

УДК 614.841.4:004.9

ivanov.av@igps.ru

**ТУШЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ОЧАГОВ КЛАССА  
«В» НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫМИ ОГNETУШАЩИМИ СОСТАВАМИ:  
ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ЭФФЕКТЫ**

**REGULARITIES AND EFFECTS IN CLASS B FIRE EXTINGUISHING WITH  
NANOMODIFIED FIRE EXTINGUISHING AGENTS**

*Иванов А. В., кандидат технических наук, доцент,  
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург*

*Ivanov A.  
The Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia*

В работе приведены обобщенные результаты исследований физических свойств и огнетушащих характеристик огнетушащих составов на основе воды, раствора пенообразователя 6 масс. % и огнетушащего порошка «Вексон-АВСЕ», модифицированных углеродными наноструктурами (УНС): многослойными углеродными нанотрубками (MWCNT) и астраленами (Astr). Данные рамановской спектроскопии свидетельствуют, что при 800 °С происходит полное разрушение структуры нефункционализированных MWCNT и относительная стабильность структуры функционализированных MWCNT и Astr. Результаты синхронного термического анализа показали, что для нефункционализированных MWCNT потеря массы составила более 95 %, в то время как потеря массы образцов для MWCNT и Astr достигала 79 % и 30 % соответственно. Приведены зависимости поверхностного натяжения, кинематической вязкости, удельной теплоты парообразования модифицированных огнетушащих жидкостей, а также времени тушения модельного очага пожара класса «В» от концентрации УНС. Наибольшее сокращение времени тушения модельных очагов (до 8 раз) достигается для составов, модифицированных астраленами, которые характеризуются наибольшей термической стабильностью. В результате нейросетевого моделирования установлено, что для модифицирования огнетушащих составов целесообразнее применять наноматериалы с более высокой температурой начала процесса окисления, с концентрацией наночастиц в базовом составе 0,2 – 0,5 об. %.

*Ключевые слова:* астралены, многостенные углеродные нанотрубки, вода, пенообразователи, огнетушащие порошки, пожаротушение, рамановская спектроскопия, термический анализ, нейросетевое моделирование.

The article presents the generalized results of studies of the physical properties and fire extinguishing characteristics of fire extinguishing compositions based on water, a foaming agent solution of 6 wt. % and fire-extinguishing powder "Vekson-ABSE" modified with carbon nanostructures: multilayer carbon nanotubes (MWCNT) and astralenes (Astr). The results of Raman spectroscopy allow us to conclude that at 800 °C the structure of non-functionalized MWCNTs is completely destroyed and the structures of functionalized MWCNTs and Astr are relatively stable. The results of simultaneous thermal analysis showed that for non-functionalized MWCNTs, the mass loss was more than 95 %, while the mass loss of samples for MWCNTs and Astr reached 79 % and 30 %, respectively. The dependences of surface tension, kinematic viscosity, specific heat of vaporization of modified fire-extinguishing liquids, as well as the extinguishing time of a

model class "B" fire seat on the concentration of carbon nanostructures are presented. The greatest reduction in the extinguishing time of model (up to 8 times) is achieved for compositions modified with astralenes, which are characterized by the highest thermal stability. As a result of neural network modeling, it was found that for the modification of fire extinguishing compositions, it is more expedient to use nanomaterials with a higher temperature of the beginning of the oxidation process, with a concentration of nanoparticles in the base composition of 0.2 – 0.5 vol. %.

*Keywords:* astralenes, multi-walled carbon nanotubes, water, water film forming solution, fire extinguishing powders, firefighting, raman spectroscopy, thermal analysis, neural network modeling.

### **Введение**

Быстрое развитие технологий влечет за собой не только увеличение рисков возникновения пожаров, но и открывает новые возможности повышения эффективности систем противопожарной защиты опасных производственных объектов. Научные исследования по разработке рецептур огнетушащих веществ (ОТВ) с повышенными эксплуатационными характеристиками активно проводятся в России и за рубежом. Современным трендом в разработке рецептур ОТВ является использование активных ингибиторов горения и смачивателей в виде наночастиц неорганических веществ с размерами около 100 нм и удельной поверхностью 25 – 100 м<sup>2</sup>/г, которые внедряются в жидкие и порошковые огнетушащие составы в концентрациях порядка 5 – 10 масс. %. Это позволяет уменьшить необходимый запас ОТВ в установках пожаротушения и сократить время ликвидации горения нефтепродуктов [1]. Углеродные наноструктуры (УНС) также показали потенциальную возможность повысить огнетушащую способность составов при концентрации активного компонента в значительно меньшей концентрации (0,1 – 1,0 об. %) [2 – 4]. Однако до настоящего времени сравнительные исследования УНС по оценке огнетушащих свойств ОТВ для пожаров класса «В» с различной термической стабильностью не проводились.

Целью настоящей работы было обобщение результатов экспериментальных исследований физических свойств и эксплуатационных характеристик ОТВ, модифицированных УНС с различной термической стабильностью, а также определение оптимальных концентраций УНС в огнетушащих составах при тушении модельных очагов класса «В».

### **Материалы и методы исследований**

В качестве материалов для исследования выбраны: дистиллированная вода (DW), водный раствор пенообразователя (ПО) AFFF 6 масс. %, огнетушащий порошок (ОП) «Вексон-АВСЕ». Модифицирование ОТВ проводилось путем ультразвукового диспергирования в базовой жидкости (дистиллированной воде и водном растворе ПО) материалов с углеродными наноструктурами: нефункционализированными (nCNT), функционализированными многослойными углеродными нанотрубками (MWCNT) и астраленами (Astr) [3]. Модифицирование огнетушащих порошков проводилось путем механического перемешивания наноматериала с базовым составом с помощью миксера с частотой вращения 60 об/мин в течение 10 мин. Технология получения УНС описана в работе [5]. Перечень образцов для исследования приведен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень образцов ОТВ, подлежащих исследованию

№	Сокращение	Базовое вещество	Тип УНС	Конц-я УНС, об. %
1	DW	Дист. вода	–	–
2	DW-nCNT0.2 (0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5)	Дист. вода	nfCNT	0,2 – 1,5
3	DW-MWCNT0.2 (0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5)	Дист. вода	MWCNT	0,2 – 1,5
4	DW-Astr0.2 (0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5)	Дист. вода	Astr	0,2 – 1,5
5	AFFF-nCNT0.1 (0.2, 0.5, 1.0, 1.2, 1.6)	Раствор ПО AFFF 6 масс. %	nfCNT	0,1 – 1,6
6	AFFF-MWCNT0.2 (0.2, 0.5, 1.0, 1.2, 1.6)	Раствор ПО AFFF 6 масс. %	MWCNT	0,1 – 1,6
7	AFFF-Astr0.2 (0.2, 0.5, 1.0, 1.2, 1.6)	Раствор ПО AFFF 6 масс. %	Astr	0,1 – 1,6
8	ОП-nCNT0.1 (0.2, 0.5, 0.7, 1.0)	ОП «Вексон-АВСЕ»	nfCNT	0,1 – 1,5
9	ОП-MWCNT0.1 (0.2, 0.5, 0.7, 1.0)	ОП «Вексон-АВСЕ»	MWCNT	0,1 – 1,5
10	ОП-Astr0.1 (0.2, 0.5, 0.7, 1.0)	ОП «Вексон-АВСЕ»	Astr	0,1 – 1,5

Измерение рамановских спектров УНС проводилось на установке Ntegra-Spectra (исследуемый модуль: SNA, длина волны лазера – 532 нм) [2]. Термическая стабильность УНС исследовалась с помощью прибора синхронного термического анализа «NETZSCH STA 449 F3 Jupiter» (максимальная температура – 800 °С, скорость нагрева – 10 К/мин, среда – воздух) [6].

Определялись зависимости поверхностного натяжения (ПН), кинематической вязкости и удельной теплоты парообразования (УТП) наномодифицированных

жидкостей при условиях, соответствующих технологиям подготовки и подачи ОТВ [3, 4].

На лабораторной установке (рис. 1) проводилось тушение модельного очага класса «В» распыленными струями воды, растворами пенообразователей 6 масс. % [5] и огнетушащим порошком [7]. Фиксировалось время ликвидации горения очага в течение времени подачи ОТВ. Для воды и раствора ПО время тушения составляло 60 с, для ОП – до 6 с. В течение одной минуты после ликвидации горения проводилась попытка повторного поджигания паров ЛВЖ в модельном очаге.

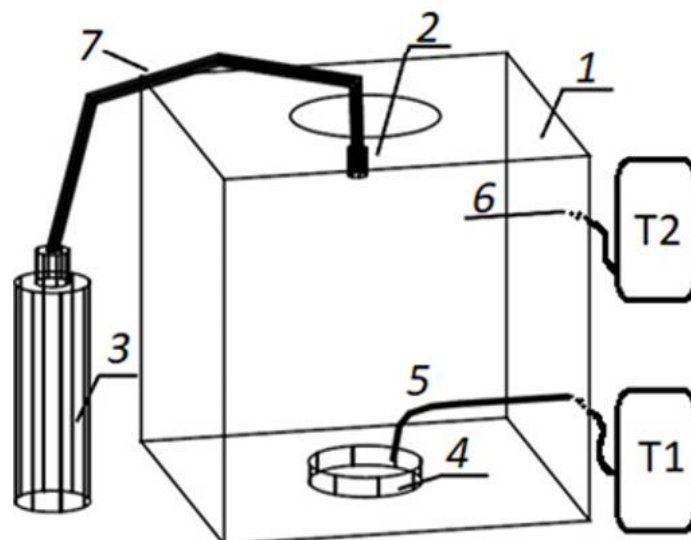


Рисунок 1. Схема лабораторной установки:

1 – металлический контейнер ( $V = 0,125 \text{ м}^3$ ); 2 – насадок-распылитель; 3 – емкость с ОТВ объемом 5 л; 4 – емкость с бензином ( $D = 0,2 \text{ м}$ ,  $H = 0,07 \text{ м}$ ); 5, 6 – термопары с регистраторами; 7 – трубопровод для подачи ОТВ ( $d = 0,01 \text{ м}$ )

#### Рамановская спектроскопия образцов УНС

В рамановском спектре для всех образцов УНС, не подвергшихся нагреву в муфельной печи до  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , наблюдалась  $G$ -полоса в интервале  $1500 - 1600 \text{ см}^{-1}$ , соответствующая колебаниям углерода в плоскости графенового слоя [8].  $D$ -полоса, характеризующая неупорядоченность структуры углеродного наноматериала,

наибольшим образом выражена для образца pCNT. Для данного вещества характерна наименьшая добротность, определяемая отношением интенсивности полос  $I_D/I_G$ . Материалы Astr и MWCNT имеют более высокую интенсивность  $G$ -полосы, что характеризует их как наночастицы с высокой упорядоченностью структуры. Кроме того, наибольшая симметрия пика для  $G$ -полосы характерна для материала Astr (рис. 2, а).

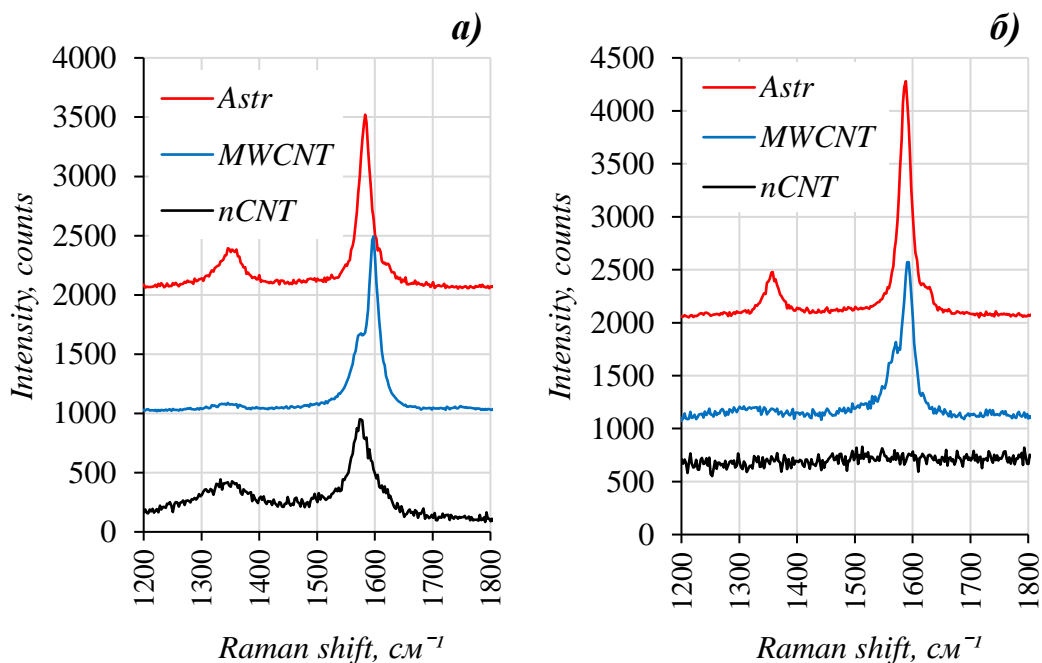


Рисунок 2. Рамановские спектры УНС: при нормальных условиях (а), после нагрева до 800 °С (б)

После нагрева в воздушной среде образцов до 800 °С наблюдался рост интенсивности G-полосы относительно D-полосы для Astr и MWCNT. Для nCNT после термического воздействия полосы D и G не фиксировались (рис. 2, б).

Термический анализ углеродных наноструктур

Результаты СТА показали существенные различия термической стабильности исследуемых наноструктур (рис. 3).

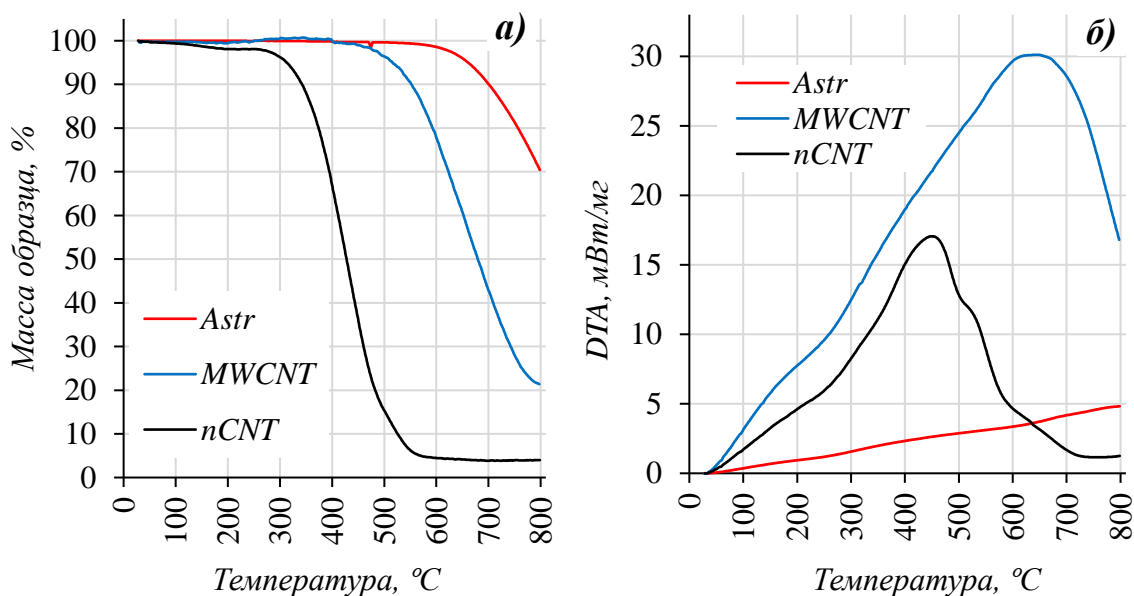


Рисунок 3. Результаты СТА УНС: ТГ (а), ДТА (б)

Начало потери массы образца наблюдалась при 580 °С для Astr, для

MWCNT и nCNT данное значение составляло соответственно 479 °С и 293 °С. Потеря массы образцов при 800 °С для Astr, MWCNT и nCNT составила 29,6 %, 79,5 % и 96 % соответственно. Максимальный тепловой эффект для MWCNT и nCNT наблюдался при температурах 655 °С и 464 °С; а для Astr данный показатель выходил за пределы измерений.

#### Поверхностное натяжение огнетушащих жидкостей

Результаты измерений поверхностного натяжения ОТВ приведены в табл. 2. Для составов на основе DW наблюдалось относительное снижение (до 7 %) значений ПН при концентрации УНС 0,2 об. %. В дальнейшем с увеличением концентрации до 1,0 об. % происходил рост (до 30 %) значений ПН, с дальнейшей стабилизацией данных значений.

Таблица 2

#### Поверхностное натяжение ОТВ

		Поверхностное натяжение, Н/м						
УНС, об. %		0	0,2	0,5	0,7	1,0	1,2	1,5
<b>ОТВ</b>	УНС, об. %							
	DW-Astr	0,072	0,067	0,082	0,085	0,094	0,091	0,093
	DW-MWCNT		0,067	0,091	0,094	0,094	0,096	0,095
	DW-nCNT		0,066	0,064	0,061	0,063	0,067	0,074
<b>ОТВ</b>	УНС, об. %							
	AFFF-Astr	0,011	0,013	0,014	0,014	0,014	0,016	0,018
	AFFF-MWCNT		0,014	0,015	0,015	0,016	0,017	0,020
	AFFF-nCNT		0,011	0,010	0,009	0,010	0,014	0,015

Растворы ПО с УНС имели существенно меньшие значения поверхностного натяжения (до 7 раз). Диспергирование Astr и MWCNT приводило к увеличению (до 40 %), а применение nCNT – к дополнительному снижению ПН (до 27 %) исследуемых ОТВ.

#### Вязкость огнетушащих жидкостей

Данные о кинематической вязкости ОТВ приведены в табл. 3. Увеличение концентрации Astr и MWCNT влекло за собой рост значений вязкости огнетушащих жидкостей на основе DW и AFFF до 23 % в сравнении с базовыми жидкостями.

Таблица 3

#### Кинематическая вязкость ОТВ

		Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с						
УНС, об. %		0	0,2	0,5	0,7	1,0	1,2	1,5
<b>ОТВ</b>	УНС, об. %							
	DW-Astr	1,054	1,104	1,027	1,118	1,221	1,231	1,238
	DW-MWCNT		1,112	1,121	1,192	1,192	1,235	1,293
	DW-nCNT		1,047	1,032	1,014	1,008	1,008	1,001
<b>ОТВ</b>	УНС, об. %							
	AFFF-Astr	1,417	1,460	1,450	1,433	1,477	1,480	1,487
	AFFF-MWCNT		1,433	1,470	1,443	1,460	1,457	1,473
	AFFF-nCNT		1,410	1,270	1,253	1,247	1,193	1,173

Применение nCNT позволяет уменьшить УТП составов AFFF до 70 % при максимальной концентрации 1,5 об. %.

*Тушение модельных очагов пожара класса «В»*

Результаты исследования зависимости времени тушения модельных очагов

пожара класса «В» от концентрации УНС представлены в табл. 4. Для отдельных образцов ОТВ горение модельного очага продолжалось до момента полного выгорания ЛВЖ, из чего делался вывод, что результат тушения был неудачный.

Таблица 4  
Результаты тушения модельного очага наномодифицированными ОТВ

		Время тушения модельного очага, с*/ наличие повторного воспламенения**						
УНС, об. %		0	0,2	0,5	0,7	1,0	1,2	1,5
<b>ОТВ</b>	DW-Astr	НР	10 / +	7 / +	10 / +	11 / +	18 / +	17 / +
	DW-MWCNT		19 / +	17 / +	11 / +	10 / +	14 / +	21 / +
	DW-nCNT		34 / +	30 / +	37 / +	НР	НР	НР
УНС, об. %		0	0,1	0,2	0,5	1,0	1,2	1,6
<b>ОТВ</b>	AFFF-Astr	16 / –	8 / –	6 / –	11 / –	15 / +	13 / +	22 / +
	AFFF-MWCNT		10 / –	10 / –	8 / –	10 / –	19 / +	21 / +
	AFFF-nCNT		12 / –	15 / –	19 / –	23 / +	НР	НР
УНС, об. %		0	0,1	0,2	0,5	0,7	1,2	1,5
<b>ОТВ</b>	ОП-Astr	6 / +	3 / +	2 / +	4 / +	4 / +	НР	НР
	ОП-MWCNT		5 / +	4 / +	4 / +	6 / +	НР	НР
	ОП-nCNT		6 / +	6 / +	НР	НР	НР	НР

\* «НР» неудачный результат тушения;

\*\* «+» при внесении источника зажигания происходило воспламенение паров после ликвидации горения, «–» воспламенение паров не происходило в аналогичных условиях.

Наименьшее время тушения модельного очага (снижение до 4,5 раз в сравнении с базовыми составами) фиксировалось для суспензий DW с УНС при концентрации Astr 0,5 об. % и MWCNT 0,7 об. %. Для суспензий DW-nCNT с концентрацией УНС 1,0 – 1,5 об. % результат тушения фиксировался как неудачный. Для всех образцов суспензий фиксировалось повторное воспламенение паров ЛВЖ над поверхностью модельного очага от внесенного источника зажигания.

Для растворов ПО с УНС наименьшее время тушения фиксировалось при концентрации Astr 0,2 об. %, MWCNT 0,5 об. % и nCNT 0,2 об. % соответственно

(снижение до 8 раз в сравнении с базовыми составами). Для растворов ПО AFFF-nCNT с концентрацией УНС 1,2 об. % и 1,6 об. % результат тушения фиксировался как неудачный. Повторное воспламенение паров ЛВЖ не наблюдалось, за исключением образцов AFFF-MWCNT (1,2 об. %, 1,6 об. %) и AFFF-nCNT 1,0 об. %.

Использование Astr и MWCNT в качестве модификаторов ОП позволяет уменьшить время тушения в 1,5 – 3 раза. Максимальный огнетушащий эффект достигался при концентрации Astr 0,2 об. %. Следует отметить, что при увеличении концентрации Astr и MWCNT более

1,0 об. % эффект тушения не был достигнут. Использование pCNT в качестве модификатора не приводило к улучшению огнетушащих характеристик ОП, а при концентрации более 0,2 об. % тушения модельного очага не происходило.

#### Обсуждение результатов

Результаты рамановской спектроскопии образцов УНС свидетельствуют о высоком качестве материалов Astr и MWCNT, имеющих в своем составе сравнительно небольшое, относительно pCNT, количество неупорядоченного (аморфного) углерода. Снижение интенсивности D-полосы во всех образцах УНС при термическом воздействии позволяет сделать вывод о произошедшей деструкции неупорядоченного углерода в структуре наноматериала. Отсутствие G-полосы для pCNT после нагрева позволяет сделать вывод о разрушении структуры углеродного наноматериала. Наибольшая симметрия G-полосы характерна для материала Astr, что является следствием ненапряженности связей в графеновых слоях, что во многом должно обуславливать термическую стабильность наноструктур [10].

Полученные результаты согласуются с данными термического анализа, которые показали незначительную потерю массы для Astr (до 30 %) и практически полное разрушение наноматериала pCNT (свыше 95 %), что свидетельствует о большей термической стабильности Astr в сравнении с MWCNT и pCNT в условиях повышенных температур, обусловленных горением ЛВЖ.

Термическая деструкция исследуемых УНС происходит на стадиях окисления аморфного углерода при температурах 200 – 300 °С и графена при температурах от 350 °С для MWCNT и более 800 °С для Astr. Скорость термической деструкции УНС во многом зависит от концентрации аморфного углерода и конфигурации графеновых слоев наночастицы [10].

Рост поверхностного натяжения жидкостей с УНС, обусловленный ростом ван-дер-ваальсовых взаимодействий

между наноструктурами, приводит к образованию более крупных капель в установке подачи огнетушащего состава, а также влечет большие затраты энергии на их испарение за счет увеличения теплоты парообразования жидкостей [2 – 5]. Снижение ПН и УТП при концентрации УНС более 1,0 об. % предположительно связано с уменьшением стабильности наножидкостей. Вместе с тем, результаты исследований свидетельствует об увеличении теплопроводности жидкостей на основе воды с УНС, что в свою очередь обеспечивает более интенсивный отвод тепла из зоны горения [9].

Огнетушащий эффект при использовании воды достигается за счет интенсификации теплообмена в конвекционной зоне горения, а применение растворов ПО позволяет создать пленку на поверхности ЛВЖ, снижающую интенсивность выделения горючих паров.

После ликвидации горения суспензиями воды с УНС, а также модифицированными ОП, при внесении источника зажигания происходило повторное воспламенение паров ЛВЖ в модельном очаге по причине отсутствия пленки ОТВ на поверхности жидкости, препятствующей испарению паров ЛВЖ.

В условиях применения растворов ПО происходило существенное сокращение времени тушения, до 30 % в сравнении с водными суспензиями с одинаковой концентрацией УНС. Отсутствие повторного воспламенения свидетельствует об уменьшении интенсивности парообразования ЛВЖ за счет возникновения пленки ПО на поверхности модельного очага. Повторное воспламенение паров ЛВЖ для отдельных образцов AFFF-MWCNT и AFFF-pCNT позволяет предположить отсутствие либо разрушение пленки ПО на поверхности горючей жидкости.

Исследования показали, что минимальное время ликвидации горения модельного очага характерно для огнетушащих жидкостей с концентрацией УНС 0,2 – 0,5 об. %. В условиях применения



наномодифицированных огнетушащих порошков оптимальные значения концентраций УНС составляют около 0,2 об. %.

Для оценки вклада исследуемых свойств наноструктур и модифицированных составов использовался метод нейросетевого моделирования [10]. В качестве воздействующих факторов принимались: концентрация УНС ( $x_1$ ), ПН ( $x_2$ ), кинематическая вязкость ( $x_3$ ), УТП ( $x_4$ ) жидкостей, добротность ( $x_5$ ), температура начала процесса окисления ( $x_6$ ), макси-

мальный тепловой эффект ( $x_8$ ) при термической деструкции УНС и соответствующая ей температура ( $x_7$ ). В качестве независимой переменной ( $Y$ ) использовалось время тушения модельного очага. Построение НС и обработка результатов проводились в программном продукте STATISTICA (вид сети – многослойный перцептрон, скрытых нейронов: 4...20, обучающихся сетей: 200 тыс.). Из 10 полученных НС была выбрана сеть «72. MLP 7-6-1» с минимальной ошибкой обучения и контрольной выборки (табл. 5).

Таблица 5

Характеристика полученной нейронной сети

In- dex	Net. name	Training perf.	Test perf.	Valida- tion perf.	Training error	Test error	Validation error	Train- ing algo- rithm	Hidden activation	Output activa- tion
72	MLP 7-6-1	0,9808	0,9999	0,00	0,7977	0,66 43	0,7616	BFGS 99	Expo- nential	Identity

Анализ вклада переменных показывает, что наиболее важными являются ПН ( $x_2$ ), УТП ( $x_4$ ) жидкостей, а также температура начала процесса окисления ( $x_6$ ), УНС (рис. 3).

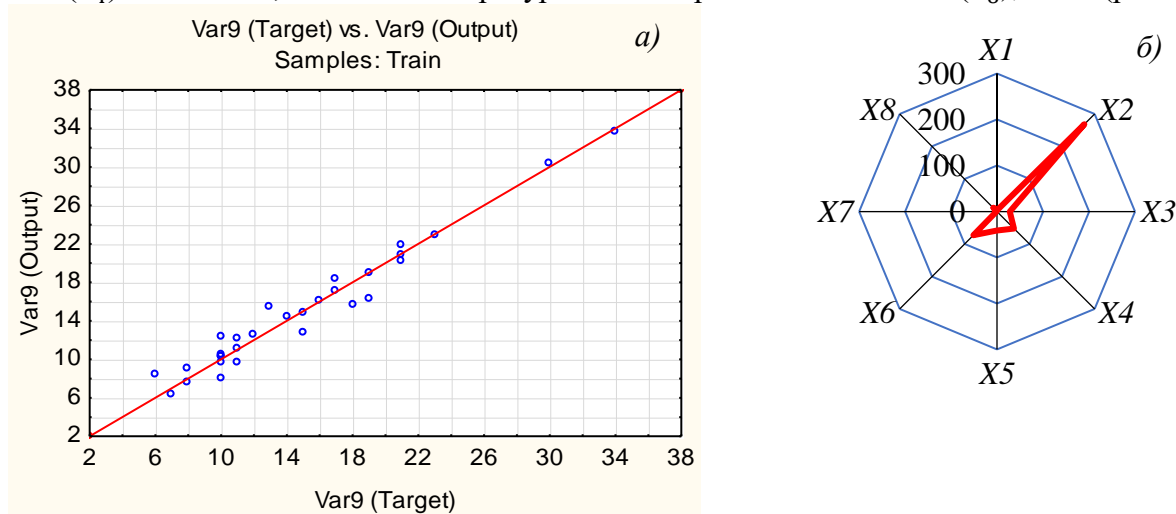


Рисунок 4. Диаграммы рассеяния целевых значений (а) и вклада переменных (б) полученной нейронной сети

Данные моделирования согласуются с результатами экспериментов, в ходе которых установлена обратная зависимость между временем тушения модельных очагов и термической стабильностью УНС. Применение образцов nCNT, характеризующихся наименьшим временем

начала процесса окисления, а также образцов ОТВ с концентрацией Astr и MWCNT 1,0 об. % и более влекло за собой кратковременное увеличение объема конвекционной зоны горения над очагом, выброс продуктов горения за пределы исследовательской камеры и увеличение времени ликвидации горения (рис. 5).



Рисунок 5. Фотография процесса тушения модельного очага с помощью ОТВ при концентрации УНС: 0,5 об. % (а), 1,0 об. % (б)

Наблюдаемый эффект, очевидно, связан с тем, что при испарении воды или попадании частиц ОП с диспергированными УНС происходит сгорание углеродных наночастиц. Несмотря на сравнительно небольшое количество УНС, тепловой эффект может быть значительным за счет высокой ( $100 - 2000 \text{ м}^2/\text{г}$ ) удельной поверхности наночастиц и одновременным их сгоранием во всем объеме конвекционной зоны. Кроме того, избыточное количество наночастиц приводит к быстрому разрушению пленки ПО на поверхности ЛВЖ, что становится причиной увеличения времени тушения очага, либо неудовлетворительного результату пожаротушения.

#### Выводы:

1. Применение огнетушащих составов, модифицированных углеродными наноструктурами, позволяет сократить время ликвидации горения модельных очагов в 2 – 3 раза, в сравнении с немодифицированными ОТВ. Экспериментальным путем

определены оптимальные концентрации УНС, которые составляют 0,2 – 0,5 об. %.

2. Увеличение вязкости жидкостей при рабочих концентрациях УНС 0,2-0,5 об. % не превышает 10 % в сравнении с неcodифицированными составами, что позволяет использовать ОТВ в существующих системах подачи и не требует дополнительных затрат на модернизацию систем противопожарной защиты объектов.

3. Развитие технологий наномодифицирования ОП требует дальнейшего изучения, однако закономерности влияния УНС на время ликвидации горения модельных очагов класса «В» сходны с ОТВ на основе воды и ПО.

Для достижения максимального огнетушащего эффекта и исключения повторного возгорания ЛВЖ предпочтительно использовать ОТВ на основе растворов пенообразователей с углеродными наночастицами, имеющими наибольшую температуру начала процесса окисления.

#### Литература

1. Rabajczyk A. et al. Nanotechnology in Fire Protection – Application and Requirements // Materials. 2021. Vol. 14. No. 24. P. 7849.
2. Иванов А. В. и др. Исследование огнетушащих свойств воды и гидрогелей с углеродными наноструктурами при ликвидации горения нефтепродуктов // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 8. С. 31–44.

3. Иванов А. В. и др. Физический механизм и способ тушения жидких углеводородов модифицированными суспензиями воды с углеродными наноструктурами // *Пожаровзрывобезопасность*. 2019. Т. 28. № 1. С. 22–34.
4. Пустовалов И. А. Экспериментальное исследование огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, модифицированной астраленами // *Пожаровзрывобезопасность*. 2021. Т. 30. № 5. С. 84–97.
5. Ponomarev A. N. et al. Investigation of extinguishment process of liquid hydrocarbon flames by aqueous suspensions of astralenes // *Fire Technology*. 2021. Vol. 57. No. 4. Pp. 2061–2075.
6. Domagała K. et al. Purification and functionalisation of multi-walled carbon nanotubes // *Materials Letters*. 2019. Vol. 253. Pp. 272–275.
7. Константинова А. С., Кожевин Д. Ф., Поляков А. С. Экспериментальная оценка влияния массы огнетушащего порошка на эффективность тушения углеводородов // *Материалы юбилейного X форума «Школа молодых ученых и специалистов МЧС России»*. 2020. С. 196–198.
8. Удовицкий В. Г. Методы оценки чистоты и характеристики свойств углеродных нанотрубок // *Физическая инженерия поверхности*. 2009. Т. 7. № 4. С. 351–373.
9. Amiri A. et al. Pool boiling heat transfer of CNT/water nanofluids // *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 71. No. 1. Pp. 450–459.
10. Хабибуллина И. А. и др. Синхронный термический анализ и спектроскопия комбинационного рассеяния света как взаимодополняющие методы диагностики аллотропных форм углерода // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2016. Т. 59. № 8. С. 34–39.
11. Li L. et al. Stability, thermal performance and artificial neural network modeling of viscosity and thermal conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ethylene glycol nanofluids // *Powder Technology*. 2020. Vol. 363. Pp. 360–368.

#### References

1. Rabajczyk A. et al. Nanotechnology in Fire Protection – Application and Requirements // *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 24. P. 7849.
2. Ivanov A. V. i dr. Issledovanie ognetchashchih svojstv vody i gidrogelej s uglerodnymi nanostrukturami pri likvidacii goreniya nefteproduktov // *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2017. Т. 26. № 8. С. 31–44.
3. Ivanov A. V. i dr. Fizicheskij mekhanizm i sposob tusheniya zhidkih uglevodorodov modifitsirovannymi suspenziyami vody s uglerodnymi nanostrukturami // *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2019. Т. 28. № 1. С. 22–34.
4. Pustovalov I. A. Eksperimental'noe issledovanie ognetchashchej sposobnosti modul'nyh ustanovok pozharotusheniya tonkoraspylennoj vodoj, modifitsirovannoj astralenami // *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2021. Т. 30. № 5. С. 84–97.
5. Ponomarev A. N. et al. Investigation of extinguishment process of liquid hydrocarbon flames by aqueous suspensions of astralenes // *Fire Technology*. 2021. Vol. 57. No. 4. Pp. 2061–2075.
6. Domagała K. et al. Purification and functionalisation of multi-walled carbon nanotubes // *Materials Letters*. 2019. Vol. 253. Pp. 272–275.
7. Konstantinova A. S., Kozhevin D. F., Polyakov A. S. Eksperimental'naya ocenka vliyanija massy ognetchashchego poroshka na effektivnost' tusheniya uglevodorodov // *Materialy yubilejnogo X foruma «Shkola molodyh uchenyh i specialistov MCHS Rossii»*. 2020. С. 196–198.
8. Udovickij V. G. Metody ocenki chistoty i harakterizacii svojstv uglerodnyh nanotrubok // *Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti*. 2009. Т. 7. № 4. С. 351–373.
9. Amiri A. et al. Pool boiling heat transfer of CNT/water nanofluids // *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 71. No. 1. Pp. 450–459.
10. Habibullina I. A. i dr. Sinhronnyj termicheskij analiz i spektroskopiya kombinacionnogo rasseyanija sveta kak vzaimodopolnyayushchie metody diagnostiki allotropanyh form ugleroda // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Himiya i himicheskaya tekhnologiya*. 2016. Т. 59. № 8. С. 34–39.
11. Li L. et al. Stability, thermal performance and artificial neural network modeling of viscosity and thermal conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ethylene glycol nanofluids // *Powder Technology*. 2020. Vol. 363. Pp. 360–368.