

Научная статья

УДК 614.842/.847; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-143-156

## НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ОГНЕТУШАЩИХ И ЗАЩИТНЫХ СОСТАВОВ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

✉ Иванов Алексей Владимирович.

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

✉ [ivanov.av.igps@mail.ru](mailto:ivanov.av.igps@mail.ru)

**Аннотация.** Представлено научное обоснование технологий модификации огнетушащих веществ и защитных составов для объектов нефтегазового комплекса при использовании углеродных наноструктур в качестве модификаторов. Экспериментальными и расчетными методами установлено, что введение модификаторов в водосодержащие огнетушащие составы в концентрации 0,75 об. % позволяет снизить время тушения модельного очага пожара класса «В», уменьшить массовую скорость выгорания на 75 % и критическую интенсивность подачи огнетушащих веществ на 78 % по сравнению с немодифицированными составами. Полученный результат вызван интенсификацией теплоотвода из зоны горения и сорбцией кислорода углеродными наночастицами. При модификации огнезащитных вспучивающихся составов формируется армирующий каркас углеродных наноструктур, способствующий образованию мелкоячеистого пенококса с пониженной теплопроводностью, обеспечивающий пролонгацию теплозащитного действия огнезащитного покрытия на 45–61 %. Технико-экономическое обоснование подтверждает рентабельность технологии модификации при стоимости модификатора не выше 200 руб./г и концентрации углеродных наноструктур 0,2–0,5 об. %. Комплексный научный подход, объединяющий экспериментальные и расчетные методы исследования, закладывает научную основу для проектирования экономически целесообразных огнетушащих и огнезащитных составов повышенной эффективности для объектов нефтегазового комплекса.

**Ключевые слова:** углеродные наноструктуры, пожаротушение, огнезащитная эффективность, огнезащитная обработка, пенококс, технико-экономическое обоснование, наномодификация, астралены

**Для цитирования:** Иванов А.В. Научные основы модификации огнетушащих и защитных составов для объектов нефтегазового комплекса. 2025. № 4 (76). С. 143–156. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-143-156.

Scientific article

## SCIENTIFIC BASIS FOR MODIFICATION OF FIRE EXTINGUISHING AND PROTECTIVE COMPOSITIONS FOR OIL AND GAS FACILITIES

Ivanov Aleksey V.

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

✉ [ivanov.av.igps@mail.ru](mailto:ivanov.av.igps@mail.ru)

**Abstract.** The article presents a scientific justification for technologies for modifying fire extinguishing agents and protective compounds for oil and gas facilities using carbon nanostructures as modifiers. Experimental and computational methods have shown that the addition of modifiers to water-containing fire extinguishing compositions at a concentration of 0,75 vol. %

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2025

reduces the extinguishing time of a model Class B fire, decreases the mass burnout rate by 75 %, and reduces the critical fire extinguishing agent delivery rate by 78 % compared to unmodified compositions. This result is due to enhanced heat removal from the combustion zone and oxygen chemisorption by carbon nanoparticles. When modifying intumescence fire-retardant compositions, a reinforcing framework of carbon nanostructures is formed, facilitating the formation of fine-cell foam coke with reduced thermal conductivity, ensuring an extension of the thermal protection effect of the fire-retardant coating by 45–61 %. A feasibility study confirms the cost-effectiveness of the modification technology, with a modifier cost no higher than 200 rubles/g and a carbon nanostructure concentration of 0,2–0,5 vol %. An integrated scientific approach, combining experimental and computational research methods, provides a scientific basis for the design of cost-effective, high-performance fire extinguishing and fire-retardant compounds for oil and gas facilities.

*Keywords:* carbon nanostructures, fire extinguishing, fire protection efficiency, foam coke, feasibility study, nanomodification, astralenes

**For citation:** Ivanov A.V. Scientific basis for modification of fire extinguishing and protective compositions for oil and gas facilities // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 4 (76). P. 143–156. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-143-156.

## Введение

Современный этап технологического развития России характеризуется переходом к принципиально новым производственным системам, базирующимся на передовых достижениях цифровых технологий, робототехники и материаловедения. Данный подход требует модернизации функциональных подсистем производства, включая системы противопожарной защиты. Усложнение технологических процессов сопровождается возрастающими рисками инцидентов и аварий, что в сочетании с угрозами терактов создает предпосылки для крупномасштабных пожаров на объектах нефтегазового комплекса [1]. Особую актуальность данные проблемы приобретают в нефтегазовом секторе, где традиционные методы пожаротушения и огнезащиты во многом демонстрируют достижение «пределов развития» в условиях новых рисков [2].

Для преодоления существующих ограничений необходима разработка принципиально новых подходов, основанных на повышении функциональных характеристик огнетушащих веществ (ОТВ) и огнезащитных вспучивающихся составов (ОВС), традиционно использующихся на объектах нефтегазового комплекса, при этом не требующих масштабной модернизации систем противопожарной защиты и соответствующих критериям ресурсосбережения. Современные исследования в области наномодифицированных материалов демонстрируют их повышенную эффективность при концентрациях активных компонентов до 1–2 масс.% [3, 4]. Это создает предпосылки для разработки «интеллектуальных» систем обеспечения безопасности с функциями самоорганизации, устойчивых к высокотемпературным воздействиям при горении нефтепродуктов.

Для решения поставленных задач необходима конвергенция перспективных нанотехнологических решений с классическими подходами, обеспечивающая формирование методологической базы для развития технологий модификации жидкостей в составе ОТВ и ОВС [5]. Экспериментальные исследования последних лет доказывают возможность достижения необходимых результатов при использовании различных методов модификации [6–8] при минимальных концентрациях модификаторов в базовом веществе [9–11]. При объединении сил и ресурсов научных организаций и производителей пожарно-технической продукции осуществляется апробация и внедрение полученных результатов в системы обеспечения пожарной безопасности [12–14].

Методология создания новых материалов с применением углеродных наноструктур (УНС) для систем пожаротушения и огнезащиты должна базироваться

на результатах междисциплинарных исследований и использовать интегративный научный подход [15]. Синтез полученных знаний в рамках интегративного подхода позволяет перейти от эмпирического поиска рецептур к целенаправленному проектированию экономически целесообразных огнетушащих и защитных составов. Это обуславливает необходимость уточнения физико-химической модели пожаротушения модельных очагов пожара класса «В» модифицированными ОТВ, разработки комплексного механизма повышения огнезащитной эффективности вспучивающихся составов за счет пролонгации теплозащитного действия пенококса при использовании ОВС с УНС, а также проведение технико-экономического обоснования использования УНС в огнетушащих и защитных составах.

Целью настоящего исследования являлась разработка научных основ модификации огнетушащих и защитных составов с использованием комплекса экспериментальных и расчетных методов, а также технико-экономического обоснования применения технологий наномодификации.

### Объекты и методы исследования

Для уточнения модели ликвидации горения модельного очага класса «1В» модифицированными ОТВ проводилось определение зависимостей времени тушения, массовой скорости выгорания горючей жидкости и температуры горения от концентрации УНС [16] на лабораторной установке, описанной в работе [10]. В качестве горючей жидкости использовался гептан [17]. В качестве модификатора – торообразные углеродные наночастицы (астралены) в концентрации 0,2–1,5 об.% [11].

Для построения уточненной модели использовались основные положения тепловой теории гашения пламени в условиях применения огнетушащих составов на основе воды при пожаротушении горючих жидкостей [18]. Ключевым условием было превышение теплопотерь  $q^-$  из зоны горения над тепловыделением  $q^+$  в единице объема:

$$q^+ < q^-. \quad (1)$$

Проводился расчет скорости тепловыделения с учетом показателей пожарной опасности, концентрации горючего вещества и окислителя, а также теплопотерь при излучении, конвекции, теплопроводности и затрат тепла на фазовые переходы [19].

Теоретическое время тушения  $\tau_t$  горючей жидкости распыленной водой определялось соотношением:

$$\tau_t = -\frac{4}{3} \frac{\lambda \rho}{cm^2} \left[ \frac{J_k}{J_f} + \ln \left( 1 - \frac{J_k}{J_f} \right) \right], \quad (2)$$

где  $J_f$  – фактическая интенсивность подачи огнетушащего вещества;  $c$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$  – соответственно, теплоемкость, плотность и теплопроводность жидкости;  $m$  – массовая скорость выгорания.

Критическая интенсивность подачи огнетушащего вещества  $J_k$  зависит от размера капель  $D_a$ :

$$J_k = 155m^2 D_a \left[ \frac{\rho T_k}{\rho_B(T_{cp}-T_0)} - 2 \right]^{-2} \quad (3)$$

и удельной теплоты парообразования  $r$  огнетушащей жидкости:

$$J_k = cm(T_{cp} - T_T)/r, \quad (4)$$

где  $T_T$  – температура тушения;  $T_{cp}$  – средняя температура поверхности жидкости.

Для оценки параметров теплообмена и развития ОФП с учетом изменения концентрации окислителя, вызванное сорбцией кислорода на поверхности УНС [20] при подаче модифицированных ОТВ, использовалась программная среда «Pyrosim» (рис. 1).

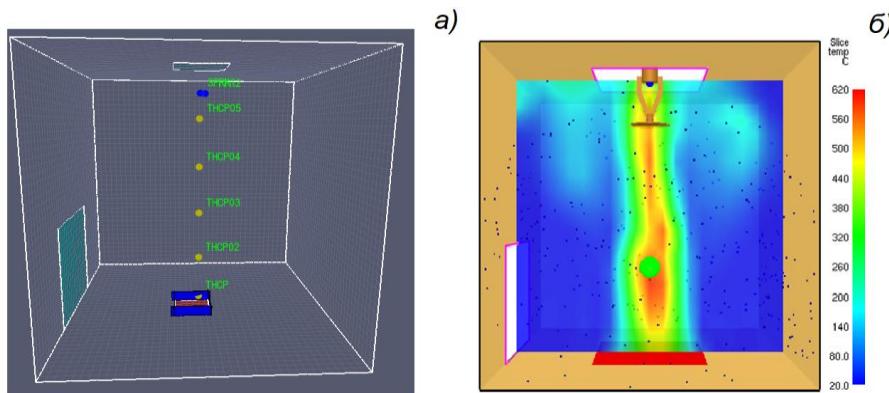


Рис. 1. Модель экспериментальной установки (а) и визуализация результатов моделирования (б) в программной среде «Pyrosim»

Параметры тестового модельного очага пожара в среде «Pyrosim» приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры модельного очага класса «В» в среде «Pyrosim»**

Свойства (характеристики)	Обозначение	Единица измерения	Значение
Размеры модели	<i>Mesh</i>	м	0,5 x 0,5 x 0,5
Размеры вычислительных ячеек	<i>Cell Size</i>	м	0,01
Размер очага	<i>Burn</i>	м	0,18x0,18
Мощность очага	<i>HRRPUA</i>	кВт/м <sup>2</sup>	500
Размер капель ОТВ	<i>Size Distribution (Water)</i>	мкм	[10]
Размер твердых частиц	<i>Size Distribution (Fuel)</i>	мкм	0,05–0,45

Термический анализ образцов модификаторов проводился на установке «NETZSCH STA449F3A-0430-M Jupiter» в интервале температур 200–600 °C, скорость подъема температуры 10°C/мин, среда – воздух [9]. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) поверхности модифицированных покрытий ОВС проводилась на установке «Integra-Spectra» полуконтактным методом с помощью АСМ головки «SNA0830». Измерение спектров комбинационного рассеяния (КРС) проводилось на той же установке с использованием CCD камеры с охлаждением до -60 °C с длиной волны лазера 532 нм [10]. Для этого наночастицы и изъятые из вспученного слоя (с поверхности, на границе раздела «пенококс-металл», а также на расстоянии 50 мм от границы раздела в глубине пенококса) помещались в измерительную ячейку, где проводилось исследование при температуре 20 °C и атмосферном давлении.

Оценка изменения теплозащитной эффективности модифицированных ОВС определялась, исходя из анализа результатов численного моделирования теплопроводности элементарной ячейки пенококса от ее геометрического размера на основе результатов исследований, изложенных в работе [21], с помощью нейросетевого моделирования в программном продукте «STATISTICA».

Технико-экономическое обоснование применения модифицированных ОТВ и ОВС проводилось по методикам, изложенными в работах [22, 23]. В ходе расчетов определялась экономия  $\mathcal{E}_{\text{модOTB}}$ , % при использовании модифицированных ОТВ, исходя из соотношения:

$$\mathcal{E}_{\text{модOTB}} = \left( 1 - \frac{\Pi_{\text{нмодOTB}}}{\Pi_{\text{нмодOTB}}} \right) \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $\Pi_{\text{помодOTB}}$  – потери от пожара при использовании модифицированных ОТВ, руб.,  $\Pi_{\text{помнодOTB}}$  – потери от пожара при использовании немодифицированных ОТВ, руб. При этом учитывалась возможность повреждения как самого объекта защиты при воздействии огня и огнетушащего состава на основе экспериментальных данных о времени тушения модельных очагов и критической интенсивности тушения при варьировании концентрации модификатора.

Результаты расчетов проводились для концентраций УНС в базовом составе 0,2–1,5 об.%, стоимости УНС от 50–600 руб./г, времени тушения 10 с, 15 мин и 3 ч.

Для оценки эффективности применения модифицированных ОВС вводился коэффициент эффективности применения УНС в огнезащитном составе  $k_{m\text{OBC}}$ :

$$k_{m\text{OBC}} = \tau_{\text{модOBC}} / \tau_{\text{базOBC}}, \quad (6)$$

где  $\tau_{\text{модOBC}}$  – время достижения предельного состояния металла при огнезащите модифицированным ОВС, мин.;  $\tau_{\text{базOBC}}$  – время достижения предельного состояния металла при огнезащите базовым ОВС, мин.

Ценообразование модифицированного огнезащитного состава проводилось, исходя из значений усредненной цены базового ОВС на рынке огнезащитной продукции для металлоконструкций, стоимости модификаторов на основе УНС, руб., значений теоретического расхода огнезащитного состава для обеспечения огнестойкости металлоконструкции R90, кг/м<sup>2</sup>, при сухом слое огнезащиты, мм, а также рыночной наценки при реализации ОВС в размере 30 % к себестоимости.

### Результаты исследований Термический анализ образцов модификатора

Термический анализ образцов модификатора показал, что в интервале температур 350–550 °C происходит увеличение массы образца УНС, вызванное сорбцией кислорода графеновыми слоями УНС (рис. 2), что в целом соответствует результатам исследований, изложенных в работе [20], свидетельствующей о значениях сорбции кислорода астраленами до 0,5 мг/г.

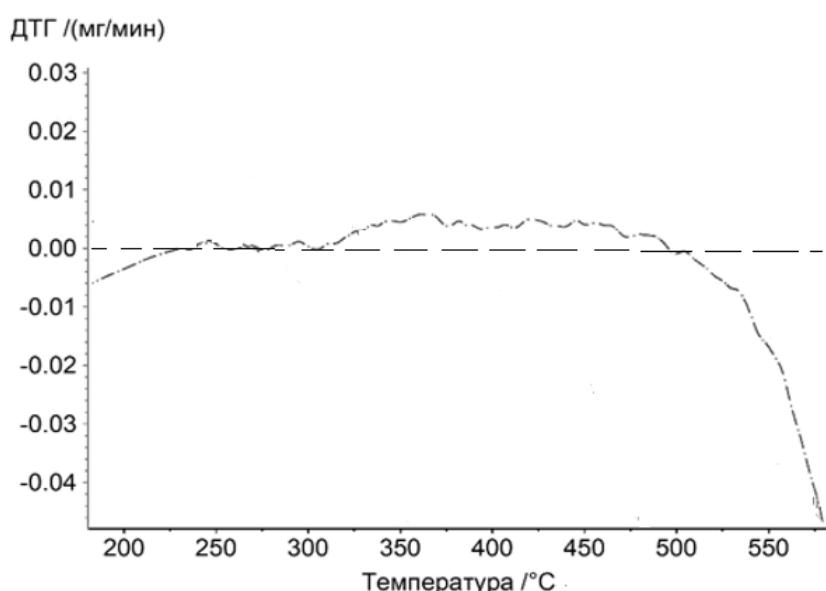


Рис. 2. ДТГ-кривые образцов модификатора в интервале температур 200–600 °C

Результаты анализа ТГ и ДТА-кривых модификатора позволяют сделать вывод, что начало потери образца происходит при температуре 647 °С с наибольшим тепловым эффектом при температуре 807,2 °С. При этом потеря 50 % массы образца наблюдается при температуре порядка 950 °С (рис. 3).

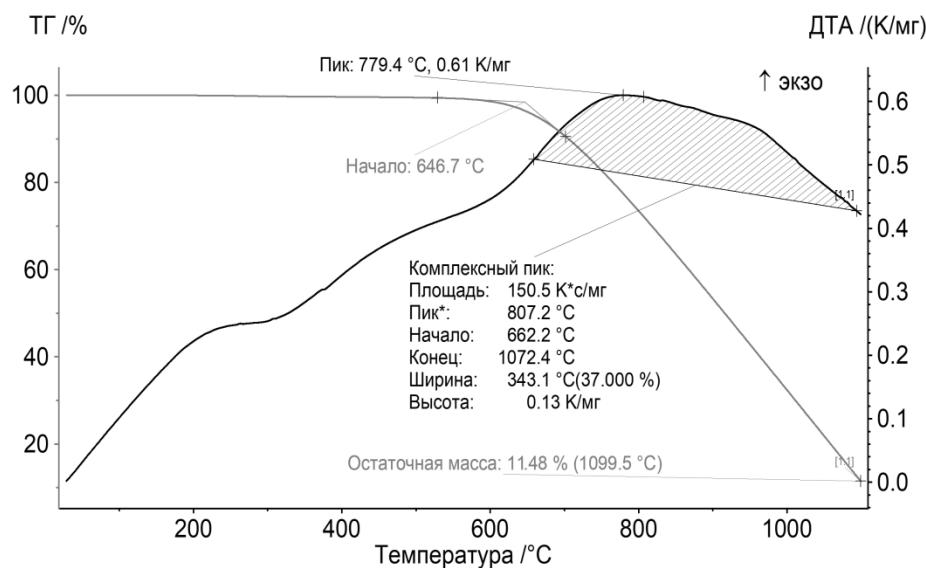


Рис. 3. ТГ и ДТА кривые образцов модификатора в интервале температур 10–1 100 °C

#### Исследование процесса тушения модельного очага класса «В» модифицированными ОТВ

Для ОТВ, модифицированных УНС, в интервале значений концентраций 0,2–1,5 об.% максимальное сокращение времени тушения модельного очага достигается при концентрации модификатора 0,75 об.%. При этом наблюдается снижение массовой скорости выгорания горючей жидкости на 75 % и снижение расчетного значения критической интенсивности тушения на 78 % в сравнении с немодифицированным ОТВ. При этом время тушения модельного очага сокращается на 71 % в эксперименте, а по расчетным данным – на 55 %, в сравнении с немодифицированным составом.

Дальнейшее увеличение концентрации модификатора приводит к росту времени тушения модельного очага. При концентрации УНС 1,5 об.% массовая скорость выгорания горючей жидкости на 10 % выше, чем зафиксированные при тушении немодифицированным составом. Экспериментальное и расчетное время тушения при концентрации 1,5 об.% меньше, чем у немодифицированного состава, однако почти в 2 раза превышает значения, полученные в условиях применения модифицированного ОТВ при концентрации УНС 0,75 об.%.

Сравнительная оценка значений температуры в зоне горения, полученных в программной среде «Pyrosim», показала, что использование модифицированных ОТВ приводит к снижению температур ниже значений, соответствующих температуре самовоспламенения легковоспламеняющейся жидкости (ЛВЖ), в отличие от применения немодифицированных ОТВ с аналогичной интенсивностью подачи [11]. Сводные данные исследований процессов тушения пожара класса «В» модифицированными ОТВ приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Исходные данные и время тушения модельного очага  
(экспериментальные данные, результаты расчета и моделирования)**

Параметр	Ед. изм.	Концентрация УНС, об. %						
		0	0,2	0,5	0,75	1,0	1,2	1,5
средний диаметр капель ОТВ	мм	0,72	0,76	0,84	0,85	0,87	0,91	0,90
удельная теплота парообразования ОТВ	кДж/кг	2 100	2 250	2 320	2 400	2 450	2 350	2 300
интенсивность подачи ОТВ (фактическая)	л/(с·м <sup>2</sup> )	0,318	0,318	0,318	0,318	0,318	0,318	0,318
массовая скорость выгорания горючей жидкости (экспериментальные данные)	кг/(с·м <sup>2</sup> )	0,018	0,007	0,005	0,005	0,015	0,019	0,022
критическая интенсивность тушения	л/(с·м <sup>2</sup> )	0,188	0,064	0,044	0,043	0,127	0,168	0,199
время тушения (расчет)	с	26	16	14	13	16	20	24
время тушения (эксперимент)	с	38	20	12	11	14	16	19
время тушения (результаты моделирования)	с	39	12	5	21	31	44	56

Результаты расчетов и моделирования в целом подтверждают данные, полученные в ходе экспериментов. Время тушения модельного очага имеет характерных экстремум в интервале концентраций УНС 0,5–0,75 об.% и имеет минимальное значение.

### Исследование модифицированных ОВС

Результаты атомно-силовой микроскопии покрытий ОВС показали наличие пространственных структур размерами более 1 мкм на поверхности модифицированных ОВС, в то время как для базового состава данные структуры не наблюдались (рис. 4).

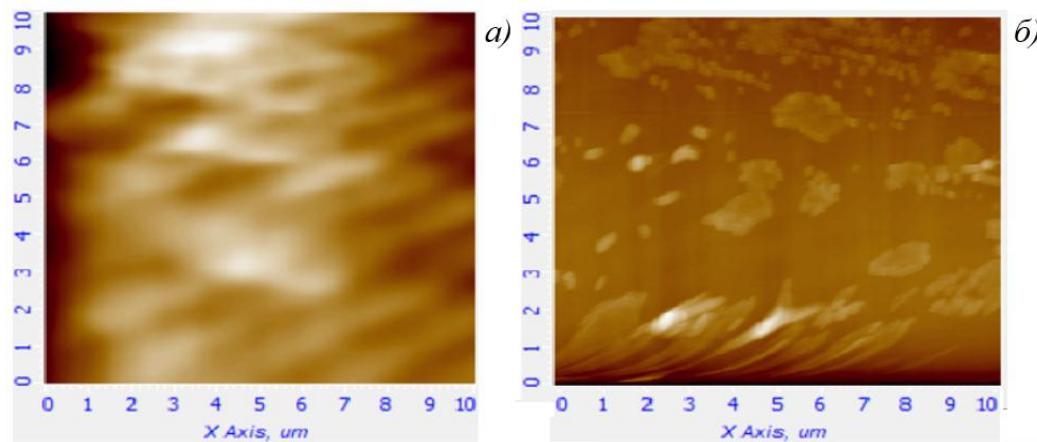


Рис. 4. АСМ-сканы образцов ОВС: немодифицированного (а),  
модифицированного УНС (б) с концентрацией в растворителе 0,75 об.%

Пенококс модифицированных ОВС отличался более мелкой ячеистой структурой в сравнении с немодифицированным составом, что позволяло обеспечить сохранность пенококса в течение более длительного периода высокотемпературного воздействия пламени горелки (рис. 5).

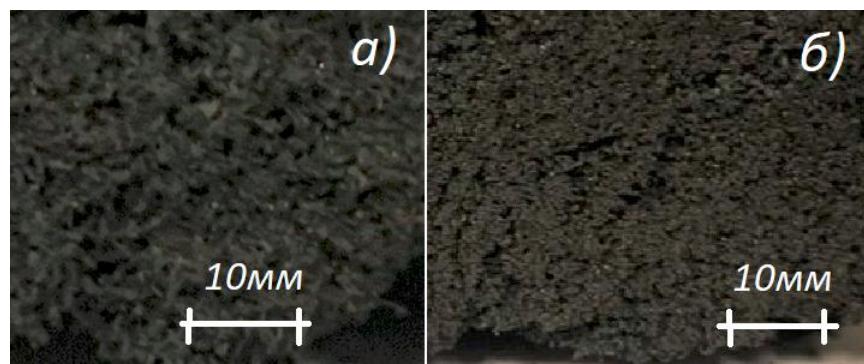


Рис. 5. ACM-сканы образцов ОВС: немодифицированного (а), модифицированного (б)

Анализ КР-спектров пенококса модифицированных ОВС показал наличие характерных для УНС G- и G'- полос в глубине защитного слоя вспученного композита, а также на границе раздела «пенококс-металлическая пластина», в то время как на поверхности слоя пенококса модифицированных ОВС и в пенококсе немодифицированного состава данные пики отсутствуют (рис. 6).

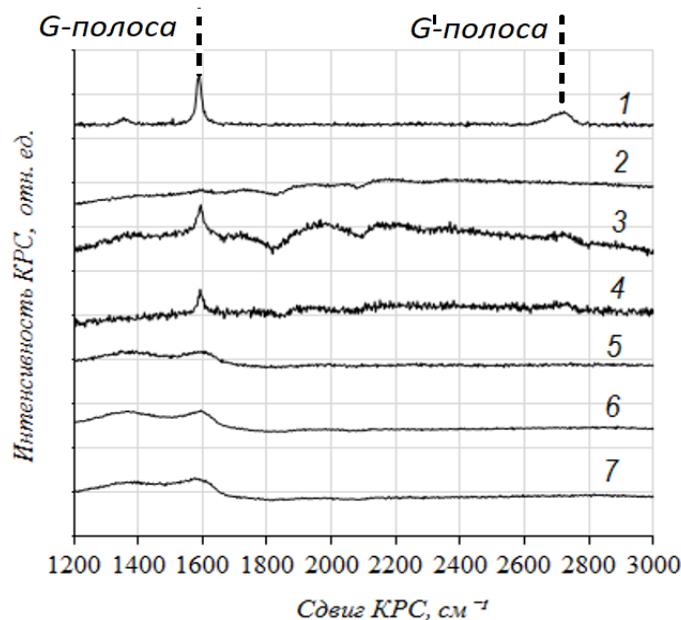


Рис. 6. КР-спектры УНС (1) и образцов пенококса: на поверхности вспученного слоя (2 – мод. ОВС, 5 – немод. ОВС); в глубине вспученного слоя (3 – мод. ОВС, 6 – немод. ОВС); на поверхности мет. пластины (4 – мод. ОВС, 7 – немод. ОВС)

Зависимость эффективной теплопроводности элементарной ячейки пенококса  $Y_{eff}$  от температуры и среднего диаметра ячейки пенококса по данным работы [21] может быть описана уравнением регрессии:

$$Y_{eff} = 0,062 \cdot X_2^{0,92} \cdot arctd(1,15 \cdot 10^{-6} \cdot X_1^2) + 6,8 \cdot 10^{-5} \cdot X_2^{1,25} \cdot X_1 + 0,0085 \cdot X_2^{0,75} + 0,55 \\ R^2 = 0,96, \quad (7)$$

где  $x_1$  – температура,  $x_2$  – средний диаметр ячейки пенококса.

Анализ вклада факторов  $X_1$  и  $X_2$  показал, что формирование структуры пенококса с уменьшением размера ячеек на 50 % позволяет снизить теплопроводность на 31–38 % при температуре 300–600 °C, что обеспечивает пролонгацию теплозащитных свойств на 45–61 % в сравнении с немодифицированным ОВС.

### Технико-экономическое обоснование применения модифицированных ОТВ и ОВС

Результаты технико-экономического обоснования показали, что основным определяющим параметром является не стоимость УНС, а концентрация наночастиц 0,2–0,5 об.% в огнетушащем составе (рис. 70). Для обеспечения максимального экономического эффекта цена модификатора не должна превышать 200 руб./г.

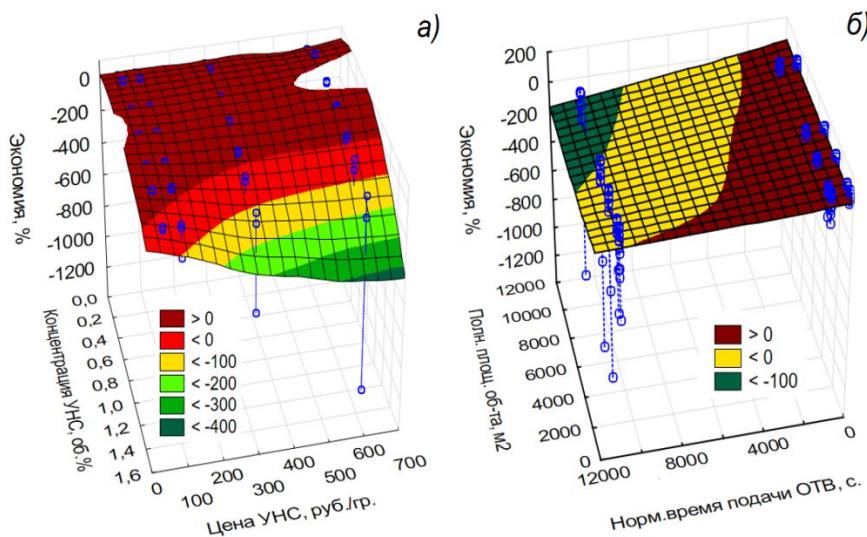


Рис. 7. 3D-диаграмма зависимости величины экономии: от концентрации и цены УНС (а), от площади объекта и нормативного времени подачи ОТВ (б)

Для однокомпонентных ОВС в среднем ценовом сегменте для рынка огнезащиты Российской Федерации рост прибыли при продаже модифицированных составов, в сравнении с немодифицированными составами, также как и для ОТВ, возможен при ценах на УНС менее 200 руб./г и концентрации наночастиц в базовом составе 0,2–0,5 об. % (рис. 8).

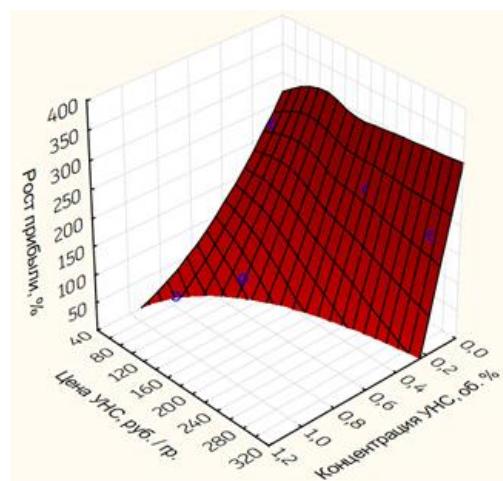


Рис. 8. 3D-диаграмма зависимости роста прибыли при продаже модифицированных ОВС от цены и концентрации УНС

## Обсуждение результатов

Для определения расхода кислорода при пожаротушении модельного очага «1В» использовались физико-химические модели, описывающие горение и пожаротушение гептана [17, 25], термической деструкции УНС [26, 27]. Данные о расходе кислорода в модельном очаге «1В» при пожаротушении гептана наномодифицированными ОТВ приведены в табл. 3.

Таблица 3

### Потребление кислорода в модельном очаге «1В» при пожаротушении гептана наномодифицированными ОТВ

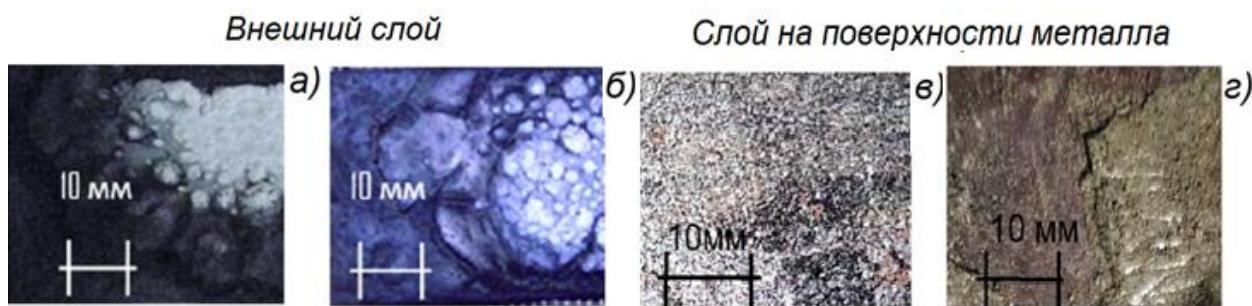
Физико-химический процесс	Потребление кислорода на единицу массы вещества, г/г
Горение гептана ( $C_7H_{16} + 11O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ )	3,5
Термическая деструкция наночастиц $C + O_2 \rightarrow CO_2$	2,65
Сорбция кислорода углеродными наночастицами	$5 \cdot 10^{-4}$

Полученные данные свидетельствуют о значимом вкладе углеродных наночастиц в снижение концентрации окислителя путем механизма сорбции кислорода в зоне горения.

Таким образом, уточненная модель ликвидации горения нефтепродуктов объединяет теплофизические и химические механизмы действия модифицированных ОТВ. Установлено, что повышенная огнетушащая эффективность составов в первую очередь обусловлена увеличением интенсивности теплоотвода из конвекционной зоны горения вследствие повышения удельной теплоты парообразования модифицированных ОТВ. Наряду с доминирующим теплофизическими механизмом, подтверждено сопутствующее явление сорбции кислорода углеродными наночастицами, обеспечивающее локальное снижение концентрации кислорода в зоне горения и влекущее за собой уменьшение массовой скорости выгорания горючей жидкости. Совокупность данных механизмов (интенсификации теплоотвода и локального ингибирования зоне горения) обеспечивает уменьшение критической интенсивности тушения модельного очага «1В» на 45–78 % при использовании модифицированных ОТВ.

Результаты исследования свойств и функциональных характеристик модифицированных ОВС позволяют сделать вывод, что введение УНС в огнезащитный состав позволяет сформировать армирующий каркас, повышающий термическую стабильность и механическую прочность теплозащитного покрытия. При этом образующийся пенококс формирует мелкочаечистую структуру с более низкой, в сравнении с немодифицированным ОВС, теплопроводностью, что обеспечивает пролонгацию теплозащитного действия вспучивающегося состава. Термически стабильные УНС длительное время сохраняют структуру пенококса, уменьшают скорость его выгорания и разрушение, что в комплексе повышает огнезащитную эффективность модифицированных ОВС.

Полученные результаты исследований объясняют результаты огневых испытаний, в ходе которых наблюдалось интенсивное выгорание пенококсового слоя для образцов немодифицированных ОВС, в то время как составы с УНС в течение аналогичного испытания разрушаются в меньшей степени, сохраняют целостность внешнего слоя вспученного покрытия и не отслаиваются от защищаемого металла (рис. 9).



**Рис. 9. Фотографии слоя ОВС после огневых испытаний:  
немодифицированного (а, в); модифицированного Astr (в, г)**

Таким образом, комплексный механизм повышения огнезащитной эффективности вспучивающихся составов путем модификации термически стабильными УНС заключается в пролонгации теплозащитных свойств вспученного покрытия за счет армирования структуры композита с помощью УНС и уменьшения термической деструкции пенококса в условиях углеводородного горения.

Технико-экономическое обоснование подтверждает рентабельность данной технологии при условии, что стоимость модifikатора не превышает 200 руб./г, что определяет экономические ограничения для ее практической реализации.

### Заключение

Полученные результаты являются методологической базой для создания нового направления получения огнетушащих и защитных составов путем модификации базовых жидкостей термически стабильными УНС.

Научной основой модификации огнетушащих и защитных составов для объектов нефтегазового комплекса является контролируемое введение УНС в базовые жидкости, обеспечивающее комплексный эффект за счет сочетания физико-химических механизмов действия в веществе и на границе раздела фаз. При модификации огнетушащих составов введение наночастиц в оптимальной концентрации 0,75 об.% приводит к интенсификации теплоотвода из зоны горения и сорбции кислорода, что обеспечивает снижение времени тушения на 71 % и критической интенсивности подачи ОТВ в сравнении с базовыми составами. Для ОВС главенствующим принципом действия модifikатора является формирование армирующего каркаса из УНС, способствующего образованию мелкочаечистого пенококса с пониженной теплопроводностью, что пролонгирует теплозащитное действие покрытия на 45–61 % в сравнении с немодифицированным составом.

Технико-экономическое обоснование подтверждает рентабельность разработанных технологий при соблюдении двух ключевых условий: стоимости модifikатора не выше 200 руб./г и оптимальной концентрации УНС в диапазоне 0,2–0,5 об.%. Комплексный подход, объединяющий экспериментальные и расчетные методы исследования, создает научную основу для проектирования нового поколения огнетушащих и защитных составов, сочетающих повышенные пожарно-технические характеристики с экономической целесообразностью применения модифицированных составов на объектах нефтегазового комплекса.

### Список источников

- Лукьянов Д.Е. Пожарная безопасность в процессе переработки нефтегазовых продуктов: современные вызовы и решения // Вестник науки. 2025. Т. 4. № 4 (85). С. 908–914.
- Иванов А.В., Дали Ф.А., Шидловский Г.Л. Электрофизический метод улучшения огнетушащих и теплоизоляционных характеристик веществ на основе воды для тепловой

защиты резервуаров с нефтепродуктами // Безопасность жизнедеятельности. 2020. № 3. С. 25–29.

3. Нанотехнологии и пожарная безопасность / С.Н. Копылов [и др.] // Пожарная безопасность. 2011. № 3. С. 71–74.

4. Olenick S.M., Carpenter D.J. An updated international survey of computer models for fire and smoke // Journal of Fire Protection Engineering. 2003. Vol. 13. Iss. 2. P. 87–110. DOI: 10.1177/1042391503013002001.

5. Olawoyin R. Nanotechnology: The future of fire safety // Safety science. 2018. Vol. 110. P. 214–221. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.08.016.

6. Miladinović L. Application of nanotechnology in the development of personal protective equipment for firefighters and rescuers // Annual conference on Challenges of Contemporary Higher Education. Kopaonik, Serbia, 2025. P. 674–683.

7. Nanotechnology safety in the marine industry / H.K. Megbenu [et al.] // Nanotechnology Safety. Elsevier, 2025. Vol. P. 229–249. DOI: 10.1016/j.ijft.2024.100583.

8. Mbamalu E.E., Chioma U.E., Epere A. Applications of fire retardant polymer composites for improved safety in the industry: a review // Proceedings of the Indian National Science Academy. 2025. Vol. 91. No. 2. P. 415–433. DOI: 10.1016/B978-0-443-15904-6.00018-6.

9. 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.

10. Investigation of extinguishment process of liquid hydrocarbon flames by aqueous suspensions of astralenes / A.N. Ponomarev [et al.] // Fire Technology. 2021. Т. 57. No. 4. P. 2061–2075. DOI: 10.1007/s10694-021-01094-1.

11. Иванов А.В. Тушение модельных очагов класса «В» наномодифицированными огнетушащими составами: закономерности и эффекты // Техносферная безопасность. 2022. № 4 (37). С. 34–44.

12. Nanotechnology in fire protection – application and requirements / A. Rabajczyk [et al.] // Materials. 2021. Vol. 14. No. 24. P. 7849. DOI: 10.3390/ma14247849.

13. Integration of industry 4.0 technologies in fire and safety management / P. Negi [et al.] // Fire. 2024. Vol. 7. No. 10. P. 335. DOI: 10.3390/fire7100335.

14. Апробация образцов тканей, модифицированных углероднымиnanoструктурами, в составе боевой одежды пожарного в рамках опытно-исследовательских учений «Безопасная Арктика-2023» / О.А. Москалюк [и др.] // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения. 2023. С. 163–168.

15. Ковальчук М. В., Нарайкин О. С., Яцишина Е. Б. Конвергенция наук и технологий – новый этап научно-технического развития // Вопросы философии. 2013. № 3. С. 3–11.

16. Киселева В.С., Иванов А.В. Апробация огнетушащего состава в условиях низких температур с использованием пожарной техники // Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. 2024. С. 107–110.

17. Горение гептана в модельном резервуаре / Д.А. Корольченко [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24. № 2. С. 67–70.

18. Горшков В.И. Тушение пламени горючих жидкостей: монография. М.: Пожнаука, 2007. 267 с.

19. Думилин А.И. Параметры тушения пламени горючих жидкостей распыленной водой // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Т. 22. № 4. С. 85–90.

20. Адсорбция кислорода фуллеренами и углеродными nanoструктурами / В.П. Белоусов [и др.] // Журнал физической химии. 2007. Т. 81. № 10. С. 1847–1855.

21. Еремина Т.Ю. Моделирование и оценка огнезащитной эффективности вспучивающихся огнезащитных составов // Пожаровзрывобезопасность. 2003. Т. 12. № 5. С. 22–29.

22. Фисенко Ю.В. Инвестирование инновационной деятельности в сфере нанотехнологий // Интеллектуальная собственность. Промышленная собственность. 2011. № 5. С. 62–70.
23. Juas B., Mattsson B. Economics of fire technology // Fire Technology. 1994. Vol. 30. No. 4. P. 468–477. DOI: 10.1007/BF01039945.
24. Бобков С.А., Бабурин А.В., Комраков П.В. Физико-химические основы развития и тушения пожаров: учеб. пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. 210 с.
25. Андросов А.С., Бегишев И.Р., Салеев Е.П. Теория горения и взрыва: учеб. М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. 248 с.
26. Al-Mayman S.I., Al-Abbad N.M., Atieh M.A. Thermal oxidation kinetic of carbon nanotubes (CNTs) // Arabian Journal for Science and Engineering. 2014. T. 39. № 2. C. 621–630. DOI: 10.1007/s13369-013-0689-8.
27. Термодинамическое подобие многослойных конических нанотрубок и графита / Г.Я. Кабо [и др.] // Свиридовские чтения. 2015. С. 60–67.

### **References:**

1. Luk'yanov D.E. Pozharnaya bezopasnost' v processe pererabotki neftegazovyh produktov: sovremennye vyzovy i resheniya // Vestnik nauki. 2025. T. 4. № 4 (85). S. 908–914.
2. Ivanov A.V., Dali F.A., Shidlovskij G.L. Elektrofizicheskij metod uluchsheniya ognetushashchih i teploizolyacionnyh harakteristik veshchestv na osnove vody dlya teplovoj zashchity rezervuarov s nefteproduktami // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2020. № 3. S. 25–29.
3. Nanotekhnologii i pozharnaya bezopasnost' / S.N. Kopylov [i dr.] // Pozharnaya bezopasnost'. 2011. № 3. S. 71–74.
4. Olenick S.M., Carpenter D.J. An updated international survey of computer models for fire and smoke // Journal of Fire Protection Engineering. 2003. Vol. 13. Iss. 2. P. 87–110. DOI: 10.1177/1042391503013002001.
5. Olawoyin R. Nanotechnology: The future of fire safety // Safety science. 2018. Vol. 110. P. 214–221. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.08.016.
6. Miladinović L. Application of nanotechnology in the development of personal protective equipment for firefighters and rescuers // Annual conference on Challenges of Contemporary Higher Education. Kopaonik, Serbia, 2025. P. 674–683.
7. Nanotechnology safety in the marine industry / H.K. Megbenu [et al.] // Nanotechnology Safety. Elsevier, 2025. Vol. P. 229–249. DOI: 10.1016/j.ijft.2024.100583.
8. Mbamalu E.E., Chioma U.E., Epere A. Applications of fire retardant polymer composites for improved safety in the industry: a review // Proceedings of the Indian National Science Academy. 2025. Vol. 91. No. 2. P. 415–433. DOI: 10.1016/B978-0-443-15904-6.00018-6.
9. Issledovanie ekspluatacionnyh harakteristik ognezashchitnyh pokrytij na osnove epoksidnyh smol, modificirovannyh astralenami / A.V. Ivanov [i dr.] // Pozharovzryvobezopasnost'. 2020. T. 29. № 1. S. 55–68. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68.
10. Investigation of extinguishment process of liquid hydrocarbon flames by aqueous suspensions of astralenes / A.N. Ponomarev [et al.] // Fire Technology. 2021. T. 57. No. 4. P. 2061–2075. DOI: 10.1007/s10694-021-01094-1.
11. Ivanov A.V. Tushenie model'nyh ochagov klassa «V» nanomodificirovannymi ognetushashchimi sostavami: zakonomernosti i effekty // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2022. № 4 (37). S. 34–44.
12. Nanotechnology in fire protection – application and requirements / A. Rabajczyk [et al.] // Materials. 2021. Vol. 14. No. 24. P. 7849. DOI: 10.3390/ma14247849.
13. Integration of industry 4.0 technologies in fire and safety management / P. Negi [et al.] // Fire. 2024. Vol. 7. No. 10. P. 335. DOI: 10.3390/fire7100335.
14. Aprobaciya obrazcov tkanej, modificirovannyh uglerodnymi nanostrukturami, v sostave boevoj odezhdy pozharnogo v ramkah opytno-issledovatel'skih uchenij «Bezopasnaya Arktika-

2023» / O.A. Moskalyuk [i dr.] // Pozharnaya bezopasnost': sovremennye vyzovy. Problemy i puti resheniya. 2023. S. 163–168.

15. Koval'chuk M.V., Narajkin O.S., Yacishina E.B. Konvergenciya nauk i tekhnologij – novyj etap nauchno-tehnicheskogo razvitiya // Voprosy filosofii. 2013. № 3. S. 3–11.

16. Kiseleva V.S., Ivanov A.V. Aprobaciya ognetushashchego sostava v usloviyah nizkih temperatur s ispol'zovaniem pozharnoj tekhniki // Aktual'nye problemy pozharnoj bezopasnosti, preduprezhdeniya i likvidacii chrezvychajnyh situacij. 2024. S. 107–110.

17. Gorenje geptana v model'nom rezervuare / D.A. Korol'chenko [i dr.] // Pozharovzryvobezopasnost'. 2015. T. 24. № 2. S. 67–70.

18. Gorshkov V.I. Tushenie plameni goryuchih zhidkostej: monografiya. M.: Pozhnauka, 2007. 267 s.

19. Dumilin A.I. Parametry tusheniya plameni goryuchih zhidkostej raspylennoj vodoj // Pozharovzryvobezopasnost'. 2013. T. 22. № 4. S. 85–90.

20. Adsorbcija kisloroda fullerenami i uglerodnymi nanostrukturami / V.P. Belousov [i dr.] // Zhurnal fizicheskoi himii. 2007. T. 81. № 10. S. 1847–1855.

21. Eremina T.Yu. Modelirovanie i ocenka ognezashchitnoj effektivnosti vspuchivayushchihsya ognezashchitnyh sostavov // Pozharovzryvobezopasnost'. 2003. T. 12. № 5. S. 22–29.

22. Fisenko Yu.V. Investirovanie innovacionnoj deyatel'nosti v sfere nanotekhnologij // Intellektual'naya sobstvennost'. Promyshlennaya sobstvennost'. 2011. № 5. S. 62–70.

23. Juas B., Mattsson B. Economics of fire technology // Fire Technology. 1994. Vol. 30. No. 4. P. 468–477. DOI: 10.1007/BF01039945.

24. Bobkov S.A., Baburin A.V., Komrakov P.V. Fiziko-himicheskie osnovy razvitiya i tusheniya pozharov: ucheb. posobie. M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2014. 210 s.

25. Androsov A.S., Begishev I.R., Saleev E.P. Teoriya goreniya i vzryva: ucheb. M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2015. 248 s.

26. Al-Mayman S.I., Al-Abbad N.M., Atieh M.A. Thermal oxidation kinetic of carbon nanotubes (CNTs) // Arabian Journal for Science and Engineering. 2014. T. 39. № 2. S. 621–630. DOI: 10.1007/s13369-013-0689-8.

27. Termodinamicheskoe podobie mnogoslojnyh konicheskikh nanotrubok i grafita / G.Ya. Kabo [i dr.] // Sviridovskie chteniya. 2015. S. 60–67.

## Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 13.10.2025; одобрена после рецензирования: 24.10.2025; принята к публикации: 24.11.2025

## The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 13.10.2025; approved after review: 24.10.2025; accepted for publication: 24.11.2025

## Информация об авторе:

**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 author:

**Ivanov Aleksey V.**, associate professor of the 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