

УДК 614.841.4:004.9

ilya\_pustovalov\_2020@bk.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ  
ОГНЕТУШАЩИХ СОСТАВОВ В МОДУЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ  
ПОЖАРОТУШЕНИЯ НА ОБЪЕКТАХ С ОБРАЩЕНИЕМ  
ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ**

**MODELING THE APPLICATION OF MODIFIED FIRE EXTINGUISHING  
COMPOSITIONS IN MODULAR FIRE EXTINGUISHING UNITS  
AT OBJECTS WITH THE REFLECTION OF LIQUID AND SOLID FUELS**

*Пустовалов И. А.,*

*Иванов А. В., кандидат технических наук, доцент,  
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург,  
Пономарев А. Н., кандидат технических наук, профессор,  
Российский университет дружбы народов, Москва*

*Pustovalov I., Ivanov A.,*

*The Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia  
Ponomarev A. N., Peoples' Friendship University of Russia*

Приведен анализ технических характеристик модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой. Определены критические характеристики для тушения пожаров твердых и жидких топлив, такие как дисперсность капель ОТВ, интенсивность подачи, время тушения, рабочее давление, суммарный расход ОТВ через распылители. Расчетным методом определена удельная теплоемкость от 4112 до 4183 Дж/(кг·К) и плотность наножидкостей от 997,6 до 1009,5 кг/м<sup>3</sup>. Приведены прочие теплофизические характеристики исследуемых огнетушащих веществ, используемых в моделировании, такие, как: удельная теплота парообразования от 1950 до 2600 кДж/кг. На основе результатов моделирования опасных факторов пожара в программной среде PyroSim определены оптимальные концентрации углеродных наноструктур для водосодержащих огнетушащих веществ в пределах от 0,05 до 0,5 об. %. Приведены данные по скорости достижения критических температур окружающей среды и потери видимости в зависимости от применяемого огнетушащего вещества. Дано теоретическое обоснование использования огнетушащих веществ в модульных системах пожаротушения на объектах с обращением жидких и твердых топлив. Основным огнетушащим механизмом применения модифицированных водосодержащих составов является более интенсивное охлаждение конвекционной зоны горения за счет изменения теплофизических характеристик модифицированных огнетушащих составов.

*Ключевые слова:* углеродные наноструктуры, FSD, модульные установки пожаротушения, огнетушащая эффективность.

An analysis of the technical characteristics of modular water mist fire extinguishing installations was given. Critical characteristics for extinguishing fires with solid and liquid fuels have been determined. For example, dispersion of droplets of a fire extinguishing agent, flow rate, extinguishing time, operating pressure, total consumption of fire extinguishing agent through spray nozzles. Specific heat and density were determined by the calculation method and ranged from 4112 to 4183 J/(kg·K) and from 997,6 to 1009,5 kg/m<sup>3</sup>, respectively. Other thermophysical characteristics of the investigated fire

extinguishing agents used in the simulation were given. For example, the specific heat of vaporization is from 1950 to 2600 kJ/kg. Based on the results of modeling hazardous fire factors in the «PyroSim» software environment, the optimal concentrations of carbon nanostructures for water-containing fire extinguishing agents were determined in the range from 0,05 to 0,5 vol.%. Data on the speed of reaching critical ambient temperatures and loss of visibility depending on the used extinguishing agent are given. The theoretical substantiation of the use of fire extinguishing agents in modular fire extinguishing systems at facilities with the handling of liquid and solid fuels is described. The main fire extinguishing mechanism for the use of modified water-containing compositions is a more intensive cooling of the convection combustion zone due to changes in the thermo-physical characteristics of the modified fire extinguishing compositions.

*Keywords:* carbon nanostructures, FSD, modular fire extinguishing installations, fire extinguishing efficiency.

Топлива – это вещества, способные выделять достаточное количество теплоты при окислении (горении). Они могут быть представлены в твердой, жидкой, газообразной фазах, а также в виде дисперсной системы [1].

В Российской Федерации прослеживается приоритет использования газообразных топлив, обусловленный количественным запасом, простотой добычи, скоростью горения и экологической безопасностью. Вместе с тем в настоящее время наблюдается тенденция к росту доли жидкого и твердого топлива в транспортном секторе, при производстве тепловой и электрической энергии. Повышение спроса на каменный уголь, торф, сланцы связано с его потреблением на тепловых электростанциях для получения электрической энергии, отопления и технологических нужд, а также совершенствованием технологий получения жидких топлив из твердых горючих ископаемых. Кроме того, ограниченные запасы природного газа и нефти вызывают необходимость проведения интенсивных исследований в области

химической переработки, совершенствований старых и разработок новых методов газификации и ожижения угля [2, 3].

Для обеспечения пожарной безопасности на объектах производства и переработки угольного сырья, на транспорте и объектах, состоящих из нескольких помещений небольшой площади, при условии невозможности использования источников хозяйственно-питьевого водоснабжения, используются модульные установки пожаротушения тонкораспыленной водой (МУПТВ) и водосодержащие огнетушащие вещества (ОТВ) [4–6].

Рынок модульных установок с водосодержащими составами весьма обширен, при этом установки пожаротушения имеют схожие эксплуатационные характеристики, такие как дисперсность капель ОТВ от 100 до 150 мкм, интенсивность подачи от 0,053 до 0,13 л/(сек·м<sup>2</sup>), время тушения от 12 до 45 с, рабочее давление от 1,0 до 3,5 МПа, суммарный расход ОТВ через распылители от 120 до 1200 л/мин (табл. 1).

Таблица 1  
Характеристики МУПТВ в зависимости от производителя

Характеристика	Производитель				
	ГК «ЭПО-ТОС»	«ЭТЕР-НИС»	ООО «НПО ПЛАМЯ»	АО «Пожтехника-Центр»	ЗАО «Источник Плюс»
Модификация	Буран-50 ТРВ	«ТРВ -Гарант-160»-40	«Тайфун-240 Fire Block»	МУПТВ-90-ЭМ/РИНЕЙ	МУПТВ-30-ГЗ-ВД
Вид ОТВ	Вода питьевая	Вода по ГОСТ Р 51232-98	Вода питьевая	Вода	Вода
Запас ОТВ, л	48±0,5	160±0,6	240±1	90	33±0,8
Диаметр капель, мкм	до 150	100	100	100	до 150
Продолжительность подачи ОТВ, с	не более 24	8–12	15–45	не менее 30	не более 20
Инерционность срабатывания, с	не более 10	не более 3	5	не более 2	не более 4
Расход ОТВ через распылитель, л/мин	9,96–120	1200	324-960	180	32,4–240
Рабочее давление, МПа	до 1,6	1,0–1,6	1,4	1,0–1,4	3,5
Защищаемая площадь, м <sup>2</sup>	36	до 100	до 200	27–60	18–27
Наибольшая интенсивность не менее, л/(с·м <sup>2</sup> )	0,055	0,13	0,053	0,059	0,061
Количество распылителей, подключенных к одному модулю, шт.	12	4–10	24–64	32	4–6
Высота расположения распылителя, м	2-4	не более 4,5	2–4	4–9	3–4
Металлоемкость МУПТР (без трубопровода), кг	85±2	343±5	245±5	не более 190	не более 50,8

Характерными недостатками модульных установок пожаротушения являются:

– небольшая интенсивность подачи огнетушащих веществ;

– увеличенная металлоёмкость установок за счет повышения давления в состоянии сработки;

– ограниченное количество ОТВ [7].

В условиях пожара наибольшую опасность для людей и находящихся в защищаемом помещении материальных ценностей представляет наступление предельно допустимых значений опасных факторов пожара (ОФП). На стадии эвакуации людей из горящего здания определяющими ОФП являются снижение видимости в дыму и повышенная температура окружающей среды [8, 9]. Исходя из данных, приведенных в методике [10], предельно допустимые значения по повышенной температуре составляет 70 °С, а по потере видимости в дыму – 20 м.

В работе [11] приведены данные об исследовании влияния углеродных наноструктур (УНС) на огнетушащие характеристики водосодержащих ОТВ. Экспериментальные данные показали улучшение эксплуатационных характеристик водосодержащих наносоставов, по сравнению с базовой жидкостью.

Для оценки распространения ОФП при тушении пожара МУПТВ широко применяется программный продукт PyroSim. Он позволяет выполнять моделирование опасных факторов пожара по полевой модели, определять время эвакуации, строить поля опасных факторов, в том числе моделировать динамику распространения ОФП на объектах многофункциональных зданий [12], подземных автостоянках [13], пассажирских вагонах и прочих объектах.

Целью настоящего исследования было установление параметров рецептур ОТВ для сокращения времени воздействия ОФП на производстве на основе моделирования в программной среде PyroSim.

В работе проводились исследования эксплуатационных характеристик водосодержащих ОТВ с углеродными наноструктурами. В качестве наноматериалов, диспергированных в водосодержащее ОТВ, использовались астралены (Astr).

Астралены – наноструктуры, полученные методом испарения графитовых анодов в электродуговом разряде [14], имеют структуру, состоящую из изогнутых графитовых слоев, диаметром 10–150 нм, 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. Плотность астраленов составляет 2250 кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость 700 Дж/(кг·К).

Оценка изменения огнетушащей эффективности модифицированного ОТВ проводилась посредством создания имитационной модели в программной среде PyroSim [15, 16], путем изменения таких показателей ОТВ, как удельная теплоемкость парообразования, распределение размеров капель ОТВ, плотность и другие, применительно к условиям, использования в модульных установках пожаротушения.

Показатели удельной теплоты парообразования и расчетной плотности наножидкостей, которые использовались в качестве исходных данных ОТВ для построения имитационной модели, приведены в табл. 2 [16]. Теплоемкость наножидкостей была определена расчетным методом [17].

Теплоемкость наножидкости зависит от относительного числа Прандтля (Pr), на который в свою очередь существенно влияет концентрация и размер наночастиц. Установлено, что с ростом концентрации наночастиц коэффициент вязкости и теплопроводности увеличивается. Однако вязкость увеличивается значительно быстрее, поэтому число Прандтля для наножидкостей возрастает с увеличением концентрации наночастиц. С увеличением размера наночастиц число Прандтля для наножидкостей уменьшается в связи с возрастанием коэффициента теплопроводности и уменьшением коэффициента вязкости. Максимальные значения числа Прандтля должны наблюдаться у наножидкостей с минимальным размером наночастиц [20].

В исследовании [18] показано, что повышение концентрации наночастиц до 1,0 об. % приводит к незначительному снижению эффективной удельной теплоемкости наножидкости до 4,8 об. %. Также в работе [19] указано, что при повышении объемной концентрации наночастиц до

10,0 об. % показатель теплоемкости наножидкости продолжает снижаться.

Рассматривая наножидкости на водной основе, как гомогенную среду, в работах [17, 18] удельную теплоемкость определяли по формуле:

$$C_{pnf} = \frac{(1-\varphi)(\rho \cdot C_p)_{bf} + \varphi(\rho \cdot C_p)_p}{(1-\varphi) \cdot \rho_{bf} + \varphi \cdot \rho_p}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – концентрация наночастиц;  $\rho_p$  – плотность наночастиц кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{bf}$  – плотность базовой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{pbf}$  – удельная теплоемкость базовой жидкости,

Дж/(кг·К);  $C_{pp}$  – удельная теплоемкость наночастиц, Дж/(кг·К).

Зависимость расчетной теплоемкости наножидкости от концентрации наночастиц представлена на рис. 1.

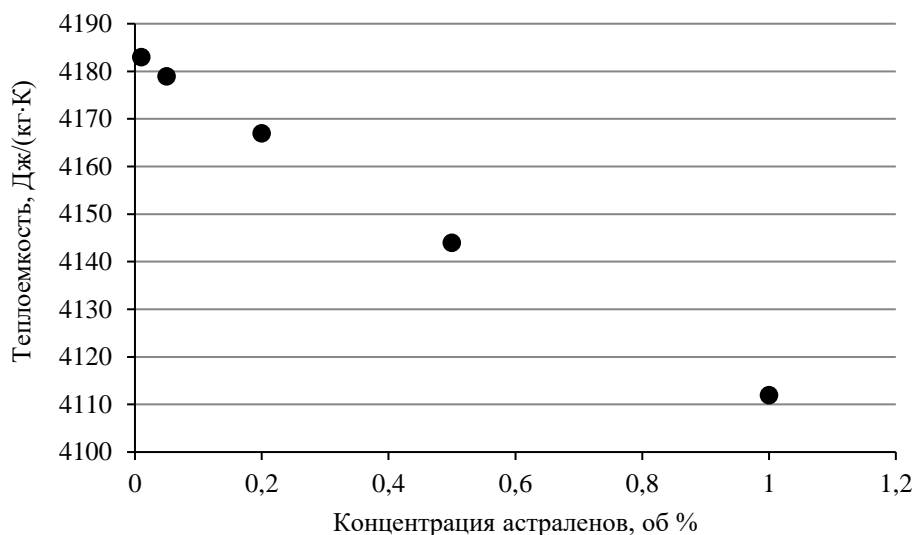


Рисунок 1. Зависимость теплоемкости наножидкости от концентрации астраленов

На основе вышеперечисленных эксплуатационных характеристик в программной среде Pyrosim определялась огнетушащая эффективность модифицированных ОТВ, оптимальная концентрация наноструктур и расход огнетушащего состава.

В качестве системы тушения была выбрана модульная установка пожаротушения тонкораспыленной водой. В качестве ОТВ использовались составы, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Эксплуатационные характеристики огнетушащих составов

Тип ОТВ	Обозначения	Удельная теплота парообразования, кДж/кг	Расчетная плотность, кг/м <sup>3</sup>
Дистиллированная вода	DW	2100	997,0

Суспензия дист. воды с астраленами в концентрации 0,05 об. %	DW+Astr. 0,05 об. %	1950	997,6
Суспензия дист. воды с астраленами в концентрации 0,2 об. %	DW+Astr. 0,2 об. %	2400	999,5
Суспензия дист. воды с астраленами в концентрации 0,5 об. %	DW+Astr. 0,5 об. %	2600	1003,2
Суспензия дист. воды с астраленами в концентрации 1,0 об. %	DW+Astr. 1,0 об. %	1350	1009,5

Моделировалась подача ОТВ через четыре распылителя, расположенные на высоте 4,9 м. Расход ОТВ через распылитель составлял от 0,33 до 1 л/с. Средний размер капель 100 мкм.

В программе PyroSim была подготовлена модель топливного отделения углеподготовительного цеха для подготовки углей к коксованию (25×15×5 м). Количество рабочих мест в соответствии со штатным расписанием составляло 10 человек.

Количество, одновременно находящихся на этаже – 14 человек.

Моделировалось распространение ОФП при пожаре в течение 200 с. Очаг пожара площадью 3 м<sup>2</sup> располагался перед выходом из вспомогательного помещения топливного отделения цеха углеподготовки (рис. 2). Также принималось, что были условия для распространения ОФП, общеобменная вентиляция отключена, воздухообмен осуществляется только через открытые эвакуационные выходы.

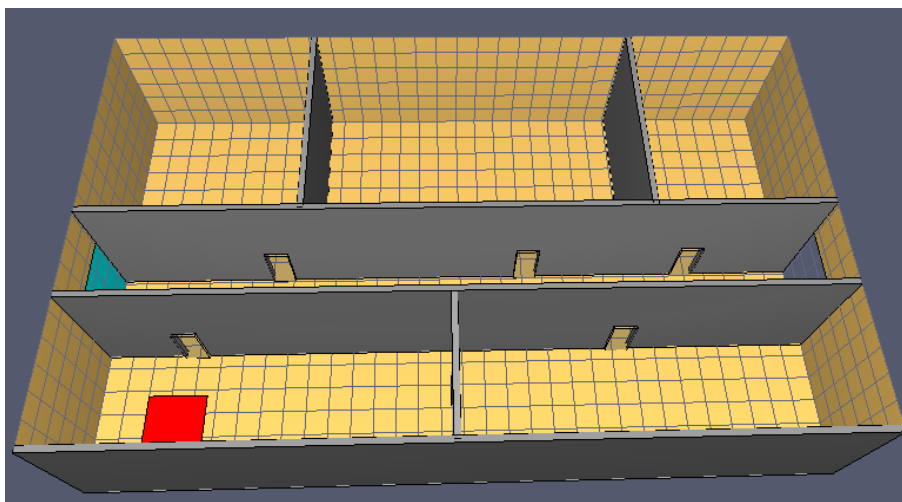


Рисунок 2. Модель помещения топливного отделения цеха углеподготовки

### Результаты и обсуждения

Результаты моделирования показали, что при повышении концентрации УНС от 0,05 до 0,5 об. % огнетушащая эффективность МУПТВ повышается. Расход ОТВ также влияет на достижение критического значения температуры окружающей

среды (рис. 3). Наибольшее временное значение установлено при тушении водосодержащим нано составом с 0,5 об. % . Такой показатель обусловлен в том числе высоким расходом ОТВ 4 л/сек. При снижении расхода до 80 л/мин, наилучшие показатели продемонстрировал состав с концентрацией 0,2 об. % УНС.



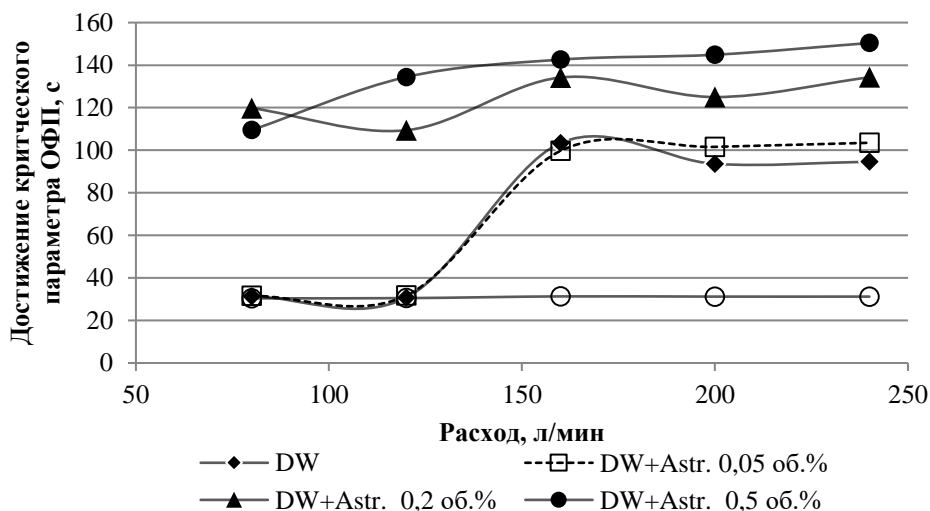


Рисунок 3. График зависимости расхода ОТВ от времени достижения критического значения температуры окружающей среды

Следует отметить, что значительных изменений в увеличении времени достижения критического значения потери

видимости не выявлено (рис. 4). При прочих равных, наилучший показатель выявлен при тушении водосодержащим составом с концентрацией УНТ 0,5 об. %.

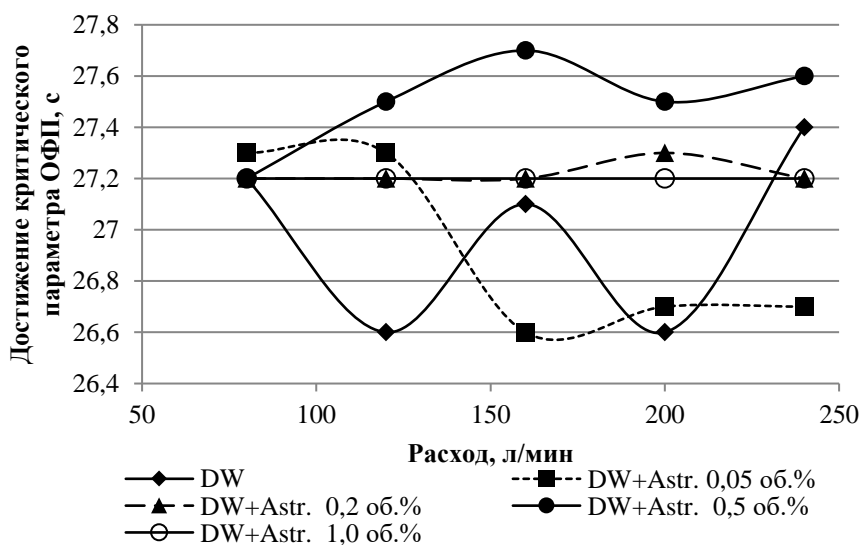


Рисунок 4. График зависимости расхода ОТВ от времени достижения критического значения потери видимости

При увеличении концентрации УНС до 1,0 об. % повышения огнетушащей эффективности ОТВ не наблюдается. Более того, время достижения критических параметров ОФП было меньше, чем у немодифицированного ОТВ при тех же параметрах моделирования. Это связано со сни-

жением удельной теплоты парообразования. Моделирование показало, что капли воды испаряются, не успевая преодолеть тепловой напор пламени и достичь зоны горения (факела). В связи с этим не происходит эффективного охлаждения очага горения.

Для каждого расхода определен наиболее подходящий состав ОТВ и время достижения критических значений ОФП. В

табл. 3 отражен требуемый запас ОТВ для обеспечения установленной продолжительности тушения.

Таблица 3  
Требуемый запас ОТВ в МУПТВ

Расход ОТВ, л/мин	Тип ОТВ	Требуемое время тушения, с (мин)	Расчетный запас ОТВ, л
4x20	DW +Astr. 0,2 об.%	119,8 (1,99)	159,2
4x30	DW +Astr. 0,5 об.%	134,4 (2,24)	268,8
4x40	DW +Astr. 0,5 об.%	142,6 (2,37)	379,2
4x50	DW +Astr. 0,5 об.%	149,9 (2,49)	498,0
4x60	DW +Astr. 0,5 об.%	150,4 (2,50)	600,0

С повышением расхода наблюдалось смещение показателя интенсивности подачи водосодержащих наножидкостей от 0,073 до 0,22 л/(с·м<sup>2</sup>) по сравнению с базовой жидкостью от 0,049 до 0,061 л/(с·м<sup>2</sup>).

Полученные результаты моделирования свидетельствуют о повышении огнетушащих характеристик высокодисперсных водосодержащих ОТВ при использовании УНС в концентрациях от 0,05 до

0,5 об. %. Повышение концентрации УНС препятствует распространению продуктов горения, а увеличение времени достижения критического значения потери видимости не наблюдается.

Сопоставляя с расходами в модульных установках пожаротушения можно, сделать вывод, что при тушении очагов возгорания модифицированными составами эффективность применения ОТВ увеличивается при одинаковых показателях расхода.

#### Литература

1. Быстрицкий Г. Ф., Гасангаджиев Г. Г., Кожиченков В. С. Общая энергетика (производство тепловой и электрической энергии). М., 2013. 408 с.
2. Малолетнев А. С., Шпирт М. Я. Современное состояние технологий получения жидкого топлива из углей // Российский химический журнал. 2008. Т. 52, № 6. С. 44–52.
3. Грушевенко Д. и др. Перспективы мировой энергетики до 2040 г. // Мировая экономика и международные отношения. 2014. № 1. С. 3–20.
4. Павлов А. Опыт использования модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой для защиты объектов различного назначения // Алгоритм безопасности. 2008. № 5. С. 28–31.
5. Дмитриенко Д. В., Жданова О. С., Пелипей Р. И. Разработка устройств пожаротушения транспортных средств // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2019. № 1. С. 86–90.
6. Печерская С. П., Куприянов А. Н. Проблемы и решения обеспечения пожарной безопасности в регионах с ограниченными запасами воды // Наука XXI века: технологии, управление, безопасность. 2017. С. 174–179.
7. Бондарь А. А. Разработка способа подачи огнетушащего вещества из модулей пожаротушения на объектах нефтегазового комплекса // автореферат дис. ... канд. тех. наук : 05.26.03. СПб., 2012. 23 с.
8. Kolodyazhniy S., Kozlov V. Analytical calculation of time of reaching specific values based on visibility loss during a fire // MATEC Web of Conferences / EDP Sciences. 2018. Т. 193. С. 8. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819303007>.
9. Philip A., Rubini Q. Simulation of visibility in smoke laden environments // InterFlam 2007, 11<sup>th</sup> International Conference of Fire Science and Engineering. 2007. С. 12.
10. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: приказ № 382 МЧС России от 30 июня 2009 г. / ФГУ ВНИИПО МЧС России. М., 2009. 71 с.



11. 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.
12. Клочков С. В., Рыбакова Е. Ю., Чуева К. А. Моделирование опасных факторов пожара многофункционального здания на основе Pyrosim и Fire Dynamics Simulator // *Актуальные вопросы полихотомического анализа*. 2019. С. 62–73.
13. Таранцев А. А., Шидловский Г. Л., Поташев Д. А. Особенности распространения опасных факторов пожара в подземных стоянках автомобилей // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2020. № 1. С. 43–52.
14. Shames A. I. et al. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles // *Diamond and Related Materials*. 2009. Т. 18, № 2–3. С. 505–510.
15. Суриков А. В. Исследование соотношения пожарно-технических показателей, характеризующих процесс дымообразования, с применением полевой модели пожара // *Материалы Международного научного семинара «Проблемы обеспечения пожарной безопасности объектов хозяйствования»*. Кокшетау, 2014. С. 157–160.
16. Торопов Д. П., Иванов А. В., Скрипник И. Л. Моделирование тушения пожара жидких углеводородов в условиях применения огнетушащих суспензий воды с углеродными наноструктурами // *Пожарная безопасность*. 2019. С. 91–103.
17. Buongiorno J. Convective transport in nanofluids // *Journal of Heat Transfer*. 2006. № 128. С. 240–250. DOI: 10.1115/1.2150834.
18. Sekhar Y. R., Sharma K. V. Study of viscosity and specific heat capacity characteristics of water-based  $Al_2O_3$  nanofluids at low particle concentrations // *Journal of experimental Nanoscience*. 2015. Т. 10, № 2. С. 86–102. DOI: 10.1080/17458080.2013.796595.
19. Namburu P. K. et al. Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids // *Micro & Nano Letters* 2.3. 2007. С. 67–71.
20. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Пряжников М. И. Теплофизические свойства наножидкостей и критерии подобия // *Письма в Журнал технической физики*. 2016. Т. 42, № 24. С. 9–16.

#### References

1. Bystritskiy G. F., Gasangadzhiev G. G., Kozhichenkov V. S. General energy (production of heat and electricity). М., 2013. 408 p.
2. Maloletnev A. S., Shpirt M. Ya. The current state of technologies for obtaining liquid fuel from coal // *Russian chemical journal*. 2008. Т. 52, № 6. P. 44–52.
3. Grushevenko D. et al. Prospects for world energy up to 2040 // *World economy and international relations*. 2014. № 1. P. 3–20.
4. Pavlov A. Experience in the use of modular installations for fire extinguishing with water mist for the protection of objects of various purposes // *Safety Algorithm*. 2008. № 5. P. 28–31.
5. Dmitrienko D. V., Zhdanova O. S., Pelipey R. I. Development of fire extinguishing devices for vehicles // *Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement*. 2019. № 1. P. 86–90.
6. Pecherskaya S. P., Kupriyanov A. N. Problems and solutions to ensure fire safety in regions with limited water reserves // *Science of the XXI century: technology, management, safety*. 2017. P. 174–179.
7. Bondar A. A. Development of a method for supplying a fire extinguishing agent from fire extinguishing modules at oil and gas facilities // *Candidate dissertation*. SPb., 2012. P. 23.
8. Kolodyazhniy S., Kozlov V. Analytical calculation of time of reaching specific values based on visibility loss during a fire // *MATEC Web of Conferences / EDP Sciences*. 2018. Т. 193. P. 8. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819303007>.
9. Philip A., Rubini Q. Simulation of visibility in smoke laden environments // *InterFlam 2007, 11th International Conference of Fire Science and Engineering*. 2007. P. 12.
10. Methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and structures of various classes of functional fire hazard: order No. 382 of the Ministry of Emergencies of Russia dated June 30, 2009 / FGU VNIPO EMERCOM of Russia. М., 2009. P. 71.
11. Ivanov A. V. et al. Physical mechanism and method of extinguishing liquid hydrocarbons with modified suspensions of water with carbon nanostructures // *Pozharovzryvobezopasnost*. 2019. Т. 28, N 1. P. 22–34.
12. Klochkov S. V., Rybakova E. Yu., Chueva K. A. Modeling of hazardous factors of a fire of a multi-functional building based on pyrosim and fire dynamics simulator // *Actual problems of polychotomous analysis*. 2019. P. 62–73.
13. Tarantsev A. A., Shidlovsky G. L., Potashev D. A. Features of the spread of hazardous factors of fire in underground parking lots // *Problems of risk management in the technosphere*. 2020. № 1. P. 43–52.

14. Shames A. I. et al. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles // *Diamond and Related Materials*. 2009. T. 18, N 2–3. P. 505–510.
15. Surikov A. V. Investigation of the ratio of fire-technical indicators characterizing the smoke formation process using a field model of fire *Materials of the International Scientific Seminar "Problems of ensuring fire safety of economic facilities"*. Kokshetau, 2014. P. 157–160.
16. Toropov D. P., Ivanov A. V., Skripnik I. L. Simulation of extinguishing a fire of liquid hydrocarbons in the conditions of using fire-extinguishing suspensions of water with carbon nanostructures // *Fire safety*. 2019. P. 91–103.
17. Buongiorno J. Convective transport in nanofluids // *Journal of Heat Transfer*. 2006. № 128. P. 240–250. DOI: 10.1115/1.2150834.
18. Sekhar Y. R., Sharma K. V. Study of viscosity and specific heat capacity characteristics of water-based  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluids at low particle concentrations // *Journal of experimental Nanoscience*. 2015. T. 10, N 2. P. 86–102. DOI: 10.1080/17458080.2013.796595.
19. Namburu P. K. et al. Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids // *Micro & Nano Letters* 2.3. 2007. P. 67–71.
20. Rudyak V. Ya., Minakov A. V., Pryazhnikov M. I. Thermophysical properties of nanofluids and similarity criteria // *Letters to the Journal of Technical Physics*. 2016. T. 42, N 24. P. 9–16.