

Научная статья

УДК 614.847:677.017; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-112-119

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДНЫХ
НАНОМОДИФИКАТОРОВ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ
МАТЕРИАЛА ВЕРХА БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНОГО**

✉Зелинская Ирина Алексеевна;

Иванов Алексей Владимирович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉zelinskaya.i@igps.ru

Аннотация. Исследовано влияние углеродных наноструктур (астраленов) на термическую стабильность композита на основе арамидных волокон с водоотталкивающей пропиткой, являющейся материалов верха боевой одежды пожарного. Методами дифференциальной термогравиметрии и дифференциального термического анализа исследован процесс термоллиза образцов с различным содержанием наночастиц (0–0,01 масс.%). Установлено, что введение астраленов в концентрации 0,001 масс.% значительно улучшает термическую стабильность композита. Дальнейшее повышение концентрации приводит к снижению термической стабильности композита. Механизм повышения термической стабильности композита за счет модифицирования астраленами заключается в создании на поверхности материала плотного карбонизованного слоя, ограничивающего доступ кислорода во внутренние слои материала.

Ключевые слова: модифицирование, термический анализ, защитная одежда, астралены

Для цитирования: Зелинская И.А., Иванов А.В. Исследование влияния углеродных наномодификаторов на термическую стабильность материала верха боевой одежды пожарного // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 112–119. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-112-119

Scientific article

**STUDY OF THE INFLUENCE OF CARBON NANOMODIFIERS
ON THERMAL STABILITY OF THE MATERIAL OF THE TOP
OF FIREFIGHTER'S PROTECTIVE CLOTHING**

✉Zelinskaya Irina A.;

Ivanov Alexey V.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉zelinskaya.i@igps.ru

Abstract. This article examines the effect of carbon nanostructures (astralenes) on the thermal stability of a composite based on aramid fibers with a water-repellent impregnation, used as the upper material for firefighter protective clothing. Differential thermogravimetry and differential thermal analysis were used to study the thermolysis of samples with varying nanoparticle contents (0–0,01 wt%). It was found that the introduction of astralenes at a concentration of 0,001 wt% significantly improves the thermal stability of the composite. Further increases in concentration lead to a decrease in the thermal stability of the composite. The mechanism for increasing the thermal stability of the composite by light modification with astralenes involves the creation of a dense carbonized layer on the surface of the material, which limits oxygen access to the inner layers of the material.

Keywords: modification, thermal analysis, protective clothing, astralenes

For citation: Zelinskaya I.A., Ivanov A.V. Study of the influence of carbon nanomodifiers on thermal stability of the material of the top of firefighter's protective clothing // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 112–119. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-112-119

Введение

Современные условия эксплуатации материалов для боевой одежды пожарного (БОП) требуют повышения термической стабильности и устойчивости к воздействию открытого пламени. Арамидные волокна, применяющиеся в качестве основы для материалов БОП, несмотря на свою прочность и сравнительно высокий кислородный индекс, при обработке водоотталкивающей пропиткой на основе силикона, обладают ограниченной огнестойкостью и подвержены термической деструкции при высоких температурах [1]. Это создает повышенный риск термических поражений участников тушения пожаров на объектах с обращением углеводородов [2]. Проведенные натурные испытания показали возможность повышения эксплуатационных характеристик материалов БОП без ухудшения механических свойств [3, 4], однако механизм повышения данных термической стабильности в условиях модифицирования астраленами [5] на данном этапе исследований раскрыт не был.

Ключевой проблемой является отсутствие четкого понимания механизма, посредством которого углеродные наноструктуры (УНС) (например, астралены и углеродные нанотрубки) повышают термическую стабильность композита. Хотя экспериментальные данные подтверждают, что введение наночастиц в полимерные матрицы увеличивает температуру начала деструкции и снижает горючесть [3], физико-химические механизмы этого процесса остаются недостаточно изученными. В частности, неясно, как именно наноструктуры влияют на кинетику термического разложения и формирование защитного углеродного слоя, предотвращающего распространение пламени [4]. В связи с этим целью настоящего исследования было проведение термического анализа материалов БОП с целью выявления механизмов обеспечения термической стабильности композитов в условиях модифицирования астраленами.

Материалы и методы для исследования

В качестве материалов для исследования использовались ткани на основе арамидного волокна с водоотталкивающей пропиткой (образцы), в которую были введены астралены (модификатор) в концентрациях 0,001 масс.%, 0,005 масс.% и 0,01 масс.% по методике, изложенной в работе [2], а также немодифицированный образец ткани (0 масс.%). Для проведения термического анализа использовалась установка NETZSCH STA449F3A-0430-M «Jupiter». Диапазон температур исследования: 100–900 °С, скорость подъема температуры: 10 °С/мин, среда: воздух [6]. Устойчивость композитов к воздействию открытого пламени определялась по ГОСТ Р ИСО 6941–99 «Материалы текстильные для средств индивидуальной защиты. Метод определения способности распространения пламени на вертикально ориентированных пробах» [11]. Зольный остаток (ЗО) определялся в исследуемых интервалах температур [7]. Обработка результатов исследования проводилась с помощью программного продукта Origin [8].

Результаты исследований

Результаты термического анализа показали, что наименьшее значение коксового остатка имеет образец с концентрацией УНС 0,001 масс.%, а наибольшее – для образца с концентрацией УНС 0,005 масс.% (рис. 1).

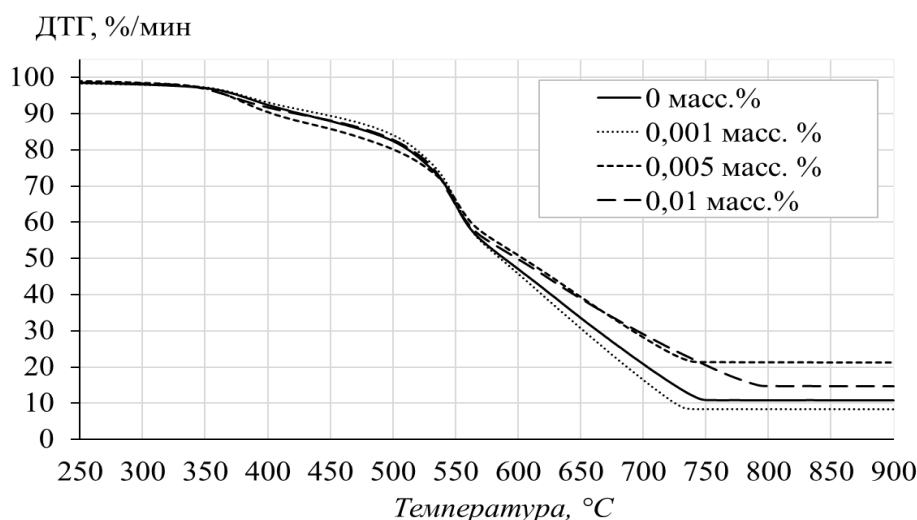


Рис. 1. ТГ-термограммы образцов

На термограммах дифференциального термического анализа (ДТА) (рис. 2) и дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) (рис. 3) наблюдаются три этапа потери массы и тепловыделения образцов материалов в интервалах температур 300–440 °С, 450–580 °С и 580–810 °С.

Полученные данные кривых ДТА показали, что с увеличением концентрации модификатора наблюдается снижение температуры пика ДТА. Для температурного интервала № 2 при концентрации модификатора 0,001 масс.% наблюдается увеличение площади ДТА-пика, а при более высоких концентрациях – его уменьшение (рис. 2).

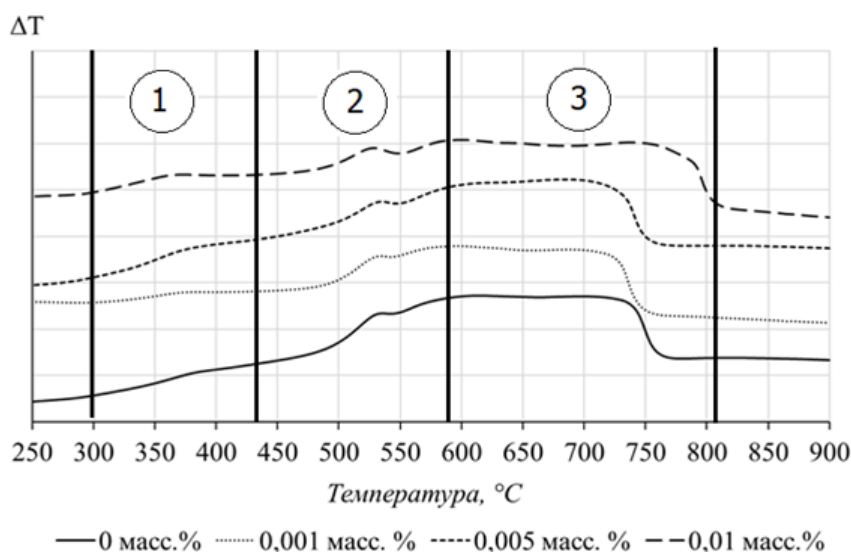


Рис. 2. Результаты ДТА-анализа образцов

Полученные данные кривых ДТГ показали, что в температурном интервале № 1 в присутствии модификатора происходит снижение температуры начала разложения и смещение ДТГ-пика в область более низких температур. Для температурного интервала № 2 влияние модификатора неоднозначно: для образца 0,005 масс.% наблюдается повышение температуры начала разложения, а для образца 0,01 масс.% происходит ее снижение. Для температурного интервала № 3 наибольшие изменения наблюдаются в температуре окончания потери массы для образца 0,01 масс.% (рис. 3).

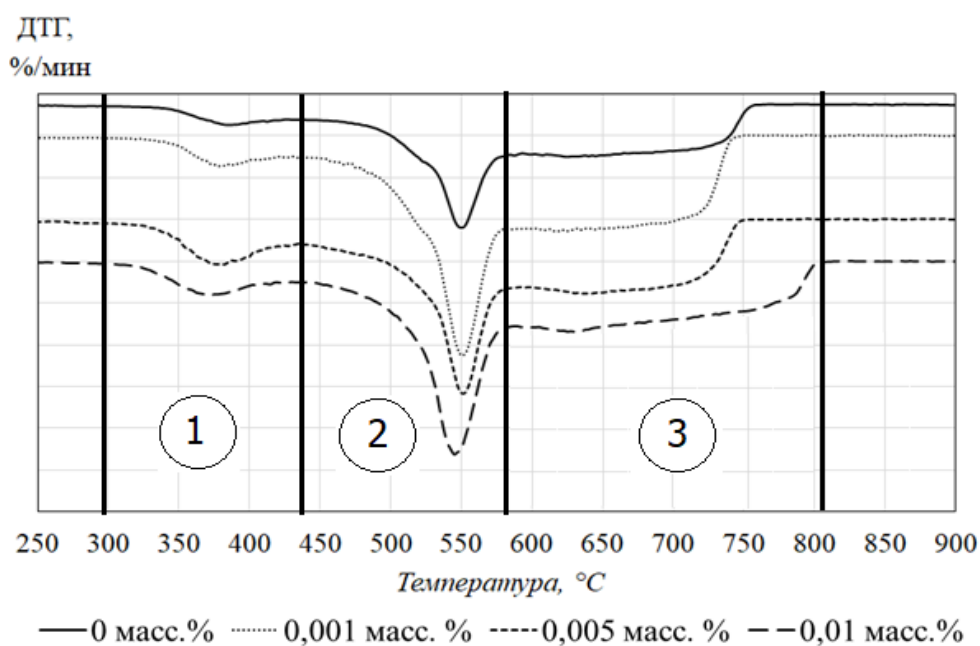


Рис. 3. Результаты ДТГ-анализа образцов

Результаты исследований устойчивости композита к воздействию открытого пламени по ГОСТ Р ИСО 6941–99 [11] показали, что наименьшее время остаточного горения наблюдается у образца с концентрацией УНС 0,001 масс.%, а наибольшее – с концентрацией УНС 0,01 масс.% (рис. 4).

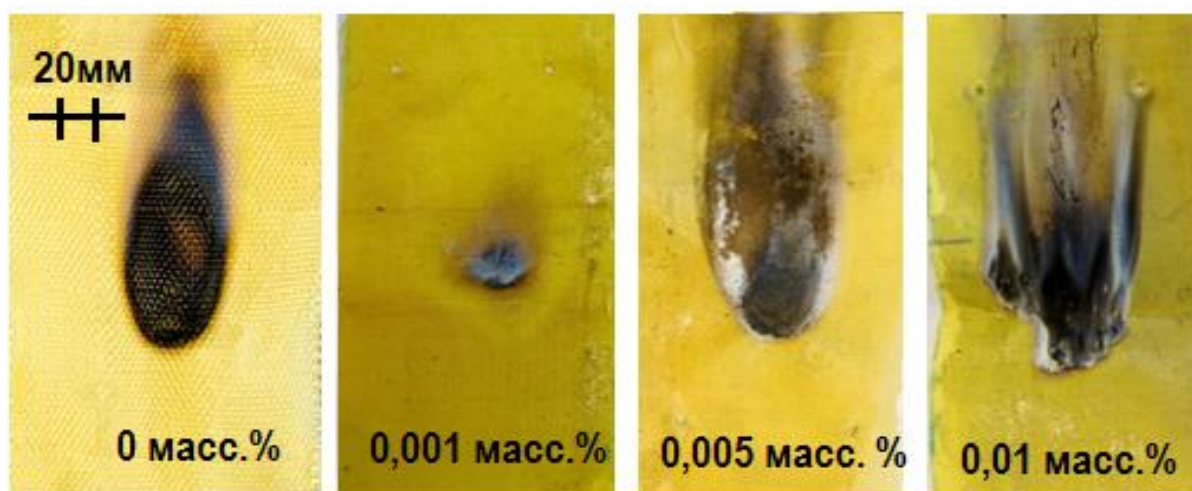


Рис. 4. Фотографии образцов после воздействия тестовых испытаний по ГОСТ Р ИСО 6941–99 [11]

Обсуждение результатов исследований

Анализ данных (табл. 1) показывает, что смещение пиков ДТГ в область более низких температур, а также увеличение площади ДТА-пика в температурном интервале № 1 указывает на увеличение скорости термического разложения с ростом концентрации модификатора.

Таблица 1

Сводные данные термического анализа образцов

№ п.п.	Показатель (характеристика)	0 масс. %	0,001 масс. %	0,005 масс. %	0,01 масс. %
1.	Температурный интервал № 1 (300–440 °С)				
1.1.	Температура начала потери массы, °С	346,8	346,5	337,7	327,6
1.2.	Температура окончания потери массы, °С	404,4	404,0	416,1	407,6
1.3.	Температура для ДТГ-пика, °С	384,5	380,6	380,5	370,2
1.4.	Значение ДТГ-пика, %/мин	-1,74	-1,54	-2,22	-1,67
1.5.	Площадь ДТА-пика, К·с/мг	3,893	6,523	6,932	8,753
2.	Температурный интервал № 2 (450–580 °С)				
2.1.	Температура начала потери массы, °С	527,2	526,6	535,5	523,5
2.2.	Температура окончания потери массы, °С	568,9	571,4	569,0	570,1
2.3.	Температура для ДТГ-пика, °С	549,6	550,8	551,0	544,6
2.4.	Значение ДТГ-пика, %/мин	-10,24	-10,84	-8,73	-9,53
2.5.	Площадь ДТА-пика, К·с/мг	5,536	9,11	2,39	2,303
3.	Температурный интервал № 3 (580–810 °С)				
3.1.	Температура начала потери массы, °С	592,0	591,9	583,7	589,0
3.2.	Температура окончания потери массы, °С	752,1	738,7	744,5	798,6
3.3.	Температура для ДТГ-пика, °С	623,9	583,6	634,0	626,8
3.4.	Значение ДТГ-пика, %/мин	-4,16	-4,66	-3,63	-3,39
3.5.	Площадь ДТА-пика, К·с/мг	95,78	88,92	92,42	76,01
3.6.	ЗО при 900 °С, %	10,64	8,24	20,99	14,52
4.	Остаточное время свободного горения, с	11	1	7	27

Значительное увеличение температуры для образца 0,01 масс. % с одновременным снижением температуры в температурном интервале № 3 свидетельствует о потенциальном изменении механизма термического разложения.

Совмещенные данные значений ЗО и остаточного времени свободного горения образцов материалов представлены на рис. 4. Наибольший вклад модификатора в процесс термической деструкции образцов происходит в температурном интервале № 1, где даже малые концентрации астраленов значительно влияют на термическую деструкцию материала.

Наибольший вклад в увеличение времени свободного горения образцов дают уменьшение значений температуры начала потери массы в температурном интервале № 1 (рис. 5) и увеличение значений температуры окончания потери массы в температурном интервале № 3 (рис. 6).



Рис. 5. Совмещенные данные значений температуры начала потери массы (температурный интервал № 1) и остаточного времени свободного горения образцов

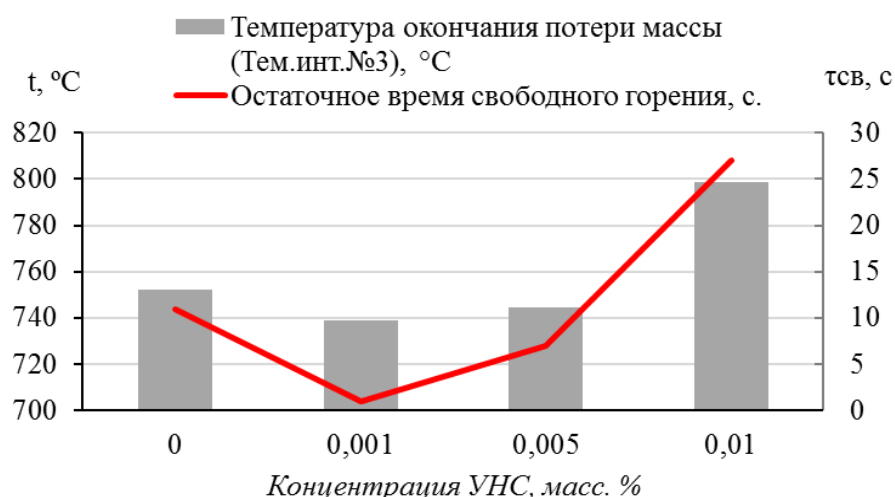


Рис. 6. Совмещенные данные значений температуры окончания потери массы (температурный интервал № 3) и остаточного времени свободного горения образцов

Исходя из полученных данных и результатов исследований, изложенных в работах [9, 10], можно сделать вывод, что повышение термической стойкости арамидного материала с силиконовой пропиткой, модифицированной астраленами, достигается за счет каталитического ускорения термического разложения модифицированного материала в температурном интервале № 1 и формирования плотного карбонизованного слоя, препятствующего быстрому проникновению кислорода во внутренний объем материала, что приводит к существенному сокращению времени свободного горения образца с концентрацией модификатора 0,001 масс. %.

Выводы

1) Модифицирование материала верха БОП астраленами в концентрации 0,001 мас. % обеспечивает повышение термической стабильности композита с силиконовой пропиткой. Дальнейшее же увеличение содержания модификатора приводит к снижению термостабильности материала.

2) Основной механизм термозащитного действия астраленов заключается в каталитическом ускорении процессов карбонизации поверхности при термическом воздействии. Это приводит к образованию плотного карбонизованного барьерного слоя, который существенно снижает скорость диффузии кислорода в объем материала и замедляет процессы термоокислительной деструкции.

3) Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения сверхмалых концентраций астраленов (порядка 0,001 мас. %) для модифицирования композитов с применением арамидов. Оптимальная концентрация обеспечивает баланс между каталитической активностью нанодобавки и структурной целостностью формируемого защитного слоя.

Список источников

1. Ивахнюк Г.К., Борисова В.А., Зелинская И.А. Модификация волокон боевой одежды пожарного углеродными наноматериалами для повышения их термостойкости и прочности в целях обеспечения безопасности сотрудников МЧС России // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации. 2020. С. 81–84.

2. Зелинская И.А. Исследование свойств наномодифицированных компонентов систем тепловой защиты в условиях горения углеводородов // XXI век: итоги прошлого

и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11. № 4 (60). С. 172–177. DOI: 10.46548/21vek-2022-1160-0027

3. Москалюк О.А., Зелинская И.А., Марценюк В.В. Апробация образцов тканей, модифицированных углеродными наноструктурами в составе боевой одежды пожарного в рамках опытно-исследовательских учений «Безопасная Арктика-2023» // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: материалы Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 163–168.

4. Кисляков Р.А., Зелинская И.А., Иванов А.В. Модификация материалов верха боевой одежды пожарного астраленами // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2021. № 2. С. 41–44.

5. Multi layered carbon nanoparticles of the fulleroid type: U.S. Patent № 9090752: заявл. / А. Ponomarev, М. Iudovich. 2015. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/26/62/05/8ef211389648f3/US9090752.pdf> (дата обращения: 20.03.2026).

6. Ситникова В.Е., Пономарева А.А., Успенская М.В. Методы термического анализа: практикум. СПб.: Университет ИТМО, 2021. 152 с.

7. Исследование эксплуатационных характеристик огнезащитных покрытий на основе эпоксидных смол, модифицированных астраленами / А.В. Иванов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2020. Т. 29. № 1. С. 55–68. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68

8. Возможности методов термического анализа в применении к исследованию кинетики термического разложения полимеров / А.А. Коптелов [и др.] // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. № 9. С. 1163–1169.

9. Characterization of the carbonization process of expandable graphite/silicone formulations in a simulated fire / B. Gardelle [et al.] // Polymer Degradation and Stability. 2013. Т. 98. № 5. С. 1052–1063. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.02.001

10. Flame retardancy of silicone-based materials / S. Hamdani [et al.] // Polymer Degradation and Stability. 2009. Т. 94. № 4. С. 465–495. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.11.019

11. ГОСТ Р ИСО 6941–99. Материалы текстильные для средств индивидуальной защиты. Метод определения способности распространения пламени на вертикально ориентированных пробах. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. III, 8 с.; 29 см (Система стандартов безопасности труда).

References

1. Ivahnyuk G.K., Borisova V.A., Zelinskaya I.A. Modifikaciya volokon boevoj odezhdy pozhnarnogo uglerodnymi nanomaterialami dlya povysheniya ih termostojkosti i prochnosti v celyah obespecheniya bezopasnosti sotrudnikov MCHS Rossii // Pozharotushenie: problemy, tekhnologii, innovacii. 2020. S. 81–84.

2. Zelinskaya I.A. Issledovanie svojstv nanomodificirovannyh komponentov sistem teplovoj zashchity v usloviyah goreniya uglevodorodov // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. 2022. Т. 11. № 4 (60). С. 172–177. DOI: 10.46548/21vek-2022-1160-0027

3. Moskalyuk O.A., Zelinskaya I.A., Marcenyuk V.V. Aprobaciya obrazcov tkanej, modificirovannyh uglerodnymi nanostrukturami v sostave boevoj odezhdy pozhnarnogo

4. v ramkah opytно-issledovatel'skih uchenij «Bezopasnaya Arktika-2023» // Pozhnarnaya bezopasnost': sovremennye vyzovy. Problemy i puti resheniya: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 2023. S. 163–168.

5. Kislyakov R.A., Zelinskaya I.A., Ivanov A.V. Modifikaciya materialov verha boevoj odezhdy pozhnarnogo astralenami // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2021. № 2. S. 41–44.

6. Multi layered carbon nanoparticles of the fulleroid type: U.S. Patent № 9090752: zayavl. / А. Ponomarev, М. Iudovich. 2015. URL:

<https://patentimages.storage.googleapis.com/26/62/05/8ef211389648f3/US9090752.pdf> (data obrashcheniya: 20.03.2026).

7. Sitnikova V.E., Ponomareva A.A., Uspenskaya M.V. *Metody termicheskogo analiza: praktikum*. SPb.: Universitet ITMO, 2021. 152 s.

8. Issledovanie ekspluatatsionnykh harakteristik ogneshchitnykh pokrytij na osnove epoksidnykh smol, modifitsirovannykh astralenami / A.V. Ivanov [i dr.] // *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2020. T. 29. № 1. S. 55–68. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68

9. Vozmozhnosti metodov termicheskogo analiza v primenenii k issledovaniyu kinetiki termicheskogo razlozheniya polimerov / A.A. Koptelov [i dr.] // *Zhurnal prikladnoj himii*. 2016. T. 89. № 9. S. 1163–1169.

10. Characterization of the carbonization process of expandable graphite/silicone formulations in a simulated fire / B. Gardelle [et al.] // *Polymer Degradation and Stability*. 2013. T. 98. № 5. S. 1052–1063. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.02.001

11. Flame retardancy of silicone-based materials / S. Hamdani [et al.] // *Polymer Degradation and Stability*. 2009. T. 94. № 4. S. 465–495. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.11.019

12. GOST R ISO 6941–99. *Materialy tekstil'nye dlya sredstv individual'noj zashchity. Metod opredeleniya sposobnosti rasprostraneniya plameni na vertikal'no orientirovannykh probah*. M.: IPK Izd-vo standartov, 2000. III, 8 s.; 29 sm (Sistema standartov bezopasnosti truda).

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 14.11.2025; одобрена после рецензирования: 12.01.2026; принята к публикации: 06.04.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 14.11.2025; approved after review: 12.01.2026; accepted for publication: 06.04.2026

Информация об авторах:

Зелинская Ирина Алексеевна, заместитель начальника кафедры педагогики и психологии экстремальных ситуаций Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: zelinskaya.i@igps.ru, SPIN-код: 6886-9928

Иванов Алексей Владимирович, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: ivanov.av.igps@mail.ru, SPIN-код: 6886-9928

Information about the authors:

Zelinskaya Irina A., deputy head of the department of pedagogy and psychology of extreme situations of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: zelinskaya.i@igps.ru, SPIN: 6886-9928

Ivanov Aleksey V., associate professor of department of fire safety of technological processes and production of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, docent, e-mail: ivanov.av.igps@mail.ru, SPIN: 6886-9928