

2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки)

Научная статья

УДК 614.842.61

Контроль надмолекулярной структуры и применение углеродных наноструктур как метод повышения огнетушащих растворов на примере воды

Никита Анатольевич Арзаев¹

Варвара Алексеевна Пешакова²

Анна Николаевна Емельянова³

^{1,2,3}Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия,

¹<https://orcid.org/0009-0004-9179-5087>

Автор, ответственный за переписку: Никита Анатольевич Арзаев, n.arzaef@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются аспекты супрамолекулярных преобразований надмолекулярной структуры воды под влиянием электрофизического воздействия и реагентной модификации наночастицами. Представлены экспериментальные данные, свидетельствующие об изменении физико-химических свойств воды - поверхностного натяжения, динамической вязкости, окислительно-восстановительного потенциала, интенсивности испарения - при обработке переменным частотно-модулированным потенциалом. Проанализировано влияние данных изменений на огнетушащую способность водосодержащих составов, в том числе модифицированных углеродными наноструктурами. Показано, что управление коллигативными свойствами воды за счёт перестройки её надмолекулярной структуры открывает перспективы для совершенствования огнетушащих веществ и технологий пожаротушения. Выявлено, что управление коллигативными свойствами воды за счёт изменения её надмолекулярной структуры открывает широкие перспективы для совершенствования огнетушащих веществ и технологий пожаротушения. Перспективы дальнейшего совершенствования огнетушащих веществ связаны с разработкой наномодифицированных композиций для роботизированных установок пожаротушения на объектах транспортировки нефтепродуктов, объектах судостроения и судоремонта, а также на прочих производственных объектах. Создание многокомпонентных составов с заданными физико-химическими характеристиками, адаптированных под различные классы пожаров (твердые вещества, горючие жидкости, электроустановки). Таким образом, управление коллигативными и структурными свойствами воды - очень важный аспект для инновационного развития пожарной безопасности различных отраслей промышленности и инфраструктуры.

Ключевые слова: надмолекулярная структура воды, супрамолекулярные преобразования, поверхностное натяжение, огнетушащая эффективность, углеродные наноструктуры, электрофизическая обработка, пожарная безопасность

Для цитирования: Арзаев Н.А., Пешакова В.А., Емельянова А.Н. Контроль надмолекулярной структуры и применение углеродных наноструктур как метод повышения огнетушащих растворов на примере воды

Original article.

Control of the supramolecular structure and the use of carbon nanostructures as a method of increasing fire-extinguishing solutions using the example of water

Nikita A. Arzaev¹

Varvara A. Peshakova²

Anna N. Emelyanova³

^{1,2,3}Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Saint-Petersburg, Russia

¹<https://orcid.org/0009-0004-9179-5087>

Corresponding author: Nikita A. Arzaev, n.arzaev@yandex.ru

Abstract. Aspects of supramolecular transformations of the supramolecular structure of water under the influence of electrophysical action and reagent modification by nanoparticles are considered. Experimental data are presented that indicate a change in the physicochemical properties of water - surface tension, dynamic viscosity, redox potential, evaporation intensity - when treated with a variable frequency-modulated potential. The effect of these changes on the fire extinguishing capacity of water-containing compositions, including those modified with carbon nanostructures, was analyzed. It has been shown that the management of the colligative properties of water due to the restructuring of its supramolecular structure opens up prospects for improving fire extinguishing substances and fire extinguishing technologies. It was revealed that the management of the colligative properties of water by changing its supramolecular structure opens up wide prospects for improving fire extinguishing substances and fire extinguishing technologies. Prospects for further improvement of fire extinguishing agents are associated with the development of nanomodified compositions for robotic fire extinguishing installations at oil product transportation facilities, shipbuilding and ship repair facilities, as well as at other production facilities. Creation of multicomponent compositions with specified physical and chemical characteristics, adapted for various classes of fires (solid substances, combustible liquids, electrical installations). Thus, the management of the colligative and structural properties of water is a very important aspect for the innovative development of fire safety in various industries and infrastructure.

Keywords: supramolecular structure of water, supramolecular transformations, surface tension, fire-extinguishing efficiency, carbon nanostructures, electrophysical treatment, and fire safety

For citation: Arzaev N.A., Peshakova V.A., Emelyanova A.N. Control of the supramolecular structure and the use of carbon nanostructures as a method of increasing fire extinguishing solutions using the example of water.

Введение

Вода является наиболее распространённым и доступным огнетушащим средством, что обусловлено её высокой удельной теплоёмкостью (4,19 кДж/(кг·°C)), значительной теплотой парообразования (2260 кДж/кг), химической инертностью и подвижностью. При соприкосновении с очагом горения вода нагревается до температуры кипения, после чего испаряется, интенсивно отбирая тепло у горящего материала; при этом из 1 литра воды образуется 1700 литров пара, разбавляющего реагирующие вещества в зоне горения. Именно фазовый переход – испарение – вносит основной вклад в механизм подавления пламени: чем быстрее протекает этот процесс, тем эффективнее ликвидация очага.

Вместе с тем применение воды в качестве огнетушащего вещества (далее – ОТВ) имеет ряд ограничений. Высокое поверхностное натяжение ($\sigma \approx 72$ мН/м при 20 °C) препятствует эффективному смачиванию гидрофобных поверхностей, типичных для горящих углеводородных материалов. Тушение горючих жидкостей с низкой температурой вспышки

(бензин и др.) распылённой водой затруднено, поскольку капли не способны достаточно охладить нагретый поверхностный слой ниже температуры вспышки. Данные обстоятельства обуславливают необходимость поиска методов повышения огнетушащей эффективности водосодержащих составов [1].

Одним из перспективных подходов является модификация физико-химических свойств воды посредством воздействия на её надмолекулярную структуру [2]. В полярных жидкостях, в том числе в воде, надмолекулярные структуры формируются за счёт водородных связей и непосредственно определяют коллигативные свойства: поверхностное натяжение, вязкость, давление насыщенного пара, осмотическое давление [3]. Целенаправленное изменение этих свойств может привести к интенсификации процесса испарения, улучшению смачивания и, как следствие, повышению огнетушащей способности воды [4, 5].

Целью настоящей работы является анализ коллоидно-химических аспектов супрамолекулярных преобразований надмолекулярной структуры воды, возникающих при электрофизическом воздействии и реагентной модификации наночастицами, и оценка их влияния на характеристики, определяющие огнетушащую эффективность водосодержащих составов.

Методы исследования.

Огнетушащее действие воды определяется её способностью отводить тепло из зоны горения [6, 7]. Суммарное количество теплоты, отводимое при нагреве и испарении единицы массы ОТВ, может быть описано выражением:

$$Q = c_p \cdot \Delta T + r \quad (1)$$

где, C_p - средняя удельная теплоемкость;

ΔT - разность между начальной температурой и температурой кипения;

r - удельная теплота парообразования.

При тушении пожаров, связанных с горением углеводородных материалов, критическое значение имеет способность ОТВ смачивать гидрофобные поверхности [8]. Краевой угол смачивания θ определяется соотношением Юнга:

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LG}} \quad (2)$$

где, σ_{SG} – поверхностное натяжение на границах твердое тело - газ;

σ_{SL} – поверхностное натяжение на границах твердое тело - жидкость;

σ_{LG} - поверхностное натяжение на границах жидкость - газ.

Поскольку молекула воды представляет собой диполь, в котором электронное облако стянуто в сторону ядра кислорода, оно создает неоднородное распределение электронной плотности. Благодаря наличию двух донорных и двух акцепторных участков каждая молекула

способна образовывать водородные связи с четырьмя соседними, формируя ажурный сетчатый каркас - трёхмерные кластеры различной размерности. В жидком состоянии эти водородные связи спонтанны и короткоживущи: они непрерывно разрушаются и образуются вновь, что обуславливает неоднородность структуры воды и совокупность её аномальных свойств [9].

Снижение поверхностного натяжения воды улучшает смачивание горящих поверхностей, увеличивая площадь контакта ОТВ с горючим материалом. Уменьшение краевого угла смачивания ($\cos \Theta \rightarrow 1$) обеспечивает растекание воды по гидрофобным углеводородным поверхностям, которые при обычных условиях плохо смачиваются водой. Традиционно для снижения поверхностного натяжения воды применяются поверхностно-активные вещества (далее – ПАВ) – смачиватели, добавляемые в концентрации 2 - 6%. Однако альтернативный подход, основанный на перестройке надмолекулярной структуры воды, позволяет достичь аналогичного эффекта при значительно меньших концентрациях модифицирующих агентов [10].

Интенсификация испарения повышает охлаждающий эффект: чем быстрее капли ОТВ переходят в парообразное состояние, тем больше тепла отводится из зоны горения в единицу времени [11]. Кроме того, увеличение объёма, образующегося пара усиливает разбавляющее действие, снижая концентрацию кислорода в зоне горения [12].

Электрофизическая обработка воды посредством приложения переменного частотно-модулированного потенциала (ПЧМП) является одним из безреагентных методов изменения её физико-химических свойств. ПЧМП представляет собой синусоиду с несущей частотой 50 Гц и наложенными гармониками в диапазоне частотной модуляции 10 - 12000 Гц при амплитуде 10 - 180 В. Устройство функционирует в режиме резонанса напряжений, что обеспечивает эффективную передачу энергии водной среде [2, 5].

Альтернативным подходом к управлению свойствами водосодержащих ОТВ является введение в воду углеродных наноструктур (далее – УНС). Исследования показали, что добавление углеродных наночастиц в воду приводит к значительным изменениям теплофизических и поверхностных свойств суспензии [13].

Астралены - наноструктуры, получаемые методом испарения графитовых анодов в электродуговом разряде, - имеют диаметр 10 - 150 нм, плотность 2250 кг/м³ и теплоёмкость 700 Дж/(кг·К). Многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ) с диаметром 30 - 150 нм и длиной 1-3 мкм также показали высокую эффективность в качестве модифицирующих агентов [14].

Результаты исследования и их обсуждение

Систематические исследования влияния ПЧМП на физико-химические свойства дистиллированной воды выявили существенные изменения, нарастающие с увеличением длительности обработки (Табл.1).

Табл.1. Изменение физико-химических свойств дистиллированной воды при обработке ПЧМП

№ п/п	Параметр	15 мин	30 мин	45 мин	60 мин
1.	Поверхностное натяжение, $\Delta\sigma/\sigma_0$ (%)	-12,0	-20,4	-25,5	-28,9
2.	Масса испарившейся жидкости за 15 мин, $\Delta m/m_0$ (%)	+13,2	+20,4	+31,7	+40,0
3.	Динамическая вязкость, $\Delta\mu/\mu_0$ (%)	-0,8	-1,8	-2,2	-2,7
4.	Водородный показатель, $\Delta pH/pH_0$ (%)	+2,0	+3,5	+4,3	+4,9
5.	ОВП, $\Delta OVP/OVP_0$ (%)	-11,6	-22,4	-28,8	-33,3
6.	Осмотическое давление, $\Delta\pi/\pi_0$ (%)	+8,6	+14,3	+28,6	+37,2

Наиболее значимыми для огнетушащих приложений являются следующие результаты:

- Поверхностное натяжение снижается на 11 - 28,9% при обработке в течение 15 - 60 минут, приближаясь к значениям, характерным для водных растворов ПАВ.
- Интенсивность испарения увеличивается на 11 - 40%, что напрямую определяет охлаждающую способность ОТВ.
- ОВП снижается на 11 - 33%, что свидетельствует об увеличении восстановительной способности воды.
- Динамическая вязкость снижается на 0,8 - 2,7%, улучшая текучесть и проникающую способность ОТВ.

Исследования структуры дистиллированной воды в условиях воздействия ПЧМП, проведённые с помощью рамановской спектроскопии (длина волны лазера 532 нм), выявили сдвиг частоты полосы О – Н в диапазоне 3100 - 3600 см⁻¹ на 30 - 50 см⁻¹ в сторону больших значений. Данный сдвиг свидетельствует об уменьшении прочности водородных связей в модифицированной воде. При электрофизическом воздействии происходит изменение надмолекулярной структуры воды: кластеры перестраиваются из трёхмерных конфигураций в двумерные. Такая перестройка обуславливает увеличение подвижности молекул, которые приобретают большую кинетическую энергию, что проявляется в интенсификации испарения и снижении вязкости.

Модифицированная вода сохраняет изменённые свойства в течение 18 часов, релаксируя к первоначальному состоянию за 24 часа, что является достаточным для практического применения в системах пожаротушения.

Экспериментальные данные по влиянию концентрации МУНТ на свойства водных

суспензий и их огнетушащие показатели при тушении очагов класса «В» представлены в (Табл. 2).

Табл.2. Теплофизические и огнетушащие характеристики суспензий воды с МУНТ

№ п/п	Концентрация, ф (% об.)	σ (мН/м)	dT/dt (°С/мин)	r (МДж/кг)	Время тушения (с)	Удельный расход (л/м²)
1.	0 (вода)	72±2	4,03	2,12±0,06	47–51	8,4–8,8
2.	0,4	67±2	5,01	2,37±0,02	24–28	3,5–3,7
3.	0,8	57±1	6,01	2,53±0,04	14–16	2,6–2,8
4.	1,0	54±2	6,23	2,77±0,02	11–13	2,3–2,5
5.	1,6	59±2	5,77	2,21±0,02	28–30	3,2–3,4

Примечание: σ - коэффициент поверхностного натяжения;

dT/dt - скорость нагрева;

r - удельная теплота парообразования.

При оптимальной концентрации МУНТ 1,0% об. поверхностное натяжение снижается на 25%, скорость нагрева до температуры кипения возрастает в 1,5 раза, а удельная теплота парообразования увеличивается на 30%. Время тушения модельного очага пожара класса «В» сокращается в 4 - 5 раз, а удельный расход ОТВ - в 3,5 раза по сравнению с немодифицированной водой.

Характерно, что при превышении оптимальной концентрации (1,6% об.) огнетушащая эффективность снижается, что обусловлено уменьшением удельной теплоты парообразования и преждевременным испарением капель, не достигающих зоны горения. Данный факт свидетельствует о существовании аналога критической концентрации мицеллообразования (ККМ), характерной для растворов ПАВ, что является принципиально важным коллоидно-химическим результатом.

Введение гидрофобных наночастиц в воду приводит к уменьшению энергии когезии жидкости и, как следствие, увеличению энергии адгезии на границе раздела с горячей поверхностью. Физически это проявляется в снижении поверхностного натяжения и улучшении смачивания гидрофобных углеводородных поверхностей. Наночастицы, обладая меньшей теплоёмкостью и большей теплопроводностью по сравнению с водой, обеспечивают более быстрое распределение тепла по капле и ускоренный переход к стадии испарения.

Моделирование в программной среде PyroSim показало, что при тушении жидких углеводородов суспензией с МУНТ в концентрации 1,0% об. расход ОТВ составляет 0,23 л/с, тогда как для водного раствора пенообразователя ПО-6% требуется 0,53 л/с, а для немодифицированной воды – 1,3 л/с. Температура воздуха в зоне эвакуации при использовании наносуспензии снижалась до 50 °С по сравнению с 85 °С для пенообразователя и 140 °С для воды.

Полученные результаты открывают несколько практических направлений совершенствования огнетушащих веществ и технологий пожаротушения.

Модификация воды углеродными наноструктурами в оптимальных концентрациях позволяет значительно сократить расход ОТВ при тушении пожаров класса «В» (горение жидких углеводородов), что особенно актуально для объектов нефтегазового комплекса, где каскадное развитие пожара представляет наибольшую угрозу. Применение модифицированных составов в роботизированных установках пожаротушения обеспечивает термическую защиту конструкций и сокращение времени ликвидации очага.

Электрофизическая обработка воды ПЧМП, как безреагентный метод, может применяться непосредственно в линии подачи ОТВ, не требуя дополнительных расходных материалов. Время сохранения модифицированных свойств (до 18 часов) достаточно для оперативного использования при ликвидации пожаров.

Комбинирование электрофизической и реагентной модификации потенциально может обеспечить аддитивный или синергетический эффект, что требует дальнейших экспериментальных исследований. Уже существующие данные свидетельствуют о том, что электрофизическое воздействие способствует упорядочиванию наночастиц в материале, улучшая эксплуатационные характеристики модифицированных составов.

Выводы

1. Экспериментальные данные, полученные при электрофизической обработке воды ПЧМП, и имеющиеся в научно-технической литературе результаты исследований модификации водосодержащих ОТВ углеродными наноструктурами позволяют подтвердить, что супрамолекулярные преобразования надмолекулярной структуры воды оказывают определяющее влияние на её физико-химические свойства, непосредственно связанные с огнетушащей эффективностью.

2. Снижение поверхностного натяжения воды на 11 - 28,9% при электрофизической обработке и на 25% при введении МУНТ в концентрации 1,0% об. обеспечивает существенное улучшение смачивания гидрофобных углеводородных поверхностей, интенсификацию испарения на 11 - 40% и сокращение времени тушения модельных очагов пожара класса «В» в 4 - 5 раз.

3. Управление коллигативными свойствами воды как посредством электрофизического воздействия, так и реагентной модификации наночастицами предопределяет возможность совершенствования огнетушащих жидкостей и систем противопожарной защиты объектов.

4. Установленное существование оптимальных концентраций наночастиц (аналога

ККМ для ПАВ), при которых огнетушащая эффективность максимальна, является важным коллоидно-химическим результатом, определяющим технологические параметры приготовления модифицированных ОТВ.

Список источников

1. Камлюк, А.Н. Методы применения компрессионной пены для тушения пожаров / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин // Техносферная безопасность. – 2018. – № 3(20). – С. 3-14. – EDN VATCKC.
2. Волик, А.С. Влияние электрического поля на огнетушащие свойства воздушно-механической пены / А.С. Волик, А. В. Квашнин, Г.К. Ивахнюк // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2020. – № 3(55). – С. 103-107. – EDN BZSSAC.
3. Kumar A., Singh R., Sharma P. Role of hydrophilic and hydrophobic nanoparticles in foam-based fire suppression systems // Fire Technology. - 2022. Vol. 58(4). P. 1567–1584. DOI: 10.1007/s10694-022-01245-z.
4. Булатов, Н.Н. Коллоидно-химические и пожарно-технические свойства CO₂-газонаполненных компрессионных пен / Н. Н. Булатов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13, № 3(67). – С. 194-198. – EDN DDDGIC.
5. Волик, А.С. Влияние электрофизической обработки воды на пожарно-технические характеристики модифицированной воздушно-механической пены / А.С. Волик, Н.Н. Булатов, Н.И. Шешина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12, № 4(64). - С. 288-293. – EDN IITSGS.
6. Применение компрессионной пены при тушении пожаров объектов нефтегазового комплекса при отрицательных температурах / М.В. Алешков, В.Д. Федяев, А.С. Гумиров, А.А. Шульпинов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2020. – № 1. – С. 8-15. – DOI 10.25257/FE.2020.1.8-15. – EDN NMBZHS.
7. Сизонова, Н.А. Средства получения и перспективы применения компрессионной пены в пожаротушении / Н.А. Сизонова // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2024. – № 2. – С. 146-155. – DOI 10.61260/2218-130X-2024-2-146-155. – EDN YVSXYC.
8. Скорупич, И.С. Экспериментальные исследования подачи струи компрессионной пены / И.С. Скорупич, А.В. Грачулин, К.Е. Шинкоренко // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6, № 2. – С. 201-210. – DOI 10.33408/2519-237X.2022.6-2.201. – EDN ISBVBU.
9. Проблемы использования компрессионной пены для тушения пожаров в зданиях повышенной этажности с применением беспилотных авиационных систем / Д.М. Гордиенко,

Е.В. Павлов, Ю.Н. Осипов [и др.] // Пожарная безопасность. – 2019. – № 3(96). – С. 42-46. – EDN TFKZVQ.

10. Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, John P. O'Connell. The properties of gases and liquids. 5th edition. McGraw-Hill Book Company. New York, 2001, 768 p.

11. Xuhui Z.Y., Yueyong W. Application research of new foam fire extinguishing device based on hot oil fire of full-size transformer. Beijing China. 2021. P. 5–15.

12. Lou M., Jia H., Lin Z. Study on fire extinguishing performance of different foam extinguishing agents in diesel pool fire // Results in Engineering. 2023. № 17. P. 67–72.

13. Иванов А.В. Тушение модельных очагов класса "В" наномодифицированными огнетушащими составами: закономерности и эффекты / А.В. Иванов // Техносферная безопасность. -2022. - № 4(37). - С. 34-44.

14. Пустовалов И.А. Добавки для повышения эффективности тонкораспыленной воды при тушении пожаров нефтепродуктов / И.А. Пустовалов, А.В. Иванов // Техносферная безопасность. - 2024. - № 1(42). - С. 2-11.

References

1. Kamlyuk, A.N. Methods of applying compression foam to extinguish fires / A.N. Kamlyuk, A.V. Grachulin // Technosphere safety. – 2018. – № 3(20). – Pp. 3-14. – EDN VATCKC.

2. Volik, A.S. The influence of an electric field on the extinguishing properties of air-mechanical foam / A.S. Volik, A.V. Kvashnin, G.K. Ivakhnyuk // Problems of risk management in the technosphere. – 2020. – № 3(55). – Pp. 103-107. – EDN BZSSAC.

3. Kumar A., Singh R., Sharma P. Role of hydrophilic and hydrophobic nanoparticles in foam-based fire suppression systems // Fire Technology. - 2022. Vol. 58(4). P. 1567–1584. DOI: 10.1007/s10694-022-01245-z.

4. Bulatov, N.N. Colloidal-chemical and fire-technical properties of CO₂-gas-filled compression foams / N. N. Bulatov // XXI century: results of the past and problems of the present plus. – 2024. – Vol. 13, No. 3(67). – pp. 194-198. – EDN DDDGIC. Mironov V.L., Klimov A.V. Electrophysical methods of exposure to aqueous surfactant solutions // Colloidal Journal. - 2022. Vol. 84(3). pp. 312-320. DOI: 10.31857/S002329442203009X.

5. Volik, A.S. The influence of electrophysical water treatment on the fire-technical characteristics of modified air-mechanical foam / A.S. Volik, N.N. Bulatov, N.I. Sheshina // XXI century: results of the past and problems of the present plus. – 2023. – Vol. 12, No. 4(64). - Pp. 288-293. – EDN IITSGS.

6. The use of compression foam in extinguishing fires of oil and gas facilities at subzero temperatures / M.V. Aleshkov, V.D. Fedyaev, A.S. Gumirov, A.A. Shulpinov // Fires and

emergencies: prevention, elimination. – 2020. – No. 1. – pp. 8-15. – DOI 10.25257/FE.2020.1.8-15. – EDN NMBZHS.

7. Sizonova, N.A. Means of obtaining and prospects for the use of compression foam in firefighting / N.A. Sizonova // Scientific and analytical journal Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. – 2024. – No. 2. – pp. 146-155. – DOI 10.61260/2218-130X-2024-2-146-155. – EDN YVSYXC.

8. Skorupich, I.S. Experimental studies of the supply of a compression foam jet / I.S. Skorupich, A.V. Grachulin, K.E. Shinkorenko // Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus. – 2022. – Vol. 6, No. 2. – pp. 201-210. – DOI 10.33408/2519-237X.2022.6-2.201. – EDN ISBVBU.

9. Problems of using compression foam to extinguish fires in high-rise buildings using unmanned aircraft systems / D.M. Gordienko, E.V. Pavlov, Yu.N. Osipov [et al.] // Fire safety. – 2019. – № 3(96). – Pp. 42-46. – EDN TFKZVQ.

10. Bruce E. Poling, John M. Prausnitz, John P. O'Connell. The properties of gases and liquids. 5th edition. McGraw-Hill Book Company. New York, 2001, 768 p.

11. Xuhui Z.Y., Yueyong W. Application research of new foam fire extinguishing device based on hot oil fire of full-size transformer. Beijing China. 2021. pp. 5-15.

12. Lou M., Jia H., Lin Z. Study on fire extinguishing performance of different foam extinguishing agents in diesel pool fire // Results in Engineering. 2023. No. 17. pp. 67-72.

13. Ivanov A.V. Extinguishing of model class "B" foci with nanomodified extinguishing agents: patterns and effects / A.V. Ivanov // Technosphere safety. -2022. - № 4(37). - Pp. 34-44.

14. Pustovalov I.A. Additives to increase the efficiency of finely dispersed water in extinguishing fires of petroleum products / I.A. Pustovalov, A.V. Ivanov // Technosphere safety. - 2024. - № 1(42). - Pp. 2-11.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.