

УДК 691- 408.62

О ПРОБЛЕМЕ ЦВЕТОВОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ТЕРМОИНДИКАТОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЖАРА

Федосов Сергей Викторович^{1,2}, Маличенко Вячеслав Геннадиевич³, Торопова Мария Владиевна³, Мальцев Алексей Николаевич⁴

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

²Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия

³Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново, Россия

⁴Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Иваново, Россия

АННОТАЦИЯ

Авторами предложено решение проблемы получения достоверных исходных данных о высокотемпературном воздействии пожара на мелкозернистый бетон. Указанные сведения необходимы для оценки возможности эксплуатации поврежденного пожаром здания. Возможность решения данной проблемы обусловлена предложенной методикой цветовой дифференциации термоиндикаторов при помощи технических средств после воздействия высокой температуры пожара. В статье обсуждаются результаты проведенного исследования по оценке испытываемых образцов мелкозернистого бетона. Практическая значимость исследования заключается в получении представления о термохромных изменениях термоиндикаторного покрытия мелкозернистого бетона. Эти данные позволяют спрогнозировать возможные последствия воздействия высокотемпературного источника нагрева на мелкозернистый бетон.

Элементами научной новизны обладает разработанная методика испытания термоиндикаторного покрытия мелкозернистого бетона в условиях высокотемпературного воздействия в целях создания базы данных об эталонах для некоторых условий. Данная методика предполагает использование цифрового аппарата для определения изображения цветовой линии RGB для различных поверхностей исследуемых образцов с последующей обработкой при помощи пакета MATLAB. В рамках исследования установлена закономерность изменения цвета испытываемого покрытия на грунтованной поверхности мелкозернистого бетона при изменении их температуры.

Ключевые слова: термоиндикатор, мелкозернистый бетон, высокотемпературный нагрев

ON THE PROBLEM OF COLOR DIFFERENTIATION OF THERMAL INDICATORS BASED ON THE RESULTS OF HIGH-TEMPERATURE FIRE EXPOSURE

Sergey V. Fedosov^{2,3}, Vyacheslav G. Malichenko³, Alexander A. Lazarev⁴, Maria V. Toropova³, Aleksey N. Maltsev⁴

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

²Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Technology», Yoshkar-Ola, Russian Federation

³Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Ivanovo State Politechnical University», Ivanovo, Russian Federation

⁴ Ivanovo Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Ivanovo, Russian Federation

ABSTRACT

The authors propose a solution to the problem of obtaining reliable initial data on the high-temperature effect of fire on fine-grained concrete. This information is necessary to assess the possibility of operating a building damaged by fire. The possibility of solving this problem is due to the proposed method of color differentiation of thermal indicators using technical means after exposure to high fire temperature. The article discusses the results of the conducted research on the evaluation of test samples of fine-grained concrete. The practical significance of the study lies in obtaining an idea of thermochromic changes in the thermoindicator coating of fine-grained concrete. These data make it possible to predict the possible consequences of the impact of a high-temperature heating source on fine-grained concrete.

The developed method of testing the thermoindicator coating of fine-grained concrete under high-temperature exposure has elements of scientific novelty in order to create a database of standards for certain conditions. This technique involves the use of a digital device to determine the image of RGB color lines for various surfaces of the studied samples with subsequent processing using the MATLAB. Within the framework of the study, the regularity of the color change of the tested coating on the primed surface of fine-grained concrete with a change in their temperature was established.

Keywords: thermal indicator, fine-grained concrete, high-temperature heating

Введение

Предпосылкой применения панельного строительства во всем мире является массовое его внедрение на территориях, где прежде всего это экономически выгодно с возможностью производить крупные панельные плиты и получать быструю прибыль за счет существенного сокращения затрат на строительство и удешевления стоимости квадратного метра, а также при технологии строительства панельных многоквартирных домов (далее – МКД) имеются все ресурсы для такого строительства. Качественными пока-

зателями панельного строительства является их быстрая сборка, контроль качества выпускаемых промышленным способом конструкций несомненно выше, чем у конструкций, изготавливаемых в условиях строительных площадок, расчетная этажность таких конструкций жилого дома может составлять 25 этажей и более. При эксплуатации панельных жилых зданий важной характеристикой является их долговечность. Основным требуемым параметром для панельных жилых зданий является эксплуатационная надежность, которая включает в себе сохранение эксплуатационных характеристик на протяжении всего срока эксплуатации, в том числе

и после пожара. Потребность в разработке методов расчета долговечности обуславливается необходимостью увеличения сроков эксплуатации ограждающих конструкций панельных жилых домов, а также снижение затрат на их восстановление в случае пожара [1, 2]. Данная характеристика неотделима от предела огнестойкости ограждающих конструкций, так как возникновение пожаров в многоквартирном панельном жилье не редкость. Статистика пожаров показывает, что пожары в панельных жилых домах возникают достаточно часто [3]. Этим также обусловлен выбор в рамках проводимого исследования мелкозернистого бетона в качестве материала для нанесения термочувствительной краски, так как данный бетон применяется при панельном строительстве. Существующие методики определения возможности МКД к эксплуатации после пожара предполагают определение температуры высокотемпературного воздействия. Однако, как правило, такие измерения во время пожара никто не проводит. Возможным вариантом решения этой задачи может стать использование термоиндикаторов.

В настоящее время существует большое количество способов измерения температуры, одним из таких является использование термоиндикаторов, которые нашли свое применение в исследованиях тепловых процессов. Методы индикации температуры с помощью термочувствительных покрытий достаточно просты и рентабельны, что само по себе не требует больших финансовых затрат. Первые упоминания применения термочувствительных соединений для индикации температуры датируются 20-ми гг. XX века. На ряде предприятий и заводов в Советском Союзе применялись краски на основе солей ртути, которыми контролировался перегрев вращающихся и движущихся деталей [4]. Возможность использования термоиндикаторов указывалась также

в работах М. В. Долгова [4], Rajadurai R. S., Lee J.-H., Choi E., Kang J.-W. и др [5, 6].

Вместе с тем при выборе такого решения возникает проблема цветовой дифференциации термоиндикаторов по результатам высокотемпературного воздействия пожара на бетон, так как практически отсутствуют исследования по данной проблематике, а человек не всегда способен дифференцировать слабо различимые оттенки. С учетом изложенного актуальность исследования заключается в противоречии между потребностью в решении проблемы цветовой дифференциации термоиндикаторов по результатам высокотемпературного воздействия пожара на бетон в целях обеспечения безопасности зданий и отсутствием соответствующих методик.

Объектом исследования является мелкозернистый бетон М300 с нанесенным на его поверхность грунтом и термоиндикаторным покрытием в виде краски.

Предметом исследования была динамика изменения цвета термоиндикаторного покрытия исследуемого образца и грунта на поверхности мелкозернистого бетона М300 при повышении температуры.

Задачи исследования:

1. Разработать методику испытания термоиндикаторного покрытия, нанесенного на мелкозернистый бетон М300 в условиях высокотемпературного воздействия в целях создания базы данных об эталонах для некоторых условий.

2. При помощи технических средств определить цвета поверхностей образцов мелкозернистого прогрунтованного бетона М300, на которые нанесено термоиндикаторное покрытие (краска LA-CO Tempilaq Advaced 399 °C).

3. Установить закономерность изменения цвета термоиндикаторного покрытия (краска LA-CO Tempilaq Advaced

399 °С) при изменении температуры грунтованной поверхности образца бетона М300.

Методы исследования:

В процессе проведения исследования предполагалось нанесение термоиндикаторного покрытия (далее – ТИП) в виде краски LA-CO Tempilaq Advanced 399 °С на мелкозернистый бетон (далее – МБ) в целях сбора информации о состоянии температуры образца при изменении его цвета с применением высокотемпературного нагрева. При изготовлении бетона был использован портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н с нормальной густотой цементного теста – $25,8 \pm 0,81$ %; с началом схватывания – 180 ± 25 мин; с концом схватывания – 235 ± 25 мин; с выдержанной равномерностью изменения объема. С целью фиксации изменения цвета был проведен ряд стендовых испытаний высокотемпературного нагрева образца МБ в различных условиях. В качестве примера рассматриваются условия, пред-

полагающие нанесение термоиндикаторной краски на грунтованную поверхность МБ. Для подготовки образцов были выполнены мероприятия, которые полностью копируют процесс нанесения покрытий на материалы в реальных зданиях. Процесс подготовки образцов состоял из двух этапов. Первый этап включал в себя подготовку поверхностей покрытия МБ, а второй этап начинался с нанесения покрытия краски на модифицированную поверхность МБ.

Бетонные образцы размером $100 \times 100 \times 100$ мм были изготовлены в соответствии с ГОСТ 13015–2012 [7]. Поверхности образцов бетона были очищены и отшлифованы с помощью применения мелкозернистой наждачной бумаги с зернистостью 20–28 мкм, а осевшая пыль после обработки была удалена с помощью компрессорной установки для обеспечения гладкой поверхности и наилучшего обеспечения адгезии нанесенного покрытия к поверхности бетона, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Подготовленная поверхность МБ для нанесения ТИП

Fig. 1. Prepared MB surface for application TYPE

В качестве первого этапа проведения испытаний на подготовленные образцы был нанесен грунтовый раствор в один слой с помощью разглаживающего валика. Затем образцы с грунтованным покрытием помещались в сушильный шкаф при температуре 100 °С в течение

10 мин. Процесс сушки осуществлялся в течение 6 часов при температуре окружающей среды. По прошествии указанного временного периода на поверхность образцов МБ было нанесено ТИП в один слой, как показано на рис. 2.



Рис. 2. ТИП на поверхности образца в один слой

Fig. 2. Type on the sample surface in one layer

Обработанные поверхности оставляли нетронутыми в течение семи дней при комнатной температуре. Затем образцы помещали в камеру муфельной печи и нагревали до целевых температур 100, 200, 300, 400 и 450°C. При каждом заданном температурном режиме образцы выдерживали 30 минут и вынимали для фиксации изображения поверхности образца с помощью цифрового

фотоаппарата. Данное техническое средство было использовано с учетом опыта исследования [5]. После этого образец снова помещали в печь и нагревали до следующей целевой температуры, как показано на рис. 3. Следует также отметить, что применяемое ТИП не является обратимым, то есть оно не восстанавливает свой первоначальный цвет при охлаждении [11].



Рис. 3. Размещение образцов в муфельной печи

Fig. 3. Placement of samples in the muffle furnace

Результаты и их обсуждение

Полученные изображения поверхностей образцов МБ были откорректированы путем изменения освещения и настроек цифрового фотоаппарата в соответствии со стандартами ColorHexa, предусматривающими использование шестизначного цветового

кода, предоставляющего информацию о цветах, полученных с изображений [8-10]. С целью компенсации различий, обусловленных цветом и яркостью источника света, полученные изображения цветочных линий RGB были переведены в стандартизированное, независимое от источника съемки пространство CIE1976 ($L^*a^*b^*$) с использованием

пакета MATLAB. Совершенные действия привели к значениям от 0 до 100 для измерения L^* и ≈ 128 и 128 для измерений a^* и b^* (табл. 1).

Таблица 1

Изменение цвета термоиндикаторного покрытия мелкозернистого бетона при температурном воздействии по шкале изменений цвета RGB и соответствующие им цветовые диаграммы (с грунтованной поверхностью).

Table 1

Color change of the thermoindicative coating of fine-grained concrete under temperature exposure, according to the RGB color change scale and the corresponding color charts (with a primed surface).

Температура, °C Temperature	Цветовая индикация Color indication			Hex Code	Описание цвета Color Description
	Red (R)	Green (G)	Blue (B)		
25	124	169	133	#7CA985	Лиственный зеленый Крайола Leafy Green Crayola
100	135	186	133	#87BA85	Темное зеленое море Dark green sea
200	119	166	118	#77A676	Бледно-зеленый Pale green
300	105	144	145	#699091	Серый шифер (Аспидно-серый) Slate Gray (Slate Grey)
400	127	150	142	#7F968E	Темный телегрей Dark telegray
450	82	92	88	#525C58	Фельдграу Feldgrau

На рис. 4 представлены изменения значений RGB на поверхностях образцов МБ, на которые нанесена краска LA-CO Tempilaq Advanced 399 °C.

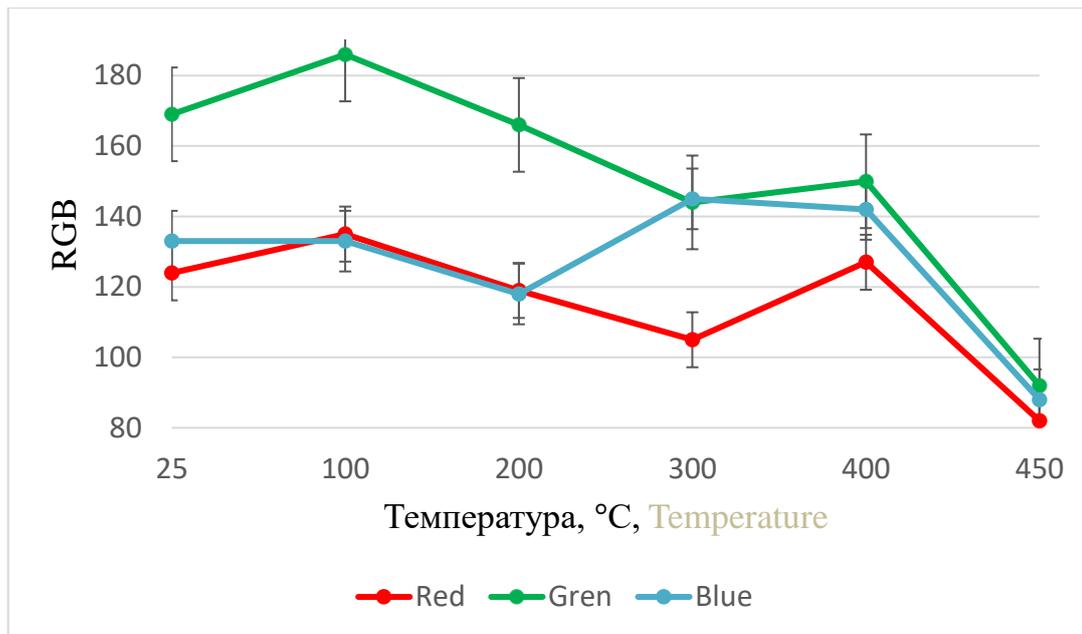


Рис. 4. Изменение значений RGB
Fig. 4. Changing RGB values

При увеличении температуры, начиная с 25 °С, усреднённые значения линий RGB составляли 135, 186, 133 соответственно, обозначение – темное зеленое море; по шестнадцатеричному коду #87BA85 (табл. 1). Они были практически неизменны до 200 °С.

Значения RGB уменьшились на 22 % и увеличились на 9 % при 300 °С, чтобы показать среднее значение 105, 144, 145, соответствующее цвету серый шифер (аспидно-серый) шестнадцатеричный код #699091. После этого значения RGB стали резко меняться с 127, 150, 142 при 400 °С до 82, 92, 88 при 450 °С, которые соответствуют цвету темный телегей и цвету фельдграу (шестнадцатеричные коды #7F968E и #525C58 соответственно). МБ с некоторыми порами на поверхности образцов обеспечивал незначительные отклонения в значениях RGB, что допустимо по отношению к стандартному отклонению в диапазоне от 18 до 23. Полученные данные по наблюдаемой динамике сопоставимы и не противоречат результатам

аналогичного исследования, проведенного Rajadurai R. S., Lee J.-H., Choi E., Kang J.-W. [5].

Выводы

Для решения проблемы цветовой дифференциации термоиндикаторов по результатам высокотемпературного воздействия пожара на МБ в целях обеспечения безопасности зданий было проведено исследование, в рамках которого выполнена работа по выявлению термохромных изменений соответствующих поверхностей. Данный эксперимент позволил получить следующие результаты:

1. Разработана методика испытания ТИП, нанесенного на МБ в условиях высокотемпературного воздействия в целях создания базы данных об эталонах для некоторых условий. В перспективе данная методика позволит накопить достаточное количество экспериментальных данных, необходимых для определения температурных значений, достигнутых в помещении во время пожара.

2. Полученные при помощи цифрового аппарата изображения цветowych линий RGB для различных грунтованных поверхностей образцов МБ, на которые нанесена краска LA-CO Tempilaq Advanced 399 °С, переводятся в стандартизированное, независимое от источника съемки пространство CIE1976 ($L^*a^*b^*$) при помощи пакета MATLAB. Данное решение позволяет получить результат с незначительными отклонениями.

3. Установлена закономерность изменения цвета ТИП (LA-CO Tempilaq Advanced 399 °С) на грунтованной поверхности МБ при изменении их температуры. При увеличении температуры в диапазоне от 25 °С до 200 °С усреднённые значения линий RGB были практически неизменны: (135, 186, 133 соответственно, обозначение – темное зеленое море; по шестнадцатеричному коду #87BA85. Средние значения RGB при 300 °С равны 105, 144, 145, соответствуют цвету серый шифер (аспидно-серый), по шестнадцатеричному коду #699091. Далее с повышением температуры значения RGB стали резко меняться: с 127, 150, 142 при 400 °С до 82, 92, 88 при 450 °С, которые соответствуют цвету темный телегей и цвету фельдграу (шестнадцатеричные коды #7F968E и #525C58 соответственно). Полученная закономерность может быть использована для идентификации изменения цвета по отношению к интенсивности температурного воздействия, что позволит усовершенствовать методику расследования пожаров и оценку возможности эксплуатации МКД после пожара.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федосов С. В., Баканов М. А. Модели и методы высокотемпературной термической обработки в технологии пеностекла. М., 2021. 302 с.
2. Карташов Э. М., Кудинов В. А. Аналитические методы теории теплопроводности и её приложений. Изд. 4-е. М., 2018. 1072 с.
3. Статистика пожаров. URL: <https://ptm01.ru/assets/images/biblioteka/Статистика/2021/ВНИИПО/pozharyi-i-pozharnaya-bezopasnost-2021.pdf> (дата обращения: 22.02.2023).
4. Долгов В. М. Аналоговая модель жидкокристаллического термоиндикатора // Приборы и методы автоматизированных экспериментальных исследований. Днепропетровск, 1976. С. 75–80.
5. MnNH₄P₂O₇-Based Coating for High Temperature Assessment on the Surfaces of Cement Composites / R. S. Rajadurai et al. // Coatings. 2018. № 10. Pp. 1–15.
6. Доморощина Т. И., Лазарев А. А., Торопова М. В. Теоретические основы применения термочувствительных строительных материалов для светосигнального обозначения вертикальных поверхностей // Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2020. № 1. С. 185–186.
7. ГОСТ 13015–2012. Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200101281> (дата обращения: 22.02.2023).
8. Pascale, D. RGB Coordinates of the Macbeth Color Checker; Babel Color Co.: Montreal, Canada, 2006; pp. 1–16.
9. RGB Tables. URL: https://www.rapidtables.com/web/color/RGB_Color.html (дата обращения: 22.02.2023).
10. ColorHexa. URL: <https://www.color-hex.com/> (дата обращения: 22.02.2023).
11. MARKERPRO: сайт. URL: <https://markerpro.ru/product/termoindikatornaya-kraska-tempilaq/> (дата обращения 19.02.2023).

REFERENCES

1. Fedosov S.V., Bakanov M.A. Models and methods of high-temperature heat treatment in foam glass technology. Moscow, OOO Publishing house «Sputnik+». 2021; 302. (rus).
2. Kartashov E. M., Kudinov V. A. Analytical methods of the theory of thermal conductivity and its applications. Moscow, LENAND, 2018; 1072. (rus).
3. Fire statistics -2021.pdf.URL: <https://ptm01.ru/assets/images/biblioteka/Statistics/2021/VNIIPPO/> (date of application: 22.02.2023).

4. Dolgov V. M. Analog model of a liquid crystal thermal indicator. Devices and methods of automated experimental research. Dnepropetrovsk, 1976; 75–80. (rus).
5. Rajadurai R. S., Lee J.-H., Choi E., Kang J.-W. MnNH4P2O7-Based Coating for High Temperature Assessment on the Surfaces of Cement Composites. Coatings, 2018; 10: 1–15. doi:10.3390/coatings10040396
6. Domoroschina T. I., Lazarev A. A., Toropova M. V. Theoretical foundations of the use of thermosensitive building materials for light-signalling of vertical surfaces Assessment of fire resistance of reinforced concrete enclosing structures in conditions of fire development and fire extinguishing // Materials of the All-Russian (with international participation) scientific and technical conference of postgraduates and students. Ivanovo, IVGPU, 2020; 185–186. (rus).
7. GOST 13015-2012 «Concrete and reinforced concrete products for construction. General technical requirements. Rules of acceptance, marking, transportation and storage». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200101281>. (date of application: 22.02.2023).
8. Pascale D. RGB Coordinates of the Macbeth Color Checker; Babel Color Co.: Montreal, Canada, 2006; 1–16.
9. RGB Tables. URL: https://www.rapidtables.com/web/color/RGB_Color.html (date of application 22.02.2023).
10. ColorHexa. URL: <https://www.color-hex.com/> date of application: 22.02.2023).
11. Official distributor's website. URL: <https://markerpro.ru/product/termoindikatornaya-kraska-tempilaq/>

Информация об авторах

Федосов Сергей Викторович, академик РААСН, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии правительства РФ в области науки и техники, почётный строитель России, лауреат Государственной премии Республики Марий Эл в области архитектуры и строительства, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии и организация строительного производства ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», Россия, 129337, г. Москва, Ярославское ш., 26; РИНЦ ID: 105900; ScopusAuthorID 70056700404; Researcher id: B-2409-2017; ORCID: 0000-0001-6117-7529; e-mail: FedosovSV@mgsu.ru

Маличенко Вячеслав Геннадиевич, соискатель, Ивановский государственный политехнический университет, Россия, 153000, Иваново, Шереметевский проспект, д. 21; РИНЦ ID: 1066291; Scopus Author ID: 57216911136; ORCID: 0000-0002-2475-3758; e-mail: mvg84@bk.ru

Information about the authors

Sergey V. Fedosov, Academician of the RAASN, Honored Scientist of the Russian Federation, Laureate of the RF Government Prize in the field of science and technology, Honorary Builder of Russia, Laureate of the State Prize of the Republic of Mari El in Architecture and Construction, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Volga State Technological University, Yaroslavl sh., 26, Moscow 129337, Russian Federation; RSCI ID: 105900; ScopusAuthorID 70056700404; Researcher id: B-2409-2017; ORCID: 0000-0001-6117-7529; e-mail: FedosovSV@mgsu.ru

Vyacheslav G. Malichenko, competitor, Ivanovo State Polytechnic University, Sheremetevsky prospect, 21, Ivanovo, 153000, Russian Federation; RSCI ID: 1066291; Scopus Author ID: 57216911136; ORCID: 0000-0002-2475-3758; e-mail: mvg84@bk.ru

Торопова Мария Владиевна, кандидат технических наук, доцент, Ивановский государственный политехнический университет, Россия, 153000, Иваново, Шереметевский проспект, д. 21; РИНЦ ID: 23655858; Scopus Author ID: 12645550800; ORCID: 0000-0001-9752-7551; Researcher id: AAA-1225-2022; e-mail: mators@mail.ru

Мальцев Алексей Николаевич, адъюнкт очной формы обучения, Ивановская пожарно – спасательная академия ГПС МЧС России, Россия, 153040, г. Иваново, проспект Строителей, д. 33; РИНЦ ID: 891145; ORCID: 0009-0003-4425-9567; Researcher id: HZL-5850-2023; e-mail: malec-37@mail.ru

Maria V. Toropova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ivanovo State Polytechnic University, Shere-metevsky prospect, 21, Ivanovo, 153000, Russian Federation; RSCI ID: 23655858; Scopus Author ID: 12645550800; ORCID: 0000-0001-9752-7551; Researcher ID: AAA-1225-2022; e-mail: mators@mail.ru

Aleksey N. Maltsev, adjunct of full-time education, Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Prospekt Stroiteley, 33, Ivanovo, 153040, Russian Federation; RSCI ID: 891145; ORCID: 0009-0003-4425-9567; Researcher ID: HZL-5850-2023; e-mail: malec-37@mail.ru