



УДК 536.52

## ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Герасютенко<sup>a</sup>, В.А. Кorableв<sup>a</sup>, Д.А. Минкин<sup>b</sup>, А.В. Шарков<sup>a</sup><sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация<sup>b</sup> Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, 196105, Российская Федерация

Адрес для переписки: viktoriya.gerasyutenko@mail.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 29.10.18, принята к печати 19.12.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-82-86

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Герасютенко В.В., Кorableв В.А., Минкин Д.А., Шарков А.В. Диагностика теплофизических свойств и контроль качества изделий из высокотеплопроводных материалов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 82–86. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-82-86

### Аннотация

**Предмет исследования.** Предложен метод выявления дефектов в изделиях из высокотеплопроводного материала и определения теплопроводности изделия путем бесконтактной невозмущающей тепловизионной макросъемки. **Метод.** Согласно предложенному методу производится локальный нагрев и последующее охлаждение изделия, измеряются температурные поля его поверхностей. Метод выявления дефектов основан на анализе температурных полей. **Основные результаты.** Разработана экспериментальная установка, состоящая из измерительной ячейки исследуемого образца, на одном крае которого устанавливается охладитель, на противоположном крае монтируется электрический нагреватель. Исследуемые образцы представляли собой пластины размером 120 × 60 × 2 мм из карбида кремния с алмазным заполнением. Проведена тепловизионная съемка образцов. Диапазон нагрева образцов: от 10 до 90 °С. Исследуемые образцы находились в двустороннем лучисто-конвективном теплообмене с окружающей средой. Получены термограммы с результатами тепловизионной съемки, выполнено сравнение распределения температуры на образце. В образце с дефектом в виде трещины наблюдалось ступенчатое изменение температуры в области трещины, в образце без дефекта – равномерный градиент температуры. **Практическая значимость.** Предложенный метод тепловизионной съемки является неразрушающим и позволяет бесконтактно контролировать качество изделий радиоэлектронной техники, а также их теплофизические свойства. По градиенту температур и измеренным значениям теплового потока определяется теплопроводность исследуемого образца. Метод предназначен для исследования высокотеплопроводных (с теплопроводностью выше 200 Вт/(м·К)) керамических материалов. При проведении тепловизионной съемки необходимо обеспечить высокий коэффициент излучения наблюдаемой поверхности исследуемого образца, например, нанеся краску с коэффициентом излучения не менее 0,95 или покрыв поверхность сажей.

### Ключевые слова

тепловод, теплопроводность, тепловизор, композиционный материал, карбид кремния с алмазным заполнением, теплофизические свойства, высокотеплопроводный материал, градиент температур, измерительная ячейка, охладитель, электрический нагреватель

## DIAGNOSTICS OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES AND QUALITY CONTROL FOR DEVICES MADE OF HIGH THERMAL CONDUCTIVITY MATERIALS

V.V. Gerasyutenko<sup>a</sup>, V.A. Korablev<sup>a</sup>, D.A. Minkin<sup>b</sup>, A.V. Sharkov<sup>a</sup><sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation<sup>b</sup> Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation

Corresponding author: viktoriya.gerasyutenko@mail.ru

### Article info

Received 29.10.18, accepted 19.12.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-82-86

Article in Russian

**For citation:** Gerasyutenko V.V., Korablev V.A., Minkin D.A., Sharkov A.V. Diagnostics of thermophysical properties and quality control for devices made of high thermal conductivity materials. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 82–86 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-82-86

**Abstract**

**Subject of study.** We propose detection method for potential defects in the structure of device made of materials with high thermal conductivity, and thermal conductivity determination by the method of contact-free noninvasive thermal-imaging macrography. **Method.** The principle of the method lies in the following: local heating and cooling of the device is carried out, the temperature fields of its surfaces are measured. This method is based on the analysis of temperature fields. **Main results.** The study on the presence of defects in highly heat conductive material based on silicon carbide with diamond filling was performed. The experimental setup was developed. It consists of a measuring cell, a test sample with a cooler installed on the one edge and electric heater on the opposite edge. The test samples had the form of silicon carbide plates with diamond filling, each of 120×60 mm in size and 2 mm in thickness. Thermal imaging of samples was carried out. The samples heating range varied from 10 to 90 °C. The test samples were in radiation-convective heat exchange with the environment on both sides. Initially, it was unknown which of the samples has a defect. The thermograms with thermal imaging results were obtained. The analysis of the obtained thermograms was carried out; the temperature distribution on the samples was compared. As a result of this comparison, both the sample with a defect in the form of a crack (a stepwise temperature change in the crack region was observed), and the sample without defect (with the uniform temperature gradient) were determined. **Practical relevance.** The proposed method of thermal imaging is non-destructive, contactless and allows for the quality control of electronic devices made of highly conductive materials, as well as their thermal properties. The thermal conductivity of the sample can be determined by the temperature gradient and the measured heat flux values. This method is used for research of high-heat ceramic materials (with thermal conductivity above 200 W/m·K). Measurements were carried out in steady state behavior. At thermal imaging it is necessary to provide a high radiation coefficient of test sample observed surface. For this purpose, the surface is covered with paint with a radiation coefficient not less than 0.95 or the surface is covered with soot.

**Keywords**

heat sink, thermal conductivity, thermal imager, composite material, silicon carbide with diamond filling, thermal properties, highly heat conductive material, temperature gradient, measuring cell, cooler, electric heater

**Введение**

При разработке и проектировании радиоэлектронных изделий повышенной мощности важно обеспечить эффективный отвод теплоты. Основными механизмами, которыми осуществляется отвод теплоты от изделий радиоэлектронной техники, являются теплопроводность, тепловое излучение и конвекция. Как правило, в реальных условиях эти три механизма передачи теплоты выполняются одновременно. Одним из основных путей эффективного отвода теплоты в изделиях мощной электроники является применение теплоотводов из высокотеплопроводных материалов [1–3]. Для создания теплоотводов полупроводниковых приборов широко применяются керамика из оксида бериллия, с высокой теплопроводностью и высокими диэлектрическими свойствами, а также алюмонитридная керамика и поликристаллический алмаз [4–6].

В настоящей статье рассмотрен высокотеплопроводный композиционный материал на основе карбида кремния с алмазным заполнением. Данный материал отличается более высокой теплопроводностью, чем материалы на основе меди и алюминия. Высокая теплопроводность (теплопроводность материалов на основе карбида кремния с алмазным заполнением или углерод-углеродных композиций может существенно превышать 500 Вт/(м·К)), твердость и плотность объясняются микроструктурой материала, формируемой жесткой карбидокремниевой матрицей, которая армирована алмазными частицами. Созданные на основе этих материалов изделия применяются для кондуктивного отвода теплоты от полупроводниковых структур с высокой плотностью тепловыделений [7]. Внедрение такого рода композиционных материалов, обладающих исключительно высокой теплопроводностью 500–700 Вт/(м·К), дает возможность создания полупроводниковых приборов с ранее недостижимой мощностью.

На производстве выполняются входной контроль комплектующих, а также тепловые испытания готовых приборов с целью проверки их характеристик и анализа теплового режима электронных узлов, плат и электронных систем в целом [8, 9]. Возможно контактное измерение температуры с помощью датчиков (термопары, термометры сопротивления) [8]. Поскольку измерения выполняются в отдельных точках, велика вероятность того, что дефект окажется вне поля зрения прибора. Датчики такого рода не дают полной картины распределения температуры. Также к недостаткам следует отнести трудность обеспечения хорошего контакта датчика и объекта исследований. Преимуществами бесконтактных методов измерения являются скорость и возможность избежать искажений температурного поля объекта, вносимых контактным средством. Целью настоящей работы является определение возможных дефектов в структуре изделия из высокотеплопроводного материала, а также теплопроводности изделия при помощи бесконтактной невозмущающей тепловизионной макросъемки.

**Методика проведения эксперимента. Экспериментальная установка**

В настоящее время применяются методики, основанные на использовании средств контактной термометрии. Однако процедура испытаний при этом достаточно длительна, а систематическая погрешность результатов наблюдений резко возрастает из-за малых размеров исследуемых объектов.

Для измерения теплопроводности и обнаружения скрытых дефектов в материалах,

предназначенных для изготовления теплоотводящих деталей, авторами настоящей статьи разработан метод, предполагающий использование тепловизора. Одним из преимуществ метода является то, что он является неразрушающим, а также позволяет выявить дефекты, которые не обнаруживаются другими способами [10–15].

Для проведения исследований разработана экспериментальная установка (рис. 1).

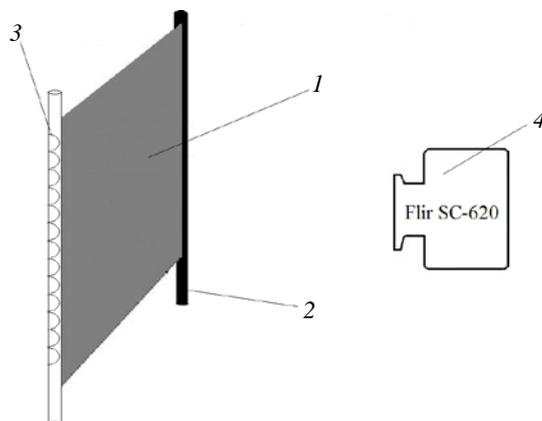


Рис. 1. Экспериментальная установка

Основой экспериментальной установки является измерительная ячейка, с помощью которой создается перепад температур по одному из направлений исследуемого образца 1. На одном крае образца устанавливается охладитель 2, на противоположном крае – электрический нагреватель 3. Охладитель 2 имеет вид пластины с каналами для прокачивания охлаждающей жидкости. На электрический нагреватель 3 подается известное значение тока и напряжения, тепловой поток распространяется вдоль пластины к охладителю.

Для исследования изделий применяется высокочувствительный тепловизор 4 с объективом, позволяющим производить макросъемку температурных полей объектов площадью менее 0,5 см<sup>2</sup> [7].

Тепловизор Flir SC-620 (рис. 2), оборудованный макрообъективом с полем зрения 24°, устанавливается на расстоянии 0,4 м от измерительной ячейки с целью фиксации излучения и отображения перепада температур. Измерения проводятся в стационарном режиме.



Рис. 2. Тепловизор Flir SC-620

### Основные результаты исследования

Результаты тепловизионной съемки исследованных образцов приведены на рис. 3. Сравнив распределение температуры на образцах, можно увидеть, что на рис. 3, б температура резко ступенчато изменяется (примерно на 10 К) в области трещины, а на рис. 3, в наблюдается равномерный градиент температуры.

Если в исследуемом образце отсутствуют трещины или другие дефекты, то полученные результаты позволяют оценить теплопроводность материала образца. Тепловой режим образца можно описать уравнением теплопроводности для пластины с теплообменом на боковой поверхности. При допущении об отсутствии перепада температур по толщине и высоте пластины уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\lambda A \frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2} - \alpha(T) P [T(x) - T_c] = 0, \quad (1)$$

где  $x = 0$  – горизонтальная координата пластины,  $\lambda$  – теплопроводность пластины,  $A$  и  $P$  – площадь и периметр поперечного сечения пластины по вертикали,  $\alpha(T)$  – коэффициент конвективного и лучистого теплообмена на боковой поверхности пластины,  $T_c$  – температура среды.

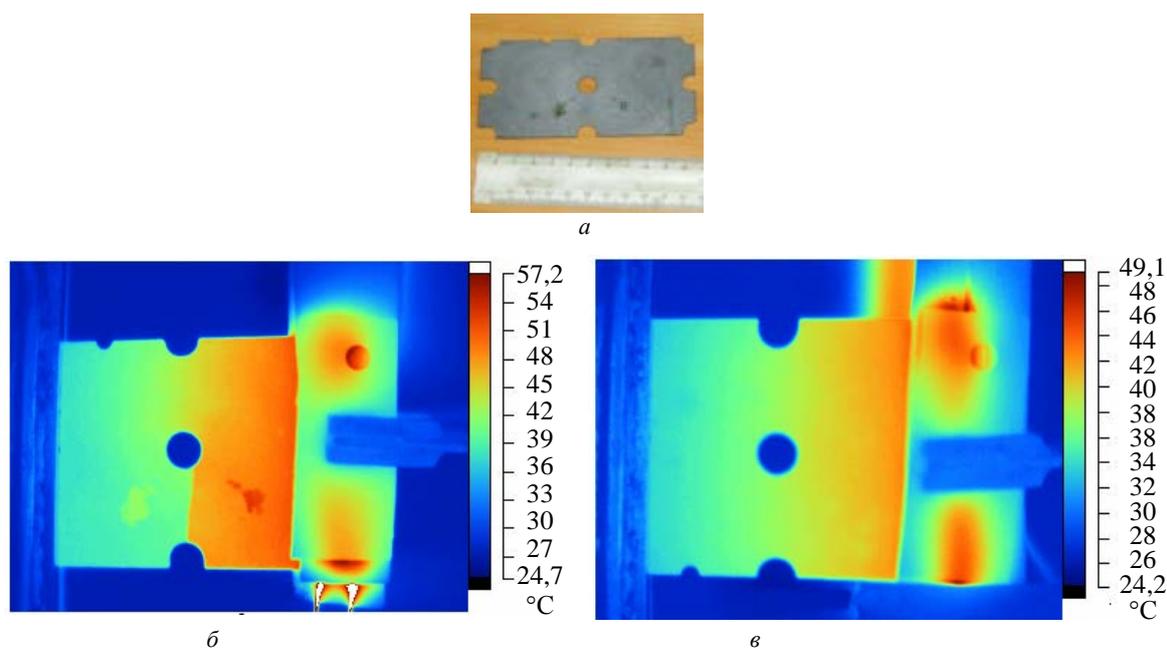


Рис. 3. а – общий вид пластины из карбида кремния с алмазным заполнением;  
 б – термограмма пластины с дефектом (трещиной между краем и центральным отверстием);  
 в – термограмма пластины без дефекта

Зависящий от температуры пластин и среды, свойств воздуха и высоты пластин коэффициент  $\alpha(T)$  может быть рассчитан по известным методикам [16, 17] или измерен экспериментально. Граничные условия I рода для уравнения (1) задаются на левой и правой стороне пластины. Значения теплопроводности можно рассчитать по формуле, полученной из уравнения (1):

$$\lambda = \frac{\alpha(T) P [T(x) - T_c]}{A \frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2}}. \quad (2)$$

В выражении (2) вторая производная  $\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2}$  определяется численно на основе измерения распределений температур по длине пластины или аналитически путем аппроксимации дискретных значений измеренных температур аналитической зависимостью.

Теплопроводность материалов на основе карбида кремния с алмазными включениями существенно зависит от размеров зерна и суммарного объема алмазов. Экспериментально получены значения теплопроводности образцов этих материалов: 460–730 Вт/(м·К), благодаря чему они перспективны для использования в изделиях электронной промышленности.

### Заключение

Таким образом, тепловизионная оценка характера распределения температуры дает возможность определять теплопроводность материала образца, а также достоверно оценивать наличие или отсутствие скрытых дефектов (неоднородностей материала, трещин, каверн) в исследуемых образцах по искажениям температурных полей.

Применение тепловизионного метода позволяет производить сплошной контроль поверхности изделия для высокоточного технического контроля изделия, определять значение теплопроводности изделия. Предложенный метод может быть использован при техническом контроле изделий в процессе их изготовления и при входном контроле изделий (сборке и монтаже радиоэлектронной аппаратуры).

### Литература

1. Катаев С., Сидоров В., Гордеев С. Алмаз-карбидный композиционный материал «Скелетон» для теплоотводов в изделиях электронной техники // Электроника: наука, технология, бизнес. 2011. № 3. С. 60–64.
2. Гордеев С.К., Корчагина С.Б., Мезенцев М.А., Каримбаев Т.Д. Алмаз-карбидкремниевые композиты «Скелетон»: строение, свойства, перспективы применения // Материалы II Международного технологического форума «Инновации».

### References

1. Kataev S., Sidorov V., Gordeev S. Diamond-carbide composite material "Skeleton" for electronic devices heat sinks. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2011, no. 3, pp. 60–64. (in Russian)
2. Gordeev S.K., Korchagina S.B., Mezentsev M.A., Karimbaev T.D. Diamond-carbide-silicon composites "Skeleton": structure, properties, perspectives of application. *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Technological Forum on Innovation, Technologies, Production*. Rybinsk, Russia, 2015. (in Russian)

- Технологии. Производство». Рыбинск, 2015.
- Поляков В.П., Ножкина А.В., Чириков Н.В. Алмазы и сверхтвердые материалы. Учебное пособие для вузов. М.: Металлургия, 1990. 327 с.
  - Зенин В.В., Колбенков А.А., Стоянов А.А., Шарпов Ю.В. Материалы для силовых полупроводниковых приборов и модулей // Твердотельная электроника, микроэлектроника и нанoeлектроника. Воронеж, 2013. С. 124–130.
  - Willander M., Friesel M., Wahab Q., Straumal B. Silicon carbide and diamond for high temperature device applications // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2006. N 17. P. 1–25. doi: 10.1007/s10854-005-5137-4
  - Сидоров В.А., Катаев С.В. Конструкционные материалы с высокой теплопроводностью для теплоотводов в изделиях электронной техники // *Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы*. 2011. № 2. С. 81–90.
  - Бородин Д.А., Кораблев В.А., Минкин Д.А., Шарков А.В. Тепловизионная дефектоскопия высокотеплопроводных материалов // Сборник трудов конференции Sensorica-2014. Санкт-Петербург, Университет ИТМО, 2014. С. 60–61.
  - Нестерук Д.А., Вавилов В.П. Тепловой контроль и диагностика. Учебное пособие. Томск, 2007. 111 с.
  - Minkina W., Dudzik S. *Infrared Thermography: Errors and Uncertainties*. Wiley, 2009. 191 p.
  - Будадин О.Н., Потопов А.И., Колганов В.И., Троицкий-Марков Т.Е. Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука, 2002. 473 с.
  - Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий // *Дефектоскопия*. 2017. № 10. С. 34–57.
  - Чуриков А.А., Коньшева Н.А., Шишкина Г.В. Проектирование оптимального режима проведения неразрушающего теплового контроля малогабаритных изделий // *Вестник ТГТУ*. 2016. Т. 22. № 1. С. 6–14. doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.006-014
  - Aldave I.J., Bosom P.V., Gonzalez L.V., de Santiago I.L., Vollheim B., Krausz L., Georges M. Review of thermal imaging systems in composite defect detection // *Infrared Physics and Technology*. 2013. V. 61. P. 167–175. doi: 10.1016/j.infrared.2013.07.009
  - Вавилов В.П. Неразрушающий контроль: Справочник. Т. 5. Тепловой контроль / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. 679 с.
  - Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Спектр, 2009. 544 с.
  - Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М-Л.: Энергия, 1965. 424 с.
  - Дульнев Г.Н., Семьяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.
  - Polyakov V.P., Nozhkina A.V., Chirikov N.V. *Diamonds and Superhard Materials*. Tutorial. Moscow, Metalluriya Publ., 1990, 327 p. (in Russian)
  - Zenin V.V., Kolbenkov A.A., Stoyanov A.A., Sharapov Y.V. Materials for power semiconductor devices and modules. *Solid-State Electronics, Microelectronics and Nanoelectronics*. Voronezh, Russia, 2013, pp. 124–130. (in Russian)
  - Willander M., Friesel M., Wahab Q., Straumal B. Silicon carbide and diamond for high temperature device applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2006, no. 17, pp. 1–25. doi: 10.1007/s10854-005-5137-4
  - Sidorov V.A., Kataev S.V. Constructional materials with high thermal conductance for heatsinks in products of electronics. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2011, no. 2, pp. 81–90. (in Russian)
  - Borodin D.A., Korablev V.A., Minkin D.A., Sharkov A.V. Thermal testing of high thermal conductivity materials. *Proc. Sensorica-2014*. St. Petersburg, 2014, pp. 60–61. (in Russian)
  - Nesteruk D.A., Vavilov V.P. *Thermal Control and Diagnostics*. Tutorial. Tomsk, Russia, 2007, 111 p.
  - Minkina W., Dudzik S. *Infrared Thermography: Errors and Uncertainties*. Wiley, 2009, 191 p.
  - Budadin O.N., Potapov A.I., Kolganov V.I., Troitsky-Markov T.E. Thermal Non-Destructive Testing of Products. Moscow, Nauka Publ., 2002, 473 p. (in Russian)
  - Vavilov V. P. Thermal nondestructive testing of materials and product: a review. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, no. 10, pp. 707–730. doi: 10.1134/S1061830917100072
  - Churikov A.A., Konyshva N.A., Shishkina G.V. Designing the optimal mode of non-destructive testing of small-sized products. *Vestnik TSTU*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 6–14. (in Russian) doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.006-014
  - Aldave I.J., Bosom P.V., Gonzalez L.V., de Santiago I.L., Vollheim B., Krausz L., Georges M. Review of thermal imaging systems in composite defect detection. *Infrared Physics and Technology*, 2013, vol. 61, pp. 167–175. doi: 10.1016/j.infrared.2013.07.009
  - Vavilov V.P. *Non-Destructive Testing. Reference. V. 5. Thermal Control*. Eds. V.V. Klyuev. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004, 679 p. (in Russian)
  - Vavilov V. P. *Infrared Thermography and Thermal Control*. Moscow, Spectr Publ., 2009, 544 p. (in Russian)
  - Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Thermal Transfer*. Moscow-Leningrad, Energiya Publ., 1965, 424 p. (in Russian)
  - Dul'nev G.N., Semyashkin E.M. *Thermal Transfer in Electronic Devices*. Leningrad, Energiya Publ., 1968, 360 p. (in Russian)

### Авторы

**Герасютенко Виктория Викторовна** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-2186-8565, viktoriya.gerasyutenko@mail.ru

**Кораблев Владимир Антонович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 7007176296, ORCID ID: 0000-0002-6691-7140, kvant1953@gmail.com

**Минкин Дмитрий Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, 196105, Российская Федерация, Scopus ID: 54943276500, ORCID ID: 0000-0001-9148-612X, mindim-spb@mail.ru

**Шарков Александр Васильевич** – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 16442754200, ORCID ID: 0000-0001-7826-4864, avsharkov@corp.ifmo.ru

### Authors

**Victoriya V. Gerasyutenko** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-2186-8565, viktoriya.gerasyutenko@mail.ru

**Vladimir A. Korablev** – PhD, Senior scientific researcher, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 7007176296, ORCID ID: 0000-0002-6691-7140, kvant1953@gmail.com

**Dmitriy A. Minkin** – PhD, Associate Professor, Associate Professor, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation, Scopus ID: 54943276500, ORCID ID: 0000-0001-9148-612X, mindim-spb@mail.ru

**Alexander V. Sharkov** – D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 16442754200, ORCID ID: 0000-0001-7826-4864, avsharkov@corp.ifmo.ru