

УДК 614.841.4

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОСТОЙКИХ ОГNETУШАЩИХ И ЗАЩИТНЫХ СОСТАВОВ ПРИ ТУШЕНИИ КАСКАДНЫХ ПОЖАРОВ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ УСТАНОВКАМИ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Киселева Виктория Сергеевна, Иванов Алексей Владимирович

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается проблема повышения эффективности тушения каскадных пожаров на объектах нефтегазового комплекса с использованием роботизированных установок пожаротушения. Предлагается комбинированный подход, основанный на применении наномодифицированных термостойких огнетушащих и защитных составов. В ходе исследования экспериментально и с помощью компьютерного моделирования подтверждено, что применение наномодифицированных составов с экспериментально установленными улучшенными теплофизическими характеристиками приводит к значительному повышению эффективности тушения и теплозащиты. Оптимальное введение углеродных наноструктур в огнетушащий и защитный составы обеспечивает существенное снижение максимальной температуры в зоне горения, кратное сокращение времени ликвидации пожара и значительное повышение стойкости защитных покрытий к экстремальному тепловому потоку. Показано, что совместное использование разработанных составов обеспечивает взаимоусиливающее действие, выражающееся в ускоренной локализации очага горения и повышении стойкости защитных покрытий к экстремальным тепловым нагрузкам. Научная и практическая новизна работы заключается в разработке комплексной методики применения новых составов, регламентирующей их приготовление, дозирование и эксплуатацию в роботизированных установках пожаротушения, что позволяет минимизировать нахождение человека в опасной зоне, сократить время тушения пожара и повысить общую эффективность противопожарной защиты критически важных объектов.

Ключевые слова: модификация, барьерный эффект, огнетушащие и защитные составы, опасные факторы пожара, углеродные наноструктуры, термостойкость

Для цитирования: Киселева В. С., Иванов А. В. Методика применения термостойких огнетушащих и защитных составов при тушении каскадных пожаров роботизированными установками пожаротушения // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 4–12.

METHODS OF USING HEAT-RESISTANT FIRE EXTINGUISHING AND PROTECTIVE COMPOUNDS WHEN EXTINGUISHING CASCADE FIRES WITH ROBOTIC FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS

Victoria S. Kiseleva, Alexey V. Ivanov

Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article examines the problem of increasing the efficiency of extinguishing cascade fires at oil and gas facilities using robotic fire extinguishing systems. A combined approach based on the use of nanomodified heat-resistant fire extinguishing and protective compositions is proposed. The study, conducted experimentally and using computer modeling, confirmed that the use of nanomodified compositions with experimentally established improved thermophysical properties leads to a significant increase in extinguishing efficiency and thermal protection. Optimal introduction of carbon nanostructures into fire extinguishing and protective compositions ensures a significant reduction in the maximum temperature in the combustion zone, a multiple reduction in fire suppression time, and a significant increase in the resistance of protective coatings to extreme heat flux. It is shown that the combined use of the developed compositions provides a mutually reinforcing effect, resulting in accelerated localization of the fire source and increased resistance of protective coatings to extreme thermal loads. The scientific and practical novelty of this work lies in the development of a comprehensive methodology for the use of new compounds, regulating their preparation, dosing, and operation in robotic fire extinguishing systems. This minimizes human involvement in the danger zone, reduces fire extinguishing time, and improves the overall effectiveness of fire protection at critical facilities.

Keywords: modification, barrier effect, fire extinguishing and protective compounds, fire hazards, carbon nanostructures, heat resistance

For citation: Kiseleva V. S., Ivanov A. V. Methods of using heat-resistant fire extinguishing and protective compounds when extinguishing cascade fires with robotic fire extinguishing systems // *Technosphere safety*. 2026. No. 2 (51). P. 4–12.

Введение

Ключевым вызовом при обеспечении пожарной безопасности критически важных объектов нефтегазового комплекса, таких как сливо-наливные эстакады и резервуарные парки, является высокая вероятность возникновения каскадных пожаров, сопровождающихся экстремальным тепловым воздействием [1]. Существующие роботизированные установки пожаротушения (далее — РУП), использующие традиционные огнетушащие (далее — ОТВ) и защитные составы (далее — ЗС), демонстрируют недостаточную эффективность в данных условиях, что подтверждается

экспериментальными исследованиями [2]. Их основные ограничения связаны с низкой термостабильностью и замедленной кинетикой подавления пламени, требующей значительного времени для локализации пожара. Существующие методики применения РУП, основанные на использовании таких составов, не учитывают специфику экстремальных тепловых потоков и не обеспечивают требуемой скорости тушения, что обуславливает необходимость разработки принципиально нового подхода. Перспективным направлением является наномодификация традиционных ОТВ и ЗС путем диспергирования углеродных наноструктур (далее — УНС), в частности

астраленов (далее — Astr), что приводит к формированию пространственной сетки, повышающей термостабильность и механическую целостность покрытий за счет барьерного эффекта [3]. Внедрение таких материалов требует разработки соответствующей методики их применения в РУП, адаптированной к изменившимся реологическим, эксплуатационным характеристикам.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка научно обоснованной методики применения термостойких наномодифицированных ОТВ и ЗС в РУП для эффективного подавления каскадных пожаров на объектах нефтегазового комплекса.

Материалы и методы

В качестве материалов исследования использовались ОТВ на основе водных растворов синтетического пенообразователя типа «S» с концентрацией 2 и 6 масс. % [4] и ЗС на основе композитов неорганического вяжущего [5], модифицированные Astr [6]. Для ОТВ варьировалась концентрация модификатора в диапазоне 0,01–0,1 масс. %, для ЗС — 0,1 и 0,15 масс. %.

Оценка термостойкости материалов и моделирование их работы в условиях пожара проводились с применением комплекса вычислительных и аналитических методов. Для моделирования распространения опасных факторов пожара использовался верифицированный программный комплекс Fire Dynamic Simulator, интегрированный в графический интерфейс PyroSim [7]. Методология исследования основана на численном решении уравнений Навье — Стокса [8] для низкоскоростных турбулентных течений, описывающих процессы тепломассопереноса в условиях горения.

В рамках исследования был разработан комплекс из трех расчетных моделей. Первая модель — виртуальный аналог лабораторной установки для тушения модельного очага пожара класса «В» в емкости кубической формы с размерами 0,5 × 0,5 × 0,5 м (рис. 1а). Регистрация температурных полей в процессе тушения осуществлялась с помощью виртуальных термопар, расположенных на двух уровнях на высотах 0,25 м и 0,45 м от дна емкости, что обеспечивало контроль динамики изменения температурного режима над поверхностью горячей жидкости.

Вторая модель представляла собой виртуальный аналог огневой печи с системой термопар, установленных перед образцом, на поверхности и за защитной пластиной, для анализа термостойкости покрытий (рис. 1б).

Третья модель — крупномасштабная модель типовой сливо-наливной эстакады с геометрическими размерами 45 × 19,5 × 20 м, предназначенной для обслуживания четырех железнодорожных цистерн с нефтепродуктами (рис. 2).

В модель была включена система орошения на базе РУП производительностью 20–40 л/с и теплозащитный экран для анализа их эффективности. Исходные данные для моделирования включали теплофизические свойства модифицированных ОТВ и ЗС, полученные в ходе экспериментальных исследований [9, 10].

Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования тушения пожара ОТВ (рис. 3) показали, что применение модифицированного состава с добавкой 0,02 масс. % УНС при тушении модельного

очага пожара класса В обеспечивает снижение максимальной температуры в зоне

горения на 18–22 % по сравнению с базовым составом.

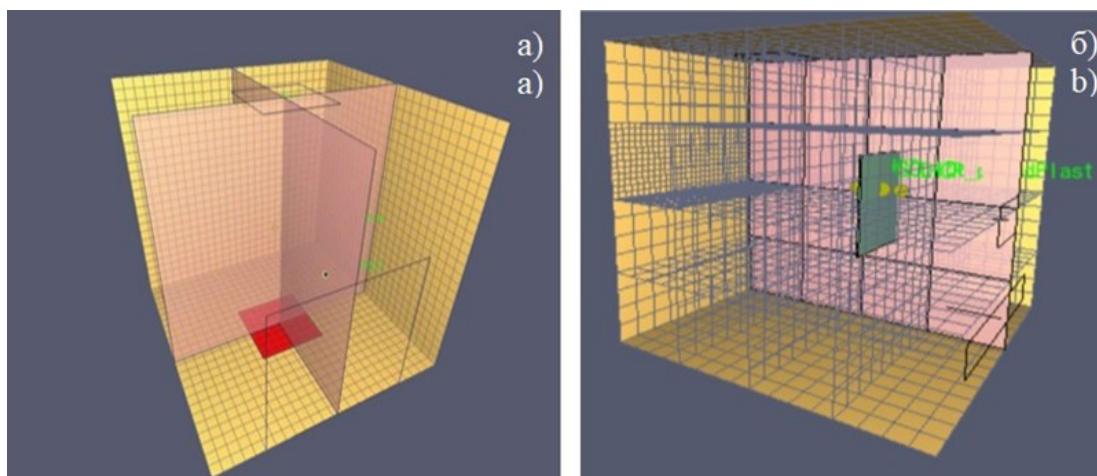


Рис. 1. Имитационные модели в программной среде PyroSim:
a — тушения пожара ОТВ; *б* — огневого воздействия на ЗС

Fig. 1. Simulation models in the PyroSim software environment:
a — fire extinguishing with fire extinguishing agents; *b* — fire impact on the fire protection system

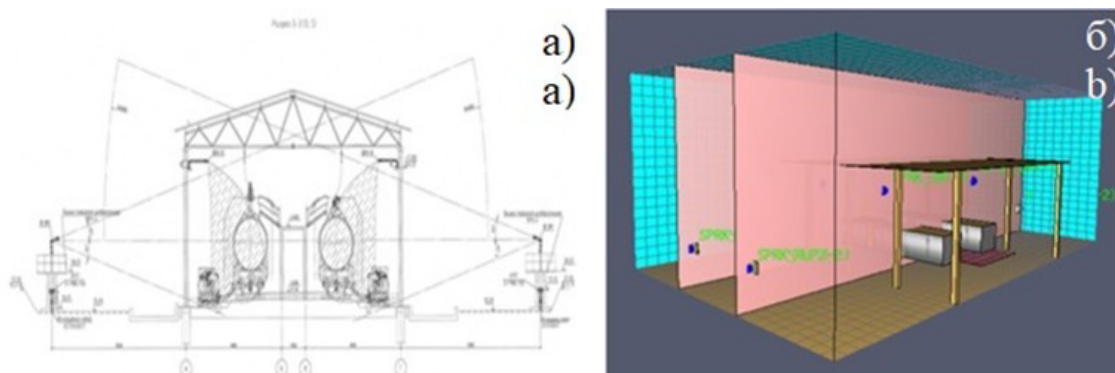


Рис. 2. Компьютерная модель сливо-наливной эстакады:
a — принципиальная схема; *б* — имитационная модель в программной среде PyroSim

Fig. 2. Computer model of a loading and unloading rack:
a — schematic diagram; *b* — simulation model in the PyroSim software environment

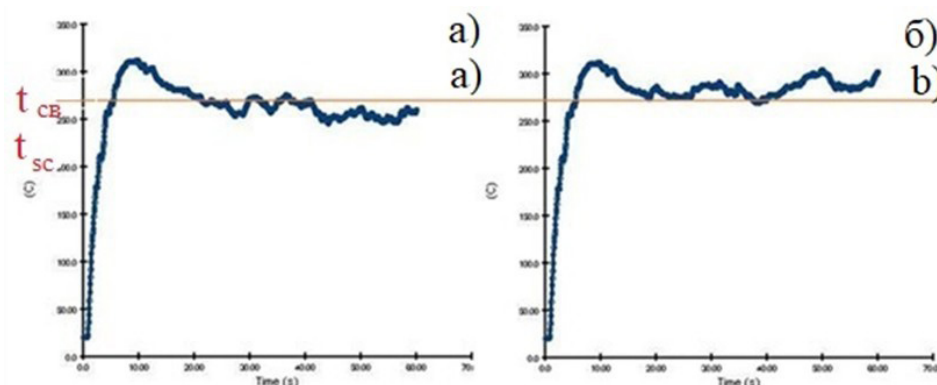


Рис. 3. Результаты моделирования в программной среде PyroSim:
a — модифицированный ОТВ; *б* — немодифицированный ОТВ

Fig. 3. Results of modeling in the PyroSim software environment:
a — modified fire extinguishing agent; *b* — unmodified fire extinguishing agent

Данные, полученные в ходе моделирования, подтвердили эффективное охлаждение зоны горения до температур ниже точки самовоспламенения легковоспламеняющейся жидкости (рис. 3). Временной анализ развития опасных факторов пожара выявил сокращение длительности ликвидации пожара на 86 % при сохранении расхода ОТВ. Полученные результаты прошли верификацию натурными испытаниями, что подтверждает адекватность разработанной модели и эффективность предложенного состава для тушения пожаров класса В [9].

Моделирование с помощью имитационной модели огневого воздействия на ЗС (рис. 4, табл.) показало выраженную зависимость теплофизических свойств композитных материалов на основе неорганического вяжущего от концентрации Astr. Наибольшую устойчивость показал образец с концентрацией УНС 0,15 масс. %, обеспечивающий тепловую защиту оборудования при температуре 1 100 °С в течение 2 043 с, в то время как немодифицированный состав выдержал воздействие 180 с [10].

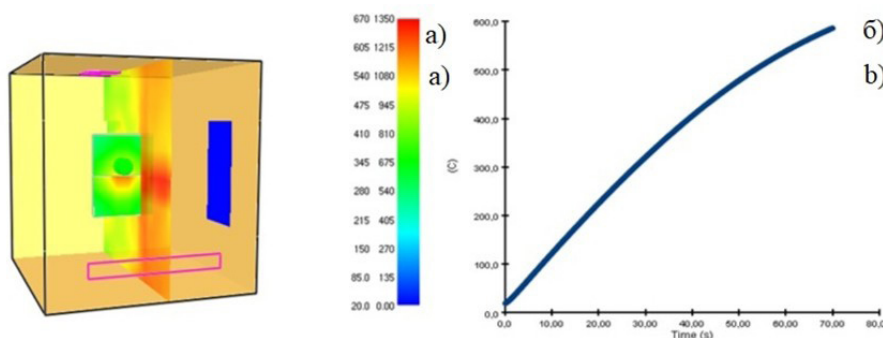


Рис. 4. Имитационная модель оценки термостойкости ЗС в программной среде PyroSim:
a — модель температурного поля на пластине; *б* — изменение температуры на обратной стороне поверхности пластины из стали в условиях факельного горения углеводородов

Fig. 4. Simulation model for assessing the thermal stability of a protective composition in the PyroSim software environment:
a — model of the temperature field on a plate; *b* — temperature change on the reverse side of the steel plate surface under conditions of torch combustion of hydrocarbons

Таблица
Данные величин коэффициента теплопроводности для всех образцов

Table
 Thermal conductivity coefficient values for all samples

№ образца № sample	Время предельного состояния, с Limit state time, s	Теплопроводность, Вт/(м·°С) Thermal conductivity, W/m·°C
1	180	0,35
2	900	0,30
3	2 043	0,27
4	240	0,33
5	1 500	0,28
6	1 100	0,29

Моделирование процессов пожаротушения на сливо-наливной эстакаде, оснащенной РУП и теплозащитным экраном,

продемонстрировало комплексную эффективность от совместного применения модифицированных составов. Комбинированное

использование ОТВ с 0,02 масс. % УНС и ЗС с 0,15 масс. % УНС обеспечило снижение скорости теплопереноса через защитный кожух на 25–30 % по сравнению с традиционными материалами. Данный результат обусловлен оптимизацией микроструктуры композита и повышением его барьерных свойств [11]. Полученные данные согласуются с результатами экспериментальных исследований, подтверждая адекватность

использованной математической модели и корректность методики расчета.

Разработанная методика представляет собой комплекс взаимосвязанных процедур, основанных на трех фундаментальных компонентах: нормировании критических параметров составов, регламентации технологического цикла и их приготовления и установлении правил практической эксплуатации в РУП (рис. 5) [12].

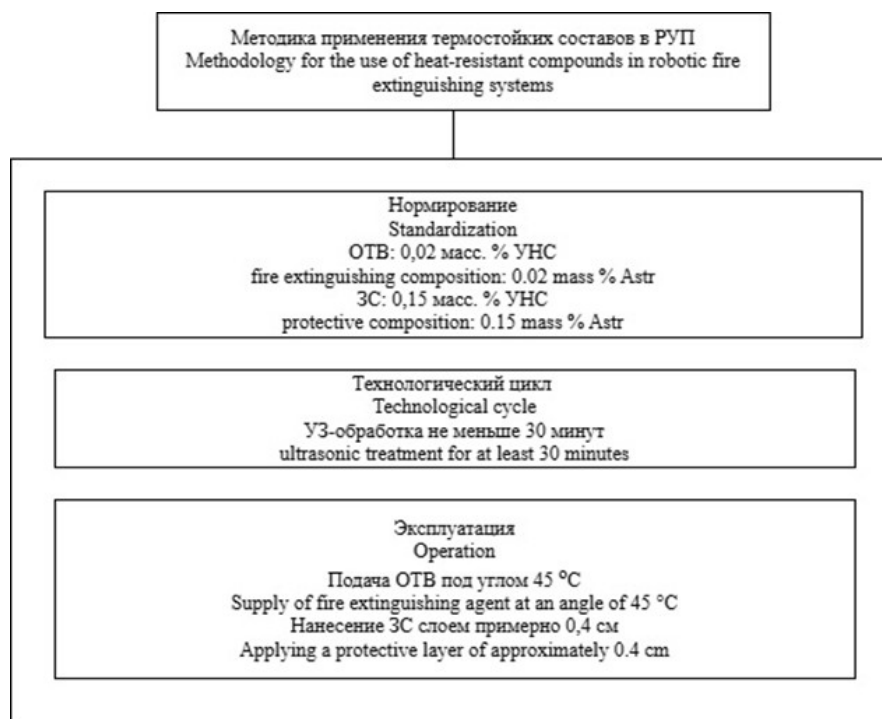


Рис. 5. Методика применения термостойких ОТВ и ЗС

Fig. 5. Methods of using heat-resistant fire extinguishing and protective compounds

Внедрение методики на критически важных объектах нефтегазового комплекса позволяет существенно повысить эффективность противодействия каскадных пожаров при использовании модифицированных составов в РУП. Применение данных материалов позволяет не только повысить эффективность тушения, но и обеспечить длительную защиту критически важных элементов инфраструктуры от термомеханического разрушения в условиях экстремальных тепловых нагрузок.

Выводы

На основании проведенных комплексных экспериментальных и численных исследований разработана научно обоснованная методика применения термостойких наномодифицированных ОТВ и ЗС в РУП для ликвидации каскадных пожаров на объектах нефтегазового комплекса. Установлено, что введение УНС в состав ОТВ в концентрации 0,02 масс. % и в ЗС в концентрации 0,15 масс. % приводит к существенному

улучшению их теплофизических и эксплуатационных характеристик. Численное моделирование в программном комплексе PyroSim обосновано натурными испытаниями и подтвердило, что комбинированное использование модифицированных составов существенно повышает эффективность теплозащиты, снижая скорость теплопереноса через защитные элементы на 25–30 %.

Разработанная методика, включающая нормирование критических параметров составов, регламентацию технологического цикла их приготовления и правила эксплуатации в РУП, позволяет существенно повысить эффективность противодействия каскадных пожаров и обеспечить длительную защиту критически важной инфраструктуры от термомеханического разрушения в условиях экстремальных тепловых нагрузок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Landucci G., Bonvicini S., Cozzani V. A methodology for the analysis of domino and cascading events in Oil & Gas facilities operating in harsh environments // *Safety science*. 2017. Vol. 95. P. 182–197.
2. Wang M., Chen X., Huang X. Robotic firefighting: a review and future perspective // *Intelligent building fire safety and smart firefighting*. 2024. P. 475–499.
3. Дмитриев А. С. Тепловые процессы в наноструктурах : монография. М., 2012. 303 с.
4. Пустовалов И. А., Иванов А. В. Методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой на объектах нефтегазового комплекса // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2021. Т. 10, № 4. С. 187–192.
5. Khalil A., Sohn S., Celik K. Thermal properties and stability of reactive magnesia cement // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 308. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125102
6. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles / A. I. Shames et al. // *Diamond and Related Materials*. 2009. Vol. 8. No. 2–3. P. 505–510.
7. Valasek L. The use of PyroSim for creation of the input FDS geometry for cinema fire simulation // *Recent Advances in Systems Science and Mathematical Modelling : Proc. of the European Conf. of Systems*. Paris, 2012. P. 304–309.
8. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model / K. McGrattan et al. // NIST special publication. URL: <https://clck.su/bLZrP> (дата обращения: 02.04.2026).
9. Киселева В. С. Разработка наномодифицированного огнетушащего состава для роботизированных установок пожаротушения на объектах транспортировки нефтепродуктов // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2023. № 3 (67). С. 196–203. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-196-203
10. Киселева В. С. Термическая стабильность и эксплуатационные характеристики конструктивных композитных материалов тепловой защиты роботизированных установок пожаротушения // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2024. Т. 13, № 4 (68). С. 238–243.

11. Разработка эффективных путей управления структурой и свойствами твердосплавных композитов, модифицированных наночастицами / Ю. И. Гордеев [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2014. Т. 7, № 3. С. 270–289.
12. Алексеева М. Б., Балан С. Н. Основы теории систем и системного анализа. СПб., 2002. 87 с.

REFERENCES

1. Landucci G., Bonvicini S., Cozzani V. A methodology for the analysis of domino and cascading events in Oil & Gas facilities operating in harsh environments // Safety science. 2017. Vol. 95. P. 182–197.
2. Wang M., Chen X., Huang X. Robotic firefighting: a review and future perspective // Intelligent building fire safety and smart firefighting. 2024. P. 475–499.
3. Dmitriev A. S. Thermal processes in nanostructures : monograph. Moscow, 2012. 303 p.
4. Pustovalov I. A., Ivanov A. V. Methodology for increasing the fire extinguishing capacity of modular fire extinguishing systems with finely misted water at oil and gas facilities // XXI century: results of the past and problems of the present plus. 2021. Vol. 10. No. 4. P. 187–192.
5. Khalil A., Sohn S., Celik K. Thermal properties and stability of reactive magnesia cement // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 308. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125102
6. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles / A. I. Shames et al. // Diamond and Related Materials. 2009. Vol. 8. No. 2–3. P. 505–510.
7. Valasek L. The use of PyroSim for creation of the input FDS geometry for cinema fire simulation // Recent Advances in Systems Science and Mathematical Modelling : Proc. of the European Conf. of Systems. Paris, 2012. P. 304–309.
8. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model / K. McGrattan et al. // NIST special publication. URL: <https://clck.su/bLZrP> (accessed 02.04.2026).
9. Kiseleva V. S. Development of a nanomodified fire extinguishing composition for robotic fire extinguishing systems at oil product transportation facilities // Problems of risk management in the technosphere. 2023. No. 3 (67). P. 196–203. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-196-203
10. Kiseleva V. S. Thermal stability and performance characteristics of structural composite materials for thermal protection of robotic fire extinguishing systems // XXI century: results of the past and problems of the present plus. 2024. Vol. 13. No. 4 (68). P. 238–243.
11. Development of effective ways to control the structure and properties of hard-alloy composites modified with nanoparticles / Yu. I. Gordeev et al. // Journal of the Siberian Federal University. Engineering and Technology. 2014. Vol. 7. No. 3. P. 270–289.
12. Alekseeva M. B., Balan S. N. Fundamentals of systems theory and system analysis. Saint Petersburg, 2002. 87 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Киселева Виктория Сергеевна, научный сотрудник центра организации научно-исследовательской и редакционной деятельности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России

(196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский просп., д. 149); РИНЦ ID: 1214692; ResearcherID: IZQ-0884-2023; ORCID: 0000-0003-0257-262X; e-mail: s-kiseleva1@mail.ru

Иванов Алексей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский просп., д. 149); РИНЦ ID: 792929; ResearcherID: A-3805-2015; ORCID: 0000-0002-4854-9321; e-mail: ivanov.av.igps@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Victoria S. Kiseleva, Research Officer center for the organization of scientific research and editorial activities, Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation); ID RSCI: 1214692; ResearcherID: IZQ-0884-2023; ORCID: 0000-0003-0257-262X; e-mail: s-kiseleva1@mail.ru

Alexey V. Ivanov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation); ID RSCI: 792929; ResearcherID: A-3805-2015; ORCID: 0000-0002-4854-9321; e-mail: ivanov.av.igps@mail.ru