

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 5. С. 84–97
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021; 30(5):84-97

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.4:539

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.05.84-97>

Экспериментальное исследование огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, модифицированной астраленами

Илья Андреевич Пустовалов ✉

Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий,
Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью исследования было изучение влияния одного из видов углеродных наноструктур, астраленов, на процессы тушения пламени нефтепродуктов тонкораспыленной водой.

Материалы и методы исследований. Объектом исследования являются огнетушащие суспензии, применяемые в модульных установках пожаротушения тонкораспыленной водой (МУПТВ) для тушения пожаров нефтепродуктов. В качестве исследуемого огнетушащего вещества использовалась дистиллированная вода, модифицированная астраленами с концентрацией наноструктур от 0,05 до 1,0 об. %. Экспериментальная часть включала исследование теплофизических характеристик огнетушащих жидкостей: плотности, динамической вязкости, поверхностного натяжения, удельной теплоты парообразования. Также были проведены исследования по определению скорости испарения, распределения размеров капель распыленных огнетушащих составов и времени тушения модельного очага возгорания нефтепродуктов.

Результаты исследования. Диспергирование наноструктур в составе огнетушащих жидкостей позволяет увеличить их плотность, поверхностное натяжение на 20,6 %, удельную теплоту парообразования при концентрации астраленов 0,25 и 0,5 об. % и динамическую вязкость при температуре 20 °С на 6,68...15,38 %. Проведены исследования по определению скорости испарения капель модифицированной огнетушащей жидкости. Установлено, что при повышении концентрации наноструктур с 0,05 до 0,5 об. % скорость испарения снижается.

Скорость движения капель возрастает при диспергировании астраленов от 0 до 0,25 об. %, однако, при дальнейшем повышении концентрации астраленов до 1,0 об. % скорость снижается.

Время тушения определялось с использованием лабораторной установки пожаротушения. Распределение размеров капель огнетушащих составов находится в интервале от 20 до 160 мкм.

На установке МУПТВ наибольшая огнетушащая способность достигалась при применении огнетушащего состава с концентрацией астраленов 0,5 об. %.

Выводы. Модифицирование огнетушащего состава углеродными наноструктурами приводит к изменению его теплофизических характеристик. Применение данного состава в составе МУПТВ на объектах с обращением нефтепродуктов комплекса позволит повысить ее огнетушащую способность. Дальнейшими направлениями исследований являются разработка способов стабилизации астраленов в суспензиях и адаптация к условиям низких температур.

Ключевые слова: наножидкости; тушение пожаров; теплофизические характеристики; время тушения; нефтегазовый комплекс

Для цитирования: Пустовалов И.А. Экспериментальное исследование огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, модифицированной астраленами // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 5. С. 84–97. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.84-97

✉ Пустовалов Илья Андреевич, e-mail: ilya_pustovalov_2020@bk.ru

An experimental study of the fire extinguishing ability of modular fire extinguishing installations if astralene-modified water mist is used

Ilya A. Pustovalov ✉

Saint Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The aim of the research project is to study the effect produced by one type of carbon nanostructures, or astralenes, on processes of extinguishing oil product flame using finely sprayed water.

Materials and research methods. The research is focused on fire extinguishing suspensions used in modular water mist installations for the fire extinguishing of oil products. Astralene-modified distilled water, having the volumetric concentration of nanostructures equal to 0.05–1.0 percent, was used as a fire extinguishing substance under research. The experiment was focused on the study of thermophysical characteristics of fire extinguishing liquids, such as density, dynamic viscosity, surface tension, specific heat of vaporization. Also, studies were carried out to identify the rate of evaporation, the distribution of droplet sizes of sprayed fire extinguishing compositions, and the time needed to extinguish the model source of ignition of oil products.

Research results. The dispersion of nanostructures of fire-extinguishing liquids allows to increase their density, surface tension by 20.6 %, increase the specific heat of vaporization if the volumetric concentration of astralenes is equal to 0.25 and 0.5 %, and boost the dynamic viscosity by 6.68–15.38 % at the temperature of 20 °C. The research was carried out to find the rate of evaporation of droplets of the modified fire-extinguishing liquid. It was found that an increase in the volumetric concentration of nanostructures from 0.05 to 0.5 % causes reduction in the evaporation rate.

The droplet speed increases if the volumetric dispersion of astralenes goes up to 0 to 0.25 %. However, a further increase in the volumetric concentration of astralenes to 1.0 % causes a reduction in their speed.

The extinguishing time was identified using a laboratory fire extinguishing installation. The distribution of droplet sizes of fire-extinguishing compositions is in the range of 20 to 160 microns.

The fire extinguishing capacity of the installation was highest if a fire extinguishing composition had a 0.5 % volumetric concentration of astralenes.

Conclusions. The modification of a fire extinguishing composition by carbon nanostructures leads to a change in its thermophysical characteristics. The addition of this composition to the installation, used at facilities involved in the processing of petroleum products, will increase its fire extinguishing ability. Further areas of research may include the development of astralene stabilization methods for suspensions and adaptation to low temperatures.

Keywords: nanofluids; fire extinguishing; thermophysical characteristics; extinguishment time; oil and gas complex

For citation: Pustovalov I.A. An experimental study of the fire extinguishing ability of modular fire extinguishing installations if astralene-modified water mist is used. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(5):84-97. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.84-97 (rus).

✉ Ilya Andreevich Pustovalov, e-mail: ilya_pustovalov_2020@bk.ru

Введение

Применение тонкораспыленной воды является одним из наиболее экономичных и эффективных способов борьбы с пожарами. Пожары нефтепродуктов характеризуются быстрым развитием, достижением высоких температур (1100 °C), а также риском каскадного развития аварийной ситуации. В данных условиях применение модульных установок пожаротушения является технически обоснованным, так как позволяет ликвидировать возгорание на ранней стадии.

При проектировании модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой (МУПТВ) необходимо учитывать критическую интенсивность тушения пламени нефтепродукта, определяемую выражением (1):

$$I_{кр}^* = 155m^2 \sqrt[3]{\frac{mD}{\nu\rho}} \left[\frac{\rho T_k}{\rho_b (T_{cp} - T_0)} - 2 \right]^{-2}, \quad (1)$$

где m — массовая скорость выгорания топлива, кг/(м²·с⁻¹);

D — средний диаметр капли в струе распыленной воды, мкм.;

ν — кинематическая вязкость жидкости, (м²/с);

ρ , ρ_b — плотность горючей жидкости и воды, г/см³;

T_k — температура кипения жидкости, °C;

T_{cp} — средняя температура поверхности жидкости, °C;

T_0 — температура окружающей среды, °C [1].

Также значение критической интенсивности может быть выражено следующей формулой:

$$I_{кр}^m = cm(T_k - T_t)/r, \quad (2)$$

где m — массовая скорость выгорания жидкости, кг/(м²·с⁻¹);

T_k — температура кипения жидкости, К;

T_t — температура тушения, К;

c — удельная теплоемкость горючей жидкости, Дж/К;

r — удельная теплота парообразования огнетушащего вещества, Дж/кг [2].

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что снижение критической интенсивности возможно за счет уменьшения размеров распыленных частиц, увеличения плотности и удельной теплоты парообразования огнетушащей жидкости. Для этого необходимы модернизация оросителей [3, 4], увеличение давления в системах иницирования, разработка новых способов подачи огнетушащих составов, разработка новых огнетушащих составов [5–7].

Общим недостатком указанных способов модернизации является необходимость разработки новых технологических, конструктивных и организационных решений в системах ППЗ, что в конечном счете негативно сказывается на стоимости МУПТВ. Это снижает их конкурентоспособность на рынке пожарно-технической продукции.

В последние десятилетия при разработке технологических устройств и материалов в сферах энергетики, электроники, пожаротушения большое внимание уделяется созданию рецептур наножидкостей

с улучшенными технологическими характеристиками с использованием углеродных наноструктур в концентрациях до 1...2 об. % [8–10]. Отличительными особенностями наножидкостей являются улучшенные теплофизические характеристики при относительно стабильных показателях реологических свойств [11]. Это позволяет внедрять их в существующие установки и оборудование систем ППЗ производственных объектов.

Целью настоящей работы было экспериментальное исследование влияния астраленов на свойства огнетушащих суспензий, определяющих огнетушащую способность МУПТВ при ликвидации горения нефтепродуктов.

Материалы и методы исследований

Астралены, используемые в качестве наноматериала, диспергированного в дистиллированную воду, получают методом испарения графитовых анодов в электродуговом разряде [12], имеют структуру, состоящую из изогнутых графитовых слоев, диаметром 10...150 нм, с расстоянием между слоями графена 0,336 нм, средний размер пор — 20...60 нм. Астралены характеризуются высокой термической устойчивостью и в порошкообразном виде представляют собой крупные агломераты размером порядка 0,5...3 мкм [13].

Подготовка суспензий (см. таблицу) проводилась путем диспергирования углеродных наноструктур (УНС) с объемной концентрацией 0,05...1,0 об. % в суспензии DW при воздействии источника ультразвука (мощность — 1,2 кВт, частота — 50...60 Гц, время обработки — 30 мин).

Определение *плотности* огнетушащих суспензий проводилось пикнометрическим мето-

дом, согласно ГОСТ 18995.1–73¹. Использовался стеклянный пикнометр типа ПЖ-2-100 КШ 10/19, соответствующий требованиям ГОСТ 22524–77², объемом 100 мл марки АИ-95.

Определение *динамической вязкости* осуществлялось методом капиллярной вискозиметрии, согласно ГОСТ 33768–2015³. Использовался стеклянный капиллярный вискозиметр тип ВПЖ-2 с диаметром капилляра 0,56 мм, соответствующим требованиям ГОСТ 10028–81⁴.

Определение *коэффициента поверхностного натяжения* проводилось стагмометрическим методом, согласно ГОСТ 8433–81⁵. Использовался стеклянный стагмометр с впаянным капилляром диаметром 0,5 мм.

Определение *удельной теплоты парообразования* осуществлялось методом автоклавирования [14].

¹ ГОСТ 18995.1–73 (СТ СЭВ 1504–79). Продукты химические жидкие. Методы определения плотности (с Изменениями № 1, 2) : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 17 июля 1973 г. № 1740.

² ГОСТ 22524–77. Пикнометры стеклянные. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3) : введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 12 мая 1977 г. № 1178.

³ ГОСТ 33768–2015. Метод определения кинематической вязкости и расчет динамической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей (с Поправкой) : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 10 декабря 2015 г. № 48).

⁴ ГОСТ 10028–81. Вискозиметры капиллярные стеклянные. Технические условия : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 19 мая 1981 г. № 2461.

⁵ ГОСТ 8433–81. Вещества вспомогательные ОП-7 и ОП-10. Технические условия : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 24 февраля 1981 г. № 968.

Условные обозначения огнетушащих составов

Arbitrary symbols of fire extinguishing compositions

Условное обозначение The symbol	Тип огнетушащего вещества (ОТВ) Type of the firefighting agent
DW	Дистиллированная вода Distilled water
DW + Astr. 0,05 об. % DW + Astr. 0,05 volumetric concentration of astralenes	Суспензия из дистиллированной воды с астраленами в концентрации 0,05 об. % Distilled water with the 0.05 % volumetric concentration of astralenes
DW + Astr. 0,2 об. % DW + Astr. 0,2 volumetric concentration of astralenes	Суспензия из дистиллированной воды с астраленами в концентрации 0,2 об. % Distilled water with the 0.2 % volumetric concentration of astralenes
DW + Astr. 0,5 об. % DW + Astr. 0,5 volumetric concentration of astralenes	Суспензия из дистиллированной воды с астраленами в концентрации 0,5 об. % Distilled water with the 0.5 % volumetric concentration of astralenes
DW + Astr. 1,0 об. % DW + Astr. 1,0 volumetric concentration of astralenes	Суспензия из дистиллированной воды с астраленами в концентрации 1,0 об. % Distilled water with the 1.0 % volumetric concentration of astralenes

Определение *размера капель* огнетушащих суспензий осуществлялось путем анализа фотографий потоков капель ОТВ с использованием средств высокоскоростной (не менее 10^3 fps) цифровой фоторегистрации [13]. Далее обрабатывали фрагмент снимка размером $20\,000 \times 20\,000$ мкм в программном продукте Image Analysis 3.5 (разработчик — NT-MDT, г. Москва).

Для определения *скорости движения капель* на выходе из оросителя применялась лабораторная установка, представляющая из себя прямоугольный параллелепипед с размерами $0,6 \times 0,9$ м, выполненный из прозрачного материала (поликарбонатное стекло) и закачной баллон с огнетушащим веществом объемом 5,0 л под давлением 1,21 МПа. Выход огнетушащего вещества осуществлялся через сплинклерный ороситель, предназначенный для формирования капель менее 150 мкм. При помощи высокоскоростной съемки (не менее 10^3 fps) определялась скорость движения капель ОТВ [15].

Определение *скорости испарения капель* огнетушащих суспензий осуществлялось с использованием лабораторной установки, представляющей из себя источник света, тепла, термопару, зафиксированную на штативе, секундомер (рис. 1). На термопаре 3 с помощью дозатора размещали каплю огнетушащей суспензии 4. Фиксировали на капле излучение светодиодной лампы 1 мощностью 100 Вт. Подносили газовую горелку с пропан-гептановой смесью 5 и высокоскоростной камерой 6, осуществляли видеофиксацию процесса испарения.

Определение *времени тушения модельного очага пожара* проводилось в лабораторной установке (рис. 2). Время тушения модельных очагов пожара класса В оценивалось в соответствии с ГОСТ Р 53288-2009⁶. Методика, используемая при проведении эксперимента, описана в [16].

Для каждого образца огнетушащей суспензии проводилось не менее трех измерений.

Экспериментальная часть

Результаты измерений плотности огнетушащих суспензий

Диспергирование астраленов в концентрации 1,0 об. % в базовой жидкости для приготовления огнетушащей суспензии позволяет незначительно увеличить плотность жидкости — на 1,0 % при температуре 20 °С (рис. 3). Максимальный эффект наблюдается при нагреве исследуемой жидкости

⁶ГОСТ Р 53288–2009. Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Модульные установки пожаротушения тонкораспыленной водой автоматические. Общие технические требования. Методы испытаний: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 февраля 2009 г. № 63-ст.

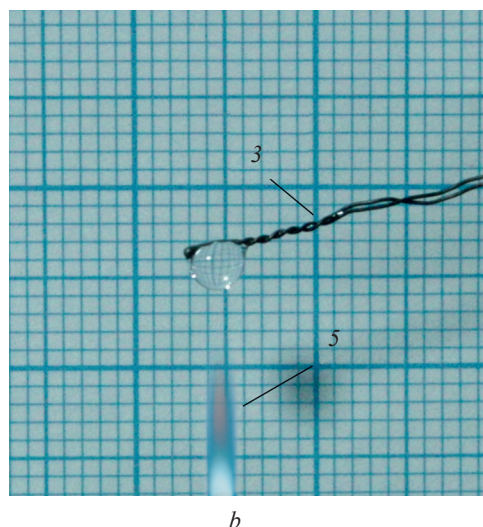
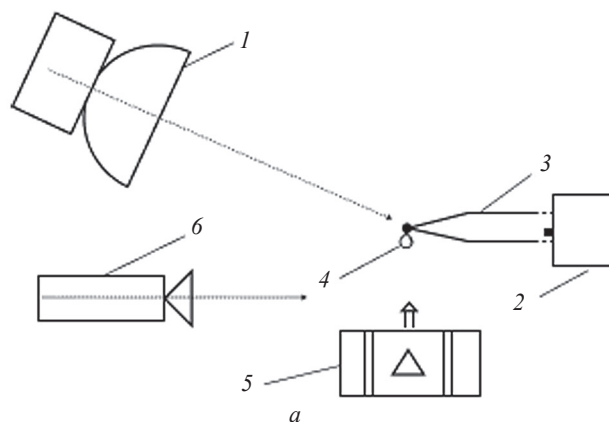


Рис. 1. Принципиальная схема *a* и фотография *b* установки для исследования скорости испарения капель огнетушащих суспензий: 1 — источник света; 2 — регистратор сигнала; 3 — термопара; 4 — капля жидкости; 5 — источник тепла; 6 — высокоскоростная камера

Fig. 1. The flow sheet *a* and the photograph *b* of an installation designated for the rate of evaporation of droplets of fire-extinguishing suspensions: 1 — source of light; 2 — signal recorder; 3 — thermocouple; 4 — droplet of liquid; 5 — source of heat; 6 — high speed camera

до температуры 50 °С, при которой плотность увеличивается на 1,82 %, (с 0,97 до 0,99 г/см³).

Наибольшее увеличение плотности — с 0,9789 до 0,99837 г/см³ — наблюдается у огнетушащей суспензии с концентрацией астраленов 0,2 об. % при температуре 50 °С (см. рис. 1). Увеличение показателя составляет 1,94 % по сравнению с базовой жидкостью.

Результаты измерений динамической вязкости огнетушащих суспензий

Полученные результаты показывают, что при диспергировании астраленов для приготовления огнетушащей суспензии динамическая вязкость при концентрациях 0,2 и 1,0 об. % повышается (рис. 4).

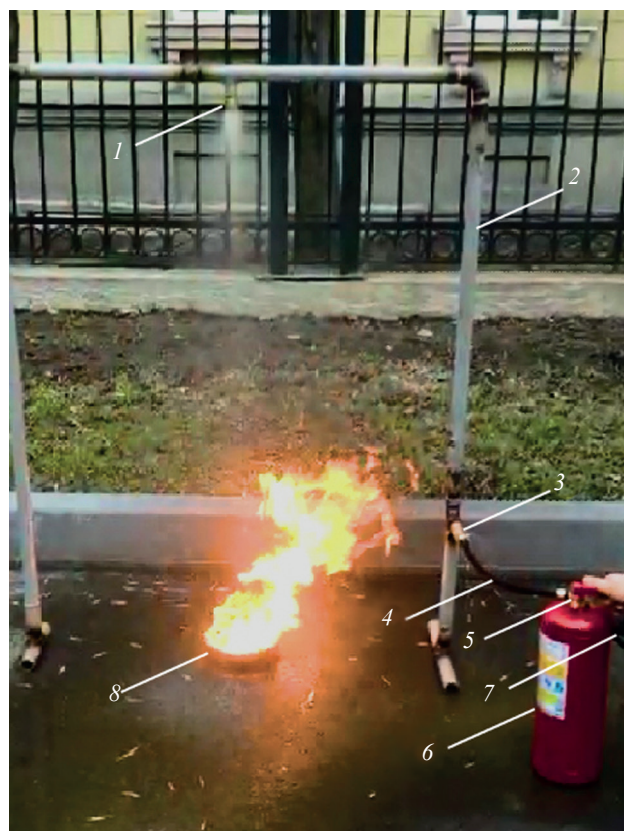


Рис. 2. Схема экспериментальной установки по тушению пожара: 1 — ороситель, формирующий тонкораспыленную воду; 2 — трубопровод; 3 — соединительная арматура; 4 — шланг высокого давления; 5 — пусковая арматура; 6 — емкость с огнетушащим веществом под давлением 12 атм; 7 — арматура для заправки огнетушащей суспензии; 8 — емкость с горючей жидкостью

Fig. 2. The layout of an experimental fire extinguishing installation: 1 — sprinkler that produces finely sprayed water; 2 — pipeline; 3 — connecting fittings; 4 — high pressure hose; 5 — actuating fittings; 6 — container with a fire extinguishing agent under the pressure of 12 atm; 7 — fittings for injecting the fire extinguishing suspension; 8 — container with flammable liquid

Наибольшее увеличение при температуре 20 °С наблюдается у суспензии с концентрацией 1,0 об. % — на 15,37 %, т.е. с 1038,8 до 1227,5 Па·с.

При увеличении концентрации астраленов не выявлено четко выраженной динамики в сторону повышения или снижения динамической вязкости огнетушащих суспензий с различной концентрацией наноструктур.

Результаты измерений коэффициента поверхностного натяжения огнетушащих суспензий

Анализ полученных результатов показал, что присутствие астраленов в составе исследуемой огнетушащей суспензии при концентрациях до 0,1 об. % уменьшает поверхностное натяжение на 2,8 %, а при дальнейшем увеличении концентрации астраленов — увеличивает его соответственно на 10,9...20,6 % по сравнению с дистиллированной водой. Максимальное значение поверхностного натяжения достигнуто при диспергировании в огнетушащий состав 1,0 об. % астраленов и при температуре 20 °С составляет 0,091 Н/м (рис. 5).

Результаты измерений удельной теплоты парообразования огнетушащих суспензий

С ростом концентрации астраленов в составе огнетушащей суспензии удельная теплота парообразования увеличивается. Данный эффект наблюдается при концентрациях от 0,05 до 0,5 об. % (рис. 6). Увеличение удельной теплоты парообразования при данных концентрациях составило 25 % (с 1950 до 2600 Дж/кг).

Следует отметить, что при достижении концентрации астраленов 1,0 об. % удельная теплота парообразования значительно снижается —

Плотность, г/см³ / Density, g/sm³

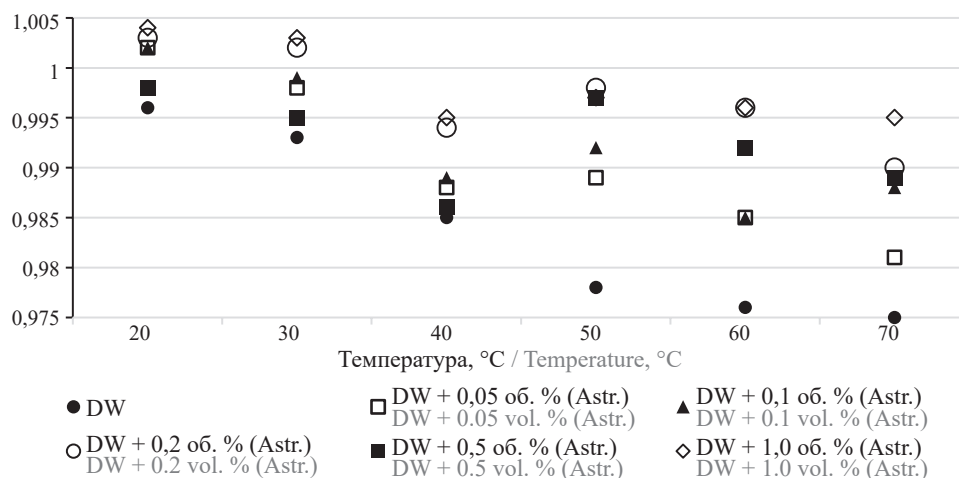


Рис. 3. Плотность огнетушащих суспензий DW с астраленами (Astr.)

Fig. 3. Density of fire extinguishing suspensions DW containing Astr

Динамическая вязкость, Па·с / Dynamic viscosity, Pa·s

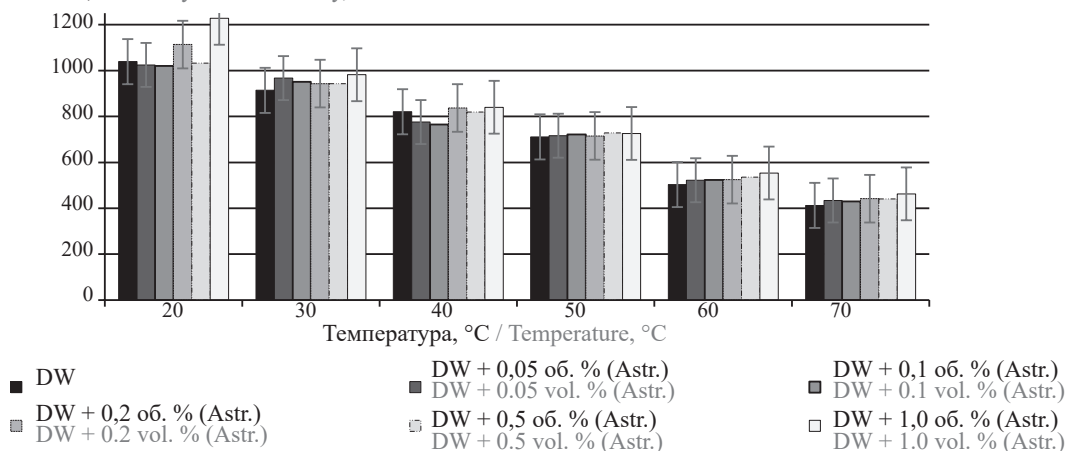


Рис 4. Динамическая вязкость огнетушащих суспензий DW с астраленами (Astr.)

Fig. 4. Dynamic viscosity of fire extinguishing suspensions DW with Astr.

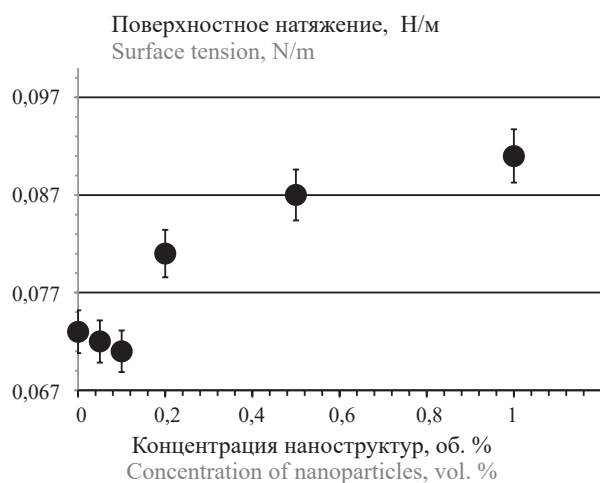


Рис. 5. Поверхностное натяжение огнетушащей суспензии в зависимости от концентрации наноструктур (от 0,05 до 1,0 об. %)

Fig. 5. The volumetric surface tension of the fire extinguishing suspension depending on the concentration of nanostructures (from 0.05 to 1.0 %)

до 1350 Дж/кг, что ниже соответствующих значений для базовой жидкости на 750 Дж/кг (35,7 %).

**Результаты измерений размера
капель огнетушащих суспензий,
формируемых на выходе
из сплинклерного оросителя
лабораторной модульной установкой
пожаротушения тонкораспыленной водой
(МУПТВ)**

Анализ данных, полученных в ходе эксперимента, показал, что при помощи лабораторной установки возможно получение капель, размеры которых соответствуют параметрам тонкораспыленной воды. На рис. 7 представлены фото капельных потоков огнетушащей суспензии на выходе из оросителя лабораторной установки МУПТВ.

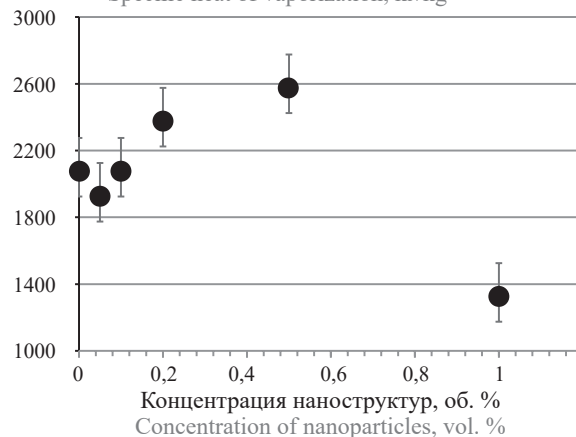
Удельная теплота парообразования, кДж/кг
Specific heat of vaporization, kJ/kg

Рис. 6. Изменение удельной теплоты парообразования огнетушащей суспензии в зависимости от концентрации наноструктур (от 0,05 до 1,0 об. %)

Fig. 6. A change in the specific heat of vaporization of the fire extinguishing suspension depending on the volumetric concentration of nanostructures (from 0.05 to 1.0 %)

Частота распределения диаметров капель для каждого вида огнетушащего вещества представлена в виде гистограмм на рис. 8.

Анализ распределения размеров капель показал, что наибольшее количество распыленных капель огнетушащих суспензий имеет размер от 60 до 100 мкм для всех образцов исследуемых ОТВ. Также можно отметить, что с увеличением количества астраленов в базовой жидкости наблюдается незначительное увеличение количества распыленных капель больших размеров.

**Результаты измерений скорости движения
капель тонкораспыленных огнетушащих
суспензий**

Анализ полученных данных показал, что скорость движения водяных потоков находится

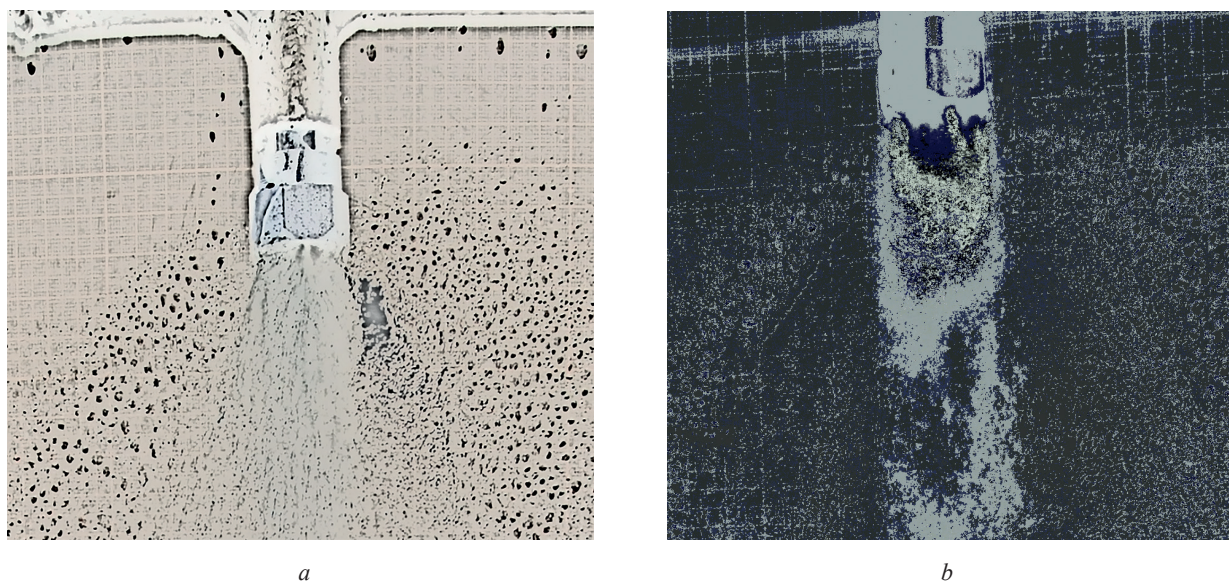


Рис. 7. Фото капельных потоков огнетушащих суспензий: *a* — дистиллированная вода; *b* — ОТВ с наноструктурами в концентрации 1,0 об. %

Fig. 7. A photo of droplet flows of fire extinguishing suspensions: *a* — distilled water; *b* — fire extinguishing suspensions with nanostructures 1.0 vol. %

Число однородных частиц на образце, counts / Frequency, counts

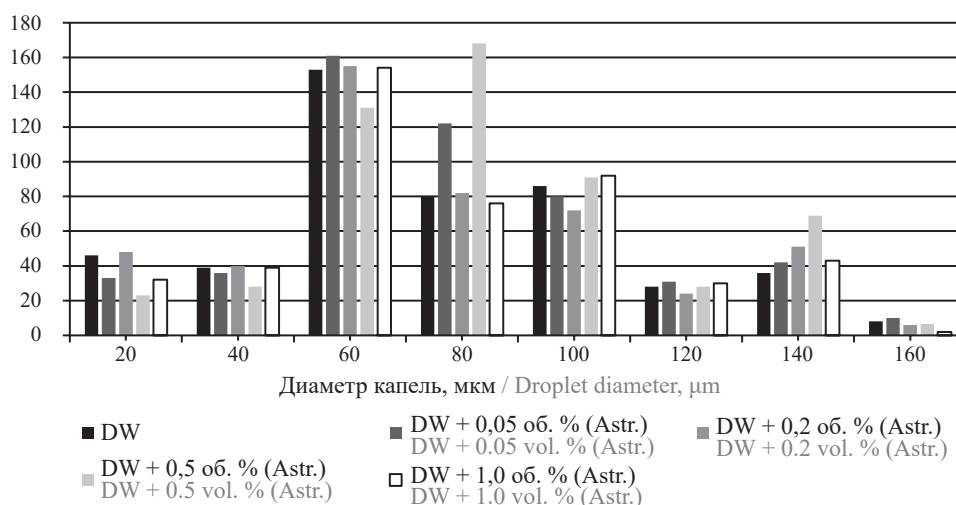


Рис. 8. Гистограмма плотности распределения диаметров капель огнетушащих суспензий DW с астраленами

Fig. 8. A histogram of the density distribution of droplet diameters of fire extinguishing suspensions DW with Astr.

в диапазоне, соответствующем движению жидкости при давлении 1,2 мПа, и составляет 39,17...39,97 м/с (рис. 9). Скорость движения капельных потоков огнетушащих суспензий практически не зависит от концентраций астраленов.

Капли огнетушащих суспензий с концентрацией астраленов 0,05 об. % имеют среднюю скорость 39,23 м/с. При повышении концентрации до 0,25 об. % средняя скорость повышается на 0,2 % — до 39,28 м/с. Наибольшая средняя скорость движения жидкости определена у немодифицированного огнетушащего состава и составляет 39,97 м/с.

Результаты измерений скорости испарения капель огнетушащих суспензий

Размер исследуемых капель огнетушащих суспензий преимущественно варьируется в интервалах от 1,15 до 1,26 мм. По результатам эксперимента установлено, что с увеличением концентрации астраленов время испарения капель исследуемой огнетушащей суспензии уменьшается (рис. 10).

Наибольшее время испарения капель жидкости наблюдается при диспергировании в огнетушащий состав 0,5 об. % астраленов и составляет 15,4 с. Наибольшее снижение времени испарения выявлено у капель с концентрацией астраленов 1,0 об. %

(6,9 с), что на 24,5 % меньше, чем у базовой жидкости.

Для определения скорости испарения капель огнетушащей суспензии необходимо вычислить массу капли. Зная радиус и принимая шар в качестве геометрической формы, рассчитали объем исследуемых капель, который составлял от 6,37 до 8,37 мм³. Учитывая значения плотности огнетушащих суспензий, определяли скорость испарения капель (рис. 11).

Для огнетушащих суспензий с концентрациями астраленов от 0 до 0,5 об. % наблюдается уменьшение скорости испарения капель от 0,89 до 0,49 мг/с. При достижении концентрации наноструктур 1,0 об. % скорость испарения капель резко возрастает до 1,19 мг/с. Данное значение превышает скорость испарения базовой жидкости на 25 %.

Результаты измерений времени тушения модельного очага пожара тонкораспыленными огнетушащими суспензиями

Применение огнетушащей суспензии с концентрацией астраленов 0,05 об. %, в том числе дистиллированной воды в МУПТВ не привели к тушению модельного очага пожара (рис. 12, а).

При помощи огнетушащей суспензии с концентрацией астраленов 0,25 об. % модельный очаг пожара был потушен в среднем за 3 с (рис. 12, б). Выявлена наиболее эффективная концентрация астраленов, которая составила 0,5 об. %. Среднее время тушения модельного очага пожара данной суспензией — 2 с (рис. 12, в). Среднее время тушения модельного очага пожара огнетушащей суспензией с наибольшей из предложенных концентрацией астраленов (1,0 об. %) составляет 6 с (рис. 12, д).

Средняя скорость движения капель, м/с
Average speed of droplet movement, m/s

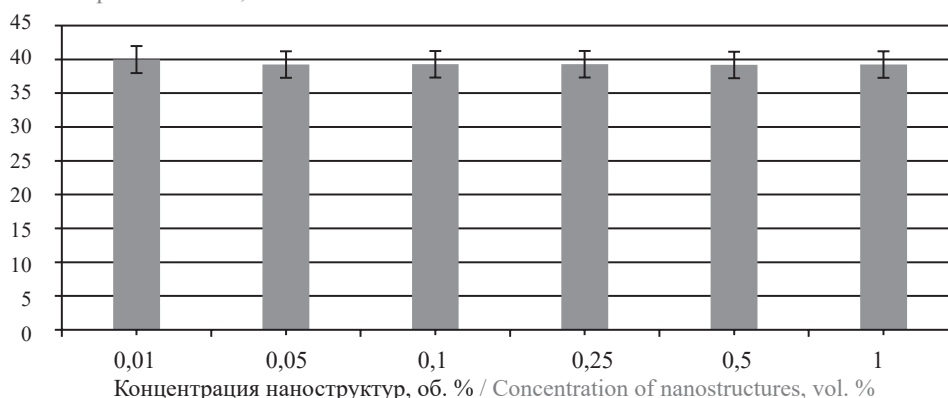


Рис. 9. Скорость движения водяных потоков огнетушащих суспензий DW + Astr.

Fig. 9. The velocity of water flows of extinguishing suspensions DW + Astr.

Время испарения капли, с
Drop evaporation time, s

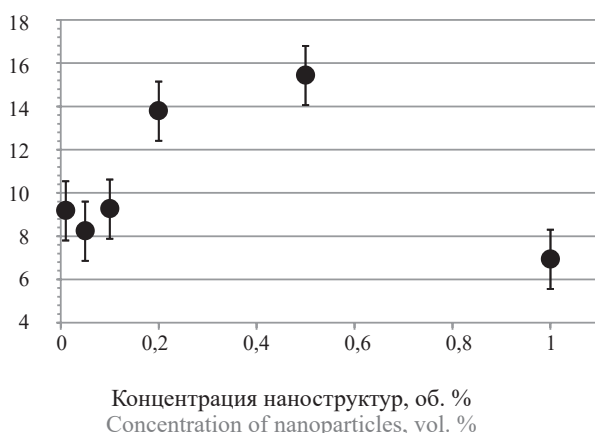


Рис. 10. Время испарения капель модифицированной огнетушащей жидкости DW + Astr.

Fig. 10. The evaporation time of droplets of modified extinguishing fluid DW + Astr.

Скорость испарения, с
Evaporation rate, s

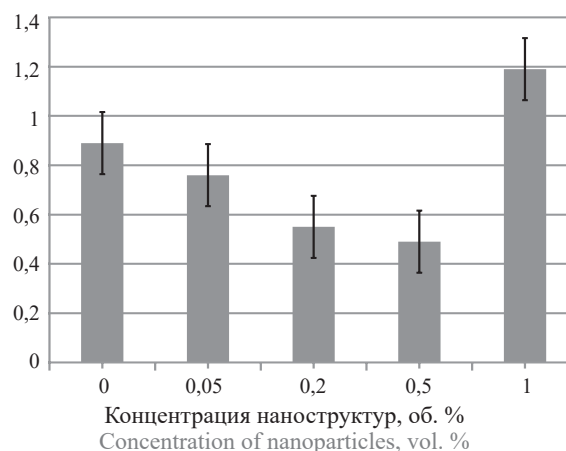


Рис. 11. Скорость испарения капель огнетушащих суспензий DW + Astr.

Fig. 11. The evaporation rate of droplets of extinguishing suspensions DW + Astr.

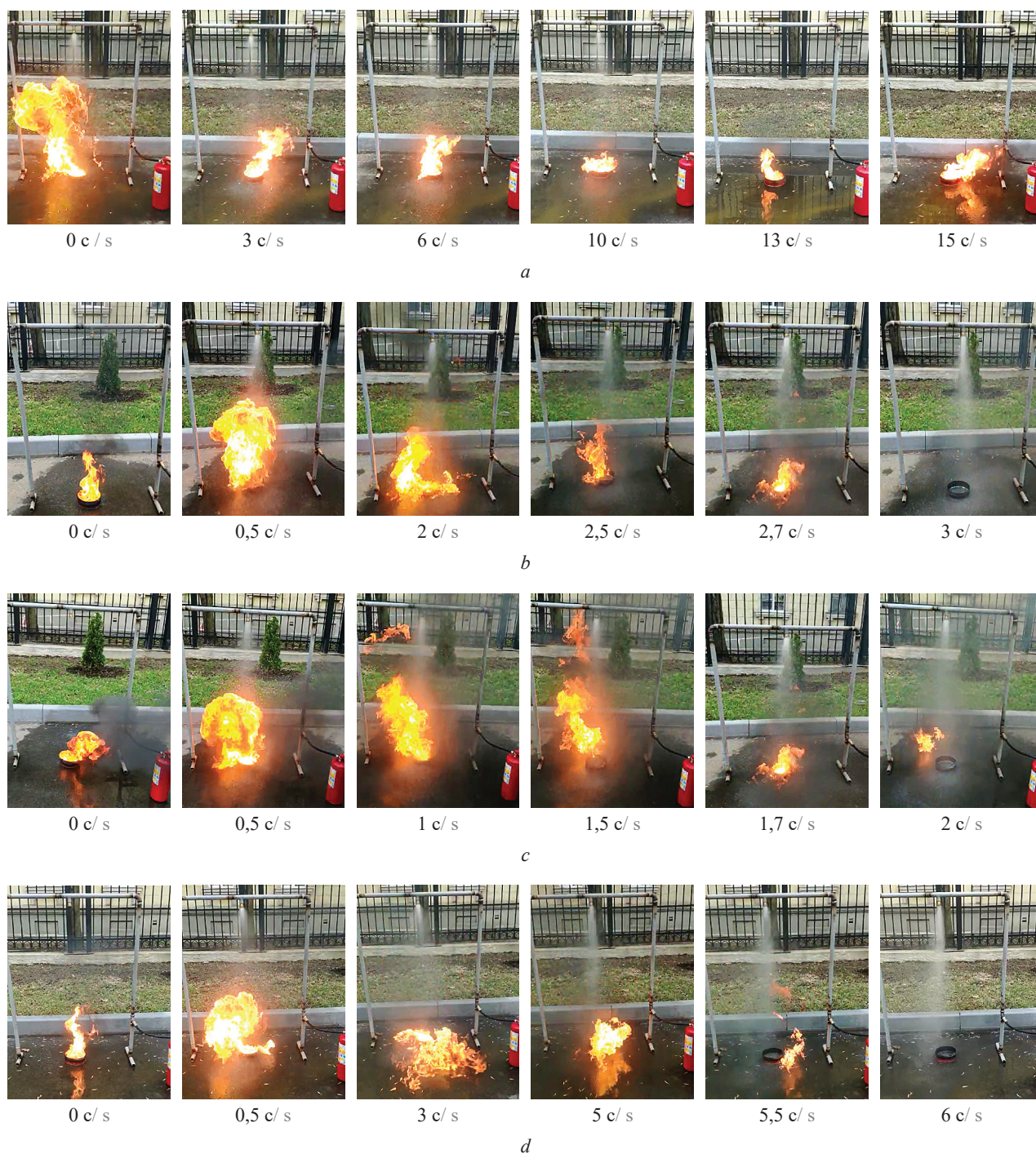


Рис. 12. Фото тушения горючей жидкости дистиллированной водой (а), огнетушащей суспензией с концентрацией астраленов 0,25 об. % (b), 0,5 об. % (c) и 1,0 об. % (d)

Fig. 12. Photos of the process of extinguishing combustible liquid using (a) distilled water, (b) fire extinguishing suspension 0.25 vol. % Astr; (c) 0.5 vol. % Astr; (d) 1.0 vol. % Astr.

Анализ данных показал, что наиболее эффективным огнетушащим веществом является суспензия с концентрацией астраленов 0,5 об. %. Среднее время тушения при данной концентрации составляет 2 с. С увеличением концентрации повышается время тушения (рис. 13). Так, при диспергировании астраленов в состав ОТВ 1,0 об. % ликвидация очага горения происходит за 6 с.

Обсуждение результатов

Экспериментальные результаты показали, что огнетушащая способность МУПТВ зависит от ряда факторов, которые определяются физико-химическими свойствами огнетушащих суспензий и их эксплуатационными характеристиками.

Диспергирование астраленов в состав дистиллированной воды с концентрациями до 1,0 об. % не при-

Время тушения модельного очага пожара, с
Time to extinguish the modal fire source, s

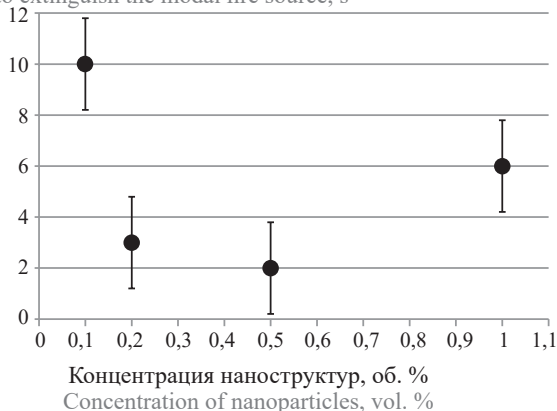


Рис. 13. Зависимость времени тушения модельного очага пожара от концентрации астраленов в огнетушащей суспензии DW + Astr.

Fig. 13. Dependence of the model fire bed extinguishment time on concentration of astralenes in the fire extinguishing suspension DW + Astr.

водит к значительным изменениям динамической вязкости и плотности. Данные результаты согласуются с работой [17], в которой максимальное увеличение динамической вязкости (с 0,0011 до 0,00128 Па·с) наблюдается у наножидкости с температурой 22 °С и концентрацией наноструктур 1,0 об. % и составляет 14,06 % по отношению к базовой жидкости. В работе [18] приводятся экспериментальные данные по изменению плотности наножидкости на водной основе. При диспергировании углеродных нанотрубок с концентрацией 1,05 об. % наблюдается изменение плотности не более чем на 1 % относительно базовой жидкости. Результаты работ согласуются с данными текущего исследования.

Изменение поверхностного натяжения огнетушащих суспензий соответствует данным, приведенным в работе [19]. Поверхностное натяжение наножидкости увеличивается с повышением концентрации наночастиц. Стоит отметить, что при диспергировании астраленов в состав воды наблюдается резкое снижение поверхностного натяжения относительно базовой жидкости. Дальнейшее повышение концентрации наноструктур приводит к ярко выраженному увеличению поверхностного натяжения.

Увеличение показателя удельной теплоты парообразования исследуемых огнетушащих суспензий согласуется с данными, полученными в работе [20]. Диспергирование углеродных наноструктур в состав дистиллированной воды приводит к повышению удельной теплоты парообразования с 2100 до 2300...2400 кДж/кг при концентрации наночастиц 1,0 об. %.

Указанные выше характеристики определяют условия подачи огнетушащих суспензий с помощью

МУПТВ и динамику образования капель огнетушащих суспензий и скорости их испарения в конвективном тепловом потоке. Несмотря на то, что диаметр капель увеличивается, скорость их испарения сокращается на 44,9 % при концентрации астраленов 0,5 об. %.

Теоретическое время тушения горючей жидкости с помощью МУПТВ определялось с помощью выражения (3):

$$t = -\frac{4}{3} \frac{\lambda \rho}{c \cdot m^2} \left[\frac{I_{кр}}{I} + \ln \left(1 - \frac{I_{кр}}{I} \right) \right], \quad (3)$$

где m — массовая скорость выгорания жидкости, кг/(м²·с⁻¹);

c, ρ, λ — теплоемкость, плотность, теплопроводность горючей жидкости, соответственно;

I — интенсивность орошения водой поверхности горючей жидкости, л/м²·с;

$I_{кр}$ — критическая интенсивность тушения горючей жидкости, л/м²·с [2].

Для сопоставления расчетных и экспериментальных данных времени тушения модельного очага пожара использовались формулы (2) и (3). Исходные данные теплофизических характеристик горючей жидкости и огнетушащих составов принимались в соответствии с работой [21].

В ходе расчетов установлено, что теоретическое время тушения в целом соответствует экспериментальным данным (рис. 14).

Время тушения модельного очага пожара, с
Time to extinguish the modal fire source, s

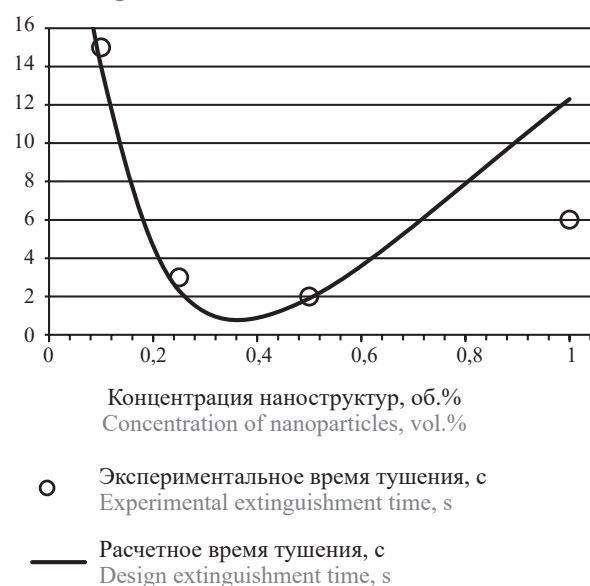


Рис. 14. Зависимость от концентрации астраленов времени тушения пламени горючей жидкости огнетушащими суспензиями

Fig. 14. Dependence between the extinguishment time of the combustible liquid flame and the concentration of astralenes, if fire-extinguishing suspensions are applied

Выводы

Наибольшую огнетушащую способность показала МУПТВ при использовании огнетушащей суспензии с концентрацией астраленов 0,5 об. %.

Модифицирование огнетушащих суспензий астраленами приводит к повышению их удельной теплоты парообразования на 25 % (с 1950 до 2600 Дж/кг при концентрации 0,5 об. %) и поверхностного натяжения на 20 % (с 0,073 до 0,091 Н/м при концентрации 1,0 об. %) при относительно малом изменении динамической вязкости и плотности. Это позволяет избежать затрат, связанных с изменением конструкции МУПТВ.

Экспериментальные данные в целом согласуются с математической моделью, описывающей время тушения, что говорит о наибольшем вкладе удельной теплоты парообразования в наблюдаемом

повышении огнетушащей способности установок с исследуемыми огнетушащими суспензиями. Параметры МУПТВ, несомненно, будут влиять на теоретическое время тушения очага пожара, поэтому в последующем предполагается провести исследования расширенной номенклатуры МУПТВ с разработанными огнетушащими суспензиями.

Кроме того, необходимо учитывать, что данные огнетушащие суспензии не являются стабильными в течение длительного времени без применения сурфактантов [22]. Поэтому в дальнейшем необходимо разрабатывать в том числе гибридные методы дезагломерации астраленов с целью поиска наиболее оптимальных способов и режимов получения стабильных дисперсий. Также суспензии имеют относительно высокую температуру замерзания. Это способствует исследованиям в области разработки наноставов для применения в условиях низких температур.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хасанов И.Р., Думилин А.И. Тушение горючих жидкостей распыленной водой // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXVIII междунар. науч.-практ. конф.: в 2-х ч. Балашиха, 2016. С. 363–366. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28817900>
2. Думилин А.И. Параметры тушения пламени горючих жидкостей распыленной водой // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2013. Т. 22. № 4. С. 85–90. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19436559>
3. Mawhinney J.R., Back G.G. Water mist fire suppression systems // SFPE Handbook of fire protection engineering. New York, NY : Springer, 2016. Pp. 1587–1645. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_46
4. Shrigondekar H., Chowdhury A., Prabhu S.V. Characterization of a simplex water mist nozzle and its performance in extinguishing liquid pool fire // Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. Vol. 93. Pp. 441–455. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2018.01.015
5. Koshiba Y., Yamamoto Y., Ohtani H. Fire suppression efficiency of water mists containing organic solvents // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62. P. 12. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103973
6. Feng M., Tao J., Qin J. Fei Q. Extinguishment of counter-flow diffusion flame by water mist derived from aqueous solutions containing chemical additives // Journal of Fire Sciences. 2016. Vol. 34. No. 1. Pp. 51–68. DOI: 10.1177/0734904115618220
7. Wu B., Liao G. Experimental study on fire extinguishing of water mist with a newly prepared multi-component additive // Procedia Engineering. 2013. Vol. 62. Pp. 317–323. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.070
8. Halelfadl S., Maré T., Estellé P. Efficiency of carbon nanotubes water based nanofluids as coolants // Experimental Thermal and Fluid Science. 2014. Vol. 53. Pp. 104–110. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.11.010
9. Hung Y.H., Gu H.J. Multiwalled carbon nanotube nanofluids used for heat dissipation in hybrid green energy systems // Journal of Nanomaterials. 2014. Vol. 2014. P. 12. DOI: 10.1155/2014/196074
10. Иванов А.В., Торопов Д.П., Ивахнюк Г.К., Федоров А.В., Кузьмин А.А. Исследование огнетушащих свойств воды и гидрогелей с углеродными наноструктурами при ликвидации горения нефтепродуктов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 8. С. 31–44. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-ognetushaschih-svoystv-vody-i-gidrogeley-s-uglerodnymi-nanostrukturami-pri-likvidatsii-goreniya-nefteproduktov>

11. Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 2. Конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 2. С. 173–188. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15606580>
12. Shames A.I., Katz E.A., Panich A.M., Mogilyansky D., Mogilko E., Grinblat J. et al. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles // *Diamond and Related Materials*. 2009. Vol. 8. No. 2, 3. Pp. 505–510. DOI: 10.1016/j.diamond.2008.10.056
13. Ponomarev A., Iudovich M. Multi-layered carbon nanoparticles of the fulleroid type. United States patent US No. 9.090.752. 2015 Jul. 28.
14. Suriyawong A., Wongwises S. Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of TiO₂-water nanofluids at very low concentrations // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010. Vol. 34. No. 8. Pp. 992–999. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2010.03.002
15. Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д. Динамика отрыва одиночных капель в воздушной среде // Известия Российской Академии наук. Механика жидкости и газа. 2014. № 4. С. 109–118. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21811487>
16. Zhu P., Wang X., Wang. Z., Cong H., Ni X. Experimental study on transformer oil pool fire suppression by water mist // *Fire Science and Technology*. 2017. Pp. 895–901. DOI: 10.1007/978-981-10-0376-9_92
17. Sekhar Y.R., Sharma K.V. Study of viscosity and specific heat capacity characteristics of water-based Al₂O₃ nanofluids at low particle concentrations // *Journal of experimental Nanoscience*. 2015. Vol. 10. No. 2. Pp. 86–102. DOI: 10.1080/17458080.2013.796595
18. Shoghl S.N., Jamali J., Moraveji M.K. Electrical conductivity, viscosity, and density of different nanofluids: An experimental study // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016. Vol. 74. Pp. 339–346. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.01.004
19. Tanvir S., Qiao L. Surface tension of nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials // *Nanoscale Research Letters*. 2012. Vol. 7. No. 1. Pp. 1–10. DOI: 10.1186/1556-276X-7-226
20. Иванов А.В., Торопов Д.В., Медведева Л.В., Калинина Е.С. Физический механизм и способ тушения жидких углеводородов модифицированными суспензиями воды с углеродными наноструктурами // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2019. Т. 28. № 1. С. 22–34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.22-34
21. Wang C., Xu H., Herreros J.M., Lattimore T., Shuai S. Fuel effect on particulate matter composition and soot oxidation in a direct-injection spark ignition (DISI) engine // *Energy & Fuels*. 2014. Vol. 28. No. 3. Pp. 2003–2012. DOI: 10.1021/ef402234z
22. Soma K., Babu J.S.C. Factors influencing the rheological behavior of carbon nanotube water-based nanofluid // *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2015. Vol. 23. No. 8. Pp. 750–754. DOI: 10.1080/1536383X.2014.973489

REFERENCES

1. Khasanov I.R., Dumilin A.I. Extinguishing flammable liquids with sprayed water. *Actual problems of fire safety : Materials of the XXVIII international scientific and practical conference: in 2 parts. International Salon of Security Means: "Integrated Security"*. 2016; 363-366. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28817900> (rus).
2. Dumilin A.I. Factors of extinguishing of the flame of combustible liquids by sprayed water. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 22(4):85-90. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19436559> (rus).
3. Mawhinney J.R., Back G.G. Water mist fire suppression systems. *SFPE Handbook of fire protection engineering*. New York, NY, Springer, 2016; 1587-1645. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_46
4. Shrigondekar H., Chowdhury A., Prabhu S.V. Characterization of a simplex water mist nozzle and its performance in extinguishing liquid pool fire. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018; 93:441-455. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2018.01.015
5. Koshiba Y., Yamamoto Y., Ohtani H. Fire suppression efficiency of water mists containing organic solvents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:12. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103973

6. Feng M., Tao J., Qin J. Fei Q. Extinguishment of counter-flow diffusion flame by water mist derived from aqueous solutions containing chemical additives. *Journal of Fire Sciences*. 2016; 34(1):51-68. DOI: 10.1177/0734904115618220
7. Wu B., Liao G. Experimental study on fire extinguishing of water mist with a newly prepared multi-component additive. *Procedia Engineering*. 2013; 62:317-323. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.070
8. Halelfadl S., Maré T., Estellé P. Efficiency of carbon nanotubes water based nanofluids as coolants. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014; 53:104-110. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.11.010
9. Hung Y.H., Gu H.J. Multiwalled carbon nanotube nanofluids used for heat dissipation in hybrid green energy systems. *Journal of Nanomaterials*. 2014; 2014:12. DOI: 10.1155/2014/196074
10. Ivanov A.V., Toropov D.P., Ivakhnyuk G.K., Fedorov A.V., Kuzmin A.A. Investigation of the fire-extinguishing properties of water and hydrogels with carbon nanostructures in the elimination of combustion of petroleum products. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(8):31-44. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-ognetushaschih-svoystv-vody-i-gidrogeley-s-uglerodnymi-nanostrukturami-pri-likvidatsii-goreniya-nefteproduktov> (rus).
11. Terekhov V.I., Kalinina S.V., Lemanov V.V. The mechanism of heat transfer in nanofluids: state of the art (review). Part 2. Convective heat transfer. *Thermal physics and aeromechanics*. 2010; 17(2):173-188. DOI: 10.1134/S0869864310020010 (rus).
12. Shames A.I., Katz E.A., Panich A.M., Mogilyansky D., Mogilko E., Grinblat J. et al. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles. *Diamond and Related Materials*. 2009; 8(2-3):505-510. DOI: 10.1016/j.diamond.2008.10.056
13. Ponomarev A., Iudovich M. *Multi-layered carbon nanoparticles of the fulleroid type*. United States patent US No. 9.090.752. 2015 Jul. 28.
14. Suriyawong A., Wongwises S. Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of TiO₂-water nanofluids at very low concentrations. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010; 34(8):992-999. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2010.03.002
15. Prokhorov V.E., Chashechkin Yu.D. Dynamics of separation of a single drop in air. *Fluid Dynamics*. 2014; 4:109-118. DOI: 10.1134/S0015462814040115 (rus).
16. Zhu P., Wang X., Wang Z., Cong H., Ni X. Experimental study on transformer oil pool fire suppression by water mist. *Fire Science and Technology*. 2017; 895-901. DOI: 10.1007/978-981-10-0376-9_92
17. Sekhar Y.R., Sharma K.V. Study of viscosity and specific heat capacity characteristics of water-based Al₂O₃ nanofluids at low particle concentrations. *Journal of experimental Nanoscience*. 2015; 10(2):86-102. DOI: 10.1080/17458080.2013.796595
18. Shoghl S.N., Jamali J., Moraveji M.K. Electrical conductivity, viscosity, and density of different nanofluids: An experimental study. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016; 74:339-346. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.01.004
19. Tanvir S., Qiao L. Surface tension of nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials. *Nanoscale Research Letters*. 2012; 7(1):1-10. DOI: 10.1186/1556-276X-7-226
20. Ivanov A.V., Toropov D.V., Medvedeva L.V., Kalinina E.S. Physical mechanism and method for quenching liquid hydrocarbons by modified suspensions of water with carbon nanostructures. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(1):22-34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.22-34 (rus).
21. Wang C., Xu H., Herreros J.M., Lattimore T., Shuai S. Fuel effect on particulate matter composition and soot oxidation in a direct-injection spark ignition (DISI) engine. *Energy & fuels*. 2014; 28(3):2003-2012. DOI: 10.1021/ef402234z
22. Soma K., Babu J.S. Factors influencing the rheological behavior of carbon nanotube water-based nanofluid. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2015; 23(8):750-754. DOI: 10.1080/1536383X.2014.973489

Поступила 09.06.2021, после доработки 20.07.2021;

принята к публикации 26.07.2021

Received June 9, 2021; Received in revised form July 20, 2021;

Accepted July 26, 2021

Информация об авторе

ПУСТОВАЛОВ Илья Андреевич, адъюнкт кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, 149; РИНЦ ID: 1122887; ORCID: 0000-0002-8059-6988; e-mail: ilya_pustovalov_2020@bk.ru

Information about the author

Ilya A. PUSTOVALOV, adjunct of Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 1122887; ORCID: 0000-0002-8059-6988; e-mail: ilya_pustovalov_2020@bk.ru