

УДК 614.841.4

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0038

**МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ОГНЕТУШАЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МОДУЛЬНЫХ УСТАНОВОК
ПОЖАРОТУШЕНИЯ ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ
НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА**

© 2021

Пустовалов Илья Андреевич, адъюнкт кафедры
пожарной безопасности технологических процессов и производств
Иванов Алексей Владимирович, кандидат технических наук,
доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств
*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России
(Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149,
e-mails: ilya_pustovalov_2020@bk.ru, spark002@mail.ru)*

Аннотация. В данной статье предложена методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, которая заключается в совершенствовании системы противопожарной защиты за счет снижения времени тушения модельных очагов пожара класса «В». Во введении приведен обзор существующих добавок для изменения характеристик воды. Описано их влияние на тушение пожаров класса «В» в условиях применения тонкораспыленной водой, а также недостатки. Указано, что снижение времени тушения модельных очагов пожара класса «В» было достигнуто путем изменения свойств огнетушащего вещества, применяемого в модульных установках пожаротушения тонкораспыленной водой, которые обеспечивают снижение пожарной опасности технологических процессов и тушение пожаров паров нефтепродуктов на объектах нефтегазового комплекса. Изменение теплофизических и реологических свойств исследуемого огнетушащего вещества обеспечивается благодаря диспергированию в его состав астраленов. Приведены результаты работ отечественных и зарубежных исследователей, которые помогают объяснить влияние астраленов на огнетушащие свойства вещества. Представлены результаты регрессионного анализа влияния свойств огнетушащей жидкости на время тушения модельного очага пожара класса «В». Предложен алгоритм повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой на объектах нефтегазового комплекса. Сделаны выводы о возможности применения разработанной методики и необходимости разработки рекомендаций для применения исследуемых огнетушащих составов в целях их внедрения в ГОСТ.

Ключевые слова: тонкораспыленная вода, астралены, нефтегазовый комплекс, огнетушащая способность, модульные установки, время тушения, система противопожарной защиты.

**METHOD FOR INCREASING THE FIRE EXTINGUISHING EFFICIENCY OF MODULES AUTOMATIC
FIRE WATER MIST SPRAY EXTINGUISHERS SYSTEMS AT THE
OBJECTS OF THE OIL AND GAS FACILITIES**

© 2021

Pustovalov Ilya Andreevich, adjunct at the department of fire safety technological processes and production
Ivanov Alexey Vladimirovich, candidate of technical sciences,
associate professor at the department of fire safety technological processes and production
*Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia
(Russia, 196105, St. Petersburg, Moskovsky prospect, 149
e-mails: ilya_pustovalov_2020@bk.ru, spark002@mail.ru)*

Abstract. This article proposes a technique for increasing the extinguishing efficiency of modules automatic fire water mist spray extinguishers systems, which consists in improving the fire protection system by reducing the time for extinguishing standardized fire source of a petroleum flames. The introduction provides an overview of existing additives for changing water characteristics. Described is their effect on extinguishing standardized fire source of a petroleum flames under conditions of use with water mist, as well as disadvantages. It is indicated that reducing the time for extinguishing standardized fire source of a petroleum flames was achieved by changing the properties of the extinguishing agent used in modules automatic fire water mist spray extinguishers systems. It is reduce the fire hazard of technological processes and extinguish fires of oil vapors at oil and gas facilities. The change in the thermophysical and rheological properties of the investigated fire extinguishing agent is ensured due to the dispersion of astralenes into its composition. The results of the work of domestic and foreign researchers are presented. It is help to explain the effect of astralenes on the fire-extinguishing properties of the substance. The results of a regression analysis of the effect of the properties of the extinguishing agent for the time of extinguishing standardized fire source of a petroleum are presented. An algorithm for increasing the extinguishing efficiency of modules automatic fire water mist spray extinguishers systems at oil and gas facilities is proposed. The conclusion contains information about the possibility of using the developed methodology and the need to develop recommendations for the use of the investigated extinguishing agents in order to introduce them into GOST.

Keywords: water mist, astralenes, oil and gas complex, extinguishing efficiency, modules automatic fire water mist spray extinguishers systems, time for extinguishing, fire protection system.

Введение. В современных условиях наращивания объемов добычи, а также внедрения новых технологий в процессы переработки нефтепродуктов, обеспечение тушения пожаров и защиты людей от воздействия опасных факторов пожара является первостепенной задачей. Сложность применения для этих целей водяных автоматических установок пожаротушения (пп.10, ст. 52 № 123-ФЗ), в том числе модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой (МУПТВ) на объектах нефтегазового комплекса (НГК) связана с особенностями горения нефтепродуктов:

- высокой скоростью окислительных реакций при горении легковоспламеняющихся и горючих жидкостей (ЛВЖ и ГЖ);

- большим сопротивлением восходящих от пламени нагретых газов из-за высокой плотности и теплоемкости пламени.

При реализации мероприятий по обеспечению пожарной безопасности на объектах НГК в условиях применения МУПТВ возникают ограничения, связанные с несоответствием параметров, требуемых для тушения пожара, с заявленными эксплуатационными характеристиками МУПТВ. Основными недостатками являются высокая скорость выхода огнетушащего вещества, низкая интенсивность орошения или недостаточная инерционная способность капель. В целях повышения эффективности тушения пожаров тонкораспыленной водой разрабатываются технические и организационные решения: модернизация оросителей, разработка новых способов и средств тушения, модифицирование огнетушащего состава [1-7]. Выбор приоритетного решения зависит от эффективности, трудоемкости и величины затрат, связанных с его реализацией. Первые два способа требуют значительных экономических затрат, связанных с разработкой технического решения, проведением испытаний, внедрением в производство и переоборудованием существующих установок. В тоже время, модифицирование уже существующего огнетушащего состава способно снизить затраты на улучшение огнетушащих характеристик МУПТВ за счет отсутствия необходимости радикального изменения конструктивных особенностей установки.

В соответствии с таблицей 1, п. 4 ГОСТ Р 53288-2009 в качестве огнетушащих веществ в МУПТВ применяются: вода, газодоводная смесь, жидкие ОТВ, а также вода с добавками. В настоящее время для ликвидации пожара класса «В» вода в чистом виде практически не применяется. Среди добавок наиболее распространены поверхностно-активные вещества (ПАВ). Они применяются для изменения свойств воды и повышения её огнетушащей эффективности. Анализ работ зарубежных и отечественных исследователей показал, что для изменения теплофизических и реологических свойств жидкостей в основном применяются поверхностно-активные вещества и многокомпонентные агенты (*Cong B. H., Kim A. K., Wu. B.*), органические растворители (*Koshiba Y., Yamamoto Y.,*

Feng M. H.), наноразмерные оксиды металлов (*Lee J., Kim S.J., Kim T.I., Терехов В.И.*) и углеродные наноструктуры (*Berrada N., Терехов В.И., Liu Z-H, Yang X-F, Gao L., Hone J., Елецкий А.В.*). В таблице 1 представлен перечень добавок к воде, способствующих тушению очагов пожара класса «В» в условиях применения тонкораспыленной воды.

Добавление ПАВ в огнетушащий состав способствует образованию пленки на поверхности нефтепродукта, которая предотвращает образование паров горючей жидкости. Это повышает эффективность тушения возгораний бензина и дизельного топлива. Механизм применения ПАВ имеет существенный недостаток: при образовании пленки на поверхности нефтепродукта не происходит интенсивного охлаждения зоны горения. Таким образом высокая температура в зоне горения может привести к повторному возгоранию.

Органические растворители повышают кислотность водосодержащего раствора. При этом увеличивается коррозионная активность, негативно влияющая на срок эксплуатации модульной установки пожаротушения.

Основным недостатком металлических наночастиц является значительное повышение электропроводности огнетушащего состава.

Недостатком применения углеродных наноструктур является их склонность к агломерации и быстрая седиментация.

Основная задача, связанная с применением тонкораспыленных струй при тушении пожаров ЛВЖ и ГЖ – обеспечить проникающую способность струи. Проникающая способность жидкости определяется напором струи, напором и гидравлическим сопротивлением отходящих от пламени нагретых газов, размером и скоростью движения капель. При модифицировании огнетушащих составов необходимо учитывать, что доминирующими процессами, определяющими эффект тушения, являются испарение капель воды в газовой фазе, а также на границе раздела фаз [14].

Целью работы является разработка методики повышения огнетушащей способности МУПТВ на основе математического моделирования и экспериментальных данных тушения модельных очагов пожара класса «В» тонкораспыленной огнетушащей суспензией [13]. Применение данной методики позволит обеспечить тушение пожаров и защиту людей от воздействия опасных факторов на объектах НГК в условиях применения МУПТВ.

Материалы и результаты исследования. Способ применения наноструктурированных присадок в качестве модификатора для огнетушащего вещества основан на результатах работ отечественных и зарубежных исследователей.

В исследовании [15] показано, что применение углеродных частиц способствует интенсификации процессов парообразования и испарения капель воды в высокотемпературных газах. Добавление углеродных наноструктур приводят к значительной деформации

капель, движущихся в высокотемпературных газах, что усиливает внутреннюю рециркуляцию. Авторы считают, что при увеличении относительной массовой доли твердых включений до 1,0 об.% скорость испарения капель увеличивается за счет повышения лучистого теплового потока к поверхности «неоднород-

ной» капли. Тепловой поток, поглощаемый частицами углерода, находящимися в тонком пограничном слое нагретой капли в 5–6 раз превышает поток, поглощаемый чистой водой. Поэтому, испарение воды вблизи каждого включения протекает намного быстрее, чем испарение гомогенной жидкости.

Таблица 1 – Эффективность тушения очагов пожара класса «В» тонкораспыленной водой в условиях применения до-
бавок к воде

Горючее вещество	Наименование добавки (концентрация)	Наблюдаемый эффект
[8] Бензин Дизельное топливо Этанол	NaHCO ₃ (5,0 масс.%)	Постепенно повышает эффективность ТРВ, как при возгорании этанола, так и при возгорании углеводородов, но, менее эффективно, чем ПАВ. Существует предел эффективного повышения концентрации металлической добавки из-за предельного давления пара активного соединения металла. Время тушения дизельного топлива составило 59 сек. что на 8 сек. меньше по сравнению с чистой водой (67 сек.). Время тушения бензина составило 108 сек. Время тушения этанола составило 210 сек.
	ПАВ (3,0 об.%)	Небольшое количество ПАВ в составе ТРВ повышает эффективность тушения возгорания бензина и дизельного топлива, образуя тонкую пленку на поверхности. Время тушения дизельного топлива составило 18 сек. Время тушения бензина составило 79 сек. Возгорание этанола ликвидировать не удалось. Чрезмерное добавление ПАВ приводит снижению предельной эффективности состава.
	МС (мульти-компонентная присадка) (3,0 об.%)	Обнаружено комбинированное подавляющее действие ПАВ и металлов. Применима для тушения этанола и углеводородных пожаров, благодаря сочетанию физических и химических механизмов пожаротушения. Время тушения дизельного топлива составило 23 сек. Время тушения бензина составило 80 сек. Время тушения этанола составило 177 сек.
[9] Гептан Дизельное топливо	AFFF (пенообразователь) (1,0-3,0 об.%)	При пожаре на поверхности топлива образуется тонкий слой пены, благодаря чему снижается скорость испарения топлива.
[10] Н-гептан (80 мл.)	C ₇ H ₁₅ OH (7,0 об.%)	Время тушения пожара тестовой смеси составило 3,1 сек.
	C ₃ H ₇ OH (3,0 об.%)	Время тушения пожара тестовой смеси составило 1,7 сек.
	C ₄ H ₈ O (1,0-5,0 об.%)	Время тушения гептановой смеси составило 16 секунд. Однако, при концентрации органического растворителя выше 5,0 об.% пожар не удалось ликвидировать.
	CH ₃ CO ₂ CH ₃ (1,0 об.%)	Время тушения пожара тестовой смеси составило 12,2 сек.
	CH ₃ O(CH ₂) ₂ OCH ₃ (1,0 – 5,0 об.%)	При концентрации 1,0 об.% время тушения составило 4,0 сек. При концентрации 5,0 об.% время тушения составило 5,2 сек.
[11] Нефть	KHCO ₃ K ₂ CO ₃	Обнаружено повышение эффективности подавления водяным туманом.
[12] Дизельное топливо	МС (1,0-3,0%)	Оптимальные значения концентрации при тушении дизельного бассейна составляют примерно 3%. Каждый компонент добавки может влиять на механизм пожаротушения ТРВ. Неорганические соли в многокомпонентных добавках усиливают эффекты химического тушения, а фторсодержащие поверхностно-активные вещества физическое пожаротушение.
[13] Бензин АИ-95	Astr. (0,05; 0,25; 0,5; 1,0 об.%)	Применение огнетушащей суспензии с концентрацией Astr. 0,05 об.%, в том числе дистиллированной воды в МУПТВ не привели к тушению модельного очага пожара. При помощи огнетушащей суспензии с концентрацией Astr. 0,25 об.% модельный очаг пожара был потушен в среднем за 3 сек. Наиболее эффективная концентрация астраленов выявлена 0,5 об.%. Среднее время тушения модельного очага пожара данной суспензией составляет 2 сек. Среднее время тушения модельного очага пожара огнетушащей суспензией с наибольшей из предложенных концентраций астраленов – 1,0 об.% составляет 6 сек. Вероятный механизм тушения пожаров ЛВЖ на объектах НГК огнетушащими суспензиями, модифицируемыми астраленами заключается в: - интенсификации процессов парообразования; - снижении концентрации окислителя в зоне горения за счет контролируемой реакции окисления графеновых слоев наночастиц.

Экспериментальные данные [15] показали, температура на поверхности углеродных частиц на 10-30 К выше, несмотря на более высокую теплопроводность углерода. Полученный результат обусловлен полной прозрачностью воды. Глубокий внутренний нагрев капли происходит за счет лучистой теплопередачи. Скорость нагрева жидкости возрастает с увеличением

диаметра твердых включений.

Исходя из вышесказанного, скорость испарения капли зависит от разности температур между каплей и окружающим пространством с учетом коэффициента теплоотдачи на границе раздела фаз капля-газ. Данный фактор определяется величиной поверхностного натяжения капель жидкости. Известно, что

в зависимости от типа диспергируемых наночастиц в состав воды возможно, как увеличение [16, 17], так и снижение поверхностного натяжения [18]. Снижение гидрофильности наночастиц [19] вызывает повышенное напряжение в объеме капли за счет воздействия Ван-дер-Ваальсовых сил, которое уменьшает толщину свободной поверхности, что увеличивает поверхностное натяжение наножидкости [20].

В ходе исследований [21] установлено, капли воды с гидрофобными наночастицами, распыленные в потоке высокотемпературных газов, имеют меньший диаметр на выходе из нагретой среды, чем на входе в неё. Степень изменения характерного размера капель зависит от начального диаметра. Так, капли с диаметром от 6 до 10 мм, на выходе уменьшаются в размере не более чем на 5%. В то время, как степень уменьшения размера исходной капли с диаметром до 1 мм увеличивается до 25%. Более того, при среднем диаметре капель более 1 мм обеспечить условия полного их испарения при движении через канал с высокотемпературными продуктами сгорания весьма затруднительно. Экспериментально установлено, что оптимальный размер капель для полного испарения в газовой среде составляет от 150 до 350 мкм. Эти данные согласуются с нормативными значениями размеров капель для определения термина тонкораспыленной воды согласно ГОСТ Р 53288-2009 при проектировании МУПТВ.

В Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России разрабатываются водосодержащие огнетушащие составы [22, 23] на основе углеродных наноструктур, в том числе астраленов [24]. Применение данной суспензии в МУПТВ позволило снизить время тушения модельного очага пожара класса «В». Полученные данные легли в основу методики повышения огнетушащей способности МУПТВ на объектах нефтегазового комплекса.

Разработка методики повышения огнетушащей способности МУПТВ проводилась с учетом оценки основных показателей системы, влияющих на эффективность её применения.

При оценке критической интенсивности тушения пламени нефтепродукта, модифицированным огнетушащим веществом применяли выражение (1):

$$I_{кр} = c \cdot m \cdot (T_k - T_t) / r \quad (1)$$

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 [25].

Выражение (2) демонстрирует зависимость критической интенсивности тушения пожара от удельной теплоты парообразования огнетушащего вещества. Результаты, полученные в ходе исследования данной свойства суспензии, позволяют оценить влияние углеродных наноструктур на критическую интенсивность тушения пожара (рис. 1а.). Установлено, что при увеличении концентрации УНС до 0,5 об.% включительно позволяет снизить критическую интенсивность с 0,14 до 0,023 л/(м²·с). Дальнейшее повышение кон-

центрации УНС приводит к увеличению критической интенсивности тушения.

С помощью выражения (2) определяли теоретическое время тушения горючей жидкости МУПТВ:

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

где m – массовая скорость выгорания жидкости, кг/(м²·с⁻¹); c , ρ , λ – теплоемкость, плотность, теплопроводность горючей жидкости; I – интенсивность орошения водой поверхности горючей жидкости, л/м²·с; $I_{кр}$ – критическая интенсивность тушения горючей жидкости, л/м²·с [26].

Для сопоставления расчетных и экспериментальных данных времени тушения модельного очага пожара использовались формулы (1) и (2). Исходные данные теплофизических характеристик горючей жидкости и огнетушащих составов принимались в соответствии с исследованием [13].

В ходе расчетов установлено, что теоретическое время тушения в целом соответствует с экспериментальными данными (рис. 1б).

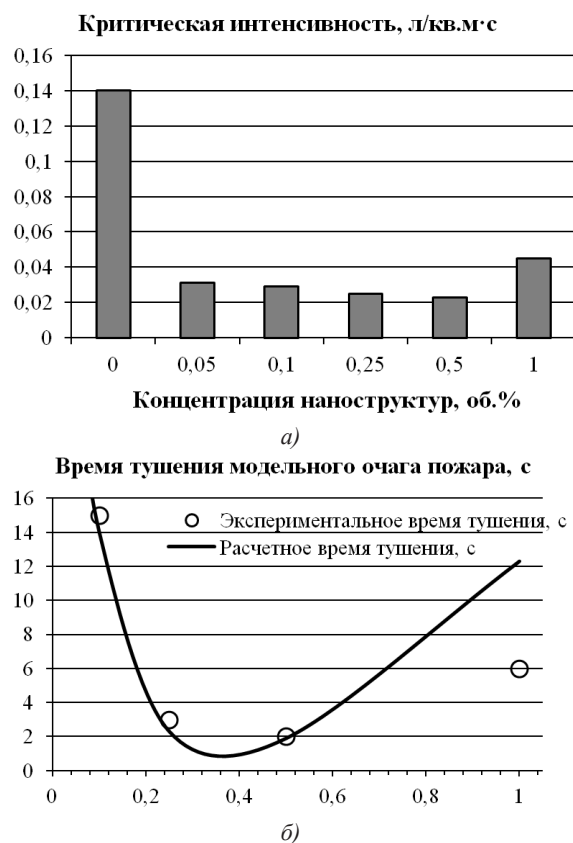


Рисунок 1 – (а) критическая интенсивность тушения огнетушащими суспензиями; (б) сопоставление расчетных и экспериментального времени тушения модельного очага пожара

Прогнозирование параметров наномодифицированных ОТВ осуществлялось посредством установления зависимости результативного признака от множества независимых факторов с помощью множественного регрессионного анализа. Оценивалось влияние свойств огнетушащей жидкости на время тушения модельного очага пожара класса «В» с помощью

программного продукта *STATISTICA Application 10* [27]. Для проведения оценки влияния входных факторов (ВФ) – $X_1 \div X_6$, (табл. 2) на выходной параметр (ВП) – время тушения пожара (Y) огнетушащими составами, модифицированными углеродными наноструктурами применялся метод шагового регрессионного анализа – исключение ранее введенного фактора.

Таблица 2 – Характеристика ВФ ($X_1 - X_6$) и ВП (Y)

ВП, ВФ	Характеристика (при $t = 20^\circ\text{C}$)	Единицы измерения
X_1	Концентрация углеродных наноструктур	об. %
X_2	Поверхностное натяжение наножидкостей	Н/м
X_3	Плотность наножидкостей	г/см ³
X_4	Динамическая вязкость наножидкостей	Па·с
X_5	Удельная теплота парообразования наножидкостей	кДж/кг
X_6	Скорость нагрева до температуры кипения	$^\circ\text{C}/\text{с}$
Y	Время тушения модельного очага пожара класса «В»	с

Результаты моделирования показали, что независимые переменные X_2, X_3, X_5 являются избыточными. Достоверность полученной модели оценивалась по критерию Фишера $F(3,11) = 69,15$. Данный показатель свидетельствует о том, что полученная модель является достоверной. Коэффициент множественной детерминации: $R^2 = 0,949$. На основе полученных коэффициентов было построено математическое уравнение, предсказывающее значение выходного пара-

метра (3).

$$Y = 596,86 - 42,58 \cdot X_6 + 113,08 \cdot X_1 - 0,239 \cdot X_4 \quad (3)$$

Интерпретация полученных данных указывает, что при увеличении динамической вязкости и скорости нагрева до температуры кипения время тушения модельного очага пожара класса «В» снижается. В свою очередь повышение объемной концентрации астраленов (от 0,5 до 1,0 об. %) приводит к увеличению времени тушения, что подтверждается экспериментальными данными.

Определение огнетушащей способности по ГОСТ Р 53288-2009: способность МУПТВ обеспечивать тушение модельных очагов пожара определенных классов и рангов. На основе полученных результатов, применение огнетушащих суспензий с содержанием астраленов от 0,25 до 1,0 об. % в МУПТВ способно обеспечить тушение модельных очагов пожара класса «В», а также сократить время тушения данных очагов. Оптимальной концентрацией астраленов является 0,5 об. %.

Методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой (рис. 2) путем диспергирования в состав огнетушащего вещества (ОТВ) углеродных наноструктур применима в качестве элемента системы обеспечения пожарной безопасности, как составляющая системы предотвращения пожара (СППЗ).

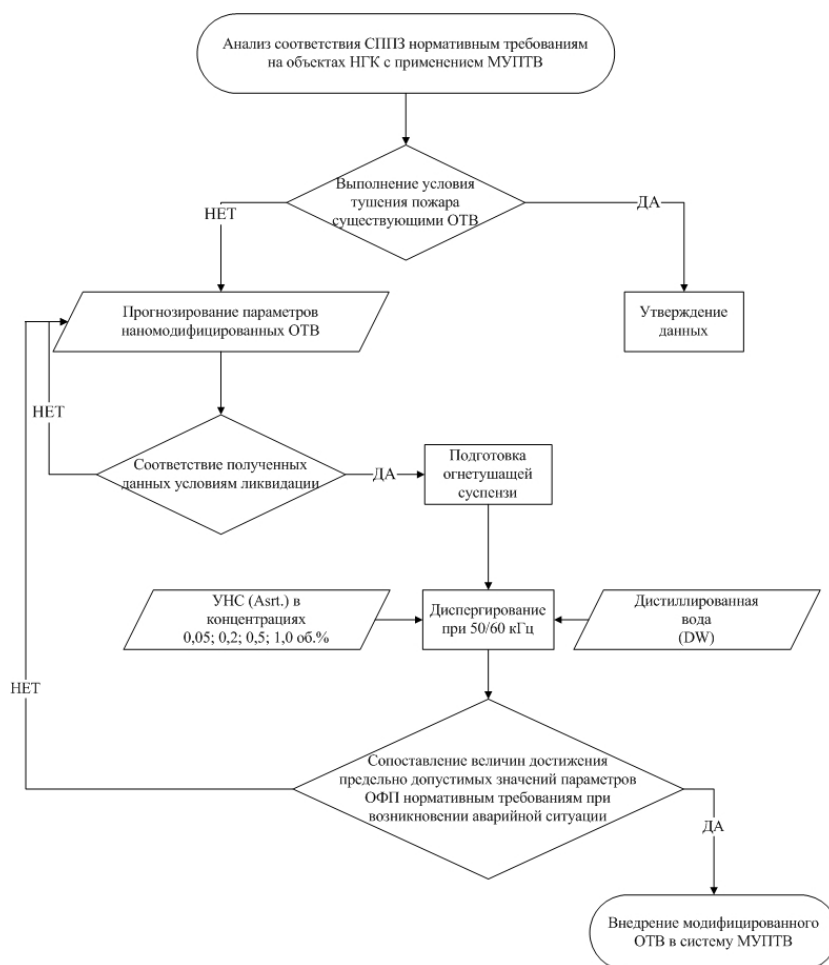


Рисунок 2 – Алгоритм повышения огнетушащей способности МУПТВ на объектах НГК

Заключение. Обзор существующих добавок к воде показал, что они имеют определенные ограничения в условиях применения в МУПТВ. Таким образом, разработан и испытан на модельных очагах пожара класса «В» огнетушащий состав на основе углеродных наноструктур – астраленов. Добавление астраленов в диапазоне концентраций от 0,25 до 0,5 об.% включительно способствуют повышению огнетушащей способности МУПТВ. При повышении концентрации Astr. до 1,0 об.% время тушения модельного очага пожара увеличивается. Вероятно, это связано со склонностью наноструктур при высоких концентрациях образовывать агломерации, которые препятствуют равномерному распределению наноструктур в объеме жидкости.

На основе теоретических, экспериментальных данных и математического моделирования разработана и предложена методика повышения огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, которая заключается в совершенствовании системы противопожарной защиты за счет снижения времени тушения модельных очагов пожара класса «В». Реализация принципов управления свойствами наножидкостей [28] позволяет управлять факторами, влияющими на тушение пожаров на объектах НГК.

Для массового внедрения данных составов необходимо разработать СТО и подготовить рекомендации по их применению для включения в ГОСТ Р 53288-2009 с обозначением характеристик, требований и способа приготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Ivanov A., Toropov D., Dali F., Perlin A., Lebedev A., Shidljvsky G. Extinguishing characteristics of water suspensions with carbon nanostructures at extinguishing liquid hydrocarbons fires (oil and gas industry) // *Delta*. – 2019. – Т. 13. – №. 1. – С. 22-31. DOI: 10.17423/delta.2019.13.1.55
- Ponomarev A. N., Ivanov A. V., Suyasova M. V., Savenkova A. Ye., Pyatin D. V., Voytenok O. V. Investigation of extinguishment process of liquid hydrocarbon flames by aqueous suspensions of astralenes // *Fire Technology*. – 2021. – Т. 57. – №. 4. – С. 2061-2075. DOI: 10.1007/s10694-021-01094-1.
- Mawhinney J. R., Back G. G. Water mist fire suppression systems // *SFPE Handbook of fire protection engineering*. – Springer, New York, NY. 2016. Pp. 1587-1645. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_46.
- 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.
- Еловский В. С. и др. Улучшение качества огнетушащей среды оросителей тонкораспыленной воды механической обработкой их поверхностей // *Технологии технической безопасности*. – 2015. – №. 5. – С. 134-141. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb>.
- Chow W. K., Jiang Z., Li S.F., Han D.L. Improving fire suppression of water mist by chemical additives // *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. – 2007. – Т. 46. – №. 1. – С. 51-60. DOI: 10.1080/03602550600948756
- Man C., Shunbing Z., Litao J.A., Xiaoli W.U. Surfactant-containing water mist suppression pool fire experimental analysis // *Procedia Engineering*. – 2014. – Т. 84. – С. 558-564. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.468
- Cong B., Liao G. Experimental studies on water mist suppression of liquid fires with and without additives // *Journal of fire sciences*. – 2009. – Т. 27. – №. 2. – С. 101-123. DOI: 10.1177/0734904108095339
- Kim A. K., Dlugogorski B. Z., Mawhinney J. R. The effect of foam additives on the fire suppression efficiency of water mist // *National Fire Laboratory, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa, Canada K1A 0R6*. – 1994. – С. 347-357.
- Koshiba Y., Yamamoto Y., Ohtani H. Fire suppression efficiency of water mists containing organic solvents // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2019. – Т. 62. – С. 103973. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103973
- Feng M. H., Tao J.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. – Т. 34. – №. 1. – С. 51-68. DOI: 10.1177/0734904115618220
- Wu B., Liao G. Experimental study on fire extinguishing of water mist with a newly prepared multi-component additive // *Procedia Engineering*. – 2013. – Т. 62. – С. 317-323. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.070
- Пустовалов И.А. Экспериментальное исследование огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, модифицированной астраленами // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2021. Т. 30. № 5. С. 84–96. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.84-96
- Горшков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей // *М.: Пожнаука*. – 2007. – Т. 268. – С. 505.
- Volkov R. S., Piskunov M.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Water droplet with carbon particles moving through high-temperature gases // *Journal of Heat Transfer*. – 2016. – Т. 138. – №. 1. – P.5. DOI: 10.1115/1.4031075
- Xue H. S., Fan J.R., Hu Y.C., Hong R.H., Cen K.F. The interface effect of carbon nanotube suspension on the thermal performance of a two-phase closed thermosyphon // *Journal of applied physics*. – 2006. – Т. 100. – №. 10. – С. 104909. DOI: 10.1063/1.2357705
- Tanvir S., Qiao L. Surface tension of nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials // *Nanoscale research letters*. – 2012. – Т. 7. – №. 1. – С. 1-10. DOI: 10.1186/1556-276X-7-226.
- Berrada N., Hamze S., Desforges A., Ghanbaja J. Surface tension of functionalized MWCNT-based nanofluids in water and commercial propylene-glycol mixture // *Journal of Molecular Liquids*. – 2019. – Т. 293. – С. 111473. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111473
- Quan X., Wang D., Cheng P. An experimental investigation on wettability effects of nanoparticles in pool boiling of a nanofluid // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Т. 108. – С. 32-40. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.098
- Lu G., Duan Y. Y., Wang X. D. Surface tension, viscosity, and rheology of water-based nanofluids: a microscopic interpretation on the molecular level // *Journal of nanoparticle research*. – 2014. – Т. 16. – №. 9. – С. 1-11. DOI: 10.1007/s11051-014-2564-2.
- Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Испарение одиночных капель и потока распыленной жидкости при движении через высокотемпературные продукты сгорания // *Теплофизика высоких температур*. – 2014. – Т. 52. – №. 4. – С. 597-604. DOI: 10.7868/S0040364414030181
- 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*. 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>
- 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*. 2019. Т. 28. №. 1. С. 22-34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.22-34.
- Shames A. I., Katz E. A., Panich A. M., Mogilyansky D., Mogilko E., Grinblat J., Belousov V.P., Belousova I. M., Ponomarev A. N. 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.
- Хасанов И. Р., Думилин А. И. Тушение горючих жидкостей распыленной водой // *Актуальные проблемы пожарной безопасности: Материалы XXVIII международного научно-практической конференции: в 2 частях. Международный салон средств обеспечения безопасности: «Комплексная безопасность»*. 2016. С. 363-366. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28817900>.
- Думилин А. И. Параметры тушения пламени горючих жидкостей распыленной водой // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2013. – Т. 22. – №. 4. – С. 85-90. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/parametry-tusheniya-plameni-goryuchih-zhidkostey-raspylennoy-vodoy>
- Яковлев В.Б. Регрессионный анализ. Расчеты в Excel и Statistica : учебное пособие / В.Б. Яковлев. – Москва : РУСАЙНС, 2018. – 178 с.
- Ivanov A. V. Nanostructures management technology to reduce the fire risk in the oil and gas industry: Performance, features and implementation / A. V. Ivanov, F. A. Dali, G.K. Ivakhnyuk, I. L. Skripnick, M.A. Simonova, D. V. Shikhalev // *Journal of Applied Engineering Science*. – 2021. – Т. 19. – №. 1. – С. 84-91. DOI: 10.5937/jaes0-26622.

Статья поступила в редакцию 19.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021