

А. В. ИВАНОВ, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: spark002@mail.ru)

Д. П. ТОРОПОВ, адъюнкт кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: dmitrytoropov2012@yandex.ru)

Г. К. ИВАХНЮК, д-р хим. наук, профессор, профессор кафедры инженерной защиты окружающей среды, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет) (Россия, 190013, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 26; e-mail: fireside@inbox.ru)

А. В. ФЕДОРОВ, д-р техн. наук, заведующий кафедрой пищевой биотехнологии продуктов из растительного сырья, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9; e-mail: alval58@yandex.ru)

А. А. КУЗЬМИН, канд. пед. наук, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: kaa47@mail.ru)

УДК 614.841.4:539

ИССЛЕДОВАНИЕ ОГNETУШАЩИХ СВОЙСТВ ВОДЫ И ГИДРОГЕЛЕЙ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ГОРЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Экспериментально обоснована возможность применения модифицированных огнетушащих веществ (ОТВ) на основе наножидкости (НЖ) с регулируемыми эксплуатационными характеристиками в условиях тушения пожаров жидких нефтепродуктов. Методами атомно-силовой и рамановской спектроскопии установлено наличие в наноматериале, помимо MWCNT, большого количества побочных продуктов синтеза нанотрубок. Показано, что электрофизический (воздействие переменного-частотного модулированного сигнала) и реагентный (внедрение гелеобразующих компонентов) методы позволяют управлять свойствами НЖ в целях их применения в штатных системах пожаротушения. В ходе экспериментов выявлено, что время тушения нефтепродуктов ОТВ на основе воды с наноматериалом MWCNT 1,0 % об. в среднем в 5,5 раз меньше времени тушения жидкости водой, а при использовании гидрогелей (DW + Carbopol ETD 2020 0,2 % масс.) с наноматериалом MWCNT 1,0 % об. время тушения пожара сократилось до 10 раз. Сделан вывод, что повышение огнетушащей эффективности модифицированных ОТВ на основе распыленной воды достигается за счет высокой термической стойкости наноматериала.

Ключевые слова: наножидкость; многослойные углеродные нанотрубки; теплопередача; огнетушащее вещество; переменного-частотный модулированный потенциал.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.31-44

Введение

Горение нефтепродуктов представляет собой сложный физико-химический процесс, включающий в себя испарение жидкости, формирование над ней паров, а также смешение их с окислителем с последующим воспламенением на некотором расстоянии от слоя жидкости. Для достижения огнетушащего эффекта необходимо снижение температуры поверхности горючей жидкости до температуры тушения пламени, при которой процесс горения будет невозможен, либо нарушение теплового равновесия экзотермической реакции. Условие ликвидации горения определяется соотношением [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{\text{ТВ}} = q_{\text{ТП}} \\ \frac{dq_{\text{ТВ}}}{dT} = \frac{dq_{\text{ТП}}}{dT} \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где $q_{\text{ТВ}}$ — тепловыделение при сгорании нефтепродуктов;

$q_{\text{ТП}}$ — теплопотери.

Теплопотери определяются по формуле [1]:

$$q_{\text{ТП}} = q_{\text{конв}} + q_{\text{изл}} + q_{\text{исп}}, \quad (2)$$

где $q_{\text{конв}}$ — тепло, отводимое конвекцией;

$q_{\text{изл}}$ — тепло, отводимое излучением;

$q_{\text{исп}}$ — тепло, затрачиваемое на испарение жидкостей (нефтепродукта и огнетушащего вещества (ОТВ)).

Наиболее значимым параметром, определяющим эффективность пожаротушения распыленной водой, является время нагрева и испарения капельных потоков ОТВ в высокотемпературных продуктах сгорания. При распылении в сопле форсунки всегда существует начальный участок нераспавшейся и маловозмущенной пелены, которая по мере истечения распадается на струи в направлении движения жидкости. Капля воды в зоне горения проходит стадии тепло- и массопереноса, характерные для ее нагрева и испарения при контакте с нагретой поверхностью. Уменьшение размера капель воды приводит к их более интенсивному испарению, снижению разбрызгивания топлива в зоне горения, а также к вероятному переливу нефтепродукта через край резервуара [2, 3].

Параметры распыления жидкости можно представить в виде формулы

$$d_k = C d_c^n \frac{\lambda_{пл} \sigma^t \mu_{ж}^q}{W^m \rho_{ж}^s}, \quad (3)$$

где d_k — диаметр капель;
 C — постоянный коэффициент;
 d_c — диаметр сопла;
 n, t, q, m, s — показатели степени при соответствующих параметрах распыления;
 $\lambda_{пл}$ — параметр пелены;
 σ — поверхностное натяжение;
 $\mu_{ж}$ — динамическая вязкость;
 W — скорость истечения жидкости;
 $\rho_{ж}$ — плотность жидкости [4].

Задача тушения распыленной водой пламени нефтепродуктов имеет ограничения из-за большого среднего размера капель ОТВ и, как следствие, недостаточной интенсивности парообразования. Данная технология применима для горючих жидкостей (ГЖ) и малоэффективна для легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) [1].

Существуют различные методы повышения эффективности пожаротушения распыленной водой, в том числе применение технологий полидисперсного пожаротушения, внедрение соляных растворов, суспензий и эмульсий и др. Увеличение температуропроводности, плотности, а также снижение поверхностного натяжения жидкости приводят к ее более интенсивному испарению в зоне горения [4].

Одним из способов модификации ОТВ на основе воды является электрофизический метод управления свойствами веществ на границе раздела фаз в сочетании с реагентной модификацией гелеобразующими и углеродными наноконпонентами. При электрофизическом воздействии либо электропроводящая система *вода – нанодисперсии* перемещается в электрических полях, либо магнитные поля изменяются во времени. Водные системы испыты-

вают комбинированное электромагнитное воздействие, и в зависимости от этих условий или электрическая, или магнитная составляющая играет в процессе преимущественную роль [5].

В работе [6] приведены данные об изменении теплофизических характеристик воды, подвергнутой воздействию переменного частотно-модулируемого потенциала (ПЧМП). В [7] для сравнения огнетушащих свойств воды в условиях воздействия ПЧМП описан ряд экспериментов по тушению очага пожара класса А. В ходе экспериментов установлено, что время тушения модифицированной водой сократилось на 30 % по сравнению с базовой жидкостью. В диссертации В. П. Степанова [8] приводятся данные об изменении физических свойств воды при температуре 20 °С под воздействием ПЧМП. Экспериментально выявлено, что при воздействии ПЧМП на воду в течение 10 мин ее поверхностное натяжение уменьшается на 12 %, вязкость — на 9 %.

В работах [9, 10] получены результаты, свидетельствующие о том, что использование модифицированных при электрофизическом воздействии водно-гелевых составов (ВГС) позволяет снизить требуемую интенсивность подачи ОТВ в 2,5 раза и сократить время тушения очага класса А на 30–40 % по сравнению с водой.

Малые концентрации углеродных наноструктур (многослойных углеродных нанотрубок (MWCNT)) в воде изменяют свойства наножидкости (НЖ) в сравнении с базовой, влияя на процессы тепло- и массопереноса. Значительное влияние на данные процессы оказывают концентрация и тип наночастиц, способы их подготовки и стабилизации (табл. 1).

При дальнейшем увеличении объемной концентрации наночастиц изменение теплофизических характеристик НЖ существенно замедляется, но при этом наблюдается повышение вязкости, что ухудшает ее эксплуатационные свойства [12].

Существенно ограничивает применение MWCNT в целях пожаротушения их высокая стоимость в сравнении с другими модифицирующими добавками. Наиболее высокопроизводительными для синтеза MWCNT являются электродуговые методы, однако они характеризуются относительно низким (до 25 %) выходом продукта. Помимо MWCNT, при синтезе образуются фуллерены, графитовые кластеры, аморфный углерод, которые являются побочными продуктами производства наночастиц и удаляются в процессе очистки [16].

Кроме того, НЖ с MWCNT имеют недостаточно большое “время жизни” (в среднем до 4 ч) из-за быстрой агломерации наночастиц, что может существенно снизить эффективность их применения. Данная проблема решается путем внедрения в НЖ

Таблица 1. Данные по управлению теплофизическими характеристиками с помощью MWCNT**Table 1.** Information on the management of thermal properties by means MWCNT

№ п/п No.	Источник Source	Вид наночастиц Kind of nanoparticles	Базовое вещество Base substance	Концентрация наночастиц Concentration of nanoparticles	Эффект (по сравнению с DW) Effect (in comparison with DW)
1	[11]	MWCNT	Дистиллированная вода (DW) Distilled water (DW)	0,22–1,00 % об. 0.22–1.00 % by vol.	Повышение теплопроводности НЖ на 10–15 % Increase in the thermal conductivity of the nanofluid by 10–15 %
2	[12]	MWCNT (УНТ “Карболекс”) MWCNT (CNT “Carbolex”)	Дистиллированная вода Distilled water	0,10 % масс. 0.10 % by mass	Более медленное (3–5 %) изменение диаметра испаряющихся капель НЖ A slower (3–5 %) change in the diameter of the evaporating droplets of the nanofluid
3	[13]	MWCNT	Дистиллированная вода, pH = 6 Distilled water, pH = 6	0,50 % масс. 0.50 % by mass	Повышение коэффициента теплопередачи на 350 % при Re = 800 при 30 °C The increase in the heat transfer coefficient by 350 % at Re = 800 at 30 °C
4	[14]	MWCNT	Дистиллированная вода Distilled water	0,20–1,00 % об. 0.20–1.00 % by vol.	Повышение теплопроводности до 6 раз Increase of thermal conductivity up to 6 times
5	[15]	MWCNT	Деионизированная дистиллированная вода Deionized distilled water	0,01; 0,05; 0,10 % масс. 0.01, 0.05, 0.10 % by mass	Уменьшение критического теплового потока до 30 %, увеличение теплоотдачи при кипении на 272 % Reduction of the value of the critical heat flux to 30 %, increase in heat transfer at boiling by 272 %

различных стабилизаторов, в том числе гелеобразующих компонентов, позволяющих стабилизировать ОТВ с наночастицами на весь цикл его применения. Практический интерес для пожаротушения могут представлять водные суспензии, содержащие, помимо MWCNT, побочные продукты синтеза и стабилизаторы с объемной концентрацией наноматериала до 1,0 % об. при фиксированном размере наночастиц.

Целью настоящего исследования являлось исследование строения и физических свойств наножидкостей на основе воды и гидрогелей с наночастицами (MWCNT и побочные продукты синтеза), а также экспериментальное обоснование возможности применения ОТВ с регулируемыми эксплуатационными характеристиками в условиях тушения пожаров жидких нефтепродуктов.

Материалы и методы исследований

В исследовании использовались НЖ на основе дистиллированной воды и гидрогелей в сочетании с углеродными наноструктурами, содержащими MWCNT [17] (рис. 1).

MWCNT получены методом каталитического пиролиза на установке “CVDomna” [18]. Параметры

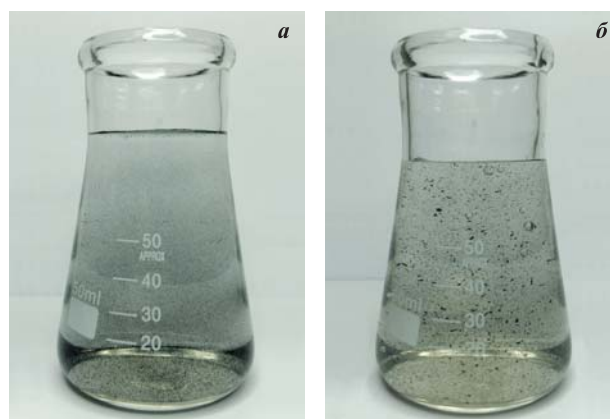


Рис. 1. Наножидкости с наноматериалом MWCNT на основе дистиллированной воды (а) и гидрогеля (б)

Fig. 1. Nanofluids with nanomaterial MWCNT based on distilled water (a) and hydrogel (b)

наночастиц: диаметр $d = 25 \dots 50$ нм, длина $l = 5 \dots 40$ мкм.

В качестве базовой жидкости выступала дистиллированная вода с pH = 6,4. Подготовка НЖ проводилась при температуре 20 °C и нормальном атмосферном давлении путем депонирования функционализированных MWCNT в дистиллированную воду при воздействии источника ультразвука (мощность

1 кВт, частота 60 кГц, время обработки 120 мин). Далее часть образцов подвергалась электрофизическому воздействию ПЧМП с параметрами 220 В, 50 Гц в течение 1 ч.

При подготовке гидрогелей использовался редкошитый акриловый полимер “Карбопол ETD-2020” (РАП) с концентрацией гелеобразующего компонента 0,5 % масс., а также 10 %-ный водный раствор гидроксида аммония, добавляемый в суспензию в количестве 10 мл на 1 л. Гидрогель, выступающий в качестве базовой жидкости, имел плотность 1010 кг/м³, pH = 5,03.

Исследование рамановских спектров НЖ проводилось на установке “Ntegra Spectra” с длиной волны 532 нм [19]. Объем исследуемой жидкости составлял 10 мл, температура 20 °С.

Структуру твердого остатка веществ исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) также на установке “Ntegra Spectra” [19]. Образцы НЖ с наноматериалом MWCNT помещали на слюдяную подложку, после чего происходило испарение жидкости при температуре 70–80 °С в течение 10 мин при нормальном атмосферном давлении. Далее проводилась оценка структуры поверхности сухого остатка.

Теплофизические свойства дистиллированной воды и гидрогелей, содержащих наноматериал MWCNT с концентрацией 0,4–1,6 % об., исследовали на лабораторной установке для изучения процессов поверхностного и объемного кипения жидкостей [20]. Жидкость объемом 50 мл помещали в стеклянный цилиндрический сосуд с электрическим нагревателем мощностью 100 Вт. Температуру в объ-

еме жидкости измеряли с помощью термопары, которая располагалась в центре сосуда на расстоянии 50 мм от его дна. В ходе исследования фиксировали температуру в точке замера и время теплового воздействия. Испытания прекращали при достижении температуры исследуемой жидкости 90 °С.

Измерение коэффициента поверхностного натяжения дистиллированной воды, содержащей наноматериал MWCNT с концентрацией 0,4 и 1,0 % об., проводилось методом отрыва капель [21]. Исследуемую и эталонную жидкость (дистиллированную воду) объемом 50 мл помещали в цилиндрические бюретки с диаметром шейки 2,5 мм, установленные на стенде параллельно друг другу. Затем, одновременно приоткрыв оба крана бюреток с эталонной и исследуемой жидкостью, добивались медленного вытекания обеих жидкостей в количестве 60 капель. После измерения объема вытекшей из бюретки жидкости определяли коэффициент поверхностного натяжения σ по формуле

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\rho \Delta V}{\rho_0 \Delta V_0}, \quad (4)$$

где σ_0 — поверхностное натяжение эталонной жидкости;

ρ — плотность эталонной жидкости;

ΔV — объем жидкости, содержащей наноматериал MWCNT;

ρ_0 — плотность исследуемой жидкости, содержащей наноматериал MWCNT;

ΔV_0 — объем эталонной жидкости, вытекшей из бюретки.

Оценка огнетушащей способности наножидкостей проводилась на лабораторной установке (рис. 2). Огнетушащее вещество 1 заливали в емкость 2 вместимостью 500 мл. Давление в системе, создаваемое воздушным компрессором, составляло 0,2–1,0 МПа. Давление в системе контролировали манометром 3. Подачу ОТВ осуществляли по резиновому шлангу 4 с внутренним диаметром 10 мм через насадок для распыления 5 диаметром 2 мм. Горючую жидкость 7 заливали в металлическую емкость диаметром 30 мм с высотой свободного борта 25–30 мм. Время свободного горения жидкости составляло 60 с. Время тушения фиксировали при полной ликвидации горения. Массу ОТВ, израсходованного на тушение, определяли путем взвешивания емкости 2 до и после эксперимента. Для каждого вида ОТВ проводили по три измерения [22].

Результаты и обсуждение

Исследование наножидкостей методом рамановской спектроскопии

В табл. 2 приведены значения основных характеристических пиков исследуемых веществ.

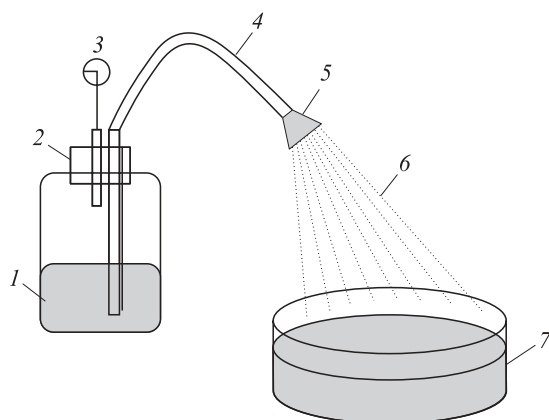
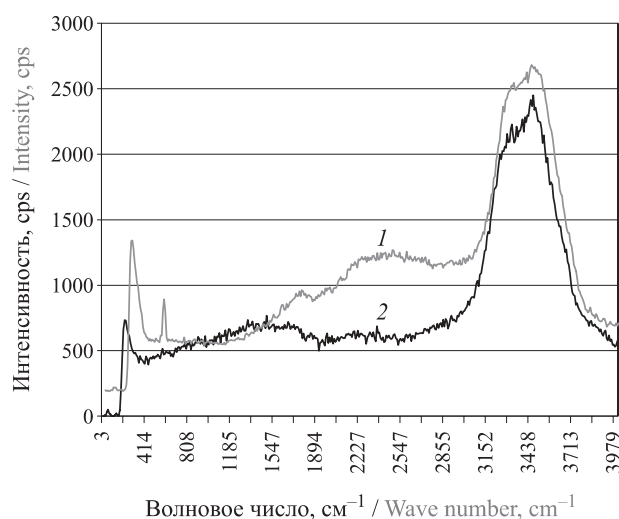


Рис. 2. Лабораторная установка по определению огнетушащей эффективности наножидкостей: 1 — ОТВ; 2 — герметичная емкость; 3 — манометр; 4 — эластичная трубка; 5 — насадок для распыления; 6 — струя распыленной наножидкости; 7 — горючее вещество (бензин АИ-92)

Fig. 2. Laboratory installation for determining the fire-extinguishing efficacy of nanofluids: 1 — extinguishing agent; 2 — hermetic container; 3 — manometer; 4 — flexible tube; 5 — nozzles for spraying; 6 — jet of a sprayed nanofluid; 7 — combustible substance (gasoline)

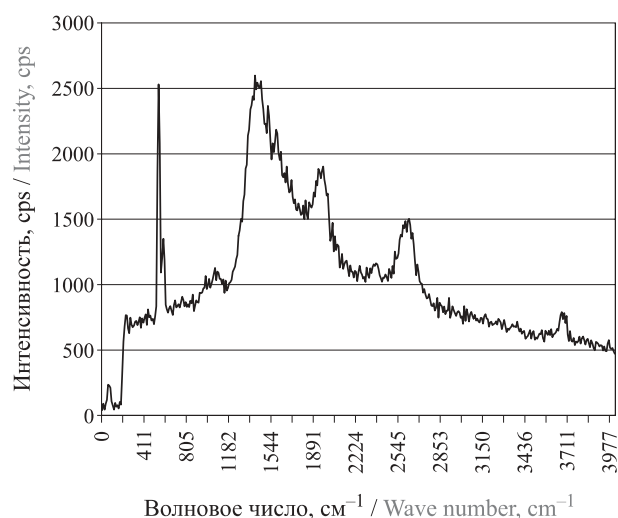
Таблица 2. Значения основных характеристических пиков исследуемых веществ**Table 2.** Values of the main characteristic peaks of the studying substances

№ п/п No.	Вещество Substance	Колебательная полоса Vibrational band	Частота полосы спектра, см^{-1} The frequency of the spectrum band, см^{-1}	Источник Source
1	Дистиллированная вода Distilled water	Либрационные колебания Libration oscillations	450; 550	[23]
		Валентные колебания моды О–Н The stretching vibrations O–H modes	3300–3600	
2	Водные растворы производных акриловой кислоты Aqueous solutions of acrylic acid derivatives	Полоса ω (CO_2) Band ω (CO_2)	552	[24]
		Коллективные полосы (C) в сочетании с колебаниями мод О–Н Collective bands (C) in combination with oscillations of O–H modes	2800–3800	[25]
3	MWCNT	D-полоса углеродных материалов D-band of carbon materials	1250–1450	[26]
		G-полоса (тангенциальные колебания в плоскости графенового слоя) G-band (tangential oscillations in the plane of the graphene layer)	1500–1600	
		G'-полоса (первый обертона D-полосы) The G'-band (the first overtone of the D-band)	2450–2650	

**Рис. 3.** Рамановские спектры гидрогеля на основе РАП с концентрацией 2 % масс. (1) и дистиллированной воды (2)**Fig. 3.** Raman spectra of the hydrogel based on carbopol at a concentration of 2 % by mass (1) and distilled water (2)

Для дистиллированной воды наблюдаются характерные пики в диапазонах 450–550 и 3300–3600 см^{-1} . Для гидрогеля, помимо характерных пиков воды, наблюдается пик в районе 560 см^{-1} . Другие колебательные полосы, характерные для производных акриловой кислоты, не наблюдаются ввиду низкой концентрации РАП (рис. 3).

В рамановском спектре образца с MWCNT присутствует достаточно большое число сторонних

**Рис. 4.** Рамановский спектр исследуемого наноматериала с MWCNT**Fig. 4.** Raman spectrum of the investigated nanomaterial with MWCNT

пиков, что говорит о присутствии примесей и низком качестве исследуемого наноматериала (рис. 4).

Рамановский спектр суспензии дистиллированной воды и наноматериала с MWCNT в условиях воздействия ПЧМП имеет отчетливо выраженные пики углеродных наноструктур, в то время как для аналогичного образца без электрофизического воздействия такие пики практически не обнаруживаются. Данный эффект объясняется тем, что при воздей-

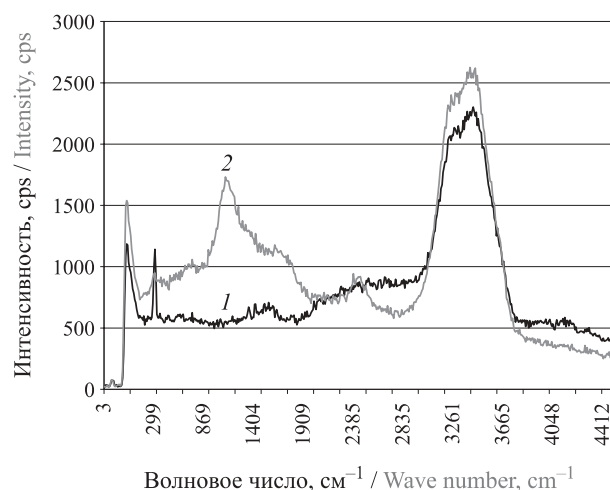


Рис. 5. Рамановский спектр дистиллированной воды и наноматериала с MWCNT при воздействии ПЧМП (1) и без него (контрольный образец) (2)

Fig. 5. Raman spectrum of distilled water and nanomaterial with MWCNT under the influence of variable-frequency modulated potential (VFMP) (1) and without VFMP (control sample) (2)

ствии ПЧМП происходит преимущественная стабилизация наночастиц по всему объему, а при отсутствии воздействия наночастицы группируются в основном в приповерхностном слое жидкости (рис. 5).

Для гидрогеля с наноматериалом MWCNT наблюдалось повышение интенсивности рамановских спектров в области характеристических пиков для углеродных нанотрубок по сравнению с пиками дистиллированной воды в условиях воздействия ПЧМП, что может быть объяснено увеличением количества поляризованных наноструктур в приповерхностном

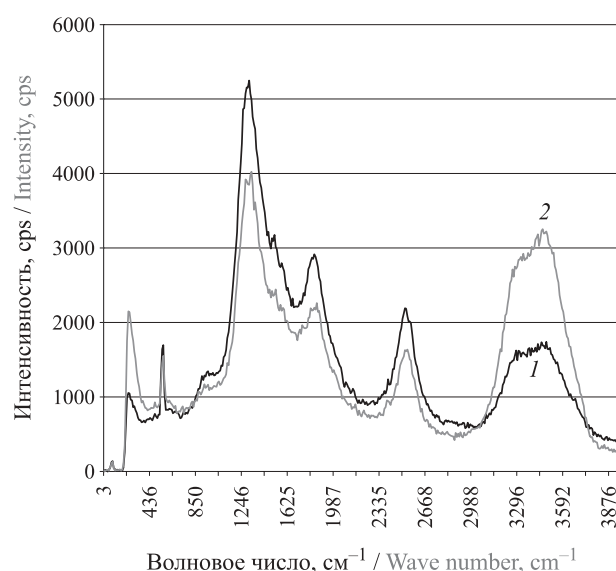


Рис. 6. Рамановский спектр гидрогеля с наноматериалом MWCNT на слюдяной подложке при воздействии ПЧМП (1) и без него (контрольный образец) (2)

Fig. 6. Raman spectrum of hydrogel (HG) with MWCNT nanomaterial on mica substrate under the influence of VFMP (1) and without VFMP (control sample) (2)

слое гидрогеля в результате электрофизического воздействия (рис. 6).

Исследование структуры наноматериалов методом атомно-силовой микроскопии

На АСМ-скане слюдяной подложки с наноматериалом MWCNT после испарения дистиллированной воды наблюдались протяженные углеродные структуры длиной до 10–15 мкм, а также скопления частиц диаметром 3–4 мкм, которые представляют собой следы аморфного углерода (рис. 7,а). При исследовании методом АСМ структуры РАП гидрогеля с наноматериалом MWCNT отмечено, что углеродные наноструктуры, находящиеся на поверхности РАП, образуют шарообразные агломерации диаметром порядка 300 нм (рис. 7,б). Следов отдельных MWCNT не наблюдалось ввиду значитель-

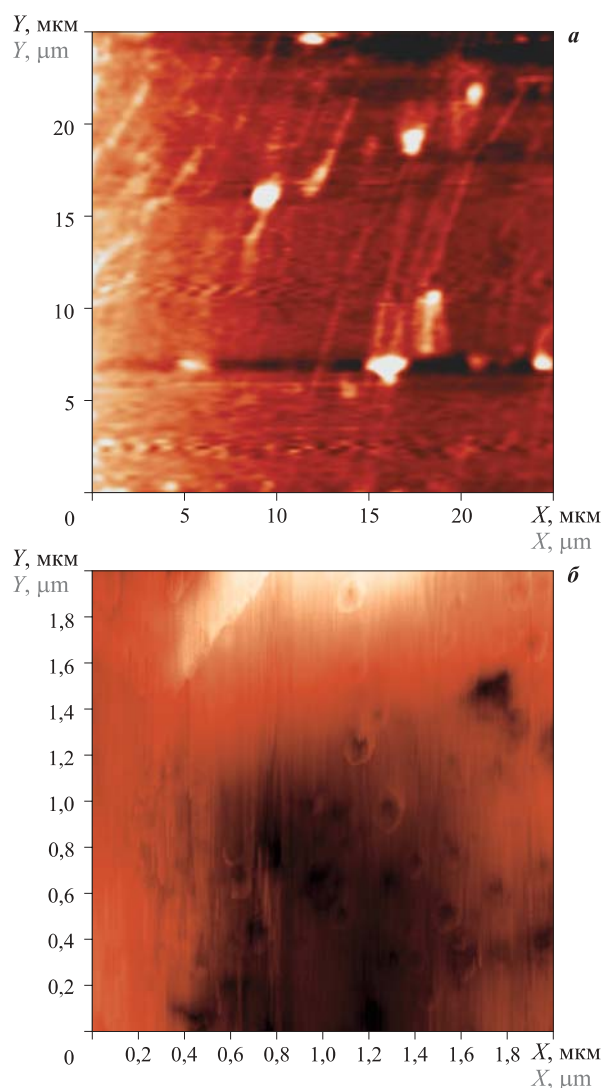


Рис. 7. АСМ-сканы твердого остатка вещества на слюдяной подложке после испарения дистиллированной воды (а) и в структуре РАП гидрогеля (б)

Fig. 7. AFM-scans of the solid residue of matter on a mica substrate: а — after evaporation of distilled water; б — in the structure carbopol of the hydrogel

ного количества следов гелеобразующего остатка (10–30 мкм).

Из полученных данных можно сделать вывод, что исследуемые НЖ содержат MWCNT (преимущественно схожих размеров) с большим количеством побочных продуктов синтеза. Электрофизический (воздействие ПЧМП) и реагентный (внедрение гелеобразующих компонентов) методы позволяют стабилизировать структуру НЖ.

Исследование теплофизических свойств наножидкостей

Результаты измерений показывают, что рост скорости нагрева наножидкости имеет прямую зависимость от концентрации наноматериала MWCNT и возрастает на 70 % в сравнении с дистиллированной водой при концентрации наноматериала 1,6 % об., что можно объяснить ростом теплопроводности при увеличении количества углеродных нанотрубок в НЖ, являющихся проводниками тепла (рис. 8).

При исследовании кинетики нагрева гидрогеля с концентрацией РАП 0,2 % масс. отмечено, что на начальной стадии кинетика нагрева образца без наноматериала MWCNT весьма схожа с кинетикой нагрева дистиллированной воды, но через 5 мин происходит резкий рост температуры вещества. Скорость роста температуры образца гидрогеля с наноматериалом MWCNT (1,0 % об.) на 50 % выше в сравнении с дистиллированной водой и аналогична скорости роста температуры образца DW + MWCNT 1,0 % об., что также можно объяснить сравнительно более высокой теплопроводностью системы с углеродными нанотрубками (рис. 9).

Полученные результаты позволяют выбрать из представленных жидкостей ОТВ с содержанием

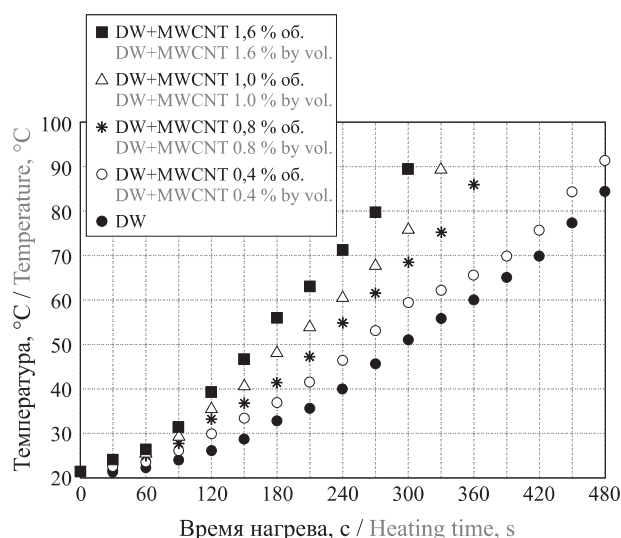


Рис. 8. Кинетика нагрева дистиллированной воды в зависимости от концентрации MWCNT

Fig. 8. Kinetics of heating of distilled water as a function of MWCNT concentration

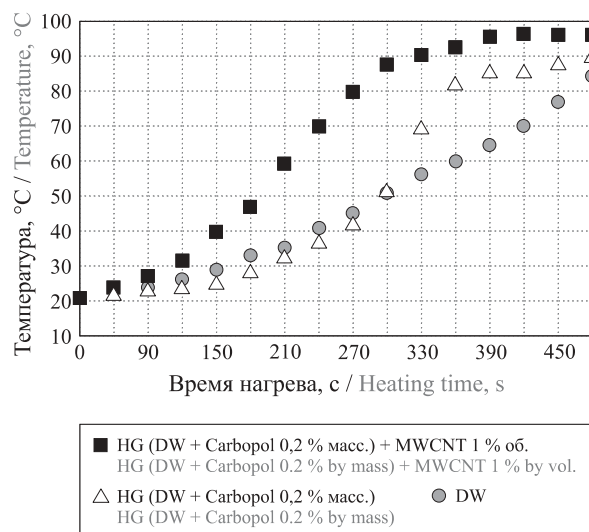


Рис. 9. Кинетика нагрева гидрогелей с РАП 0,2 % масс. и наноматериала MWCNT 1,0 % об.

Fig. 9. Kinetics of heating of hydrogels with 0.2 % by mass carbopol and MWCNT nanomaterial 1.0 % by vol.

наноматериала 1,0 % об. как наиболее эффективное средство для охлаждения зоны пламенного горения нефтепродуктов, а также для обеспечения ее стабильности [12].

Измерение коэффициента поверхностного натяжения наножидкостей

Результаты измерений свидетельствуют об уменьшении коэффициента поверхностного натяжения НЖ с увеличением концентрации наноматериала, содержащего MWCNT. Так, при концентрации наноматериала с MWCNT 0,4 % об. происходит снижение коэффициента поверхностного натяжения НЖ на 7 %, а при концентрации 1,0 % об. — на 20 %. В условиях электрофизического воздействия коэффициент поверхностного натяжения НЖ для указанных концентраций наноматериала в сравнении с исходными материалами изменяется соответственно на 9 и 21 % (рис. 10).

При определении коэффициента поверхностного натяжения гидрогелей (DW + РАП 0,2 % масс.) в условиях воздействия ПЧМП выявлено, что значение коэффициента поверхностного натяжения жидкости уменьшилось на 58 % по сравнению с эталонной жидкостью. Депонирование наноматериала с MWCNT в концентрации 1,0 % об. повышает поверхностное натяжение гидрогелей на 15–20 %. При электрофизическом воздействии дополнительно происходит снижение поверхностного натяжения на 10–15 % (рис. 11).

Схожие результаты получены в работе [27]. В частности, в ней показано, что внедрение MWCNT в дистиллированную воду в концентрации до 1,0 % об. приводит к уменьшению поверхностного натяжения НЖ. Далее при увеличении концентрации MWCNT

происходит рост поверхностного натяжения НЖ. Наличие поверхностно-активных веществ в воде с MWCNT снижает коэффициент поверхностного натяжения НЖ.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что значительное уменьшение поверхностного натяжения НЖ за счет внедрения MWCNT и гелеобразующего компонента приводит к уменьшению

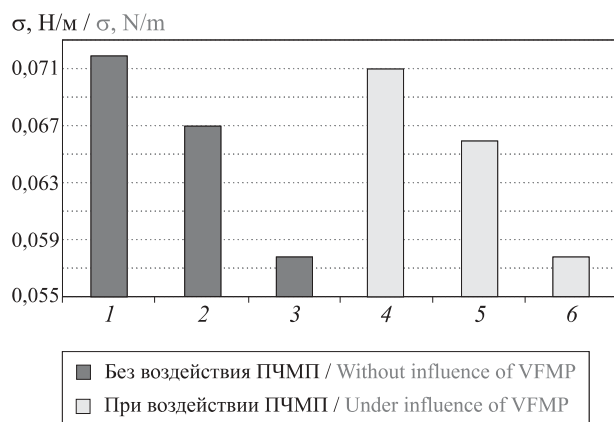


Рис. 10. Коэффициент поверхностного натяжения образцов дистиллированной воды с наноматериалом MWCNT в условиях электрофизического воздействия: 1 — DW (контрольный образец); 2 — DW + MWCNT 0,4 % об.; 3 — DW + MWCNT 1,0 % об.; 4 — DW (ПЧМП); 5 — DW + MWCNT 0,4 % об. (ПЧМП); 6 — DW + MWCNT 1,0 % об. (ПЧМП)

Fig. 10. Coefficient of surface tension of samples of distilled water with nanomaterial MWCNT under conditions of electrophysical exposure: 1 — DW (control); 2 — DW + MWCNT 0.4 % by vol.; 3 — DW + MWCNT 1.0 % by vol.; 4 — DW (VFMP); 5 — DW + MWCNT 0.4 % by vol. (VFMP); 6 — DW + MWCNT 1.0 % by vol. (VFMP)

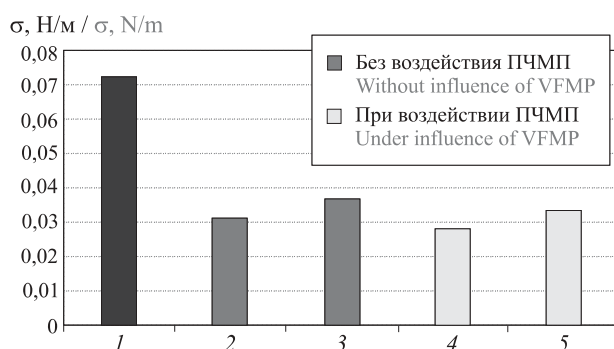


Рис. 11. Коэффициент поверхностного натяжения образцов гидрогелей (HG) с наноматериалом MWCNT (2–5) в условиях электрофизического воздействия: 1 — DW (контрольный образец); 2 — HG (DW + Carbopol 0,2 % масс.); 3 — HG (DW + Carbopol 0,2 % масс.) + MWCNT 1,0 % об.; 4 — HG (DW + Carbopol 0,2 % масс.) (ПЧМП); 5 — HG (DW + Carbopol 0,2 % масс.) + MWCNT 1,0 % об. (ПЧМП)

Fig. 11. Coefficient of surface tension of hydrogel samples with nanomaterial MWCNT (2–5) under conditions of electrophysical exposure: 1 — DW (control); 2 — HG (DW + Carbopol 0.2 % by mass); 3 — HG (DW + Carbopol 0.2 % by mass) + MWCNT 1.0 % by vol.; 4 — HG (DW + Carbopol 0.2 % by mass) (VFMP); 5 — HG (DW + Carbopol 0.2 % by mass) + MWCNT 1.0 % by vol. (VFMP)

размера каплей более чем на 20 % в сравнении с базовой жидкостью при сохранении параметров распыления ОТВ. Это способствует уменьшению размера каплей при распылении ОТВ в приповерхностном слое горячей жидкости, что, в свою очередь, повышает эффективность процесса тушения пламени нефтепродуктов [4].

Исследование огнетушащей способности наножидкостей методом поверхностного тушения горючей жидкости тонкораспыленным составом

Время тушения пожара наножидкостью на основе воды с наноматериалом MWCNT 1,0 % об. в среднем в 5,5 раз меньше времени тушения жидкости водой. При использовании гидрогелей (DW + РАП 0,2 % масс.) с наноматериалом MWCNT 1,0 % об. время тушения пожара сокращается до 10 раз (рис. 12).

Интенсивность тушения пожара водой с наноматериалом MWCNT 1,0 % об. снижается в 2 раза, а гидрогелем (DW + РАП 0,2 % масс.) с наноматериалом MWCNT 1 % об. — в 3 раза (рис. 13).

В условиях электрофизического воздействия на исследуемые наножидкости наблюдается дополнительное (на 10–15 %) сокращение времени тушения и интенсивности подачи ОТВ.

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод, что повышение огнетушащей эффективности модифицированных ОТВ на основе распыленной воды достигается за счет высокой термической стойкости наноматериала, улучшенной теплопроводности НЖ с MWCNT [11, 14], стабилизации наночастиц в жидкости и снижения скорости их агломерации [28, 29], уменьшения размера каплей

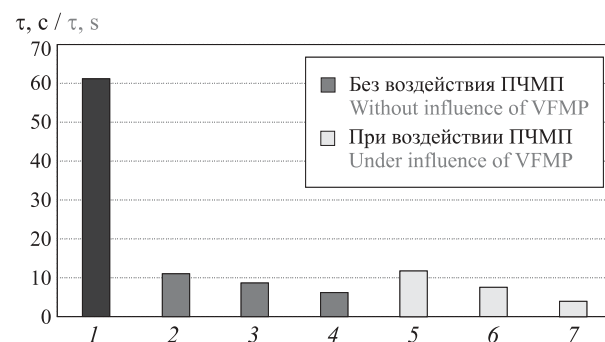


Рис. 12. Время тушения пламени (бензин АИ-92): 1 — DW (контрольный образец); 2 — DW + MWCNT 1,0 % об.; 3 — HG (DW + Carbopol 0,2 % масс.); 4 — HG (DW + Carbopol 0,2 % масс.) + MWCNT 1,0 % об.; 5 — DW + MWCNT 1,0 % об. (ПЧМП); 6 — HG (DW + Carbopol 0,2 % масс.) (ПЧМП); 7 — HG (DW + Carbopol 0,2 % масс.) + MWCNT 1,0 % об. (ПЧМП)

Fig. 12. Time of extinguishing the flame (gasoline): 1 — DW (control); 2 — DW + MWCNT 1.0 % by vol.; 3 — HG (DW + Carbopol 0.2 % by mass); 4 — HG (DW + Carbopol 0.2 % by mass) + MWCNT 1.0 % by vol.; 5 — DW + MWCNT 1.0 % by vol. (VFMP); 6 — HG (DW + Carbopol 0.2 % by mass) (VFMP); 7 — HG (DW + Carbopol 0.2 % by mass) + MWCNT 1.0 % by vol. (VFMP)

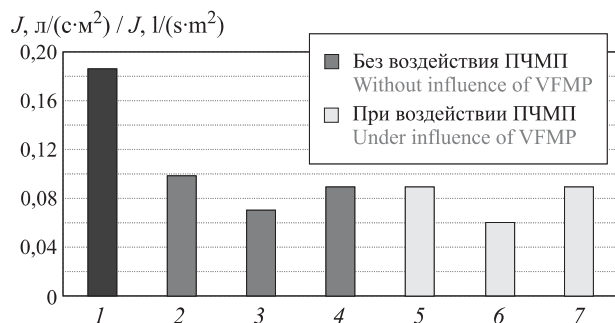


Рис. 13. Интенсивность подачи ОТВ при тушении пламени (бензин АИ-92): 1 — DW (контрольный образец); 2 — DW + MWCNT 1,0 % об.; 3 — HG (DW + Carbopol 0,2 % масс.); 4 — HG (DW + Carbopol 0,2 % масс.) + MWCNT 1,0 % об.; 5 — DW + MWCNT 1,0 % об. (ПЧМП); 6 — HG (DW + Carbopol 0,2 % масс.) (ПЧМП); 7 — HG (DW + Carbopol 0,2 % масс.) + MWCNT 1,0 % об. (ПЧМП)

Fig. 13. Intensity of fire extinguishing agent supply when extinguishing a flame (gasoline): 1 — DW (control); 2 — DW + MWCNT 1.0 % by vol.; 3 — HG (DW + Carbopol 0.2 % by mass); 4 — HG (DW + Carbopol 0.2 % by mass) + MWCNT 1.0 % by vol.; 5 — DW + MWCNT 1.0 % by vol. (VFMP); 6 — HG (DW + Carbopol 0.2 % by mass) (VFMP); 7 — HG (DW + Carbopol 0.2 % by mass) + MWCNT 1.0 % by vol. (VFMP)

за счет снижения поверхностного натяжения [4] и увеличения плотности жидкости с гелеобразующим компонентом [30].

Выводы

1. Депонирование наноматериалов с MWCNT в воду и гидрогели интенсифицирует теплообмен в жидкостях, что приводит к более быстрому разогреву их до температуры кипения в условиях теплового воздействия пламени. Коэффициент поверхностного натяжения наножидкостей уменьшается при внедрении наноматериалов с MWCNT, что способствует более эффективному распылу их в приповерхностном слое горячей жидкости.

2. Согласно полученным экспериментальным данным вода и гидрогели, содержащие наноматериалы с MWCNT, являются эффективными при тушении пожаров нефтепродуктов при относительно малых концентрациях наночастиц с большим содержанием аморфного углерода и других примесей.

3. Эффективность управления свойствами наножидкостей зависит от физико-химических свойств базовой жидкости и наноматериалов, а также от параметров внешнего воздействия. Электрофизическая и реагентная модификации позволяют стабилизировать наножидкости, что дополнительно повышает их эффективность при ликвидации горения нефтепродуктов с помощью существующих систем пожаротушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей : монография. — М. : Пожнаука, 2007. — 267 с.
2. Воднев П. П. Расчет параметров пожара, времени вскипания и выброса нефтепродуктов в процессе горения: методич. указания по выполнению контрольной работы. — Ульяновск : УВАУ ГА, 2008. — 17 с.
3. Волков Р. С., Войтков И. С., Высокоморная О. В. Особенности тушения жидких топлив и органических горючих жидкостей распыленным потоком воды // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2016. — Т. 25, № 4. — С. 68–75. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.04.68-75.
4. Тарасевич С. Э., Яковлев А. Б. Средний диаметр капель, образующихся при распаде жидких струй и пленок (обзор) // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. — 2004. — № 4. — С. 52–57.
5. Пат. 2479005 Российская Федерация. МПК G05B 24/02 (2006.01), H03B 28/00 (2006.01). Способ и устройство управления физико-химическими процессами в веществе и на границе раздела фаз / Ивахнюк Г. К., Матюхин В. Н., Клочков В. А., Шевченко А. О., Князев А. С., Ивахнюк К. Г., Иванов А. В., Родионов В. А. — № 2011118347/08; заявл. 21.01.2010; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2479005> (дата обращения: 10.04.2017).
6. Алексеик Е. Б., Савенкова А. Е., Гемини З. Влияние переменных электрических полей на процессы создания и стабилизации воздушно-механических пен // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России : научно-аналитический журнал. — 2013. — № 4. — С. 44–48. URL: <http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V54/8.pdf> (дата обращения: 15.04.2017).
7. Таранцев А. А., Чащин А. С. Применение модифицированных водных растворов для целей пожаротушения на объектах железнодорожного транспорта // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России : научно-аналитический журнал. — 2015. — № 2. — С. 30–37. URL: <http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V72/5.pdf> (дата обращения: 15.04.2017).
8. Степанов В. П. Минимизация задымленности в строительных объемах зданий и сооружений методами конденсационного улавливания и диспергирования электрофизически модифицированной воды : дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2007. — 133 с.

9. Гаджиев Ш. Г., Иванов А. В., Ивахнюк Г. К., Кадочникова Е. Н. Исследование огнетушащих и теплозащитных свойств водногелевых составов на основе модифицированных наножидкостей // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России : научно-аналитический журнал. — 2014. — № 2. — С. 31–37. URL: <http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V62/4.pdf> (дата обращения: 15.04.2017).
10. Гаджиев Ш. Г., Иванов А. В., Кондрашин А. В. Моделирование дальности подачи струи модифицированных водногелевых огнетушащих веществ // Проблемы управления рисками в технике. — 2015. — № 1(33). — С. 60–67.
11. Jiang H., Zhang Q., Shi L. Effective thermal conductivity of carbon nanotube-based nanofluid // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. — 2015. — Vol. 55. — P. 76–81. DOI: 10.1016/j.jtice.2015.03.037.
12. Терехов В. И., Шишкин Н. Е. Экспериментальное исследование испарения капель наножидкости в потоке сухого воздуха // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. — 2011. — № 2(7). — С. 197–200.
13. Ding Y., Alias H., Wen D., Williams R. A. Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids) // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2006. — Vol. 49, No. 1-2. — P. 240–250. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.07.009.
14. Xie H., Lee H., Youn W., Choi M. Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities // Journal of Applied Physics. — 2003. — Vol. 94, No. 8. — P. 4967–4971. DOI: 10.1063/1.1613374.
15. Amiri A., Shanbedi M., Amiri H., Heris S. Z., Kazi S. N., Chew B. T., Eshghi H. Pool boiling heat transfer of CNT/water nanofluids // Applied Thermal Engineering. — 2014. — Vol. 71, No. 1. — P. 450–459. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.06.064.
16. Авцинов И. А., Попов Г. Г. Проблемы синтеза углеродных нанотрубок // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2010. — Т. 6, № 10. — С. 68–71.
17. Иванов А. В., Ивахнюк Г. К., Медведева Л. В. Методы управления свойствами углеводородных жидкостей в задачах обеспечения пожарной безопасности // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2016. — Т. 25, № 9. — С. 30–37. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.30-37.
18. Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Симунин М. М. Технология производства углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза этанола из газовой фазы // Химическая технология. — 2007. — Т. 8, № 2. — С. 58–62.
19. Коваленко А. А., Елисеев А. А. Спектроскопия комбинационного рассеяния : методическая разработка. — М. : МГУ, 2011. — 37 с.
20. Теплообмен : методич. указания по самостоятельной работе / Сост.: Д. С. Серебrenников, А. А. Дектерев, К. А. Финников, М. С. Лобасова. — Красноярск : ИПК СФУ, 2009. — 105 с.
21. Сизов Е. Г., Беховых Ю. В. Механика и молекулярная физика: лабораторный практикум : учебное пособие. — Барнаул : Изд-во АГАУ, 2011. — 108 с.
22. Шароварников А. Ф., Мельников А. И. Экспериментальные исследования огнетушащей способности водных пленкообразующих растворов фторированных поверхностно-активных веществ // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2015. — Т. 24, № 9. — С. 74–81. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.74-81.
23. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. — Л. : Гидрометеиздат, 1975. — 280 с.
24. Murli C., Song Y. Pressure-induced polymerization of acrylic acid: a raman spectroscopic study // The Journal of Physical Chemistry B. — 2010. — Vol. 114, No. 30. — P. 9744–9750. DOI: 10.1021/jp1034757.
25. Tsukida N., Muranaka H., Ide M., Maeda Y., Kitano H. Effect of neutralization of poly(acrylic acid) on the structure of water examined by raman spectroscopy // The Journal of Physical Chemistry B. — 1997. — Vol. 101, No. 34. — P. 6676–6679. DOI: 10.1021/jp971210+.
26. Удовицкий В. Г. Методы оценки чистоты и характеристики свойств углеродных нанотрубок // Физическая инженерия поверхности. — 2009. — Т. 7, № 4. — С. 351–373.
27. Khaleduzzaman S. S., Mahbulul I. M., Shahriul I. M., Saidur R. Effect of particle concentration, temperature and surfactant on surface tension of nanofluids // International Communications in Heat and Mass Transfer. — 2013. — Vol. 49. — P. 110–114. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.10.010.
28. Ивахнюк Г. К., Картель Н. Т., Иванов А. В., Капитоненко З. В. Адсорбционные и электрофизические методы синтеза наноматериалов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). — 2011. — № 12. — С. 58–59.
29. Yu W., Xie H. A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications // Journal of Nanomaterials. — 2012. — 17 p. DOI: 10.1155/2012/435873.

30. *Иванов А. В., Михайлова В. И., Ивахнюк Г. К., Демехин Ф. В.* Исследование характеристик модифицированных гидрогелей для тепловой защиты резервуаров нефтепродуктов // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 4. — С. 58–67. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.04.58-67.

Материал поступил в редакцию 15 мая 2017 г.

Для цитирования: *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. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.31-44.

English

RESEARCH OF THE EXTINGUISHING PROPERTIES OF WATER AND HYDROGEL WITH CARBON NANOPARTICLES FOR LIQUIDATION BURNING OF THE PETROLEUM PRODUCTS

IVANOV A. V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moscow Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: spark002@mail.ru)

TOROPOV D. P., Postgraduate Student of Department of Physical-Technical Basics of Fire Safety, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moscow Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: dmitrytoropov2012@yandex.ru)

IVAKHNYUK G. K., Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of Department of Engineering Protection of Environment, Saint Petersburg State Technology Institute (Moskovskiy Avenue, 26, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation; e-mail: fireside@inbox.ru)

FEDOROV A. V., Doctor of Technical Sciences, Head of Department of Food Biotechnology of Products from Vegetable Raw Materials, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (Lomonosova St., 9, Saint Petersburg, 191002, Russian Federation; e-mail: alval58@yandex.ru)

KUZMIN A. A., Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of Department of Physical-Technical Basics of Fire Safety, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moscow Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: kaa47@mail.ru)

ABSTRACT

The use of sprayed water to extinguish fires in petroleum products is limited by the relatively low rate of vaporization due to the large average size of the droplets of the extinguishing agent. As methods to increase the efficiency of water-based fire, an electrophysical method for controlling the properties of substances at the interface is used, as well as a reagent modification — the deposition of nanomaterial with multilayered carbon nanotubes (MWCNT) into the liquid, and the use of gelling agents to stabilize the nanofluid.

Raman spectroscopy revealed the presence in the nanomaterial, in addition to MWCNT, of a large number of by-products of nanotube synthesis. In the electrophysical action, characteristic peaks of nanostructures in water and hydrogel are observed, due to the predominant grouping of MWCNT in the near-surface layer of the liquid. With the help of atomic force microscopy, extended carbon nanostructures included in the composition of the extinguishing agent, as well as traces of amorphous carbon, were observed.

In the course of the study, it was found that the increase in the rate of heating of the nanofluid is directly dependent on the concentration of the MWCNT nanomaterial and increases in comparison with distilled water (by 70 % — for the concentration of nanoparticles in water by 1.6 % by vol. and by 50 % — for the concentration of nanoparticles in the hydrogel 1.0 % by vol.), which can be

explained by an increase in the thermal conductivity of the system due to a larger number of carbon nanotubes that are conductors of heat from the source of heating. The results obtained allow to select from the presented liquids containing the nanomaterial at a concentration of 1.0 % by vol. as the most effective for cooling the combustion of petroleum products of the combustion zone and to ensure its stability.

When determining the surface tension coefficient of a nanofluid, water surface with a nanomaterial (DW + MWCNT 1.0 % by vol.) has a surface tension reduction of 20 %, for hydrogels (DW + Carbopol 0.2 % by mass) — by 58 %. When impact occurs electrophysical additional reduction of surface tension by 10 % preferably for all samples. A significant decrease in the value of the surface tension of the nanofluid, due to the introduction of MWCNT and the gelling component, leads to a decrease in the droplet size by more than 20 % in comparison with the base liquid while maintaining the parameters of the spraying of the extinguishing agent. This helps to reduce the size of droplets in the fire extinguishing substance in the near-surface layer of the burning liquid, increases the efficiency of the process of extinguishing the flame of petroleum products.

During the experiments, it was found that the quenching time of water-based nanofluids with MWCNT nanomaterial 1.0 % by vol. on average 5.5 times less than the time of quenching the liquid with water. For hydrogels (DW + Carbopol 0.2 % by mass) with nanomaterial MWCNT 1 % by vol. the fire-fighting time was reduced to 10 times. The intensity of extinguishing water with nanomaterial MWCNT 1 % by vol. decreased by 2 times, and for hydrogels (DW + Carbopol 0.2 % by mass) with nanomaterial MWCNT 1 % by vol. — 3 times. In electrophysical conditions of exposure to the test is an additional nanofluids (10–15 %) reduction of the quenching time and the flow rate of the extinguishing agent.

Summarizing the obtained results, it can be concluded that the increase in the fire-extinguishing efficiency of modified extinguishing agents based on atomized water is achieved due to the high thermal stability of the nanomaterial, improved thermal diffusivity of the nanoparticle with MWCNT, stabilization of nanoparticles in the liquid and reducing the rate of their agglomeration, reducing the droplet size by reducing the surface tension and increasing the fluid density.

Keywords: nanofluid; multilayer carbon nanotubes; heat transfer; fire extinguishing agent; variable-frequency modulated signal.

REFERENCES

1. Gorshkov V. I. *Tusheniye plameni goryuchikh zhidkostey* [Extinguishing the flame of flammable liquids]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2007. 267 p. (in Russian).
2. Vodnev P. P. *Calculation of fire parameters, boiling time and release of oil products in the combustion process. Methodich. instructions for the performance of the test work*. Ulyanovsk, Ulyanovsk Higher Civil Aviation School Publ., 2008. 17 p. (in Russian).
3. Volkov R. S., Voytkov I. S., Vysokomornaya O. V. Features of extinguishing of the liquid fuels and organic flammable liquids by an atomized water flow. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 4, pp. 68–75 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.04.68-75.
4. Tarasevich S. E., Yakovlev A. B. Calculation of mean diameter of drops at disintegration of liquid jets and films. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika / Russian Aeronautics*, 2004, no. 4, pp. 52–57 (in Russian).
5. Ivakhnjuk G. K., Matjukhin V. N., Klachkov V. A., Shevchenko A. O., Knjazev A. S., Ivakhnjuk K. G., Ivanov A. V., Rodionov V. A. *Method and apparatus for controlling physical-chemical processes in substance and on a phase boundary*. Patent RU, no. 2479005, publ. date 10.04.2013 (in Russian).
6. Alekseik E. B., Savenkova A. E., Gemish Z. The alternating electric fields on processes and stabilization of air and mechanical foam. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii. Nauchno-analiticheskiy zhurnal / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia. Scientific and Analytical Magazine*, 2013, no. 4, pp. 44–48 (in Russian). Available at: <http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V54/8.pdf> (Accessed 15 April 2017).
7. Tarancev A. A., Chashin A. S. Application of modified water solutions for fire on the objects of railways. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii. Nauchno-analiticheskiy zhurnal / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia. Scientific and Analytical Magazine*, 2015, no. 2, pp. 30–37 (in Russian). Available at: <http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V72/5.pdf> (Accessed 15 April 2017).

8. Stepanov V. P. *Minimization of smoke in building volumes of buildings and structures by the methods of condensation trapping and dispersion of electrophysically modified water*. Cand. tech. sci. diss. Saint Petersburg, 2007. 133 p. (in Russian).
9. Hajiyevev Sh. G., Ivanov A. V., Ivakhnyuk G. K., Kadochnikova E. N. Research extinguishing and thermal insulation properties of hydrogels prepared from modified nanofluids. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii. Nauchno-analiticheskiy zhurnal / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia. Scientific and Analytical Magazine*, 2014, no. 2, pp. 31–37 (in Russian). Available at: <http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V62/4.pdf> (Accessed 15 April 2017).
10. Gadzhiev Sh. G., Ivanov A. V., Kondrashin A. V. Simulation of distance jet modified water-gel extinguishing agents. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2015, no. 1(33), pp. 60–67 (in Russian).
11. Jiang H., Zhang Q., Shi L. Effective thermal conductivity of carbon nanotube-based nanofluid. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2015, vol. 55, pp. 76–81. DOI: 10.1016/j.jtice.2015.03.037.
12. Terekhov V. I., Shishkin N. E. Experimental investigation of a nanoliquids drops evaporation in a stream of dry air. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezultaty, tekhnologii / Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies*, 2011, no. 2(7), pp. 197–200 (in Russian).
13. Ding Y., Alias H., Wen D., Williams R. A. Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, vol. 49, no. 1-2, pp. 240–250. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.07.009.
14. Xie H., Lee H., Youn W., Choi M. Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 94, no. 8, pp. 4967–4971. DOI: 10.1063/1.1613374.
15. Amiri A., Shanbedi M., Amiri H., Heris S. Z., Kazi S. N., Chew B. T., Eshghi H. Pool boiling heat transfer of CNT/water nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 2014, vol. 71, no. 1, pp. 450–459. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.06.064.
16. Avcinov I. A., Popov G. G. *Problems of carbon nanotubes synthesis*. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta / The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2010, vol. 6, no. 10, pp. 68–71 (in Russian).
17. Ivanov A. V., Ivakhnyuk G. K., Medvedeva L. V. Methods of control properties of hydrocarbon liquids in the problems of fire safety. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 9, pp. 30–37 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.30-37.
18. Bobrynetskiy I. I., Nevolin V. K., Simunin M. M. Technology of production of carbon nanotubes by the method of catalytic pyrolysis of ethanol from the gas phase. *Khimicheskaya tekhnologiya / Chemical Technology*, 2007, vol. 8, no. 2, pp. 58–62 (in Russian).
19. Kovalenko A. A., Eliseev A. A. *Spektroskopiya kombinatsionnogo rasseyaniya* [Spectroscopy of Raman scattering]. Moscow, Lomonosov Moscow State University Publ., 2011. 37 p. (in Russian).
20. Serebrennikov D. S., Dekterev A. A., Finniov K. A., Lobasova M. S. *Teplomassoobmen* [Heat and mass exchange]. Krasnoyarsk, IPK SFU Publ., 2009. 105 p. (in Russian).
21. Sizov E. G., Bekhoviykh Yu. V. *Mekhanika i molekulyarnaya fizika. Laboratornyy praktikum* [Mechanics and molecular physics. Laboratory workshop]. Barnaul, Altai State Agricultural University Publ., 2011. 108 p. (in Russian).
22. Sharovarnikov A. F., Melnikov A. I. Experimental studies of fire extinguishing capacity of the water film forming solutions containing fluorinated surfactants. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 9, pp. 74–81 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2015.24.09.74-81.
23. Eizenberg D., Kautsman V. *Struktura i svoystva vody* [Structure and properties of water]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1975. 280 p. (in Russian).
24. Murli C., Song Y. Pressure-induced polymerization of acrylic acid: a raman spectroscopic study. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2010, vol. 114, no. 30, pp. 9744–9750. DOI: 10.1021/jp1034757.
25. Tsukida N., Muranaka H., Ide M., Maeda Y., Kitano H. Effect of neutralization of poly(acrylic acid) on the structure of water examined by raman spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1997, vol. 101, no. 34, pp. 6676–6679. DOI: 10.1021/jp971210+.
26. Udovitskiy V. G. Methods for estimating the purity and characterization of the properties of carbon nanotubes. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti / Physical Surface Engineering*, 2009, vol. 7, no. 4, pp. 351–373 (in Russian).

27. Khaleduzzaman S. S., Mahbubul I. M., Shahrul I. M., Saidur R. Effect of particle concentration, temperature and surfactant on surface tension of nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 49, pp. 110–114. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.10.010.
28. Ivakhnyuk G. K., Kartel N. T., Ivanov A. V., Kapitonenko Z. V. Adsorption and electrophysical methods of synthesis of nanomaterials. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (Tekhnicheskogo universiteta) / Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 2011, no. 12, pp. 58–59 (in Russian).
29. Yu W., Xie H. A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications. *Journal of Nanomaterials*, 2012. 17 p. DOI: 10.1155/2012/435873.
30. Ivanov A. V., Mikhaylova V. I., Ivakhnyuk G. K., Demekhin F. V. Investigation of the characteristics of modified hydrogels for thermal protection of petroleum products tanks. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 4, pp. 58–67 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.04.58-67.

For citation: Ivanov A. V., Toropov D. P., Ivakhnyuk G. K., Fedorov A. V., Kuzmin A. A. Research of the extinguishing properties of water and hydrogel with carbon nanoparticles for liquidation burning of the petroleum products. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 8, pp. 31–44 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.31-44.



Издательство «ПОЖНАУКА»

Представляет книгу

Д. Г. Пронин, Д. А. Корольченко

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ПОЖАРНЫХ ОТСЕКОВ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ : монография.

— М. : Издательство "ПОЖНАУКА", 2014. — 104 с. : ил.



Изложены современные подходы к нормированию площадей пожарных отсеков и раскрыты требования к ним. Предложен метод научно-технического обоснования размеров пожарных отсеков с учетом вероятностного подхода на основе расчета пожарного риска. Рассмотрены возможности расчета вероятностных показателей, используемых в разработанном методе. Представлены основные достижения в данном направлении отечественной и зарубежной науки; приведены сведения о положительных и отрицательных сторонах действующей системы технического регулирования.

Монография ориентирована на научных и инженерных работников, занимающихся вопросами проектирования противопожарной защиты зданий и сооружений, а также на научных и практических работников пожарной охраны, преподавателей и слушателей учебных заведений строительного и пожарно-технического профиля, специалистов страховых компаний, занимающихся вопросами оценки пожарного риска.

Монография рекомендуется к использованию при выполнении научно-исследовательских и нормативно-технических работ по оптимизации объемно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений, в том числе тех, на которые отсутствуют нормы проектирования, а также при проведении оценки страхования пожарных рисков.

Разработанный метод расчета может быть положен в основу технических регламентов и сводов правил в области строительства и пожарной безопасности.

121352, г. Москва, а/я 43; тел./факс: (495) 228-09-03; e-mail: info@fire-smi.ru