат.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, регенерация, датчик температуры, высокотемпературные измерения, температурная чувствительность

Ссылка для цитирования: Коннов Д.А., Казачкова И.Д., Коннов К.А., Куликова В.А., Варжель С.В. Разработка и исследование волоконно-оптического датчика температуры на основе регенерированной волоконной брэгговской решетки // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 5. С. 66–71. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-05-66-71>

Коды OCIS: 120.2230, 050.2230

Development and research of a fiber-optic temperature sensor based on a regenerated fiber Bragg grating

DMITRIY A. KONNOV¹✉, IRINA D. KAZACHKOVA², KIRILL A. KONNOV³,
VARVARA A. KULIKOVA⁴, SERGEY V. VARZHEL⁵

University ITMO, St. Petersburg, Russia

¹dakonnov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>

²irin.kazachkova@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-3031-3625>

³kakonnov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>

⁴kulikova_va@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-0457-4517>

⁵svvarzhel@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>

Abstract

Subject of study. Fiber-optic temperature sensor based on a regenerated fiber Bragg grating. **Aim of study.** Development of a high temperature sensor based on a regenerated fiber Bragg grating and conducting its temperature study up to a temperature of 1000 °C. **Method.** The regenerated fiber Bragg grating is obtained by annealing in a high-temperature muffle furnace with a “seed” fiber Bragg grating recorded on hydrogenated optical fiber SMF-28, at a continuously rising temperature from room temperature to 920 °C (regeneration temperature in the case of SMF-28 fiber). The reflection coefficient of the “seed” grating is as close as possible to 100%, the structure length is 15 mm. Heating rate 500 °C/hour. **Main results.** During the work and temperature studies, which were carried out in the temperature range from +25 to +1000 °C in steps of 100 °C, a fiber-optic temperature sensor was developed based on a regenerated fiber Bragg grating with a reflectance of about 50%, the temperature sensitivity of which was 14,9 pm/°C. **Practical significance.** The proposed method for manufacturing regenerated fiber Bragg gratings makes it possible to use them as a sensitive element of a temperature sensor. Its ability to operate at such high temperatures opens up wide possibilities for use in a huge range of industrial applications (for example, gas turbine engines, power plants, steel mills, etc.). The simplicity of its implementation makes it possible to obtain a fiber-optic temperature sensor without the use of additional equipment and material costs.

Keywords: fiber Bragg grating, regeneration, temperature sensor, high-temperature measurements, temperature sensitivity

For citation: Konnov D.A., Kazachkova I.D., Konnov K.A., Kulikova V.A., Varzhel S.V. Development and research of a fiber-optic temperature sensor based on a regenerated fiber Bragg grating [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 5. P. 66–71. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-05-66-71>

OCIS codes: 120.2230, 050.2230

ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптические датчики, способные измерять высокие температуры, являются одним из ключевых элементов во многих промышленных процессах, требующих работы в условиях высоких температур. Отражающая способность волоконных брэгговских решеток (ВБР) существенно ухудшается в условиях высокой температуры окружающей среды, что ограничивает их применение в газотурбинах двигателях, на электростанциях, предприятиях, производящих черные и цвет-

ные металлы, космических исследовательских модулях, в нефтегазовой и аэрокосмической промышленности. За последние два десятилетия предложено достаточно много решений для повышения рабочей температуры ВБР, включая гиперсенсibiliзацию путем предварительного облучения, оптимизацию состава стекла и изготовление решеток типов II и ПА с использованием фемтосекундных лазеров [1].

Одним из решений является использование регенерированных волоконных брэгговских решеток (РВБР). На сегодняшний день не су-

ществует общепринятой теории, которая могла бы объяснить все наблюдаемые явления, связанные с эффектом регенерации [2].

Процесс изготовления РВБР относительно прост и широко обсуждается в литературе [3–15]. Обычно ВБР записываются в волокно, нагруженное водородом, с помощью ультрафиолетового (УФ) лазера и фазовой маски, которое затем отжигается при определенной температуре (от 500 до 1000 °С). Отжиг такого типа приводит к полной деградации исходной ВБР (т.е. «затравочной» ВБР) и последующему росту новой ВБР (т.е. РВБР).

Таким образом, целью данной работы является разработка датчика высоких температур на основе РВБР и проведение его температурного исследования до температуры 1000 °С.

МЕТОД РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ

В настоящей работе получение РВБР осуществлялось с применением высокотемпературной муфельной печи, куда предварительно помещалось нагруженное водородом оптическое волокно SMF-28 с записанной в него «затравочной» ВБР, коэффициент отражения последней при этом максимально близок к 100%, длина структуры 15 мм. Для формирования структуры в волокне использовались схема с применением интерферометра Тальбота и эксимерная лазерная система *Optosystems CL-7500*. Схема установки для проведения процесса регенерации представлена на рис. 1.

В ходе проведенной работы была определена наиболее эффективная температура регенерации ВБР. Для этого 6 комплементарных образцов ВБР поочередно помещались в высокотемпературную муфельную печь, где проводился их равномерный отжиг. Установлено, что наиболее эффективная регенерация ВБР (коэффициент отражения 99,9%, длина 15 мм) наблюдалась при температуре 920 °С, коэффициент отражения РВБР составил 53%. На рис. 2 представлена зависимость коэффициента отражения РВБР от температуры регенерации.

В связи с необходимостью повышения фоторефрактивности оптического волокна перед началом процесса регенерации стандартное волокно SMF-28 выдерживалось в камере с водородом в течение 2 недель при температуре 60 °С. После этого в него записывалась

ВБР с коэффициентом отражения порядка 99,9%, длина структуры 15 мм. Спектр отражения «затравочной» ВБР представлен на рис. 3. Неровности спектра объясняются необходимостью длительной записи решетки для получения максимального коэффициента отражения. Как видно из рисунка, до процесса регенерации мощность отраженного сигнала ВБР составила 54,1 нВт при комнатной температуре.

В процессе термической регенерации ВБР отжигалась в высокотемпературной муфельной печи (LOIP LF-9/13). Температура отжига непрерывно увеличивалась (скорость нагрева 500 град/час) от комнатной до температуры регенерации (в случае SMF-28 составляет

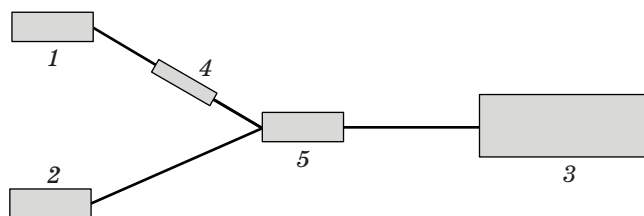


Рис. 1. Схема установки для проведения процесса регенерации ВБР. 1 — широкополосный источник излучения, 2 — анализатор спектра, 3 — высокотемпературная муфельная печь, 4 — оптический изолятор, 5 — Y-ответвитель

Fig. 1. Schematic representation of the installation for carrying out the process of regeneration of the fiber Bragg grating. (1) Broadband radiation source, (2) spectrum analyzer, (3) high-temperature muffle furnace, (4) optical isolator, (5) Y-coupler

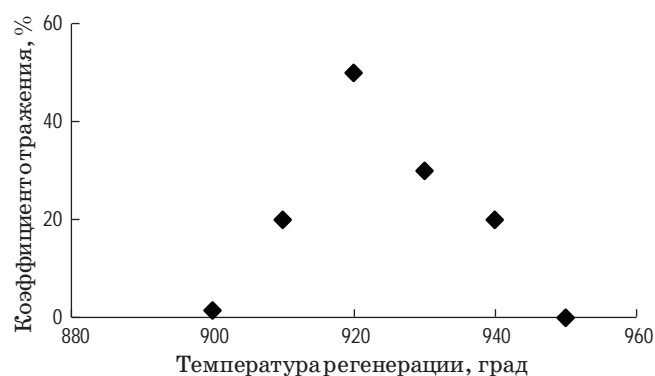


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения РВБР от температуры регенерации

Fig. 2. Reflection coefficient dependence of the regenerated fiber Bragg grating on the regeneration temperature



Рис. 3. Спектр отражения «затравочной» волоконной брэгговской решетки

Fig. 3. Reflection spectrum of a «seed» fiber Bragg grating

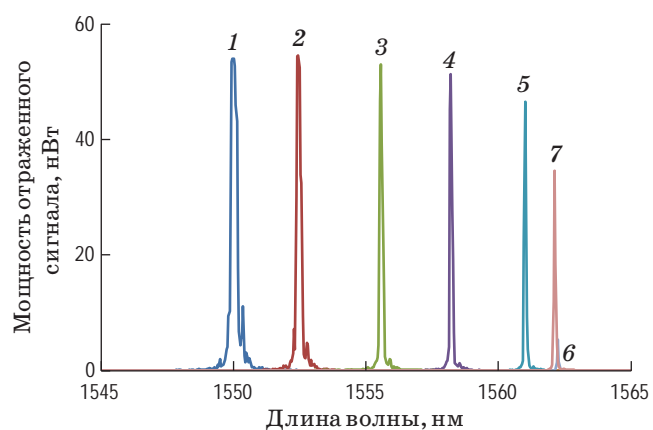


Рис. 4. Температурные зависимости спектров ВБР при температурах 25 (1), 200 (2), 400 (3), 600 (4), 800 (5), 912 (6), 920 (7) °С

Fig. 4. Temperature dependences of the fiber Bragg grating spectra at temperatures (1) 25, (2) 200, (3) 400, (4) 600, (5) 800, (6) 912, (7) 920 °С

примерно 920 °С), при которой отражательная способность решетки быстро падает до тех пор, пока брэгговское отражение не перестает регистрироваться анализатором оптического спектра. Решетка отжигалась при этой температуре до завершения процесса регенерации. Весь процесс занял примерно 145 мин.

В процессе отжига ВБР заметен (рис. 4) резкий спад отражаемой мощности при температуре около 908 °С. В этот момент происходит так называемое стирание «затравочной» ВБР, а через некоторое время начинается процесс регенерации при 920 °С.

При достижении температуры 912 °С начинается рост коэффициента отражения и со-

ответственно появление РВБР. Этот процесс продолжается вплоть до температуры 920 °С, после чего РВБР выдерживается при этой температуре около 30 мин. На рис. 5 представлены температурные зависимости центральной длины волны и коэффициента отражения ВБР на всем протяжении процесса регенерации.

После окончательной стабилизации РВБР коэффициент отражения составил 53%. Спектры отражения «затравочной» ВБР и РВБР представлены на рис. 6.

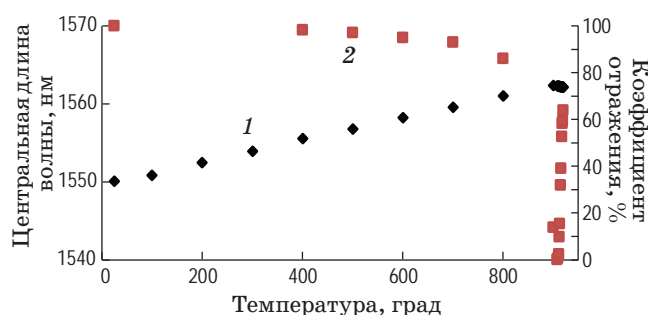


Рис. 5. Температурные зависимости изменения центральной длины волны отраженного излучения (1) и коэффициента отражения (2) ВБР во время процесса регенерации

Fig. 5. Temperature dependences of (1) changes in the central wavelength of reflected radiation and (2) reflection coefficient of a fiber Bragg grating during the regeneration process

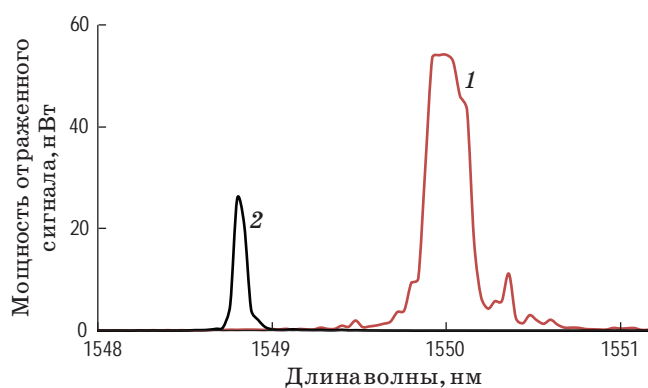


Рис. 6. Спектры отражения «затравочной» ВБР (коэффициент отражения около 99,9%) — (1) и РВБР (коэффициент отражения около 53%) — (2)

Fig. 6. Reflection spectra of (1) a «seed» fiber Bragg grating (reflection coefficient about 99.9%) and (2) a regenerated fiber Bragg grating (reflection coefficient about 53%)

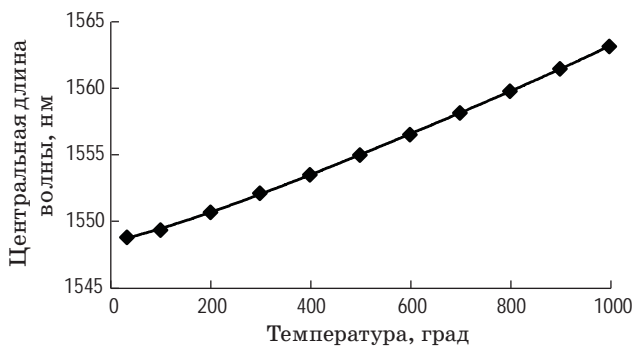


Рис. 7. Температурная зависимость центральной длины волны отраженного излучения РВБР при нагреве

Fig. 7. Temperature dependence of the reflected radiation central wavelength of a regenerated fiber Bragg grating upon heating

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕГЕНЕРИРОВАННОЙ ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ

В процессе температурных исследований РВБР размещалась в высокотемпературной муфельной печи и при изменении температуры фиксировался спектр ее отражения. Схема установки аналогична той, что приведена на рис. 1. Исследования проводились в температурном диапазоне от +25 до +1000 °С с шагом в 100 °С. На рис. 7 представлена зависимость изменения центральной длины волны отраженного излучения РВБР от температуры после усреднения данных 5 циклов нагрева.

Анализируя полученную зависимость можно сказать, что температурная чувствительность полученного образца волоконно-оптического датчика температуры на основе РВБР составила 14,9 пм/град.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Dinusha S. Gu., On K.L., Zhengyong L., et al. Resurgent regenerated fiber Bragg gratings and thermal annealing techniques for ultra-high temperature sensing beyond 1400 °C // *Opt. Exp.* 2020. V. 28. № 7. P. 10595–10608. <https://doi.org/10.1364/OE.375421>
- Leonhard P., Franz J.D., Robert R.J.M., et al. Regenerated fibre Bragg gratings: A critical assessment of more than 20 years of investigations // *Opt. Laser Technol.* 2021. V. 134. P. 106650. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106650>
- Safari Yazd N., Chah K., Caucheteur C., et al. Comparison of regenerated fiber Bragg gratings properties in standard and B/Ge co-doped single-mode silica fibers // *IEEE Sens. J.* 2020. V. 28. № 7. P. 10595–10608. <https://doi.org/10.1364/OE.375421>
- Lindner E., Canning J., Chojetzki C., et al. Post-hydrogen-loaded draw tower fiber Bragg gratings and their thermal regeneration // *Appl. Opt.* 2011. V. 50. № 17. P. 2519–2522. <https://doi.org/10.1364/AO.50.002519>
- Holmberg P., Laurell F., Fokine M. Influence of pre-annealing on the thermal regeneration of fiber Bragg gratings in standard optical fibers // *Opt. Exp.* 2015. V. 23. № 21. P. 27520–27535. <https://doi.org/10.1364/OE.23.027520>
- Wang T., Shao L., Canning J., et al. Regeneration of fiber Bragg gratings under strain // *Appl. Opt.* 2013. V. 52. № 10. P. 2080–2085. <https://doi.org/10.1364/AO.52.002080>
- Cook K., Shao L., Canning J. Regeneration and helium: Regenerating Bragg gratings in helium-loaded

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформирована концепция конструкции датчика температуры на основе регенерированной волоконной решетки Брэгга, а также изготовлены макетные образцы волоконно-оптического датчика температуры.

В ходе исследования решены следующие задачи:

- Изготовлен макетный образец волоконно-оптического датчика температуры на основе РВБР с коэффициентом отражения решетки порядка 50%,

- Проведены температурные исследования разработанного образца, в ходе которых получена температурная зависимость центральной длины волны отражения РВБР при нагреве от +25 до +1000 °С (5 циклов). Температурная чувствительность полученного образца волоконно-оптического датчика температуры составила 14,9 пм/град.

Применение разработанного волоконно-оптического датчика температуры позволит упростить процесс обработки данных относительно способа опроса ранее разработанного нами волоконно-оптического датчика температуры на основе интерферометра Фабри–Перо с отражающими тонкопленочными многослойными структурами [16].

В ходе дальнейшего исследования планируется проведение оптимизации условий и методик проведения температурных исследований, а также оптимизации метода отжига для получения РВБР. Например, осуществление процесса регенерации в стальном капилляре, необходимом для уменьшения температурного градиента, а также для повышения прочностных характеристик чувствительного элемента.

- germanosilicate optical fibre // *Opt. Mater. Exp.* 2012. V. 2. № 12. P. 1733–1742. <https://doi.org/10.1364/OME.2.001733>
8. Lindner E., Chojetzki C., Brückner S., et al. Thermal regeneration of fiber Bragg gratings in photosensitive fibers // *Opt. Exp.* 2009. V. 17. № 15. P. 12523–12531. <https://doi.org/10.1364/OE.17.012523>
 9. Lai M., Lim K., Gunawardena D., et al. Thermal stress modification in regenerated fiber Bragg grating via manipulation of glass transition temperature based on CO₂-laser annealing // *Opt. Lett.* 2015. V. 40. № 5. P. 748–751. <https://doi.org/10.1364/OL.40.000748>
 10. Bandyopadhyay S., Canning J., Biswas P., et al. A study of regenerated gratings produced in germanosilicate fibers by high temperature annealing // *Opt. Exp.* 2011. V. 19. № 2. P. 1198–1206. <https://doi.org/10.1364/OE.17.012523>
 11. Chong S., Chong W., Harun S., et al. Regenerated fibre Bragg grating fabricated on high germanium concentration photosensitive fibre for sensing at high temperature // *Opt. Laser Technol.* 2012. V. 44. № 4. P. 821–824. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.11.024>
 12. Cheong Y., Chong W., Chong S., et al. Regenerated type-IIa fibre Bragg grating from a Ge-B codoped fibre via thermal activation // *Opt. Laser Technol.* 2014. V. 62. P. 69–72. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.01.007>
 13. Lai M., Gunawardena D., Lim K., et al. Thermal activation of regenerated fiber Bragg grating in few mode fibers // *Opt. Fiber Technol.* 2016. V. 28. P. 7–10. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.01.007>
 14. Lindner E., Canning J., Chojetzki C., et al. Thermal regenerated type IIa fiber Bragg gratings for ultra-high temperature operation // *Opt. Commun.* 2011. V. 284. № 1. P. 183–185. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2010.08.075>
 15. Oliveira V., Abe I., Alberto N., et al. Fibre Bragg gratings, towards a better thermal stability at high temperatures // *Phys. Procedia.* 2015. V. 62. P. 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.02.013>
 16. Моор Я.Д., Коннов К.А., Плотников М.Ю. и др. Высокоточный волоконно-оптический датчик температуры на основе интерферометра Фабри–Перо с отражающими тонкопленочными многослойными структурами // *Научно-техн. вест. информ. технол., механики и оптики.* 2022. Т. 22. № 3. С. 442–449. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-3-442-449>
 - Moор Ya.D., Konnov K.A., Plotnikov M.Yu., et al. High-precision fiber-optic temperature sensor based on a Fabry–Perot interferometer with reflective thin-film multilayer structures [in Russian] // *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics.* 2022. V. 22. № 3. P. 442–449. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-3-442-449>

АВТОРЫ

Дмитрий Александрович Коннов — аспирант, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>; dakonnov@itmo.ru

Ирина Дмитриевна Казачкова — аспирант, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-3031-3625>; irin.kazachkova@gmail.com

Кирилл Александрович Коннов — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 56032492300; <https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>; kakonnov@itmo.ru

Варвара Александровна Куликова — студент, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 57997721300; <https://orcid.org/0000-0002-0457-4517>; kulikova_va@itmo.ru

Сергей Владимирович Варжель — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 55247304200; <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>; svvarzhel@itmo.ru

AUTHORS

Dmitriy A. Konnov — PhD Student, Engineer, University ITMO, St. Petersburg, 197101, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>; dakonnov@itmo.ru

Irina D. Kazachkova — PhD Student, Engineer, University ITMO, St. Petersburg, 197101, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3031-3625>; irin.kazachkova@gmail.com

Kirill A. Konnov — PhD (Physics and Mathematics), Head of laboratory, University ITMO, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 56032492300; <https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>; kakonnov@itmo.ru

Varvara A. Kulikova — Student, Engineer, University ITMO, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 57997721300; <https://orcid.org/0000-0002-0457-4517>; kulikova_va@itmo.ru

Sergey V. Varzhel — PhD (Physics and Mathematics), Head of laboratory, University ITMO, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 55247304200; <https://orcid.org/0000-0002-3120-8109>; svvarzhel@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 06.12.2023
Одобрена после рецензирования 16.02.2024
Принята к печати 27.03.2024

The article was submitted to the editorial office 06.12.2023
Approved after review 16.02.2024
Accepted for publication 27.03.2024