

УДК 614.844.2

ДОБАВКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ**Пустовалов Илья Андреевич¹, Иванов Алексей Владимирович²**¹Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Россия²Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева, г. Санкт-Петербург, Россия**АННОТАЦИЯ**

В данной статье рассмотрены результаты исследований в области повышения огнетушащей эффективности тонкораспыленной воды за счет применения добавок, а также возможность ее использования в целях тушения пожаров горючих жидкостей. Представлен обзор основных добавок к тонкораспыленной воде, предложенных исследователями за последние восемь лет: органические соединения, наноматериалы, неорганические соединения, поверхностно-активные вещества, многокомпонентные добавки. Рассмотрены характеристики различных видов добавок: свойства, механизмы действия при тушении модельных очагов пожаров класса «В». Предложена классификация основных видов добавок. Определены доминирующие способы тушения пожара горючей и легковоспламеняющейся жидкостей при добавлении различных добавок в состав ТРВ. Сделан вывод о возможности применения тонкораспыленной воды, содержащей добавки, для тушения пожаров нефтепродуктов, что подтверждается экспериментальными данными. Подбор добавок к тонкораспыленной воде следует осуществлять исходя из вида объекта защиты, установки пожаротушения и условий эксплуатации. Отмечена высокая эффективность огнетушащих составов на водной основе с применением углеродных наноструктур (астраленов) при тушении легковоспламеняющихся и горючих жидкостей. Данная добавка интенсифицирует процессы теплоотвода, что оказывает значительный эффект на скорость охлаждения пламенной зоны горения.

Ключевые слова: тонкораспыленная вода, добавка, горючая жидкость, тушение, модульная установка пожаротушения, нефтепродукты, астралены

ADDITIVES FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF FINE SPRAY WATER IN EXTINGUISHING OIL PRODUCT FIRES**Ilya A. Pustovalov¹, Alexey V. Ivanov²**¹Academy of the State Fire service of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia²Saint-Petersburg University of State Fire service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

This article reviews the results of research in the field of increasing the extinguishing efficiency of fine spray water through the use of additives, as well as the possibility of its use for extinguishing fires of flammable liquids. An overview of the main additives to finely dispersed water proposed by researchers over the past eight years is presented: organic compounds, nanomaterials, inorganic compounds, surfactants, multicomponent additives. Characteristics of different types of additives are considered: properties, mechanisms of action in extinguishing model fires of class "B". Classification of the main types of additives is proposed. The dominant methods of fire extinguishing of combustible and flammable liquids when adding various additives to the composition of TRVs are determined. It is concluded that it is possible to use fine spray water containing additives for extinguishing fires of oil products, which is confirmed by experimental data. Selection of additives to fine spray water should be based on the type of protection object, fire extinguishing installation and operating conditions. High efficiency of water-based fire extinguishing compositions with the use of carbon nanostructures (astralenes) in extinguishing flammable and combustible liquids has been noted. This additive intensifies the processes of heat removal, which has a significant effect on the cooling rate of the flame combustion zone.

Keywords: fine spray water, additive, flammable liquid, extinguishing, modular fire extinguishing unit, petroleum products, astralenes

Введение

Затяжные пожары нефтепродуктов приводят к загрязнению окружающей среды, наносят большой материальный ущерб предприятию и государству. Сосредоточение значительной пожарной нагрузки, ограниченность способов доставки огнетушащего вещества в зону горения создают угрозу жизни и здоровью персонала и личного состава пожарных подразделений, задействованных для ликвидации возгорания. Для пожаров нефтепродуктов характерна высокая динамика развития и скорость распространения пламени на ранней стадии пожара [1]. В условиях невозможности предотвращения возникновения пожара возникает необходимость разработки новых способов пожаротушения, обеспечивающих локализацию и ликвидацию возгорания на ранней стадии развития пожара.

Основная часть

В целях обеспечения пожарной безопасности на потенциально опасных объектах существует два принципиально различных подхода [2]. Первый подход направлен на предотвращение возникновения пожаров, второй – на формирование условий, позволяющих достичь ликвидации на ранней стадии развития пожара (рисунок 1).

Наиболее перспективным огнетушащим веществом с точки зрения величины материального ущерба, причиненного в результате тушения, безопасности для людей и затрат на монтаж оборудования является тонкораспыленная вода (ТРВ). Данный вид огнетушащего вещества хорошо зарекомендован для обеспечения защиты от пожаров на следующих объектах: складские системы стеллажного хранения, подземные автостоянки, различные виды транспортной техники, электрооборудование, находящееся под напряжением, архивы, книгохранилища и другие

объекты [8–11]. Однако для тушения пожаров нефтепродуктов тонкораспыленная вода применяется редко.

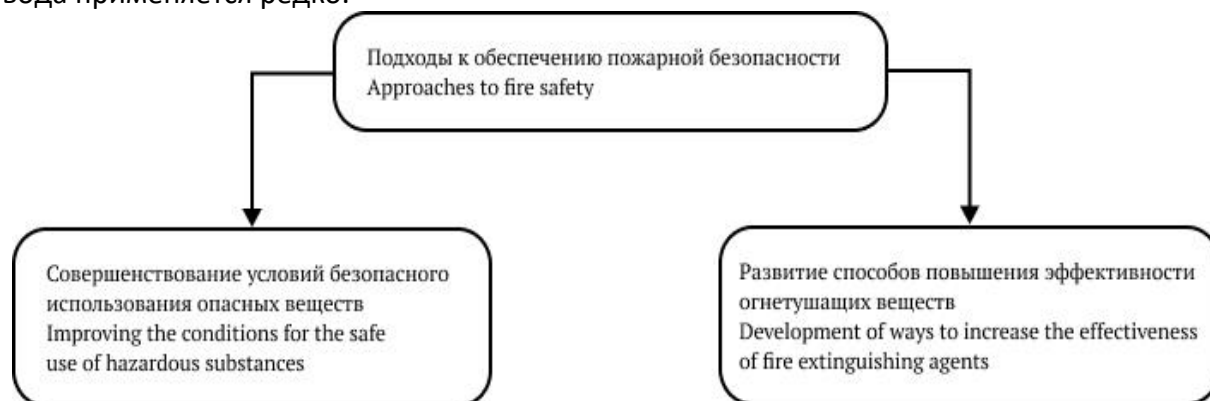


Рис. 1. Подходы к обеспечению пожарной безопасности на объектах с обращением опасных веществ

Fig. 1. Approaches to ensuring fire safety at facilities with hazardous substances handling

Известны основные механизмы тушения горючей жидкости тонкораспыленной водой: достижение значения массовой концентрации водяного пара, при котором достигается нижний концентрационный предел горения горючей газовой смеси; охлаждение горючей газовой смеси в пламенной зоне за счет испарения воды до температуры вспышки горючих паров [6]. При объемном тушении основными характеристиками тонкораспыленной воды являются скорость достижения требуемой концентрация водяного пара (разбавление) и скорость испарения капель воды (охлаждение пламенной зоны). Мощность теплового потока при горении нефтепродуктов в зависимости от расстояния до очаговой зоны может достигать более

20 кВт/м² [7], в результате чего капли среднего диаметра 150 мкм уносятся из зоны горения, не достигнув пламенной зоны и вышеуказанные механизмы не работают.

В последние годы активно развивается направление модифицирования воды различными добавками. В данной статье приведен обзор добавок, влияющих на огнетушащую способность системы тушения тонкораспыленной водой без учета внешних характеристик окружающей среды и очага, таких как наличие механической вентиляции, наклон поверхности, несколько очаговых зон и прочие факторы. Классификация добавок, представленная на рис. 2, учитывает механизм подавления пламени горючей жидкости и природы добавки.

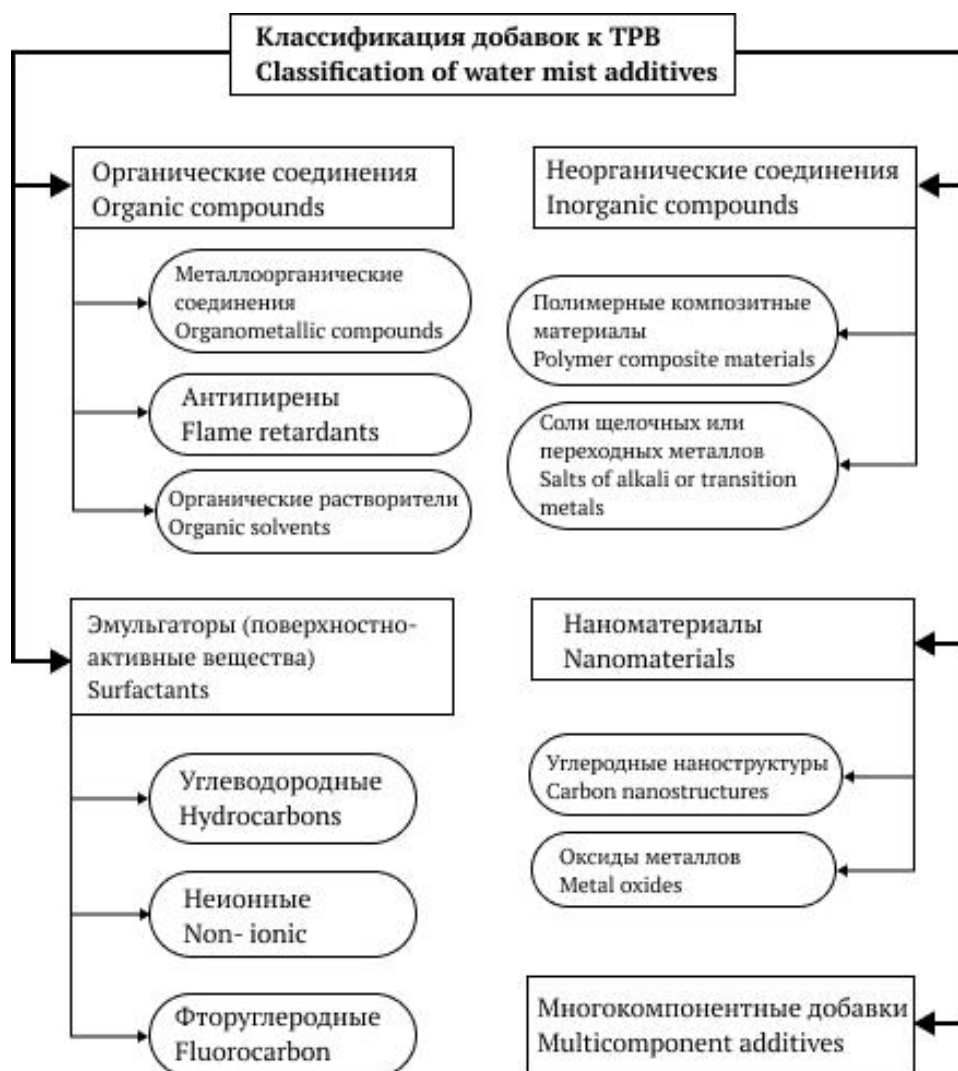


Рис. 2. Классификация добавок, повышающих огнетушащие свойства тонкораспыленной воды при тушении пожаров нефтепродуктов

Fig. 2. Classification of additives that increase the extinguishing properties of finely dispersed water when extinguishing fires of petroleum products

Неорганические соединения

Научным коллективом [3] были проведены исследования с целью оценки влияния 10-процентного бромида калия (10 % KBr) на эффективность тушения модельного очага пожара класса В тонкораспыленной водой. Время свободного горения легковоспламеняющейся жидкости составляло 15 с., а подача на тушение тонкораспыленной воды без добавок осуществлялась с высоты 2 м. В результате было установлено резкое увеличение температуры (от 27 до 416 °С) в зоне горения, расположенной на высоте 10 см от зеркала

жидкости. При этом ликвидация возгорания в модельном очаге класса В объемом 200 мл не была достигнута. Это указывает на недостаточные теплоотводящие свойства водяного тумана без добавок. В тоже время применение тонкораспыленной воды с содержанием 10 % KBr препятствует увеличению температуры в зоне горения выше 284 °С. Кроме того, обнаружено смещение эндотермического пика на высоту 20 см от зеркала жидкости. Это связано с образованием продуктов разложения KBr, которые сосредотачиваются в промежутке между зеркалом жидкости и уров-

нем размещением термопары № 2 (на высоте 20 см), образуя нестабильный зазор. Ликвидация модельного очага пожара класса В в условиях применения добавки 10 % КВг была достигнута на 81 секунде.

Авторским коллективом [2] рассматривался вопрос снижения негативных последствий пожаров нефтепродуктов с точки зрения предотвращения несчастных случаев, обеспечения сохранности окружающей среды и энергосбережения. С этой целью изучалась возможность применения тонкораспыленной воды в системах низкого, среднего и высокого давления как чистой, так и с применением экологически чистых добавок для тушения пожаров горючих жидкостей. В качестве добавок к воде применялся полимерный композит собственного производства и хлорид натрия (NaCl). Результаты исследований демонстрируют эффективность чистой тонкораспыленной воды в системах пожаротушения высокого давления. В тоже время применение добавки – полимерного композиционного материала в концентрации 1 масс. % – позволило обеспечить тушение возгорания горючей жидкости в системе пожаротушения низкого давления. Тонкораспылённая вода с содержанием 1 масс. % NaCl не продемонстрировала стабильный эффект тушения возгорания горючей жидкости.

Доминирующим способом тушения горючей жидкости тонкораспыленной водой, содержащей неорганические соединения, является ингибирование.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ)

Применение полисорбата-80 в качестве добавки к ТРВ позволяет получить эмульсию бензина и воды, что приводит к снижению давления насыщенного пара. В условиях воздействия окислителя и температуры скорость образования горючих паров над поверхностью эмульсии ниже по сравнению с бензином. Этот эффект

способствует тушению пожаров класса В. Так, добавление 0,5 об. % полисорбата-80 к тонкораспыленной воде позволяет ликвидировать модельный очаг пожара с высоты 2 м за 32 с [3].

В исследовании [4] изучалось влияние углеводородного поверхностно-активного вещества (кокамидопропилбетаин), а также фторуглеродного поверхностно-активного вещества (Capstone FS-1157) на ТРВ, концентрации которых составили 1 масс. %. Применение кокамидопропилбетаина позволяет значительно снизить поверхностное натяжение воды для усиления эффекта распыления. Применение Capstone FS-1157 обусловлено способностью образовывать тонкослойную пленку на поверхности масла и эмульгировать ГЖ после распыления из форсунки. В результате исследования установлено, что среднее время тушения пожара было значительно сокращено по сравнению с использованием чистого водяного тумана, особенно для Capstone FS-1157, огнетушащий эффект которого является наилучшим при тушении трансформаторного масла. Время тушения пожара трансформаторного масла составило 6 с, что на 90 % ниже по сравнению с чистым водяным туманом. Данный результат главным образом связан с эмульгированием поверхностно-активного вещества на поверхность горючей жидкости.

В исследовании [12] было изучено влияние четырех видов ПАВ в составе ТРВ на время тушения пожара в бассейне с трансформаторным маслом. Было зафиксировано изменение температуры и формы пламени пожара в процессе тушения горящего трансформаторного масла. Эффективность тушения пожара водяным туманом, содержащим ПАВ, оказалась выше по сравнению с чистой тонкораспыленной водой. Это связано со снижением поверхностного натяжения воды, изоляцией кислорода за счет образования пленки на поверхности горючей жидкости

и эмульгирования трансформаторного масла при поверхностно-объемном тушении. Водяной туман, содержащий фторуглеродное ПАВ, продемонстрировал лучший огнетушащий эффект пожара в очаге с трансформаторным маслом, чем водяной туман, содержащий углеводородное ПАВ. Так, с помощью тонкораспыленной воды с содержанием 5 % фторуглеродного ПАВ время тушения пожара составило 7 с. Это связано с высокой электроотрицательностью и низкой поляризуемостью фторуглеродной цепи в ПАВ, а также с низкой стабильностью углеводородных ПАВ в условиях повышенной температуры. Фторуглеродное ПАВ обладает высокой поверхностной активностью в водном растворе, что приводит к образованию устойчивой пленки на поверхности горючей жидкости и изолированию кислорода.

Таким образом, основным способом тушения пожара ТРВ с содержанием ПАВ является изоляция – образование на поверхности горючей жидкости изолирующего слоя, позволяющего снизить скорость образования горючих паров над горючей жидкостью, а также эмульгирование горючей жидкости, что приводит к снижению скорости её испарения. Также применение фторсодержащих ПАВ позволяет уменьшить размер частиц водяного тумана.

Органические соединения

Добавка, представляющая собой соль щелочного металла (KHSO_3), способна образовывать активные радикалы при тушении пожаров горючих жидкостей. Калиевая соль, используемая в качестве добавки к тонкораспыленной воде продемонстрировала положительный эффект по сравнению с чистой водой [4]. Среднее время тушения модельного очага с бензином составило 30 с, с дизельным топливом – 25 с, а с трансформаторным маслом – 37 с.

Органический антипирен (карбамид) при попадании в зону горения выделяет большое количество инертных газов и поглощает энергию пламени путем разложения. Эффективность тушения диамидом угольной кислоты ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) бензиновых и дизельных пожаров оказалась выше, чем у KHSO_3 и поверхностно-активных веществ [4]. Время тушения составило 16 и 19 с для бензиновых и дизельных топлив соответственно. Это связано с реакцией разложения карбамида, поглощающего большое количество тепла, что приводит к снижению температуры пламени, а также с образованием инертных газов, таких как NH_3 и CO_2 , которые разбавляют окислитель.

В работе [5] проведено исследование влияния азеотропных смесей органических растворителей с водой на эффективность тушения модельного очага пожара класса В (гептана) водяным туманом. В качестве органических растворителей использовались: этанол (от 1 до 20 об. %), пропанол (от 1 до 20 об. %). Минимальное время тушения продемонстрировали водяной туман с концентрацией этанола 7 об. % (3,1 с) и водный состав с концентрацией пропанола 3 об. % (1,7 с). Исследование скорости испарения капель тонкораспыленного раствора показало, что скорость испарения капель увеличивается по мере увеличения доли летучего спирта в растворителе с 0 до 20 об. %. В результате математической обработки данных, полученных в ходе эксперимента, было установлено, что увеличение скорости испарения капель огнетушащей жидкости повышает эффективность пожаротушения.

В исследовании [13] оценивалось влияние водных дисперсий металлоорганического соединения (ферроцена). В каплях тонкораспыленной воды содержались частицы ферроцена микронного размера и ПАВ, такие как Triton X-100 (ТХ), Noigen TDS-80 (NT), Tween 60 (Т60) и Tween 80

(Т80). Ферроцен и его производные являются хорошими ингибиторами пламени и антипиренами. Эксперименты по тушению пожаров в бассейнах показали, что водные дисперсии ферроцена, содержащие ТХ и ферроцен микронного размера, $s = 16,9$ мкм, обладают более коротким временем тушения, чем обычный влажный химикат. Однако, когда ферроцен используется в качестве добавки к воде, он имеет два явных недостатка: нерастворимость в воде и снижение эффективности тушения при более высоких фракциях ферроцена.

В исследовании [3] упоминается об использовании угольной кислоты в составе ТРВ, которая образуется при растворении в воде диоксида углерода. Раствор, насыщенный CO_2 хранится в герметичной емкости под давлением 0,7 Мпа и температуре 20 °С. При распылении водяного тумана давление в системе снижается, что приводит к улетучиванию свободных групп CO_2 , а молекулы угольной кислоты доставляются в зону горения. Количество теплоты, поглощаемое при разрушении молекулярных связей H_2CO_3 при температуре 25 °С, составляет около 19,4 кДж/моль. Таким образом, применение растворенного в воде диоксида углерода улучшает охлаждающий эффект и снижает высоту пламени. Однако в исследовании [3] ликвидировать модельный очаг пожара класса В с помощью тонкораспыленной воды, насыщенной CO_2 , не удалось.

Таким образом, доминирующим способом тушения горючей жидкости тонкораспыленной водой, содержащей органические соединения, также является ингибирование.

Многокомпонентная добавка

С целью комбинации нескольких огнетушащих эффектов часто применяются многокомпонентные добавки. Так, при тушении модельного очага пожара с высоты 2 м с помощью многокомпонентных

добавок, содержащих: 5 % KBr + 0.5 об. % полисорбата-80, 10 % KBr + 0.5 об. % полисорбата-80, 5 % KBr + 0.5 об. % полисорбата-80 + раствор 6,4 л CO_2 , 10 % KBr + 0.5 об. % полисорбата-80 + раствор 6,4 л CO_2 , тушение горючей жидкости было достигнуто за 21, 16, 4 и 3 с соответственно [3].

В исследовании [14] оценивались эффективность тушения и механизм подавления пламени при возгорании этанола с помощью водяного тумана, содержащего инертный газ (N_2), комплексную добавку KQ (6 об. % фторсодержащего ПАВ и K_2CO_3), и растворы солей. Практическая значимость данного исследования заключалась в создании условий безопасного хранения и транспортировки топлива на спиртовой основе. Участие солей и двухатомного азота в составе тонкораспыленной воды заметно сокращало время снижения температуры пламенной зоны горения по сравнению с чистой тонкораспыленной водой.

Использование ТРВ без добавок снизило температуру пламени с 660 °С до 145 °С в среднем за 114 с, при добавлении N_2 – за 102 с, а при охлаждении пламени 5–10-процентными водными растворами солей (K_2CO_3 , $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$, RCl, KH_2PO_4) и N_2 время снижения температуры до 145 °С варьировалось в промежутке от 52 до 68 с в зависимости от вида применяемого солевого раствора. Эксперименты по тушению модельного очага пожара этанола объемом 100 мл продемонстрировали наилучшие результаты тушения при использовании следующих видов добавок в составе тонкораспыленной воды: N_2 + 5 об. % K_2CO_3 – 14,58 с, N_2 + 10 об. % K_2CO_3 – 12,31 с, N_2 + 10 об. % KQ – 10,05 с.

Также замечено, что применение добавки KQ способствовало уменьшению диаметра капель водяного тумана по сравнению с водными солевыми растворами. Это позволяло увеличить скорость образования ионов и приводило к уменьшению

турбулентности пламени, вызываемой поступлением водяного тумана.

Таким образом, действие многокомпонентных добавок при тушении пожара ЛВЖ и ГЖ показывает комбинированный механизм. Так, присутствие инертного газа способствует увеличению удельной теплоемкости смеси, благодаря чему снижаются концентрация паров горючей жидкости в зоне горения и интенсивность пламени, а химические добавки способны ингибировать цепную реакцию горения.

Наноструктуры

Механизм работы наноструктур в составе ТРВ заключается в увеличении эффективной теплопроводности базовой жидкости, улучшая при этом охлаждающие свойства жидкости. В качестве нанодобавок могут выступать такие наноразмерные материалы, как золото, окись меди, карбид кремния, диоксид титана и т. п. [15].

В работе [16] представлены результаты исследований по определению влияния многослойных углеродных нанотрубок (MWCNT) на огнетушащие характеристики тонкораспыленной воды в условиях тушения пламени легковоспламеняющихся жидкостей. Увеличение концентрации MWCNT до 1 об. % в огнетушащих суспензиях повышает огнетушащую эффективность тонкораспыленной воды за счет изменения теплофизических и реологических характеристик суспензии, которые влияют на скорость отвода тепла из зоны горения. Дальнейшее увеличение концентрации наноструктур снижает теплофизические свойства, и, соответственно, эффективность огнетушащего вещества.

В исследовании [17] описаны результаты тушения модельных очагов пожара класса В с помощью ТРВ, в состав которой диспергированы астралены – гидрофобные углеродные наноструктуры

с высокой термической устойчивостью. Концентрация астраленов составляла от 0,05 до 1 об. %. Привнесение астраленов в состав дистиллированной воды оказало влияние на ее характеристики, такие как поверхностное натяжение, динамическая вязкость, удельная теплота парообразования и прочие. При тушении модельного очага пожара класса В, наилучший результат продемонстрировало огнетушащее вещество с содержанием астраленов 0,5 об. %. Ликвидация горения бензина марки АИ-95 объемом 100 мл была достигнута на 3 с, в то время как с помощью чистой тонкораспыленной воды потушить данный очаг не удалось.

Таким образом, основным способом тушения пожара горючей жидкости при добавлении углеродных наноструктур в состав ТРВ является охлаждение в результате интенсификации процессов теплоотвода в момент доставки тонкораспыленной суспензии в зону горения.

Выводы

Экспериментальные данные демонстрируют, что применение добавок в составе тонкораспыленной воды приводит к значительному повышению ее огнетушащей эффективности, которая выражается в сокращении времени тушения пожаров легковоспламеняющихся и горючих жидкостей. Данную особенность целесообразно учитывать при проектировании систем водяного пожаротушения, в том числе модульных установок пожаротушения. Эффект, оказываемый добавками на ТРВ, значительно отличается в зависимости от вида и концентрации. Поэтому для корректной работы огнетушащего вещества требуются дополнительные исследования, учитывающие вид объекта защиты, установки пожаротушения и условий эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гравит М. В., Бардин А. В. Углеводородный режим пожара // Комплексная безопасность и физическая защита. 2017. С. 46–57.
2. Liu Y. C., Jiang J. C., Huang A. C. Experimental study on extinguishing oil fire by water mist with polymer composite additives // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. Vol. 148. Pp. 4811–4822.
3. Lv D. Tan W., Zhu G., Liu L. Gasoline fire extinguishing by 0.7 MPa water mist with multicomponent additives driven by CO₂ // Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 129. Pp. 168–175.
4. Investigation of the fire-extinguishing performance of water mist with various additives on typical pool fires / J. Lu et al. // Combustion Science and Technology. 2019. P. 6.
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. 103973.
6. Корольченко Д. А., Пузач С. В. Оценка механизмов тушения горючих жидкостей тонкораспыленной водой // Пожаровзрывобезопасность. 2021. Т. 30, № 1. С. 54–63.
7. Копылов Н. П., Хасанов И. Р. Эффективность применения теплозащитных экранов для защиты от тепловых потоков при пожарах // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 11. С. 38–43.
8. Павлов А. Опыт использования модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой для защиты объектов различного назначения // Алгоритм безопасности. 2008. № 5. С. 28–31.
9. Фомин В. И., Миначев Р. И. Пожаротушение карьерной техники тонкораспыленной водой // Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области пожарной безопасности. 2018. С. 346–349.
10. Кожин С. Тушение тонкораспыленной водой электрооборудования, находящегося под напряжением // Безопасность. Достоверность. Информация. 2008. № 79. С. 46–47.
11. Романовская Д. П., Носенко М. О. Применение установки пожаротушения тонкораспыленной водой на примере книгохранилища библиотеки ТОГУ // Новые идеи нового века. 2014. Т. 3. С. 373–378.
12. Experimental study on the effectiveness of water mist containing surfactant on extinguishing transformer oil fire / P. Liang et al. // 2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2021. Pp. 3698–3703.
13. Koshiba Y., Okazaki S., Ohtani H. Experimental investigation of the fire extinguishing capability of ferrocene-containing water mist // Fire Safety Journal. 2016. Vol. 83. Pp. 90–98.
14. Evaluation of the suppression effect on the flame intensification of ethanol fire by N₂ twin-fluid water mist containing KQ compound additive / B. Pei et al. // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 149. Pp. 289–298.
15. Терехов В. И., Калинина С. В., Леманов В. В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Ч. 1: Синтез и свойства наножидкостей // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 2. С. 173–188.
16. Toropov D., Ivanov A., Dali F., Perlin A., Lebedev A. Extinguishing characteristics of water suspensions with carbon nanostructures at extinguishing liquid hydrocarbons fires (oil and gas industry) // Delta. 2019. Vol. 13, No. 1. Pp. 22–31.
17. Пустовалов И. А. Экспериментальное исследование огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, модифицированной астраленами // Пожаровзрывобезопасность. 2021. Т. 30, № 5. С. 84–97.

REFERENCES

1. Gravit M. V., Bardin A. V. Hydrocarbon fire regime. Comprehensive security and physical protection. 2017; 46–57. (rus).
2. Liu Y.C., Jiang J.C., Huang A.C. Experimental study on extinguishing oil fire by water mist with polymer composite additives. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023; 148: 4811–4822.
3. Lv D. Tan W., Zhu G., Liu L. Gasoline fire extinguishing by 0.7 MPa water mist with multicomponent additives driven by CO₂. Process Safety and Environmental Protection. 2019; 129: 168–175.
4. Lu J., Liang P., Chen B., Wu C. & Zhou T. Investigation of the fire-extinguishing performance of water mist with various additives on typical pool fires. Combustion Science and Technology. 2019; 6.
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: 103973.
6. Korolchenko D. A., Puzach S. V. The assessment of extinction mechanisms involving water mist applied to combustible liquids. Pozharovzryvobezopasnost. 2021; 30 (1): 54–63. (rus).
7. Kopylov N. P., Khasanov I. R. Efficiency of thermal shields application for protection against thermal flows in case of fires. Occupation safety in industry. 2016; 11: 38–43. (rus).

8. Pavlov A. Experience in using modular fire extinguishing systems with thinly sprayed water to protect objects for various purposes. The security algorithm. 2008; 5: 28–31. (rus).
9. Fomin V. I., Minachev R. I. Modular fire-fighting of quarry equipment. Historical experience, current problems and prospects of educational and scientific activities in the field of fire safety: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, October 18-19, 2018; Moscow: Academy of the State Fire service of EMERCOM of Russia, 2018; 346–349. (rus).
10. Kozhinov S. Extinguishing with fine spray water of electrical equipment under voltage. Safety. Credibility. Information. 2008; 79: 46–47. (rus).
11. Romanovskai D. P., Nosenko M. O. Application of fire suppression by the example of water mist book depository libraries in PNU. New Ideas of New Century: Proceedings of the International Scientific Conference FAD PNU. 2014; 3: 373–378. (rus).
12. Liang P., Zhou T., Chen B., Wu C., Liu Y. Experimental study on the effectiveness of water mist containing surfactant on extinguishing transformer oil fire. Energy Internet and Energy System Integration (EI2): Proceedings of the 5th Scientific Conference, Taiyuan, October, 22-24, 2021, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021; 3698–3703.
13. Koshiba Y., Okazaki S., Ohtani H. Experimental investigation of the fire extinguishing capability of ferrocene-containing water mist. Fire Safety Journal. 2016; 83: 90–98.
14. Pei B., Zhu Z., Yang S., Wei S., Pan R., Yu M., Chen L. Evaluation of the suppression effect on the flame intensification of ethanol fire by N2 twin-fluid water mist containing KQ compound additive. Process Safety and Environmental Protection. 2021; 149: 289–298.
15. Terekhov V. I., Kalinina S. V., Lemanov V. V. Mechanism of heat transfer in nanofluids: current state of the problem (review). Part 1: Synthesis and properties of nanofluids. Thermophysics and Aeromechanics. 2010; 17 (1): 173–188. (rus).
16. Toropov D. Ivanov A, Dali F., Perlin A., Lebedev A. Extinguishing characteristics of water suspensions with carbon nanostructures at extinguishing liquid hydrocarbons fires (oil and gas industry). Delta. 2019; 13 (1): 22–31.
17. Pustovalov I. A. An experimental study of the fire extinguishing ability of modular fire extinguishing installations if astralene-modified water mist is used. Pozharovzryvobezopasnost. 2021; 30 (5): 84–97.

Информация об авторах

Иванов Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, СПб УГПС МЧС России, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149; РИНЦ ID: 792929; e-mail: spark002@mail.ru

Пустовалов Илья Андреевич, преподаватель кафедры механики инженерной графики, Академия ГПС МЧС России, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4; РИНЦ ID: 1122887; ORCID: 0000-0002-8059-6988; e-mail: ilya_pustovalov_2020@bk.ru

Information about the authors

Alexey I. Ivanov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes and Productions, Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Moskovskiy prospect, 149, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 792929; e-mail: spark002@mail.ru

Ilya A. Pustovalov, Lecturer of the Department of Mechanics of Engineering Graphics, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 1122887; ORCID: 0000-0002-8059-6988; e-mail: ilya_pustovalov_2020@bk.ru