

Исследование огнезащитных свойств интумесцентных материалов, применяемых на промышленных объектах Арктического региона при ускоренном старении

Екатерина Валерьевна Головина¹✉, Андрей Владимирович Калач^{2,3},
Виталий Александрович Скоробогатов⁴

¹ Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Екатеринбург, Россия

² Воронежский государственный технический университет (ВГТУ), г. Воронеж, Россия

³ Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний, г. Воронеж, Россия

⁴ ООО «ТЕРРИТОРИЯ», Московская область, г. о. Красногорск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Использование огнезащитных материалов на промышленных объектах, расположенных в Арктическом регионе, требует особого подхода к исследованию сохранения их работоспособности в условиях низких температур и агрессивной окружающей среды. В связи с этим вопрос оценки огнезащитной способности средств огнезащиты представляется востребованным и актуальным.

Цели и задачи. Данная работа направлена на исследование сохранности огнезащитных свойств огнезащитного материала под влиянием климатических факторов в условиях открытой промышленной среды. Для осуществления цели исследования были выполнены следующие задачи:

- проведено искусственное старение образцов огнезащитного покрытия в соответствии с применяемыми методиками на 5, 15 и 25 лет;
- исследована устойчивость к влиянию погодных факторов и сохранению огнезащитных характеристик материалов в ходе их использования методами термического анализа;
- проведена оценка огнезащитной эффективности образцов после ускоренного искусственного старения, имитирующего длительную эксплуатацию.

Методы. Для осуществления исследования сохранности огнезащитных свойств анализируемых образцов покрытий были применены следующие методы:

- метод искусственного климатического старения;
- методы синхронного термического анализа;
- метод оценки огнезащитной эффективности.

Результаты. Результаты испытаний анализируемых образцов огнезащитных материалов при искусственном ускоренном старении показали незначительное ухудшение огнезащитных характеристик покрытия при увеличении количества циклов. Сделан вывод о возможности применения вышеуказанных методов для проведения качественной оценки сохранности огнестойких характеристик исследуемых материалов.

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают, что анализируемые покрытия сохраняют огнезащитную способность при условии соблюдения требований, указанных в технической документации. Следовательно, исследуемый огнезащитный материал интумесцентного типа может быть рекомендован для промышленных объектов, расположенных в регионах с преобладанием низких температур.

Ключевые слова: огнезащитные покрытия; огнезащитная эффективность; воздействие климатических факторов; сохранение огнезащитных свойств; вспучивающийся огнезащитный состав; метод термического анализа; объект нефтегазовой отрасли

Для цитирования: Головина Е.В., Калач А.В., Скоробогатов В.А. Исследование огнезащитных свойств интумесцентных материалов, применяемых на промышленных объектах Арктического региона при ускоренном старении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 4. С. 62–72. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.62-72

✉ Головина Екатерина Валерьевна, e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

Investigation of the flame retardant properties of intumescent materials used at industrial facilities in the Arctic region with accelerated aging

Ekaterina V. Golovina¹✉, Andrey V. Kalach^{2,3}, Vitaly A. Skorobogatov⁴

¹ Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Yekaterinburg, Russian Federation

² Voronezh State Technical University (VSTU), Voronezh, Russian Federation

³ Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russian Federation

⁴ LLC "TERRITORY", Moscow region, Krasnogorsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The use of fire-resistant materials at industrial facilities located in the Arctic region requires a special approach to the study of their performance in conditions of low temperatures and aggressive environment. In this regard, the issue of assessing the fire-resistant capacity of fire-protection means appears to be in demand and relevant.

Aims and purposes. This work is aimed at the study of the preservation of fire-resistant properties of fire-resistant material under the influence of climatic factors in the conditions of an open industrial environment. To achieve the purpose of the study, the following tasks were performed:

- artificial aging of fire-resistant coating specimens was carried out in accordance with the applied methods for 5, 15 and 25 years;
- the resistance to the influence of weather factors and the preservation of fire-resistant characteristics of materials during their use by thermal analysis methods has been investigated;
- the fire-retardant effectiveness of the specimens after accelerated artificial aging, simulating long-term operation, was evaluated.

Methods. The following methods were used to study the preservation of the fire-retardant properties of the analyzed coating specimens:

- the method of artificial climatic aging;
- the methods of synchronous thermal analysis;
- the method of assessing fire-retardant effectiveness.

Results. The results of testing the analyzed specimens of fire-resistant materials under artificial accelerated aging showed a slight deterioration in the fire-resistant properties of the coating as the number of cycles increased. It was concluded that the above methods can be used to qualitatively assess the preservation of the fire-resistant properties of the studied materials.

Conclusion. The conducted experimental studies confirm that the analyzed coatings retain their fire-resistant properties, provided that the requirements specified in the technical documentation are met. Therefore, the studied intumescent fire-resistant material can be recommended for industrial facilities located in regions with predominantly low temperatures.

Keywords: flame-retardant coatings; flame-retardant effectiveness; impact of climatic factors; preservation of flame-retardant properties; bulging flame retardant; thermal analysis method; oil and gas industry facility

For citation: Golovina E.V., Kalach A.V., Skorobogatov V.A. Investigation of the flame retardant properties of intumescent materials used at industrial facilities in the Arctic region with accelerated aging. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(4):62-72. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.04.62-72 (rus).

✉ Ekaterina Valeryevna Golovina, e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

Введение

В связи с необходимостью разработки и освоения новых месторождений нефти и газа наблюдается возрастание интереса к развитию промышленных объектов, расположенных в Арктическом регионе. Развитие предприятий нефтегазового комплекса диктует соблюдение требований пожарной безопасности, в том числе посредством применения специальных средств огнезащиты. В то же время необходимо принимать во внимание специфику эксплуатации данных промышленных объектов, поскольку арктический климат обладает рядом кли-

матических особенностей, оказывающих влияние на выбор и осуществление огнезащиты конкретного объекта.

Необходимо выделить следующие параметры, влияющие на выбор огнезащитного покрытия для предприятий нефтегазовой отрасли, расположенных в Арктическом регионе:

- условия эксплуатации, такие как температурно-влажностные условия эксплуатации и производства работ по огнезащите [1], способность к сохранению огнезащитных свойств в диапазоне температур, характерных для Арктической зоны (от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$) [2, 3];

- стойкость к агрессивности окружающей среды, возможность для применения огнезащитного материала для внешних работ [4];
- сохранение прочности и адгезионных свойств покрытия при длительной эксплуатации в условиях арктических климатических условий [4, 5].

Арктический регион представляет собой уникальную экологическую систему с особыми климатическими условиями, что предъявляет особые требования к эксплуатационным характеристикам строительных материалов, в том числе и к огнезащитным. В условиях Арктики особое внимание необходимо уделять выбору материалов, учитывая не только их огнезащитные свойства, но и стойкость к низким температурам и воздействию агрессивных факторов окружающей среды. В работах [6–9] приведены результаты исследования огнезащитных свойств терморасширяющихся материалов для стальных конструкций. Авторы сходятся во мнении, что оценка огнезащитной эффективности выступает одним из методов, с помощью которых определяются основные параметры качества обеспечения пожарной безопасности защищаемого объекта. Учитывая сложность эксплуатационных условий промышленных предприятий, расположенных в Арктическом регионе, одним из факторов, влияющих на сохранение огнезащитных функций покрытия, является срок службы в условиях длительного времени и действия неблагоприятных климатических условий арктических районов [10, 11].

Исследователями [12, 13] предлагается применение огнезащитных материалов интумесцентного типа для объектов нефтегазовой отрасли. К основным достоинствам вспучивающихся составов относится возможность нанесения малыми толщинами [14], не требуется сложное техническое оборудование для нанесения на защищаемую конструкцию и возможность применения к конструкциям практически любой сложности [15, 16].

Одновременно с этим при внешней целостности проблемным вопросом является обеспечение сохранения огнезащитных свойств покрытия [17].

Наиболее проблематичным является определение момента, когда покрытие утрачивает свои защитные функции и подлежит замене [18]. Данный аспект представляет значительный интерес с точки зрения обеспечения пожарной безопасности, поскольку от него зависит эффективность защиты объектов от пожара [19].

Целью данной работы является исследование сохранности огнезащитных свойств огнезащитного материала при воздействии климатических факторов в условиях открытой промышленной среды.

Для достижения поставленной цели исследования было проведено искусственное старение об-

разцов огнезащитного покрытия в соответствии с применяемыми методиками на 5, 15 и 25 лет; исследована устойчивость к влиянию погодных факторов и сохранению огнезащитных характеристик материалов в ходе их использования методами термического анализа; проведена оценка огнезащитной эффективности образцов после ускоренного искусственного старения, имитирующего длительную эксплуатацию.

В настоящем исследовании приводятся результаты испытаний на сохранность огнезащитных характеристик при климатическом старении в условиях открытой промышленной атмосферы (ХЛ1, УХЛ1 по ГОСТ 15150–69¹) на примере современного огнезащитного покрытия, применяемого для объектов нефтегазового комплекса.

Материалы и методы

С 1 октября 2024 г. начал действовать национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 71618–2024 «Конструкции стальные строительные с огнезащитными покрытиями. Методы испытаний антикоррозионных свойств и стойкости к воздействию климатических факторов в процессе эксплуатации»². Данный документ можно применять в качестве руководства при установлении гарантийного срока для огнезащитных покрытий, применяемых на стальных элементах строительных конструкций [20, 21].

В качестве объекта исследования было выбрано атмосферостойкое огнезащитное покрытие интумесцентного типа (далее — ОЗП) на органической основе, характеристики которого, согласно технической документации, соответствуют специфике промышленных объектов, расположенных в арктических районах. Покрытия наносились по схеме в соответствии с технической документацией:

- грунтовочный слой толщиной сухого слоя не менее 0,80 мкм;
- атмосферостойкое огнезащитное покрытие толщиной сухого слоя не менее 0,870 мкм;
- финишное покрытие толщиной сухого слоя не менее 0,50 мкм.

Испытания проводились посредством нанесения покрытия на четырех образцах стальных пластин при температуре –10... –15 °С, один из которых использовался в качестве контрольного и не подвергался воздействию ускоренных климатических испытаний.

¹ ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

² ГОСТ Р 71618–2024. Конструкции стальные строительные с огнезащитными покрытиями. Методы испытаний антикоррозионных свойств и стойкости к воздействию климатических факторов в процессе эксплуатации.

Таблица 1. Оборудование и параметры проведения испытаний
Table 1. Equipment and test parameters

| Оборудование Equipment | Параметры испытаний Test parameters | | Время выдержки образцов в одном цикле, ч Specimen holding time in one cycle, h |
|---|--|--|---|
| | Температура, °С Temperature, °C | Относительная влажность, % Relative humidity, % | |
| Камера климатическая ТН-225 С Climate control chamber TN-225 C | +40 (± 2) | +97 (+ 3) | 2 |
| Испытательная камера с напуском сернистого газа SO ₂ LRHS-297-RSO ₂ (концентрация SO ₂ (5 + 1) мг/м ³) Test chamber with SO ₂ sulfur dioxide intake RHS-297-RSO ₂ (concentration of SO ₂ (5 + 1) mg/m ³) | +40 (± 2) | +97 (+ 3) | 2 |
| Камера климатическая ТН-225 С Climate control chamber TN-225 C | –30 (± 3) | Не нормируется It is not standardized | 6 |
| УФ-камера для испытаний на атмосферостойкость UV-ST-260: режим 3 мин орошения, 17 мин без орошения UV weather resistance test chamber UV-ST-260: 3 minutes irrigation mode, 17 minutes without irrigation | +60 (± 3) | Не нормируется It is not standardized | 5 |
| Камера климатическая ТН-225 С Climate control chamber TN-225 C | –60 (± 3) | Не нормируется It is not standardized | 3 |
| Выдержка на воздухе Exposure to air | 15–30 | Не более 80 No more than 80 | 6 |
| Итого Total | 24 | | |

В рамках исследования циклическое искусственное старение трех образцов осуществлялось в соответствии с ГОСТ 9.401–2018³, по методу 6. Далее проводилось определение стойкости огнезащитных покрытий к воздействию климатических факторов и сохранности огнезащитных свойств в процессе эксплуатации. Для оценки огнезащитной эффективности использовались два метода: термический анализ (ГОСТ Р 53293–99⁴) и метод оценки огнезащитной эффективности (ГОСТ Р 53295–2009⁵).

Искусственное старение имитировало эксплуатацию огнезащитного терморасширяющегося покрытия в течение 5, 15 и 25 лет. Режим испытаний, порядок перемещения и продолжительность выдержки образцов в установках приведены в табл. 1.

Далее проводился визуальный осмотр покрытия. В соответствии с требованиями ГОСТ 9.407–2015⁶

³ ГОСТ 9.401–2018. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов.

⁴ ГОСТ Р 53293–99. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа.

⁵ ГОСТ Р 53295–2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности.

⁶ ГОСТ 9.407–2015. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида.

допускаются внешние повреждения не более 15 % поверхности образца покрытия, площадь коррозионного разрушения — не более 1 %.

В соответствии с ГОСТ Р 53293–99⁴ методами термического анализа проводилось определение сохранности огнезащитных свойств исследуемых образцов покрытий. Для каждого образца проводились не менее трех параллельных испытаний.

Методами термического анализа испытывались образцы покрытия, нанесенного на стальные пластины, подвергнутые искусственному старению. Соответственно, ТА проводился для всего огнезащитного материала, нанесенного на пластину, включая финишное покрытие.

Оценка огнезащитной эффективности производилась в соответствии с методикой, указанной в ГОСТ Р 53295–2009⁵. Среднюю температуру металла рассчитывали как среднее значение показаний термопар, установленных на образце.

Результаты и их обсуждение

Как известно, анализ термоаналитических кривых позволяет выявить не только термические свойства интумесцентных материалов, но и обеспечивает полное понимание термостойкости и устойчивости исследуемых образцов к воздействию высоких температур.

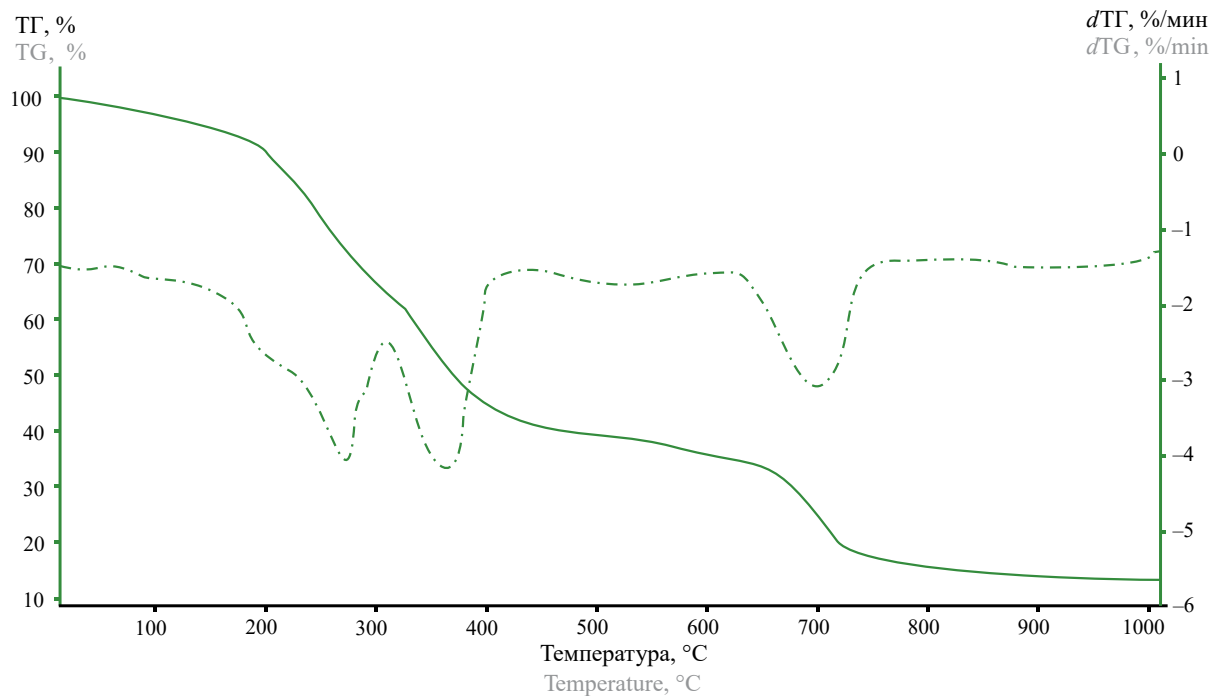


Рис. 1. Результаты термического анализа контрольного образца (без старения)
Fig. 1. Results of thermal analysis of the control specimen (without aging)

Установлены незначительные изменения внешнего вида покрытия в зависимости от длительности климатических испытаний.

Необходимо также отметить, что при исследовании наблюдали слабое посветление образца после 224 циклов старения.

Термоаналитические кривые исследуемых образцов представлены на рис. 1–4.

Исходя из данных термограммы контрольного образца, представленной на рис. 1, на ТГ-кривой прослеживается 3 основных этапа потери массы, что согласовывается с данными ДТГ-кривой.

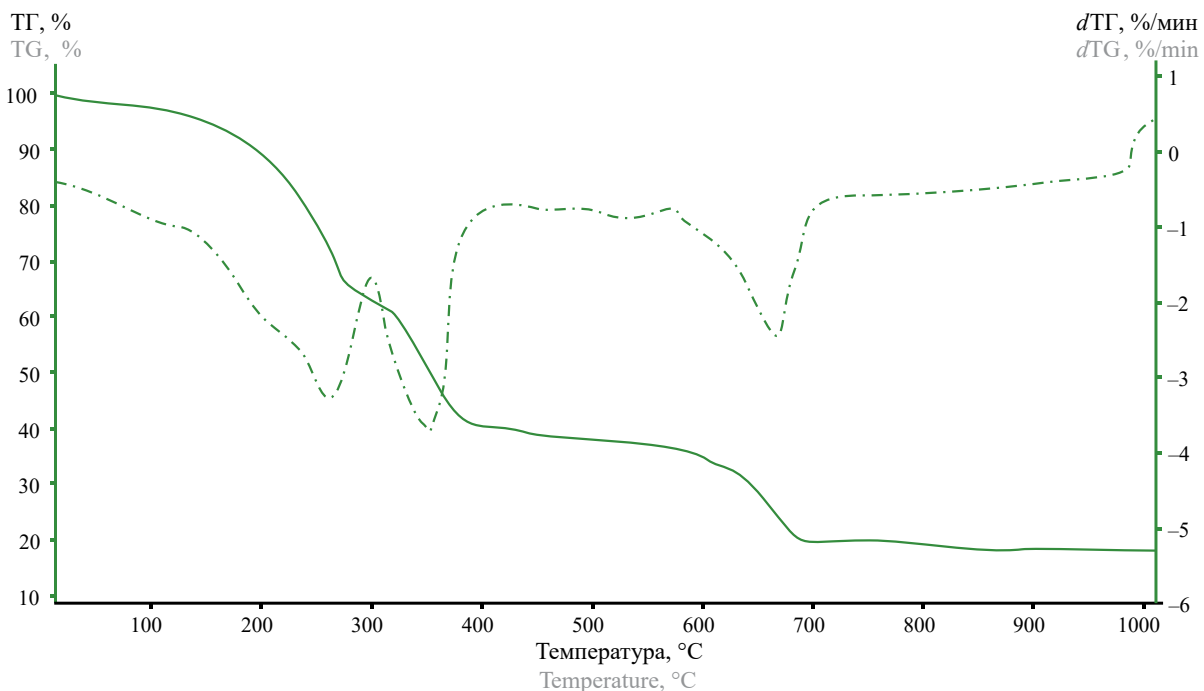


Рис. 2. Результаты термического анализа образца после 45 циклов старения
Fig. 2. Results of thermal analysis of the specimen after 45 aging cycles

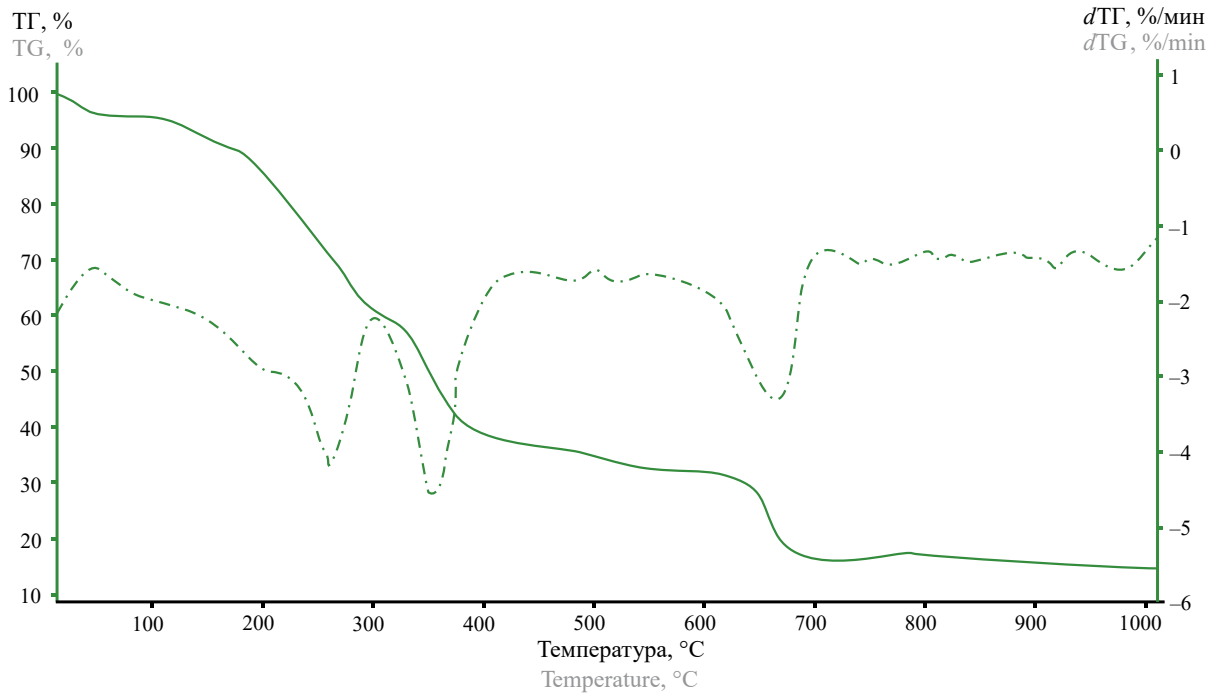


Рис. 3. Результаты термического анализа образца после 134 циклов старения
Fig. 3. Results of thermal analysis of the specimen after 134 aging cycles

Основные этапы потери массы наблюдаются в интервалах температур 200–400 °С, 300–500 °С, 500–700 °С. Зольный остаток составил 15,44 %.

Полученные результаты исследования образцов, подвергшихся искусственному старению (см. рис. 2–4), хорошо согласовываются с ТГ и ДСК кри-

выми исходного образца без старения. Потеря массы выражена тремя основными пиками в интервалах температур 200–400 °С, 300–500 °С, 500–700 °С. Зольный остаток для всех состаренных образцов варьируется в пределах от 15,26 до 17,8 %, что отличается от значения для контрольного образца не более чем на 2,5 %.

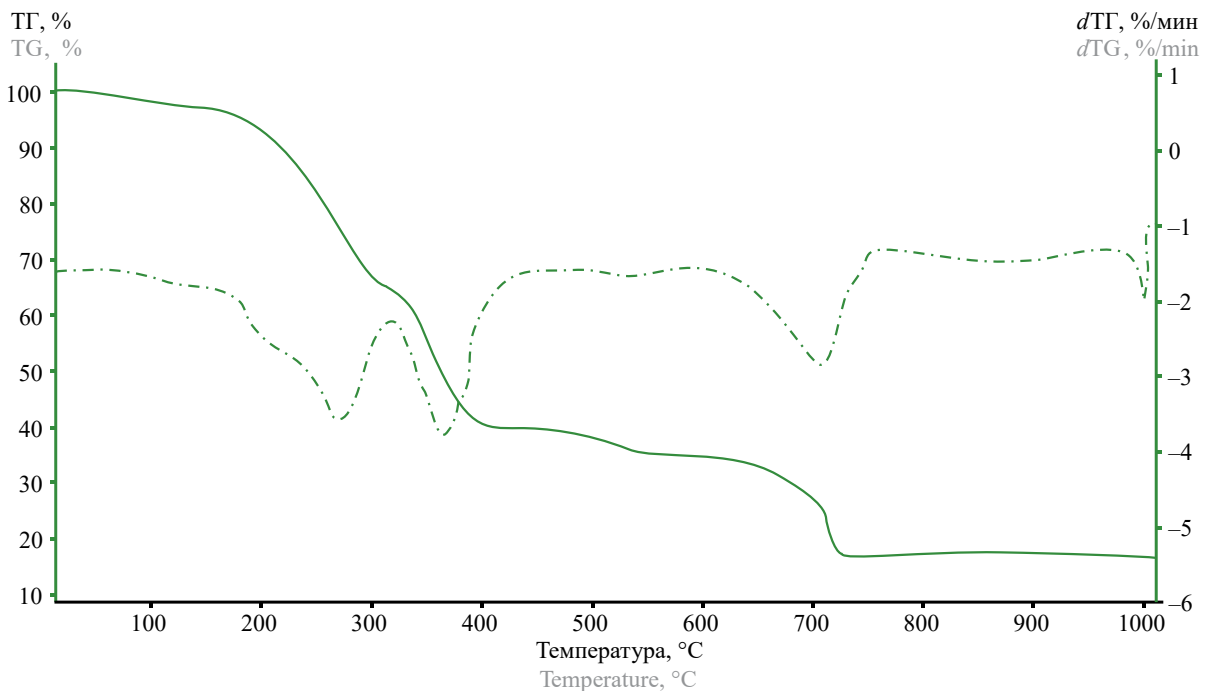


Рис. 4. Результаты термического анализа образца после 224 циклов старения
Fig. 4. Results of thermal analysis of the specimen after 224 aging cycles

Таблица 2. Результаты термического анализа образцов покрытия
Table 2. Results of thermal analysis of coating specimens

| Термоаналитическая характеристика hermoanalytical characteristics | Без старения Without aging | 45 циклов старения 45 aging cycles | 134 цикла старения 134 aging cycles | 224 цикла старения 224 aging cycles |
|--|-------------------------------|--|---|---|
| <i>Потеря массы Δm, %, при температуре, °C</i> <i>Mass loss Δm, %, at temperature, °C</i> | | | | |
| Δm_{200} | 5,41 | 6,47 | 6,35 | 4,35 |
| Δm_{300} | 21,44 | 22,59 | 22,64 | 20,48 |
| Δm_{400} | 36,31 | 36,88 | 37,58 | 35,55 |
| Δm_{500} | 38,73 | 39,11 | 40,23 | 37,76 |
| Зольный остаток, % (1000 °C) Ash residue, % (1,000 °C) | 15,44 | 15,26 | 17,35 | 17,80 |
| <i>Температура, °C, при потере массы</i> <i>Temperature, °C, with weight loss</i> | | | | |
| $T_{5\%}$ | 189,65 | 171,33 | 165,65 | 200,13 |
| $T_{10\%}$ | 234,65 | 226,33 | 225,65 | 240,13 |
| $T_{20\%}$ | 284,65 | 276,33 | 280,65 | 290,13 |
| $T_{30\%}$ | 359,65 | 356,33 | 360,65 | 265,13 |
| $T_{50\%}$ | 704,65 | 686,33 | 690,65 | 720,13 |
| <i>Характеристика максимумов ДТГ-пиков в температурном интервале</i> <i>(температура максимума T_{max}/максимальная скорость потери массы A_{max}, %/мин)</i> <i>Characteristics of the maxima of DTG peaks in the temperature range</i> <i>(maximum temperature T_{max}/maximum mass loss rate A_{max}, %/min)</i> | | | | |
| 200–400 °C | 271,80/2,39 | 264,66/2,18 | 272,08/2,34 | 270,49/2,24 |
| 300–500 °C | 361,92/2,58 | 358,17/2,36 | 366,80/2,74 | 326,86/2,56 |
| 500–700 °C | 691,21/1,55 | 679,72/1,59 | 684,73/1,62 | 709,00/1,54 |

По результатам термического анализа в соответствии с ГОСТ Р 53293–99⁴ были определены значимые идентификационные характеристики по ДТГ-и ТГ-кривым (табл. 2).

Установление идентичности образцов проводилось в результате сравнения методами статистического анализа идентификационных характеристик испытуемого образца с аналогичными характеристиками, полученными для идентификатора.

В результате анализа идентификационных характеристик выделено четыре основных температурных интервала потери массы контрольного образца огнезащитной композиции без старения: при температурах 200, 300, 400 и 500 °C. Анализ ДТГ-кривой свидетельствует о наличии трех максимумов температур, соответствующих максимальной скорости потери массы. Последний этап потери массы достигает своего максимума при температуре 691,21 °C и обусловлен процессом горения пенококсового слоя.

Анализ идентификационных характеристик образцов, подвергшихся искусственному старению (табл. 2),

выявил соответствие с основными температурными интервалами потери массы контрольного образца при температурах 200, 300, 400 и 500 °C. Отклонение значений потери массы в анализируемых интервалах температур состаренных образцов от контрольного составляет: после 45 циклов старения — 1,7 %, после 134 циклов старения — 0,9 %, после 224 циклов старения — 2,5 %.

Таким образом, экспериментально установлена схожесть ТГ- и ДТГ-кривых в температурном интервале исследования, одновременно с этим сопоставление значимых идентификационных характеристик, полученных методом термического анализа, с теоретически рассчитанными статистическими критериями не выявило значительных отклонений.

Зависимости изменения температуры в печи и на образцах при испытаниях по ГОСТ Р 53295–2009⁵ представлены на рис. 5.

По результатам испытаний установлено, что время достижения критической температуры 500 °C на образцах составило: контрольный без старения —

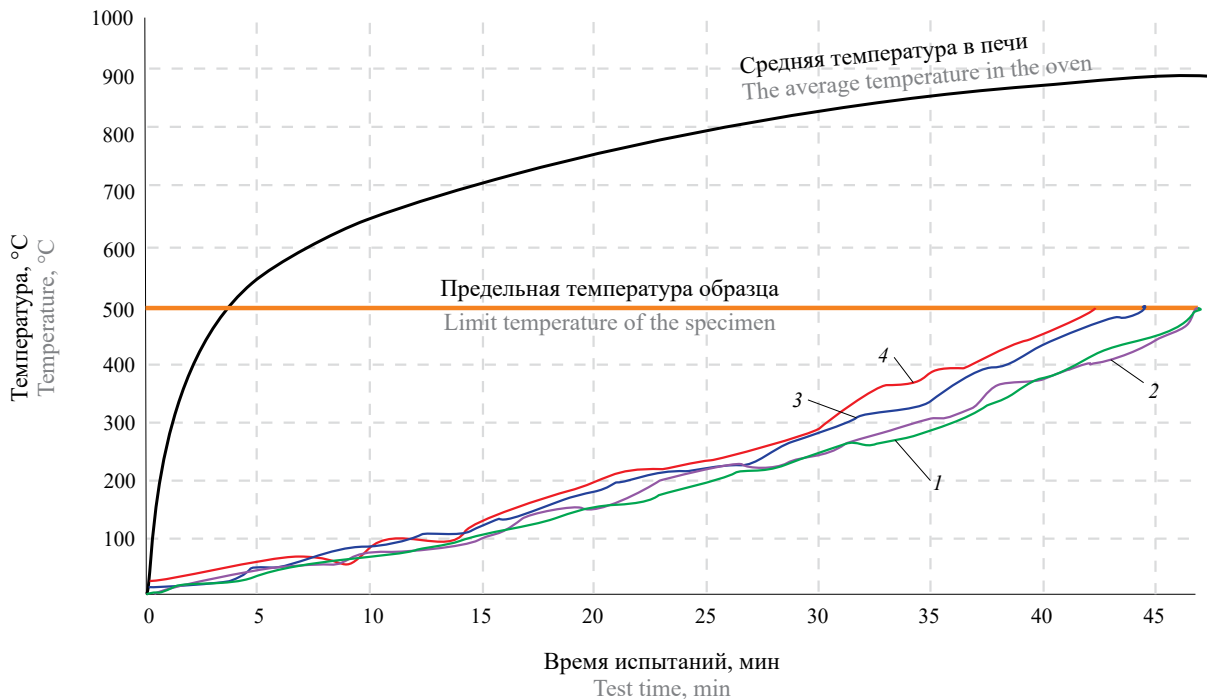


Рис. 5. Оценка огнезащитной эффективности: 1 — контрольный образец без старения; 2 — после 45 циклов старения; 3 — после 134 циклов старения; 4 — после 224 циклов старения

Fig. 5. Assessment of flame retardant effectiveness: 1 — control specimen without aging; 2 — after 45 aging cycles; 3 — after 134 aging cycles; 4 — after 224 aging cycles

48 мин; после 45 циклов старения — 47 мин; после 134 циклов старения — 44 мин; после 224 циклов старения — 41 мин.

Выводы

В результате исследований огнезащитного покрытия интумесцентного типа на основе органического связующего были проведены климатические испытания на образцах, подвергшихся искусственному старению на 5, 15 и 25 лет.

Методом термического анализа были определены значимые термоаналитические характеристики и произведена обработка графических зависимостей в соответствии с ГОСТ Р 53293–99⁴. Установлено, что на основании совпадения количества основных ДТГ-максимумов и тождественности термоаналитических кривых во всем температурном интервале сравнения можно сделать вывод об идентичности анализируемых образцов.

Исследование методом оценки огнезащитной эффективности подтверждает, что при продолжи-

тельной эксплуатации в условиях воздействия климатических факторов анализируемые огнезащитные материалы снижают свои защитные свойства несущественно, отклонение значения от контрольного образца при 224 циклах составило менее 10 %, что соответствует прогнозной огнезащитной эффективности в течение 25 лет эксплуатации.

Таким образом, исследование показало, что атмосферостойкое огнезащитное терморасширяющееся покрытие, нанесенное в соответствии со всеми требованиями технологического процесса, способно сохранять свою эффективность в условиях открытой промышленной атмосферы (ХЛ1, УХЛ1) не менее 25 лет.

Установлено, что испытываемые ОЗП на основе органического связующего продемонстрировали высокие огнезащитные свойства и надежность в экстремальных условиях, что удовлетворяет требованиям, необходимым для огнезащиты и долгосрочной эксплуатации объектов в Арктическом регионе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gravit M., Shabunina D. Structural Fire Protection of Steel Structures in Arctic Conditions // Buildings. 2021. Vol. 11 (11). P. 499. DOI: 10.3390/buildings11110499. EDN VTEVLC.
2. Захарова М.И. Анализ и оценка риска аварий резервуаров и газопроводов при низких температурах : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа : Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т., 2015. 22 с. EDN ZPPZER.

3. *Спирidonov A.A., Фадеев A.M.* Современные технологии при реализации нефтегазовых проектов в Арктике // Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. 2022. № 2 (10). С. 25–31. DOI: 10.51823/74670_2022_2_25. EDN ZJVOQA.
4. *Калач A.B., Головина E.B., Клементьев B.A.* Обзор вариантов обеспечения огнезащиты стальных конструкций объектов нефтегазового комплекса в условиях Арктического региона // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации : мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф., в 2 ч., Москва, 17–18 марта 2022 года. Ч. 1. М. : Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2022. С. 317–320. EDN AUXBUS.
5. *Зыбина O.A., Устинов A.A., Бабикова A.C.* Совершенствование методов оценки огнезащитной эффективности интумесцентных покрытий для защиты металлоконструкций // Огнезащита материалов и конструкций Spbru FPM-2023 : сб. тезисов докладов I Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2023. С. 192–195. EDN GJGKFR.
6. *Головина E.B., Калач A.B.* Исследование огнезащитных свойств терморасширяющихся материалов для использования в климатических условиях Арктической зоны // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. № 6 (32). С. 5–12. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.5-12
7. *Пехотиков A.B. и др.* Актуальные вопросы применения средств огнезащиты для стальных конструкций // Евростройпрофи. 2015. № 79. С. 34–38.
8. *Комарова M.A., Гришин И.А., Шалабин M.B., Мельников H.O.* Разработка методов испытаний огнезащитных покрытий стальных строительных конструкций в процессе эксплуатации // Вестник НИЦ Строительство. 2024. № 1 (40). С. 21–34. DOI: 10.37538/2224-9494-2024-1(40)-21-34. EDN CJYXWA.
9. *Eremina T., Korolchenko D.* Fire Protection of Building Constructions with the Use of Fire-Retardant Intumescent Compositions // Buildings. 2020. No. 10 (10). P. 185. DOI: 10.3390/buildings10100185. EDN JBSWFO.
10. *Докучаева Л.В., Старостенков A.C., Мельников H.O.* Исследование процессов ускоренного старения огнезащитных покрытий // Успехи химии и химической технологии. 2012. Т. 26. № 2 (131). С. 99–104. EDN RCCFNP.
11. *Mohd Sabee M.M.S., Itam Z., Beddu S., Zahari N.M., Mohd Kamal N.L., Mohamad D. et al.* Flame Retardant Coatings: Additives, Binders, and Fillers // Polymers (Basel). 2022. No. 14 (14). P. 2911. DOI: 10.3390/polym14142911
12. *Eremina T.Yu., Minaylov D.A., Klochkov Yu.S., Cahyadi B., Zybina O.A., Turkov V.A.* Features of numerical simulation of a steel building structure heating with fire protection by intumescent coating // Proceedings on Engineering Sciences. 2024. Vol. 6. No. 3. Pp. 1077–1086. DOI: 10.24874/pes06.03.021. EDN YDWEUO.
13. *Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G.* Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions // Fire Safety Journal. 2018. No. 95. Pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
14. *Siddiqui A.A., Ewer J.A., Lawrence P.J., Galea E.R., Frost I.R.* Building Information Modelling for performance-based Fire Safety Engineering analysis : A strategy for data sharing // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 42 (3). P. 102794. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102794
15. *Еремина Т.Ю., Уткин С.В.* Исследование изменений свойств огнезащитных покрытий интумесцентного типа методом термомеханического анализа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. № 2 (33). С. 32–41. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.32-41. EDN MHQLEL.
16. *Weil E.D.* Fire-protective and flame-retardant coating // Journal of fire sciences. 2011. No. 29 (3). Pp. 259–296. DOI: 10.1177/0734904110395469
17. *Головина E.B., Беззапонная O.B., Мансуров Т.Х.* Влияние агрессивной среды на термостойкость и горючесть интумесцентного состава на основе силиконового связующего // Техносферная безопасность. 2017. № 4 (17). С. 44–50. EDN XIDHLM.
18. *Kalafat K., Taran N., Vakhitova L., Plavan V., Bessarabov V., Zagoriy G.* Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. No. 10-106 (4). Pp. 45–54. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209841. EDN EBOYFE.
19. *Комарова M.A., Мельников H.O., Шалабин M.B., Скоробогатов B.A., Головина E.B.* Огнезащитная эффективность покрытий металлических конструкций при ускоренном климатическом старении // Техносферная безопасность. 2024. № 4 (45). С. 3–22. EDN NBZDZG.
20. *Cirpici B.K., Wang Y.C., Rogers B.D.* An analytical approach for predicting expansion of intumescent coating with different heating conditions : Proceedings of the 12th International Congress on Advances in Civil Engineering. Turkey, 2016. Pp. 1–8. URL: https://www.researchgate.net/publication/308793883_An_Analytical_Approach_for_Predicting_Expansion_of_Intumescent_Coating_with_Different_Heating_Conditions
21. *Шмакова O.A.* Способы исследования эффективности огнезащитных покрытий металлоконструкций в условиях эксплуатации с течением времени // Гражданская оборона на страже мира и безопасности : мат. V Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Всемирному дню гражданской обороны. М., 2021. С. 72–79. EDN AVDSAZ.

REFERENCES

1. Gravit M., Shabunina D. Structural Fire Protection of Steel Structures in Arctic Conditions. *Buildings*. 2021; 11(11):499. DOI: 10.3390/buildings11110499. EDN VTEVLC.
2. Zakharova M.I. Analysis and assessment of the risk of accidents of tanks and gas pipelines at low temperatures : *abstract of dissertation of Candidate of technical sciences*. Ufa, Ufa State Petroleum Engineering university, 2015; 22. EDN ZPPZEP. (rus).
3. Spiridonov A.A., Fadeev A.M. Modern technologies in the implementation of oil and gas projects in the Arctic. *Arctic 2035: current issues, problems, solutions*. 2022; 2(10):25-31. DOI: 10.51823/74670_2022_2_25. EDN ZJVOQA. (rus).
4. Kalach A.V., Golovina E.V., Klementyev B.A. Review of options for ensuring fire protection of steel structures of oil and gas facilities in the Arctic region. Firefighting: problems, technologies, innovations : *Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference. Part I*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters. 2022; 317-320. EDN AUXBUS. (rus).
5. Zybina O.A., Ustinov A.A., Babikova A.S. Improving methods for assessing the fire protection efficiency of intumescent coatings for protecting metal structures. Fire protection of materials and structures Spbp FPM-2023 : *collection of abstracts of reports of the I International Scientific and Practical Conference*. St. Petersburg, 2023; 192-195. EDN GJGKFR. (rus).
6. Golovina E.V., Kalach A.V. Study of flame-retardant properties of thermally expanding materials for use in the climatic conditions of the Arctic zone. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and explosion safety*. 2023; 32(6):5-12. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.5-12 (rus).
7. Pekhotikov A.V. et al. Current issues of application of fire protection means for steel structures. *Eurostroyprofi*. 2015; 79:34-38. (rus).
8. Komarova M.A., Grishin I.A., Shalabin M.V., Melnikov N.O. Development of test methods for fire-resistant coatings of steel building structures during operation. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024; 1(40):21-34. DOI: 10.37538/2224-9494-2024-1(40)-21-34. EDN CJYXWA. (rus).
9. Eremina T., Korolchenko D. Fire protection of building constructions with the use of fire-retardant intumescent compositions. *Buildings*. 2020; 10:185. DOI: 10.3390/buildings10100185. EDN JBSWFO.
10. Dokuchaeva L.V., Starostenkov A.S., Melnikov N.O. Study of accelerated aging processes of fire-protective coatings. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2012; 26:2(131):99-104. EDN RCCFNP. (rus).
11. Mohd Sabee M.M.S., Itam Z., Beddu S., Zahari N.M., Mohd Kamal N.L., Mohamad D. et al. Flame retardant coatings: additives, binders, and fillers. *Polymers (Basel)*. 2022; 14. DOI: 10.3390/polym14142911
12. Eremina T.Yu., Minaylov D.A., Klochkov Yu.S., Cahyadi B., Zybina O.A., Turkov V.A. Features of numerical simulation of a steel building structure heating with fire protection by intumescent coating. *Proceedings on Engineering Sciences*. 2024; 6(3):1077-1086. DOI: 10.24874/pes06.03.021. EDN YDWEUO.
13. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2018; 95:42-50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
14. Siddiqui A.A., Ewer J.A., Lawrence P.J., Galea E.R., Frost I.R. Building Information Modelling for performance-based Fire Safety Engineering analysis : A strategy for data sharing. *Journal of Building Engineering*. 2021; 42:102794. DOI: 10.1016/j.job.2021.102794
15. Eremina T.Yu., Utkin S.V. Study of changes in the properties of fire-retardant coatings of intumescent type by thermomechanical analysis method. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):32-41. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.32-41. EDN MHQLEL. (rus).
16. Weil E.D. Fire-protective and flame-retardant coating. *Journal of fire sciences*. 2011; 29:259-296. DOI: 10.1177/07349041110395469
17. Golovina E.V., Bezzaponnaya O.V., Mansurov T.H. The influence of the aggressive environment on the thermal stability and flammability of intumescent silicone composition. *Technosphere safety*. 2017; 4(17):44-50. EDN XIDHLM. (rus).
18. Kalafat K., Taran N., Plavan V., Bessarabov V., Zagoriy G., Vakhitova L. Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020; 4(10-106):45-54. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209841. EDN EBOYFE.
19. Komarova M.A., Melnikov N.O., Shalabin M.V., Skorobogatov V.A., Golovina E.V. Fire-resistant effectiveness of coatings of metal structures under accelerated climatic aging. *Technosphere safety*. 2024; 4(45):3-22. EDN NBZDZG (rus).
20. Cirpici K.B., Wang Y.C., Rogers B.D. An analytical approach for predicting expansion of intumescent coating with different heating conditions : *Proceedings of the 12th International Congress on Advances in Civil Engineering*. Turkey, 2016; 1-8. URL: https://www.researchgate.net/publication/308793883_An_Analytical_Approach_for_Predicting_Expansion_of_Intumescent_Coating_with_Different_Heating_Conditions

21. Shmakova O.A. Methods for studying the effectiveness of fire-resistant coatings of metal structures in operating conditions over time. Civil defense on guard of peace and security : *mat. V International Scientific-practical Conference, dedicated to the World Civil Defense Day*. Moscow, 2021; 72-79. EDN AVDSAZ. (rus).

Поступила 27.01.2025, после доработки 15.07.2025;

принята к публикации 16.07.2025

Received January 27, 2025; Received in revised form July 15, 2025;

Accepted July 16, 2025

Информация об авторах

ГОЛОВИНА Екатерина Валерьевна, к.т.н., старший научный сотрудник, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; РИНЦ ID: 846886; ORCID: 0000-0002-2999-0752; e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

КАЛАЧ Андрей Владимирович, д.х.н., профессор, Воронежский государственный технический университет (ВГТУ), Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84; Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний, Россия, 394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, 1-а; РИНЦ ID: 195516; ORCID: 0000-0002-8926-3151; e-mail: a_kalach@mail.ru

Скоробогатов Виталий Александрович, генеральный директор, ООО «ТЕРРИТОРИЯ», Россия, 143430, Московская область, г. о. Красногорск, рп. Нахабино, ул. Вокзальная, 25Б, офис 6; ORCID: 0009-0001-7097-6805; e-mail: skorobogatov.ntc@yandex.ru

Вклад авторов: *все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Ekaterina V. GOLOVINA, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Yekaterinburg, Sverdlovsk Region, 620062, Russian Federation; ID RSCI: 846886; ORCID: 0000-0002-2999-0752; e-mail: ekaterinagolovina@yandex.ru

Andrey V. KALACH, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Voronezh State Technical University (VSTU), 20th Anniversary of October St., 84, Voronezh, 394006, Russian Federation; Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Irkutskaya St., 1-a, Voronezh, 394072, Russian Federation; ID RSCI: 195516; ORCID: 0000-0002-8926-3151; e-mail: a_kalach@mail.ru

Vitaly A. Skorobogatov, Deputy General Director, LLC "TERRITORY", 25B, office 6, Vokzalnaya St., Moscow region, Krasnogorsk, Nakhabino district, 143430, Russian Federation; ORCID: 0009-0001-7097-6805; e-mail: skorobogatov.ntc@yandex.ru

Contribution of the authors: *all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

The authors declare that there is no conflict of interest.