

УДК 536.248

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-272-276

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СЪЕМКИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ

А.В. Шарков^а, В.В. Герасютенко^а, Д.А. Минкин^б

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^б Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, 196105, Российская Федерация

Адрес для переписки: viktoriya.gerasyutenko@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 25.10.19, принята к печати 19.02.20

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Шарков А.В., Герасютенко В.В., Минкин Д.А. Моделирование теплового режима электронного оборудования на основе результатов тепловизионной съемки температурных полей элементов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 2. С. 272–276. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-272-276

Аннотация

Предмет исследования. Предложен метод исследования теплового режима электронного оборудования, заключающийся в тепловизионном обследовании электронного оборудования при заданных внешних условиях и создании на его основе тепловой и математической моделей. **Метод.** Разработка тепловой и математической моделей исследуемого объекта произведена на основе исследования теплового режима объекта электроники с помощью тепловизора. В отличие от существующих, предложенный метод позволяет существенно ускорить разработку тепловой и математической моделей, а также позволяет более точно судить о мощности тепловыделяющих элементов. **Основные результаты.** Исследован тепловой режим электронного блока в герметичном исполнении, охлаждаемый свободной конвекцией и излучением в воздушной среде. Блок размещается в корпусе с температурой воздуха 50 °С. Внутри герметичного корпуса установлены тепловыделяющие электронные элементы на платах. Для расчета теплообмена в электронном блоке составлены тепловая и математическая модели. Учтены необходимые допущения и определены их основные элементы. Проведен расчет свободно-конвективных и лучистых тепловых проводимостей с использованием метода последовательных приближений. Согласно предложенному методу проведено измерение температурных полей элементов электронного блока путем тепловизионной съемки. С помощью тепловизора Flir SC620 получены термограммы, по которым определены значения среднесредних температур компонентов электронного блока. Выполнено сравнение расчетных значений среднесредних температур элементов электронного блока с полученными экспериментальными данными. **Практическая значимость.** Предложенный в работе метод теплового моделирования позволяет создать адекватную модель исследуемого электронного устройства при различных мощностях тепловыделяющих элементов и температурах окружающей среды и может быть использован при проектировании и разработке радиоэлектронного оборудования различного назначения, в том числе и для объектов, расположенных в герметичном корпусе.

Ключевые слова

тепловой режим, тепловизионная съемка, электронный блок, тепловая проводимость, уравнение теплового баланса, термограмма, свободная конвекция

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-272-276

SIMULATION OF ELECTRONIC EQUIPMENT THERMAL REGIME BASED ON THERMAL IMAGING RESULTS OF ELEMENT TEMPERATURE FIELDS

A.V. Sharkov^a, V.V. Gerasyutenko^a, D.A. Minkin^b

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b 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 25.10.19, accepted 19.02.20

Article in Russian

For citation: Sharkov A.V., Gerasyutenko V.V., Minkin D.A. Simulation of electronic equipment thermal regime based on thermal imaging results of element temperature fields. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 272–276 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-272-276

Abstract

Subject of Research. The paper proposes a method for study of the electronic equipment thermal conditions. The method involves thermal imaging examination of electronic equipment under given external conditions and creation of thermal and mathematical model on its basis. **Method.** The development of thermal and mathematical models of the object under study was performed through the thermal regime research of the electronics object by a thermal imager. In contrast to the existing approaches, the proposed method provided significant acceleration of the thermal and mathematical model development and more accurate identification of the power of heat dissipation elements. **Main Results.** We have studied sealed electronic unit thermal conditions cooled by free convection and radiation in the air. The unit is installed in the casing with the air temperature of 50 °C. The heat generating electronic elements on the boards are installed inside the sealed housing. The thermal and mathematical models have been developed to calculate the heat transfer in the electronic unit. The necessary assumptions and their main elements have been determined. The calculation of free convective thermal conductivities and radiant thermal conductivities is performed by the method of successive approximations. According to the proposed method, the element temperature fields of the electronic unit have been measured by thermal imaging. By application of Flir SC620 thermal imager, thermograms have been obtained that determined the average surface temperatures of electronic unit components. The calculated average surface temperatures of the electronic unit elements determined from the thermal and mathematical models are compared with the measured values. **Practical Relevance.** The proposed method of thermal modeling is applicable for creation of an adequate model of the studied electronic device at various powers and ambient temperatures and for the design and development of various application electronic equipment including the objects located in a closed casing.

Keywords

thermal conditions, thermal imaging, electronic unit, thermal conductivity, thermal balance equation, thermogram, free convection

Введение

В настоящее время исследование теплового режима является актуальной задачей при конструировании и эксплуатации электронного оборудования. Конструкция электронного устройства во многом определяется его тепловым режимом [1–3]. В современных устройствах электроники отмечается тенденция к уменьшению размеров электронных компонентов, возрастанию мощности тепловыделений и увеличению плотности монтажа элементов. Надежность и срок эксплуатации электронного оборудования существенно зависят от теплового режима электронных приборов, входящих в его состав. Температура каждого элемента электронного оборудования зависит от мощности тепловыделений в элементе, температур соседних узлов и приборов, тепловых проводимостей к соседним элементам и воздуху, находящемуся внутри электронного блока, а также от температуры окружающего воздуха и температур окружающих блок поверхностей [1–5]. В работах [6–10] представлены методы расчета теплового режима с помощью компьютерного моделирования. Недостатками таких методов являются большие затраты времени на описание исследуемого объекта и отсутствие реальной информации о тепловыделяющих объектах и их характеристиках.

В ряде случаев точность методов расчета теплового режима существенно снижается из-за отсутствия необходимой информации об исследуемых устройствах (расположении полупроводниковой структуры, толщине стенок корпуса, теплофизических свойствах комплектующих элементов и др.).

В данной работе предложен метод исследования теплового режима электронного оборудования на основе результатов тепловизионной съемки, который позволяет создавать адекватную модель объекта и более точно судить о характеристиках теплонагруженных компонентов, входящих в его состав. Метод может применяться, в том числе и для объектов, расположенных в герметичном корпусе.

Описание предлагаемого метода

Предложен метод теплового моделирования электронных блоков, находящихся в герметичном и перфорируемых корпусах, заключающийся: в исследовании температурных полей при помощи тепловизионной съемки при известных внешних условиях; разработке тепловой модели на основе анализа термограмм и ее исследовании при задании экстремальных внешних условий. Для измерения температуры предлагается следующая последовательность действий: корпус объекта исследований выполняется со съемными крышками, которые позволяют обеспечить тепловизионную съемку при измерении температуры; при достижении стационарного режима работы крышки снимаются, и производится тепловизионная съемка. Время съемки термограммы на тепловизоре составляет около 5 с, за это время необходимо оценить скорость изменения температуры объекта, чтобы внести соответствующую поправку в результаты измерений. Метод дает возможность определить мощность отдельных тепловыделяющих элементов, тепловую проводимость между элементами, а также оценить, с какой скоростью будет меняться температурное поле исследуемого объекта. На основании уравнения теплового баланса и по полученным результатам тепловизионной съемки разрабатываются тепловая и математическая модели объекта.

Апробация метода

В работе исследован электронный блок, охлаждаемый свободной конвекцией и излучением в воздушной среде. При проведении исследований электронный блок размещался в объеме, температура воздуха и стенок в котором может подниматься до 50 °C. Конструкция блока имеет герметичное исполнение — это означает, что отсутствует воздухообмен между внутренним объемом блока и окружающей воздушной средой. В такой конструкции происходит перенос теплоты за счет теплового излучения и при помощи свободно-конвек-

тивных потоков воздуха от корпуса во внешнюю среду. Передача теплоты от электронных элементов к корпусу производится: теплопроводностью по платам и деталям конструкции, свободной конвекцией и излучением.

Для расчета теплообмена в блоке используют критериальные зависимости, описывающие теплообмен между теплоотдающей поверхностью и воздухом, и законы теплового излучения. Особенность применения этих методик расчета состоит в применении метода последовательных приближений [3, 4], так как величины тепловых проводимостей зависят от температур, определяемых в ходе выполнения расчетов.

В качестве примера на рис. 1 показана конструкция исследуемого электронного блока. Тепловыделяющие электронные элементы установлены внутри герметичного корпуса на платах, закрепленных на внутренней перегородке. Теплота от поверхностей электронных элементов передается к внешней поверхности корпуса, далее с помощью излучения и свободной конвекции поступает к соседним окружающим предметам и в окружающий воздух, достигающий температуры 50 °С.

Часть тепловыделений от поверхностей элементов передается свободной конвекцией в воздух, заполняющий внутреннее пространство блока, а затем к стенкам блока. Так как воздух прозрачен для инфракрасного излучения, то существенную роль играет теплообмен излучением между элементами и стенками блока.

Для расчета среднесurfaceных температур элементов разработана тепловая модель электронного блока, учитывающая следующие элементы:

- 1) тепловыделяющие электронные элементы, расположенные на платах, передают теплоту к плате излучением к наружным стенкам корпуса и конвекцией к воздуху, находящемуся внутри блока;
- 2) электронные элементы на корпусе блока отдают теплоту корпусу излучением к наружным стенкам корпуса и конвекцией к воздуху, находящемуся внутри блока;
- 3) электронные платы отдают теплоту излучением к корпусу и свободной конвекцией к воздуху в полости;

- 4) корпус электронного блока, получивший теплоту от внутренних элементов, рассеивает ее в окружающую среду излучением и свободной конвекцией;
- 5) воздух в полостях электронного блока передает полученную теплоту от тепловыделяющих элементов, расположенных на плате, свободной конвекцией и излучением к наружным стенкам блока;
- 6) воздух и поверхности, окружающие блок.

Теплообмен свободной конвекцией осуществляется между тепловыделяющими элементами и воздухом в полостях, а также между корпусом электронного блока и окружающим его воздухом.

Расчет теплообмена при свободной конвекции проведен на основе зависимостей для свободно-конвективного теплообмена [1–4]. Процессы переноса теплоты излучением в герметичном электронном блоке с естественно-конвективным охлаждением имеют большое значение [11–13]. Теплота с помощью излучения передается от корпуса блока к окружающим поверхностям. Внутри электронного блока теплообмен излучением идет как между элементами и внутренними стенками блока, так и между соседними элементами [14–16].

При расчете лучистых тепловых потоков между элементами тепловой модели использовались зависимости, основанные на законе Стефана–Больцмана [2–4].

Приведены значения суммарных тепловых проводимостей, учитывающие лучистую и конвективную составляющие теплообмена, полученные в последнем приближении:

- 1) тепловая проводимость между электронным элементом и платой: $\sigma_{\text{эл.-пл.}} = 0,15 \text{ Вт/К}$;
- 2) тепловая проводимость между электронным элементом и корпусом: $\sigma_{\text{эл.-к.}} = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/К}$;
- 3) тепловая проводимость между электронным элементом, расположенным на корпусе блока и корпусом блока: $\sigma_{\text{эл.-к.}} = 0,5 \text{ Вт/К}$;
- 4) тепловая проводимость между электронными платами и корпусом электронного блока: $\sigma_{\text{эл.-к.}} = (2 - 3) \text{ Вт/К}$;
- 5) тепловая проводимость между корпусом электронного блока и окружающей средой: $\sigma_{\text{эл.-к.}} = 0,73 \text{ Вт/К}$.



Рис. 1. Электронный блок: 1–6 — тепловыделяющие элементы на платах; 7, 11 — электронные платы; 8 — корпус блока; 9 — электронный элемент на корпусе блока; 10 — электронный элемент на плате питания

Основные результаты

Измерение температурных полей элементов электронного блока проводилось с помощью тепловизора Flir SC620. Корпус электронного блока, представленного на рис. 1, закрывается с помощью крышек для обеспечения его герметичности. В ходе эксперимента электронный блок работал с закрытыми крышками до наступления стационарного режима. Для проведения тепловизионных исследований крышки снимались. Достоверность информации о температуре объектов, полученной с помощью тепловизора, существенно зависит от значения степени черноты наблюдаемых объектов. Металлические поверхности без покрытий имеют низкие значения степени черноты (менее 0,5), поэтому на термограмме температуры таких объектов существенно занижены. Неметаллические поверхности, покрытия (краска, лак), обработанные металлические поверхности (анодное оксидирование) облада-

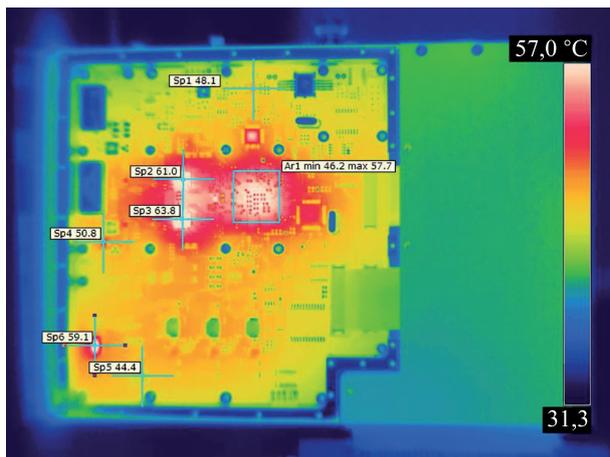


Рис. 2. Термограмма исследуемого электронного блока

ют более высоким значением коэффициента черноты, поэтому при проведении эксперимента поверхности электронных плат и корпуса электронных компонентов покрывались лакокрасочным покрытием с толщиной более 20 мкм. Полученная термограмма электронного блока представлена на рис. 2.

Термограмма электронного блока получена с помощью программы обработки инфракрасных изображений, используемой для тепловизора Flir SC620. Определены значения температуры в конкретных точках «Sp» и областях «Ar». Каждая точка обозначена перекрестием, символами «Sp1»–«Sp6» и соответствующими значениями температуры в градусах Цельсия. В области «Ar1», ограниченной прямоугольником, измерены минимальное 46,2 °C и максимальное 57,7 °C значения температуры.

После обработки термограмм получены среднеповерхностные значения температур компонентов электронного блока. Снятие крышек с корпуса блока на время тепловизионной съемки приводило к изменению условий теплообмена. Для оценки темпа охлаждения наблюдаемых элементов в условиях съемки были проведены измерения температуры в течение нескольких минут. Это позволило на основе уравнений [4] для

регулярного режима тела с постоянным источником мощности тепловыделений установить, что через 5 с после снятия крышек температура наблюдаемых объектов изменялась не более чем на 2 %.

Необходимо отметить также, что полупроводниковые структуры электронных элементов будут иметь более высокую температуру по сравнению с их наружной поверхностью из-за наличия внутреннего теплового сопротивления.

Заключение

Предложен метод моделирования теплового режима приборов электроники с использованием тепловизионной съемки, который может быть применен для определения температурных полей объектов в герметичном исполнении. Для проведения исследований были составлены тепловая и математическая модели исследуемого электронного блока, рассчитаны величины тепловых проводимостей между элементами электронного блока. Решена система уравнений теплового баланса для тепловой модели относительно среднеповерхностных температур для различных значений температур наружного воздуха. В результате расчета получены значения среднеповерхностных температур элементов электронного блока. Проведено сравнение расчетных значений среднеповерхностных температур элементов электронного блока со значениями, полученными экспериментально, с использованием тепловизионной съемки. Результаты расчетных и экспериментальных данных показали удовлетворительное совпадение, что позволяет рекомендовать метод для практического использования.

Также данный метод эффективен для исследования теплового режима объектов электроники, работающих в условиях повышенной температуры окружающей среды. Метод не требует значительных временных затрат и позволяет определить значения среднеповерхностных температур элементов, обеспечить нормальный тепловой режим электронного оборудования и тем самым повысить его надежность, а также оптимизировать расположение элементов внутри корпуса прибора.

Литература

1. Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А. Свободно-конвективный теплообмен: справочник. Минск: Наука и техника, 1982. 400 с.
2. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: справочник. М.: Атомизда, 1979. 216 с.
3. Дульнев Г.Н., Семьяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.
4. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.
5. Рашидханов А.Т., Юсуфов Ш.А. Система обеспечения теплового режима шкафа телекоммуникационного оборудования // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. Т. 44. № 2. С. 87–96. doi: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96
6. Дилевская Е.В., Касков С.И., Леонтьев А.И. Исследование тепловых режимов мощных полупроводниковых преобразователей энергии // Вестник Международной академии холода. 2008. № 4. С. 34–38.
7. Муратов А.В., Ципина Н.В. Способы обеспечения тепловых режимов РЭС: учеб. пособие. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного технического университета, 2007. 98 с.

References

1. Martynenko O.G., Sokovishin Yu.A. *Free-Convective Heat Exchange. Handbook*. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1982, 400 p. (in Russian)
2. Wong H.Y. *Handbook of Essential Formulae and Data on Heat Transfer Engineers*. Longman, 1977, 236 p.
3. Dulnev G.N., Semyashkin E.M. *Heat Transfer in Radio-Electronic Devices*. Leningrad, Energy Publ., 1968, 360 p. (in Russian)
4. Dulnev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. *Methods for Calculation of Device Thermal Regime*. Moscow, Radio i Svjaz Publ., 1990, 312 p. (in Russian)
5. Rashidkhanov A.T., Yusufov Sh.A. Technical science power, metallurgical and chemical mechanical engineering development of prototype system for regulating thermal conditions of telecommunications equipment cabinets. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*, 2017, vol. 44, no. 2, pp. 87–96. (in Russian). doi: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-87-96
6. Dilevskaya E.V., Kaskov S.I., Leontyev A.I. Investigation of thermal conditions of powerful solid-state power transformers. *Journal of International Academy of Refrigeration*, 2008, no. 4, pp. 34–38. (in Russian)

8. Муромцев Д.Ю., Белоусов О.А. Компьютерные технологии для расчёта тепловых режимов и механических воздействий: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 88 с.
9. Туищев А.И., Губанов И.О., Плеханов В.М., Токарев Д.Г. Исследование тепловых режимов печатных плат радиоэлектронных средств и вычислительной техники при конвекционном и радиационном теплообменах // Вестник НГИЭИ. 2014. № 12(43). С. 88–93.
10. Ефремова С.В., Леушев В.П., Иванов А.В. Моделирование тепловых режимов теплонагруженных радиоэлектронных средств // X Научно-техническая конференция «Молодежь в науке»: сборник докладов. г. Саров. 2011. С. 390–395.
11. Попов В.В., Гордеев Г.А., Павлов А.В., Пономарева А.С., Смирнов Н.В. Расчет теплового режима элементов блока радиоэлектронной аппаратуры на этапе конструирования // Известия Института инженерной физики. 2018. № 2(48). С. 8–12.
12. Павлова А.Д. Особенности процессов теплообмена в радиоэлектронных аппаратах в герметичном исполнении: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики. СПб, 2011. 113 с.
13. Исламова А.Д., Кораблев В.А., Савинцева Л.А., Шарков А.В. Создание равномерного температурного поля на охлаждаемых объектах // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2007. Т. 50. № 10. С. 67–69.
14. Karwa R. *Heat and Mass Transfer*. Springer, 2017. 1023 p. doi: 10.1007/978-981-10-1557-1
15. Rensburg R. *Advanced Thermal Design of Electronic Equipment*. Springer, 1998. 589 p. doi: 10.1007/978-1-4419-8509-5
16. Shabany Y. *Heat Transfer: Thermal Management of Electronics*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 471 p.
7. Muratov A.V., Tcipin N.V. *Methods of Providing Electronic Equipment Thermal Conditions*. Tutorial. Voronezh State Technical University Publ., 2007, 98 p. (in Russian)
8. Muromtsev D.Yu., Belousov O.A. *Computer Technologies for Calculation of Thermal Conditions and Mechanical Effects*. Tutorial. Tambov, TSTU Publ., 2012, 88 p. (in Russian)
9. Tuishchev A.I., Gubanov I.O., Plekhanov V.M., Tokarev D.G. Investigation of thermal regimes of printed circuit boards of radio-electronic means and computer equipment in case of convection and radiation heat exchange. *Bulletin NGIEI*, 2014, no. 12(43), pp. 88-93. (in Russian)
10. Efremova S.V., Leushev V.P., Ivanov A.V. Modeling of thermal conditions of heat-loaded electronic equipment. *Proc. X Scientific and Technical Conference "Youth in science"*, Sarov, 2011, pp. 390–395. (in Russian)
11. Popov V.V., Gordeev G.A., Pavlov A.V., Ponomareva A.S., Smirnov N.V. Calculation of the thermal conditions of the elements of the radioelectronic equipment block at the design stage. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki*, 2018, no. 2(48), pp. 8–12. (in Russian)
12. Pavlova A. D. *Characteristics of Heat Transfer Processes in Totally Enclosed Radio-Electronic Devices*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, St. Petersburg, 2011, 113 p. (in Russian)
13. Islamova A.D., Korablev V.A., Savintseva L.A., Sharkov A.V. Creation of a uniform temperature field on cooled objec. *Journal of Instrument Engineering*, 2007, vol. 50, no. 10, pp. 67–69. (in Russian)
14. Karwa R. *Heat and Mass Transfer*. Springer, 2017, 1023 p. doi: 10.1007/978-981-10-1557-1
15. Rensburg R. *Advanced Thermal Design of Electronic Equipment*. Springer, 1998, 589 p. doi: 10.1007/978-1-4419-8509-5
16. Shabany Y. *Heat Transfer: Thermal Management of Electronics*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010, 471 p.

Авторы

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@itmo.ru

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

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

Authors

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

Victoria V. Gerasyutenko — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-2186-8565, viktoriya.gerasyutenko@mail.ru

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