

---

---

## ТРУДЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

---

---

Научная статья

УДК 614.844.2; DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-196-203

### **РАЗРАБОТКА НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО ОГНЕТУШАЩЕГО СОСТАВА ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ**

✉ Киселева Виктория Сергеевна.

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

✉ [s-kiseleva1@mail.ru](mailto:s-kiseleva1@mail.ru)

*Аннотация.* Цель исследований заключается в обосновании возможности применения углеродных наноструктур в роботизированных установках пожаротушения на объектах с обращением нефтепродуктов. В работе представлены результаты измерений поверхностного натяжения и вязкости воды со смачивателем, модифицированных углеродными наноструктурами (астраленами), а также определения массовой скорости выгорания легковоспламеняющейся жидкости в условиях подачи огнетушащего вещества. Представлены результаты измерений времени тушения модельного очага пожара класса «В» и времени термической деструкции пленки пенообразователя на поверхности горючей жидкости. На основании исследований был сделан вывод о том, что огнетушащие составы, модифицированные астраленами, целесообразно применять в роботизированных установках пожаротушения на объектах с обращением нефтепродуктов с целью обеспечения тепловой защиты и сокращения времени ликвидации пожара.

*Ключевые слова:* роботизированные установки пожаротушения, огнетушащий состав, поверхностно-активные вещества, углеродные наноструктуры, тепловая защита, раствор пенообразователя

**Для цитирования:** Киселева В.С. Разработка наномодифицированного огнетушащего состава для роботизированных установок пожаротушения на объектах транспортировки нефтепродуктов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 3 (67). С. 196–203. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-196-203.

Scientific article

### **DEVELOPMENT OF A NANOMODIFIED FIRE EXTINGUISHING COMPOSITION FOR ROBOTIZED FIRE EXTINGUISHING INSTALLATIONS AT OIL PRODUCTS TRANSPORTATION FACILITIES**

✉ Kiseleva Viktoria S.

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

✉ [s-kiseleva1@mail.ru](mailto:s-kiseleva1@mail.ru)

*Abstract.* The purpose of the research is to substantiate the possibility of using carbon nanostructures in robotic fire extinguishing installations at facilities with the circulation of petroleum products. The paper presents the results of measuring the surface tension and viscosity of water with a wetting agent modified with carbon nanostructures (astralens), as well

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2023

as determining the mass burnout rate of a flammable liquid under the conditions of supplying a fire extinguishing agent. The results of measurements of the extinguishing time of a class B model focus and the time of thermal destruction of a foaming agent film on the surface of a combustible liquid are presented. Based on the research, it was concluded that fire extinguishing compositions modified with astralenes should be used in robotic fire extinguishing installations at facilities with the circulation of petroleum products in order to provide thermal protection and reduce the time to extinguish a fire.

*Keywords:* robotic fire extinguishing installations, fire extinguishing composition, surfactants, carbon nanostructures, thermal protection, foam concentrate solution

**For citation:** Kiseleva V.S. Development of a nanomodified fire extinguishing composition for robotized fire extinguishing installations at oil products transportation facilities // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 3 (67). P. 196–203. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-196-203.

## Введение

Наиболее вероятными последствиями развития аварийных ситуаций на объектах транспортировки нефтепродуктов являются пожары и взрывы, сопровождающие воспламенением паров нефтепродуктов, образованием ударной волны с фронтом избыточного давления [1]. Кроме того, в последнее время объекты хранения и транспортировки нефтепродуктов становятся подвержены диверсиям и террористическим актам [2]. В таких условиях создается угроза каскадного развития пожара, который мгновенно захватывает большие площади объекта, что создает дополнительные сложности для его ликвидации [3].

Для сокращения времени оперативного реагирования на развитие пожароопасной ситуации и исключения поражения людей опасными факторами пожара (ОФП) все чаще применяются роботизированные установки пожаротушения (РУП). Развитие технологий пожаротушения с помощью РУП неотъемлемым образом связано с разработкой современных, экологически чистых, высокоэффективных огнетушащих и защитных составов (ОТВ), дающих возможность их использования в условиях недостаточного водоснабжения [4], воздействия ОФП. Путями повышения эффективности РУП является возможность увеличения скорости и точности выполнения заданной последовательности действий установки в сравнении с обычными техническими средствами пожаротушения (ОТС).

Одним из способов повышения эффективности РУП является использование ОТВ, минимизирующих время ликвидации горения нефтепродукта. Это достигается за счет применения поверхностно-активных веществ (ПАВ), обеспечивающих снижение поверхностного натяжения огнетушащей жидкости и увеличение стойкости пленки пенообразователя.

Исследования [5] показали возможность повышения эффективности ОТВ и защитных составов в условиях горения нефтепродуктов за счет применения углеродных наноструктур (УНС). Однако до настоящего времени исследования по оценке огнетушащей способности установок пожаротушения с применением ПАВ, модифицированных УНС, не проводились. Целью настоящего исследования было физико-химическое обоснование компонентов рецептур огнетушащих составов на основе воды с ПАВ для применения в РУП на объектах нефтегазового комплекса.

## Материалы и методы исследования

В качестве материалов для исследования использовались: вода и растворы синтетического пенообразователя (ПО) типа «S» (2 и 6 масс %) [6], модифицированные УНС (астраленами) [7], в концентрации 0,01–0,1 масс. %.

Для всех образцов ОТВ были проведены измерения поверхностного натяжения (методом отрыва капель) [8], вязкости (сталагмометрическим методом) [9]. Определялась массовая скорость выгорания легковоспламеняющейся жидкости (ЛВЖ) (бензин марки «АИ-92»

ТУ-0251-001-12150839–2015) в условиях подачи ОТВ с интенсивностью  $0,1 \text{ л}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$  [10]. Также были произведены измерения времени тушения модельного очага класса «В» модифицированными ОТВ и термической деструкции пленки ПО на поверхности горючей жидкости [5].

### Результаты исследования

Результаты измерений поверхностного натяжения модифицированных ОТВ приведены на рис. 1.

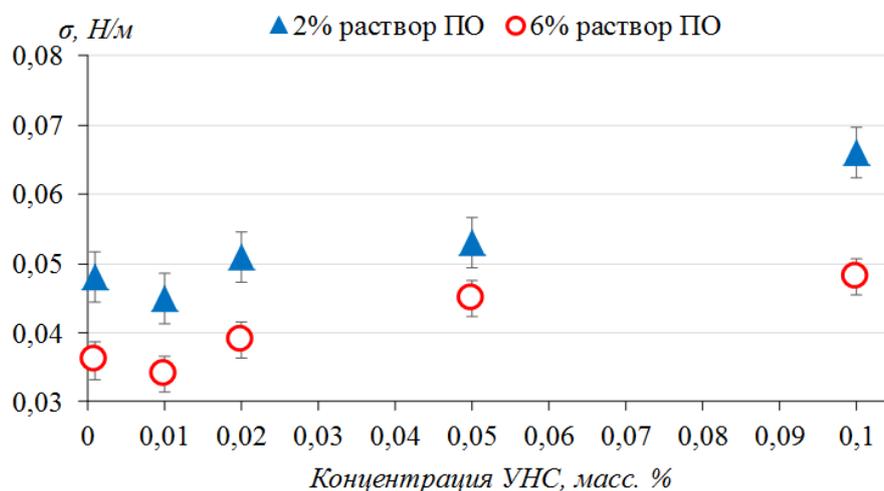


Рис. 1. Зависимость поверхностного натяжения модифицированных ОТВ от концентрации УНС

Диспергирование УНС в ОТВ в диапазоне концентраций 0,01–0,02 не приводит к значимому изменению поверхностного натяжения.

При увеличении концентрации УНС свыше 0,01 масс. % происходит рост поверхностного натяжения для всех модифицированных ОТВ. Максимальное изменение значений поверхностного натяжения наблюдалось для концентрации УНС 0,1 масс. % (для 2 % раствора ПО – увеличение на 31 %, для 6 % раствора ПО – увеличение на 49 %).

Результаты измерений кинематической вязкости растворов ПО при температуре  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  приведены на рис. 2.

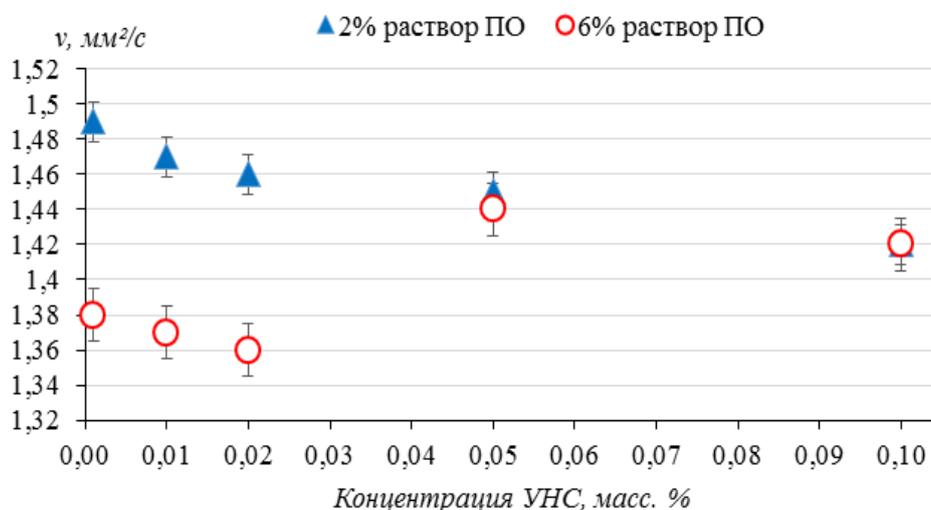


Рис. 2. Зависимость кинематической вязкости модифицированных ОТВ от концентрации УНС

Максимальная кинематическая вязкость наблюдается при концентрации ПО 2 масс. % и концентрации астраленов 0,01 масс. %, а минимальная – при 6 масс. % и концентрации астраленов 0,02 масс. %.

Результаты определения массовой скорости выгорания ЛВЖ в условиях подачи модифицированных ОТВ представлены на рис. 3.

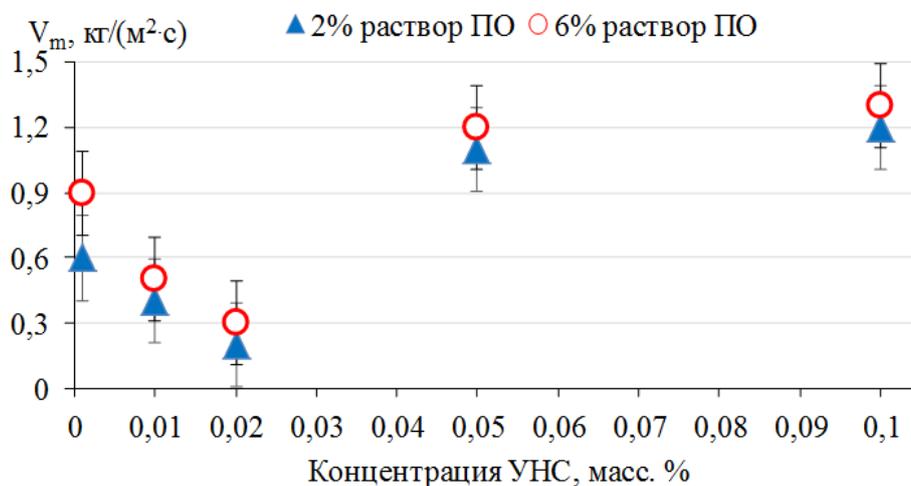


Рис. 3. Зависимость массовой скорости выгорания бензина от концентрации УНС в ОТВ

На основании полученных данных можно сделать вывод, что наименьшая массовая скорость выгорания наблюдалась для ПО 2 масс. % и 6 масс. % с концентрацией УНС 0,02 масс. %.

Результаты исследований влияния концентрации УНС на время ликвидации модельного очага пожара класса «В» модифицированными ОТВ представлены на рис. 4.

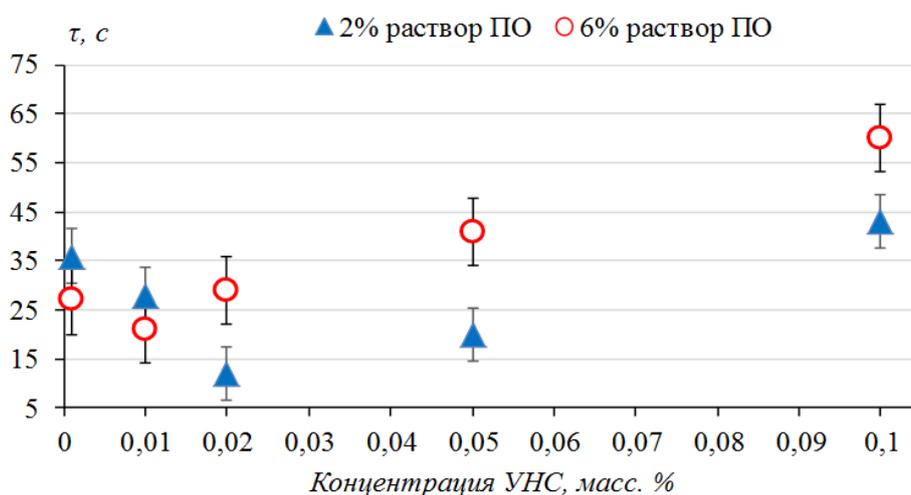


Рис. 4. Зависимость времени тушения модельного очага класса «В» от концентрации УНС в ОТВ

Из полученных результатов можно сделать вывод, что наилучший огнетушащий эффект достигается при использовании ПО 2 масс. % с концентрацией УНС 0,02 масс. %, а для ПО 6 масс. % – с концентрацией УНС 0,1 масс. %.

Данные о времени разрушения пленки ПО в зависимости от концентрации УНС представлены на рис. 5.

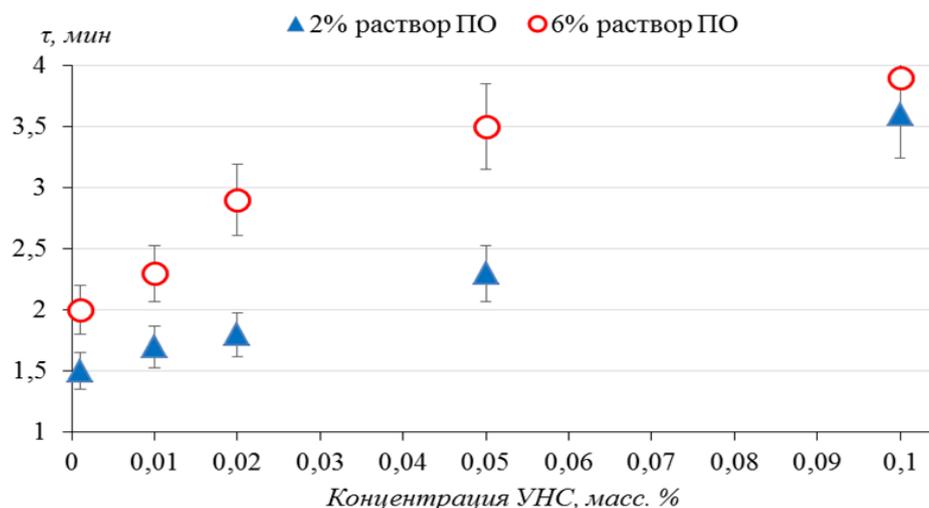


Рис. 5. Зависимости времени разрушения пленки раствора ПО от концентрации УНС

Наибольшее значение времени разрушения пленки ПО в зависимости от концентраций пенообразователя 2 масс. % и 6 масс. % и концентрации астраленов 0,1 масс. %, наименьшее значение времени разрушения пленки ПО в зависимости от концентраций пенообразователя 2 масс. % и 6 масс. % и концентрации астраленов 0,01 масс. %.

### Обсуждение результатов

Горение нефтепродуктов сопровождается резким увеличением температуры в зоне горения, характерное для кривой углеводородного пожара:

$$T = T_0 + 1080 \cdot (1 - 0,325e^{-0,167\tau} - 0,675e^{-2,5\tau}),$$

где  $T$  – текущая температура в помещении, °C;  $T_0$  – температура в помещении на момент возгорания, °C;  $\tau$  – время от начала пожара, мин.

Для данных условий достижения температур, приводящих к выходу из строя оборудования РУП, без использования тепловой защиты, при критических достижениях теплового потока [11].

Снижение температуры в зоне горения нефтепродуктов может быть достигнуто путем нарушения теплового баланса [12]:

$$\frac{dq^+}{d\delta} = \frac{dq^-}{d\delta},$$

где  $q^+$  – тепловыделение при сгорании нефтепродуктов;  $q^-$  – теплопотери.

$$q^+ = Q_n K_0 \varphi_{\Gamma}^h \varphi_{OK}^m e^{\left(\frac{E_a}{RT}\right)},$$

где  $Q_n$  – низшая теплота сгорания горючего;  $K_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $\varphi_g$  и  $\varphi_{ок}$  – концентрация горючего и окислителя, соответственно;  $h$  и  $m$  – порядок реакции по горючему и окислителю, соответственно;  $E$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура.

$$q^- = q_{конв} + q_{изл} + q_{исп},$$

где  $q_{конв}$  – тепло, отводимое конвекцией;  $q_{изл}$  – тепло, отводимое излучением;  $q_{исп}$  – тепло, отводимое испарением.

При подаче ОТВ происходит увеличение теплотерь из зоны горения и ее охлаждение конвекционной зоны до температуры потухания [13]:

$$T_{пот} = T_{ад} + \Delta T,$$

где  $T_{ад}$  – адиабатическая температура, К;  $\Delta T$  – изменение температуры, К.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что применение наномодифицированных ОТВ ведет к снижению интенсивности испарения ЛВЖ, охлаждению зоны горения, что в конечном счете определяет снижение времени ликвидации горения нефтепродуктов.

Незначительное изменение вязкости ОТВ и увеличение «срока жизни» пленки ПАВ позволяют не только применять модифицированный состав в уже использующихся РУП, но и обеспечивать повышение тепловой защиты оборудования за счет сокращения интенсивности испарения нефтепродуктов под слоем пленки ПАВ. При подаче модифицированного состава происходит охлаждение зоны горения, уменьшение массовой скорости выгорания ЛВЖ, что в конечном счете обеспечивает сокращение времени тушения пожара и уменьшение тепловой нагрузки на конструктивные элементы технологических установок на объектах транспортировки нефтепродуктов.

Таким образом, увеличение огнетушащей способности РУП приводит к снижению теплового потока и температуры в зоне горения, тем самым достигается задача повышения теплозащитной эффективности за счет подачи модифицированных огнетушащих веществ.

### Заключение

1. Значительные изменения поверхностного натяжения растворов ПО происходят при концентрации УНС более 0,2 масс. %.

2. Измерения вязкости растворов ПО показали небольшое (до 15 %) увеличение измеренных значений в интервале концентрации астраленов от 0,1 до 1,0 масс. %, что позволяет применять наномодифицированных ОТВ в существующих РУП.

3. Исследования влияния концентрации УНС на разрушение пленки ПО, которое показало, что диспергирование астраленов в растворы ПО в несколько раз увеличивает «время жизни пены», в особенности для концентраций пенообразователя 2 масс. % и 6 масс. %.

4. Исследования влияния концентрации УНС на время ликвидации горения модельных очагов класса «В» модифицированными ПО показали, что наилучшими огнетушащими свойствами (сокращение времени тушения на 25–40 %) обладают составы с содержанием пенообразователя 2 и 6 масс. % с содержанием УНС в растворе 0,01–0,2 масс. %. Для данных составов не наблюдалось повторного воспламенения ЛВЖ после тушения, что может быть объяснено термической стойкостью пленки ПО.

Таким образом, на основании полученных данных можно сделать вывод, что модифицированные огнетушащие составы целесообразно применять при тушении пожаров РУП на объектах транспортировки нефтепродуктов с целью обеспечения тепловой защиты и сокращения времени ликвидации пожара.

**Список источников:**

1. Рожков Д.М., Седов Д.В., Бемяк А.Л. Исследование величины пожарного риска при транспортировке и хранении нефтепродуктов в условиях нефтебазы // XXI век. Техносферная безопасность. 2022. Т. 7. № 2 (26). С. 168–178.
2. Швырков С.А. Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара: дис. ... д-ра техн. наук. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2013.
3. Методы повышения безопасности ведения работ по тушению пожара в резервуарных парках / С.А. Имамутдинов [и др.] // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2019. № 1. С. 90–91.
4. Таранцев А.А., Пивоваров Н.Ю. Расчетная оценка водоотдачи тупиковых сетей наружного противопожарного водоснабжения // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 9. С. 73–78.
5. Физический механизм и способ тушения жидких углеводородов модифицированными суспензиями воды с углеродными наноструктурами / А.В. Иванов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность / Fire and explosion safety. 2019. Т. 28. № 1. С. 22–34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.22-34.
6. Пустовалов И.А., Иванов А.В. Методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой на объектах нефтегазового комплекса // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10. № 4. С. 187–192.
7. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles / A.I. Shames [et al.] // Diamond and related materials. 2009. Vol. 8. № 2-3. P. 505–510.
8. Tanvir, S., Qiao L., Surface tension of nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials // Nanoscale research letters. 2012. Т. 7. № 226. С. 1–10. DOI: 10.1186/1556-276X-7-226.
9. Soheli Mursheda S.M., Patrice E. A state of the art review on viscosity of nanofluids // Renewable and sustainable energy reviews. 2017. № 76. P. 1134–1152.
10. Государственный стандарт Союза ССР ГОСТ 12.1.044–89. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. Доступ из информ.-правового портала «Гарант».
11. Исследование теплопередачи через двустенный теплозащитный экран робота-пожарного / А. Ştefan [et al.] // Машины. 2022. Т. 10. № 10. С. 942.
12. Горшков В.И. Тушение пламени горючих жидкостей // Монография. 2007. С. 174–181.
13. Nolan D.P. Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical and related facilities. 2nd ed. Elsevier Inc., 2011. 340 p. DOI: 10.1016/B978-1-4377-7857-1.00039-2.

**References:**

1. Rozhkov D.M., Sedov D.V., Belyak A.L. Issledovanie velichiny pozharnogo riska pri transportirovke i hranenii nefteproduktov v usloviyah neftebazy // XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2022. Т. 7. № 2 (26). S. 168–178.
2. Shvyrkov S.A. Pozharnyj risk pri kvazimgnovennom razrushenii neftyanogo rezervuara: dis. ... d-ra tekhn. nauk. M.: Akad. GPS MCHS Rossii, 2013.
3. Metody povysheniya bezopasnosti vedeniya rabot po tusheniyu pozhara v rezervuarnykh parkah / S.A. Imamutdinov [i dr.] // Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo». 2019. № 1. S. 90–91.
4. Tarancev A.A., Pivovarov N.Yu. Raschetnaya ocenka vodootdachi tupikovykh setej naruzhnogo protivopozharnogo vodosnabzheniya // Pozharovzryvbezopasnost'. 2012. Т. 21. № 9. S. 73–78.
5. Fizicheskij mekhanizm i sposob tusheniya zhidkih uglevodorodov modificirovannymi suspenziyami vody s uglerodnymi nanostrukturami / A.V. Ivanov [i dr.] // Pozharovzryvbezopasnost' / Fire and explosion safety. 2019. Т. 28. № 1. S. 22–34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.22-34.

6. Pustovalov I.A., Ivanov A.V. Metodika povysheniya ognetyushashchej sposobnosti modul'nyh ustanovok pozharotusheniya tonkoraspylennoj vodoj na ob'ektah neftegazovogo kompleksa // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. 2021. T. 10. № 4. S. 187–192.
7. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles / A.I. Shames [et al.] // Diamond and related materials. 2009. Vol. 8. № 2-3. P. 505–510.
8. Tanvir, S., Qiao L., Surface tension of nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials // Nanoscale research letters. 2012. T. 7. № 226. S. 1–10. DOI: 10.1186/1556-276X-7-226.
9. Sohel Mursheda S.M., Patrice E. A state of the art review on viscosity of nanofluids // Renewable and sustainable energy reviews. 2017. № 76. P. 1134–1152.
10. Gosudarstvennyj standart Soyuza SSR GOST 12.1.044-89. Sistema standartov bezopasnosti truda. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov. Nomenklatura pokazatelej i metody ih opredeleniya. Dostup iz inform.-pravovogo portala «Garant».
11. Issledovanie teploperedachi cherez dvustennyj teplozashchitnyj ekran robota-pozharnogo / A. Ştefan [et al.] // Mashiny. 2022. T. 10. № 10. S. 942.
12. Gorshkov V.I. Tushenie plameni goryuchih zhidkostej // Monografiya. 2007. S. 174–181.
13. Nolan D.P. Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical and related facilities. 2nd ed. Elsevier Inc., 2011. 340 p. DOI: 10.1016B978-1-4377-7857-1.00039-2.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 27.04.2023; одобрена после рецензирования: 28.08.2023; принята к публикации: 31.08.2023

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 27.04.2023; approved after review: 28.08.2023; accepted for publication: 31.08.2023

*Информация об авторах:*

**Киселева Виктория Сергеевна**, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: s-kiseleva1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0257-262X>, SPIN-код: 2341-7695

*Information about the author:*

**Kiseleva Viktoria S.**, adjunct of the faculty of training highly qualified personnel of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: s-kiseleva1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0257-262X>, SPIN: 2341-7695