

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)

А. А. БОЕВА, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: silina.2015@mail.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)

С. Н. ТЕРЕХИН, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: expert_terehin@inbox.ru)

В. Я. ПРОРОК, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: aist_ugps@mail.ru)

УДК 614.841.343:539.097

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ВСПУЧИВАЮЩИХСЯ КОМПОЗИЦИЙ В УСЛОВИЯХ УГЛЕВОДОРОДНОГО ПОЖАРА НА ОБЪЕКТАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Представлены результаты исследований эксплуатационных характеристик огнезащитных вспучивающихся композиций (ОВК), модифицированных углеродным наноматериалом с многослойными углеродными нанотрубками (MWCNT) на лабораторной установке, моделирующей условия углеводородного горения. Показано, что модификация компонентов ОВК при депонировании MWCNT в сочетании с электрофизическим воздействием влечет за собой улучшение их технологических и эксплуатационных характеристик, в том числе снижение скорости роста температуры защищенного металла в условиях углеводородного горения, снижение коэффициента вспучивания и увеличение адгезионной прочности покрытия.

Ключевые слова: огнезащитное вспучивающееся покрытие; реагентная модификация; электрофизическая модификация; углеводородный пожар; переменный частотно-модулированный потенциал; транспортировка нефтепродуктов.

DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.5-19

Введение

Доставка нефтепродуктов потребителю осуществляется посредством морского, речного, железнодорожного, автомобильного и трубопроводного транспорта. Каждый вид транспорта используется исходя из экономической целесообразности и развития соответствующих коммуникаций. Наиболее распространенным оборудованием для всех видов транспорта нефтепродуктов являются резервуары, сливно-наливные эстакады, наносные станции и трубопроводы [1].

Объекты транспорта характеризуются повышенной опасностью вследствие наличия большого количества легковоспламеняющихся (ЛВЖ) и горючих (ГЖ) жидкостей, значительной вероятностью

возникновения источников зажигания при различных операциях, в том числе сливе-наливе, перекачке нефтепродуктов. По данным [2] почти 50 % всех аварий на объектах с обращением нефтепродуктов приходится на технологические трубопроводы и насосно-компрессорное оборудование, причем свыше 30 % аварийных ситуаций возникает из-за неисправности таких элементов оборудования, как сальники, прокладки, фланцевые соединения и т. п. При наличии источников зажигания возможно возникновение факельного горения паров нефтепродуктов в элементах технологических аппаратов и трубопроводов, что может привести к деформации и обрушению металлоконструкций, подвергшихся высокотемпературному (до 1200 °С) и эрозионному воздействию.

© Иванов А. В., Боева А. А., Ивахнюк Г. К., Терехин С. Н., Пророк В. Я., 2017

Одним из способов обеспечения требуемой огнестойкости металлоконструкций является применение огнезащитных вспучивающихся композиций (ОВК). Эффективность ОВК зависит от их способности переходить во вспученное состояние, что позволяет значительно снизить их теплопроводность. Критическими эксплуатационными характеристиками огнезащитных составов являются кратность вспучивания, устойчивость к эрозии, температура активации, изменение массы при потере влаги и др. [3].

Модификация полимеров различными наноструктурами, в том числе составляющими лакокрасочных составов, позволяет улучшить их эксплуатационные характеристики для решения задач различного спектра. Вместе с тем задача выбора способа модификации веществ осложняется наличием большого спектра наночастиц и условий их использования, что не всегда дает возможность выбрать оптимальную технологию получения наноматериала в узком спектре необходимых характеристик. Решение данной проблемы возможно с помощью методов моделирования и прогнозирования свойств и характеристик наноматериалов. В настоящей работе представлены результаты исследования эксплуатационных характеристик наномодифицированных ОВК в условиях углеводородного горения для создания технологий производства и применения огнезащитных составов на основе углеродсодержащих нанокомпозитов при обеспечении тепловой защиты металлоконструкций объектов транспортировки нефтепродуктов [4].

Постановка задачи исследования

Основным условием образования вспененной карбонизованной массы при температуре порядка 360...430 °С является наличие компонентов, ответственных за образование вспененного углеродного каркаса. К ним относятся пенообразователи, пленкообразователи, пигментные наполнители и другие вещества [5, 6].

Моделирование физико-химических процессов разложения ОВК представляет собой сложную задачу с учетом детального механизма реакций, происходящих в условиях термического воздействия. Разработанные модели позволяют учитывать поглощение тепловой энергии и фильтрацию при пиролизе компонентов покрытий, конденсацию влаги, вспучивание и усадку прогретого слоя, химический и механический унос массы обугленного слоя [7].

Вспучивающиеся огнезащитные покрытия, применяемые для стальных конструкций, характеризуются своей теплоизолирующей способностью, основной характеристикой которых является коэффициент температуропроводности α , определяемый выражением

$$\alpha = \lambda_t / (c_t \rho_0), \quad (1)$$

где λ_t — теплопроводность;

c_t — теплоемкость;

ρ_0 — плотность [8].

Важной характеристикой огнезащитного состава является коэффициент вспучивания $k_{вс}$. Большая толщина вспученного покрытия позволяет уменьшить теплопроводность материала [3].

Коэффициент вспучивания определяется по формуле

$$k_{вс} = h_{всп} / h_0, \quad (2)$$

где $h_{всп}$ — толщина вспученного покрытия;

h_0 — начальная толщина.

Адгезия огнезащитных покрытий является одним из важнейших показателей, влияющих на огнезащитную эффективность вспучивающихся покрытий в условиях термического и эрозионного воздействия пламени. В качестве основного агента адгезионного взаимодействия используется полимерное связующее, которое в условиях высоких температур разрушается, в результате чего происходит отслаивание пенококса и быстрый разогрев металлоконструкций [9].

Потеря массы ОВК ΔM при нагревании оказывает непосредственное влияние на огнезащитную способность покрытия. Плотность покрытия в условиях теплового воздействия может быть определена по формуле

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{1 - \Delta M / M_0}{1 + (h_{всп} - h_0) / h_0}, \quad (3)$$

где M_0 — начальная масса огнезащитного покрытия [10].

В работе [11] приведены результаты испытаний огнезащитных покрытий в условиях углеводородного горения. Показано, что при реактивном воздействии пламени заявленные пределы огнестойкости металлоконструкций, защищенных исследуемыми ОВК, существенно снижаются за счет увеличения скорости термической деструкции полимерных покрытий.

Модификация полимеров и лакокрасочных покрытий наноструктурами позволяет получать материалы с улучшенными технологическими, адгезионными и физико-механическими характеристиками [12]. Сведения о результатах модификации некоторых видов полимеров и лакокрасочных материалов приведены в табл. 1.

Задача настоящего исследования заключается в определении оптимальных концентраций и условий модификации ОВК путем депонирования наноматериалов с MWCNT в базовый состав для обеспечения огнезащиты металлических конструкций объектов транспортировки нефтепродуктов в условиях

Таблица 1. Свойства полимеров, модифицированных углеродными наночастицами**Table 1.** Properties of polymers modified with carbon nanoparticles

Источник Source	Вид наночастиц + базовый материал Type of nanoparticles + base material	Концентрация наночастиц, % масс. Concentration of nanoparticles, % by mass	Наблюдаемый эффект The observed effect
[13]	MWCNT + эпоксидная смола E51 MWCNT + epoxy resin E51	0,01...0,5	Повышение температуры разложения с 361 до 387 °С; повышение предела прочности с 58,5 до 128,94 МПа; снижение температуры стеклования с 76 до 69 °С Increasing the decomposition temperature from 361 to 387 °C; increase in the tensile strength from 58.5 to 128.94 MPa; reduction of the glass transition temperature from 76 to 69 °C
[14]	DWCNT + эпоксидная смола SC-15 DWCNT + epoxy resin SC-15	0,05...1	Увеличение трещиностойкости с 0,65 до 0,8 МПа; уменьшение коэффициента теплового расширения на 40...70 %; повышение температуры стеклования с 85 до 105 °С; увеличение значения деформации разрушения на 50 % Increased crack resistance from 0.65 to 0.8 MPa; decrease in the coefficient of thermal expansion by 40...70 %; increase in the glass transition temperature from 85 to 105 °C; an improvement in the value of the fracture deformation by 50 %
[15]	MWCNT + полиметилакрилат (ПММА) MWCNT + polymethyl acrylate (PMMA)	4...26	Термическая деградация ПММА при 350...450 °С (без MWCNT при 320...450 °С) Thermal degradation of PMMA at 350...450 °C (without MWCNT at 320...450 °C)
[12]	УНТ* марки “Суспензия” + грунт алкидный “Agrohel” MWCNT brand “Suspension” + primer alkyd “Agrohel”	0,025...0,3	Увеличение адгезии на 53 %; увеличение ударной прочности в 2,5 раза; повышение прочности покрытия в 2,5 раза Increased adhesion by 53 %; increase the impact resistance in 2.5 times; increase of coating strength in 2.5 times
[12]	УНТ марки “Суспензия” + грунт алкидный ГФ-0119 MWCNT grade “Suspension” + primer alkyd GF-0119	0,025...0,3	Увеличение адгезии в 2...5 раз; ускорение формирования покрытия в 1,5 раза Increase adhesion in 2...5 times; acceleration of the formation of the coating in 1.5 times
[16]	MWCNT + эпоксидные связующие MWCNT + epoxy binders	1	Увеличение прочности при изгибе на 100 %; увеличение модуля упругости при растяжении на 24,6 %; уменьшение температуры стеклования со 170 до 159 °С Increase in bending strength by 100 %; an increase in the tensile modulus by 24.6 %; decrease in the glass transition temperature from 170 to 159 °C
[17]	MWCNT + жидкое натриевое стекло MWCNT + liquid sodium glass	0,01	Увеличение коэффициента вспучивания в 2,5...3,0 раза в сравнении с базовым материалом The increase in the coefficient of swelling in 2.5...3.0 times in comparison with the base material

* УНТ — углеродные нанотрубки.

факельного горения при непосредственном контакте пламени с поверхностью металла.

Материалы для исследований

В качестве объектов исследования были выбраны углеродные наноматериалы, содержащие MWCNT, которые были получены методом каталитического пиролиза на установке “CVDomna” [18]. Функционализация MWCNT проводилась в процессе отжи-

га в муфельной печи при температуре 250...300 °С. Функционализированные MWCNT представляют собой цилиндрические и шаровидные структуры ($d = 30$ нм, $l = 2...5$ мкм) (рис. 1) [19].

Основой для модифицированных ОВК являлась огнезащитная вспучивающаяся краска для стальных конструкций “Термобарьер” (по ТУ 2313-001-30642285–2011). Модификация огнезащитного состава проводилась путем депонирования MWCNT

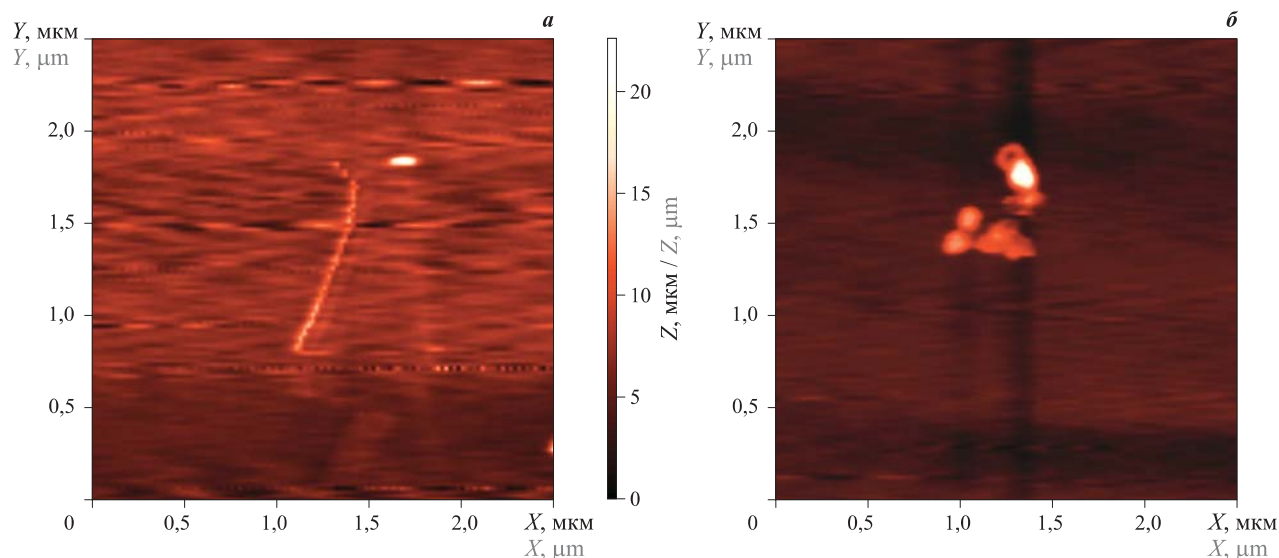


Рис. 1. Сканы ACM MWCNT на слюдяной подложке: *а* — цилиндрические УНТ; *б* — шаровидные наноструктуры
Fig. 1. The MWCNT ASM scans on a mica substrate: *a* — a cylindrical CNTs; *b* — globular nanostructures

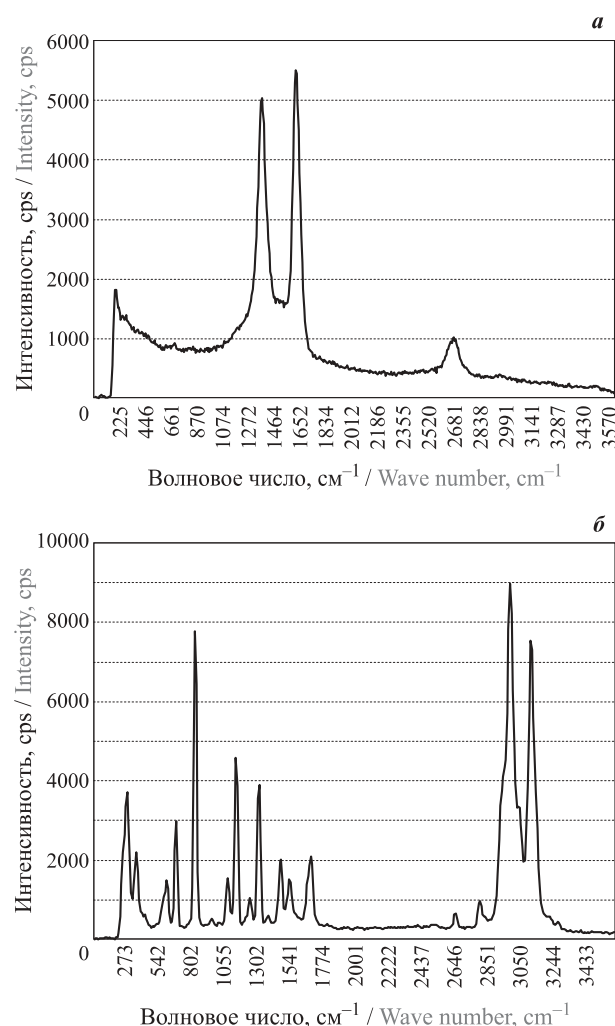


Рис. 2. Рамановский спектр MWCNT: *а* — исходный материал; *б* — в растворе (о-ксилол), лазер 532 нм, экспозиция 5 с
Fig. 2. Raman spectrum of MWCNT: *a* — original material; *b* — in a solvent (o-xylene), laser 532 nm, exposure 5 s

в растворитель (о-ксилол) с дальнейшим перемешиванием в наполнителе в концентрации 0,1...1,25 % об.

Рамановский спектр MWCNT в растворе представлен на рис. 2. Характерными для MWCNT являются пики в интервале 1200...1400 см^{-1} . Наблюдение данных пиков в рамановском спектре растворителя свидетельствует о наличии наноматериалов с MWCNT в приповерхностном слое жидкости.

В ходе экспериментов отдельные компоненты ОВК подвергались электрофизическому воздействию [20] с параметрами переменного частотно-модулированного потенциала (ПЧМП) 56 В, 50 Гц. В табл. 2 представлены образцы ОВК, участвующие в исследованиях.

Исследование огнезащитной эффективности наномодифицированных огнезащитных вспучивающихся покрытий

Исследование огнезащитной эффективности наномодифицированных ОВК проводили на лабораторной установке, моделирующей условия углеводородного горения (рис. 3) [21]. Образец пластины из углеродистой стали марки Ст. 5 толщиной 2 мм (ГОСТ 380–2005) помещали в испытательную камеру. Высокотемпературный газовый поток (температура около 1200 °С, давление 0,1 МПа) создавали с помощью пропан-бутановой горелки с массовым расходом горючего газа 50...60 г/ч. Температуру газового потока и тыльной стороны пластины контролировали двумя термопарами. Время обогрева пластины составляло 25 мин. За предельное состояние принимали достижение температуры металлической пластины 500 °С (по ГОСТ Р 53295–2009). Для каждого образца проводили не менее трех испытаний.

Практически для всех образцов модифицированных ОВК, содержащих MWCNT, наблюдается более

Таблица 2. Перечень образцов, участвующих в исследовании

Table 2. The list of samples involved in the study

№ п/п No.	Образец ОБК Sample OVK	Концентрация MWCNT, % об. Concentration of MWCNT, % by vol.		ПЧМП VFMP
		в грунте ГФ-021 in the primer GF-021	в огнезащитном составе in fire-resistant composition	
1	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0 % об. Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0 % by vol.	0	0	–
2	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0,1 % об. Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0.1 % by vol.	0	0,10	–
3	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0,5 % об. Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0.5 % by vol.	0	0,50	–
4	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0,75 % об. Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0.75 % by vol.	0	0,75	–
5	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 1 % об. Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 1 % by vol.	0	1,00	–
6	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 1,25 % об. Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 1.25 % by vol.	0	1,25	–
7	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0 % об. Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0 % by vol.	1,00	0	–
8	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0,1 % об. Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0.1 % by vol.	1,00	0,10	–
9	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0,5 % об. Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0.5 % by vol.	1,00	0,50	–
10	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0,75 % об. Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0.75 % by vol.	1,00	0,75	–
11	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 1 % об. Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 1 % by vol.	1,00	1,00	–
12	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 1,25 % об. Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 1.25 % by vol.	1,00	1,25	–
13	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0 % об. ПЧМП Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0 % by vol. VFMP	0	0	+
14	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0,1 % об. ПЧМП Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0.1 % by vol. VFMP	0	0,10	+
15	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0,5 % об. ПЧМП Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0.5 % by vol. VFMP	0	0,50	+
16	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 0,75 % об. ПЧМП Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 0.75 % by vol. VFMP	0	0,75	+
17	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 1 % об. ПЧМП Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 1 % by vol. VFMP	0	1,00	+
18	Грунт MWCNT 0 % об. Краска MWCNT 1,25 % об. ПЧМП Primer MWCNT 0 % by vol. Paint MWCNT 1.25 % by vol. VFMP	0	1,25	+
19	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0 % об. ПЧМП Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0 % by vol. VFMP	1,00	0	+
20	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0,1 % об. ПЧМП Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0.1 % by vol. VFMP	1,00	0,10	+
21	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0,5 % об. ПЧМП Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0.5 % by vol. VFMP	1,00	0,50	+
22	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 0,75 % об. ПЧМП Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 0.75 % by vol. VFMP	1,00	0,75	+
23	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 1 % об. ПЧМП Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 1 % by vol. VFMP	1,00	1,00	+
24	Грунт MWCNT 1 % об. Краска MWCNT 1,25 % об. ПЧМП Primer MWCNT 1 % by vol. Paint MWCNT 1.25 % by vol. VFMP	1,00	1,25	+

медленный (на 10...55 %) рост температуры объекта защиты в течение времени наблюдения в сравнении с немодифицированным покрытием ОВК (рис. 4).

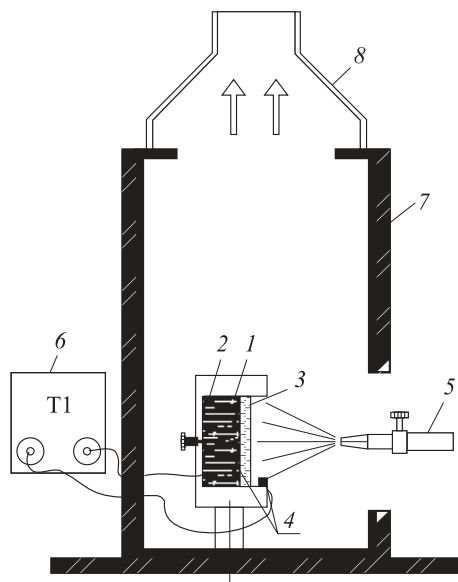


Рис. 3. Схема лабораторной установки для испытаний огнезащитных покрытий в условиях углеводородного горения: 1 — стальная пластина; 2 — теплоизоляция; 3 — огнезащитное покрытие; 4, 5 — термопары; 6 — регистратор температуры; 7 — корпус испытательной камеры; 8 — вытяжной зонт

Fig. 3. The scheme of laboratory setup for testing of fire protective coatings in hydrocarbon combustion: 1 — steel plate; 2 — thermal insulation; 3 — fire retardant coating; 4, 5 — thermocouples; 6 — temperature recorder; 7 — the body of the test chamber; 8 — exhaust hood

Наилучшие результаты (достижение максимальной температуры образца не выше 300 °С в течение 25 мин прямого воздействия горячей струи углеводородного газа) получены для образцов ОВК:

- с немодифицированным грунтом и огнезащитной краской (при воздействии ПЧМП);
- с немодифицированным грунтом, с содержанием MWCNT в огнезащитной краске 0,5 и 1,0 % об. (при воздействии ПЧМП);
- с модифицированным грунтом (содержание MWCNT 1,0 % об.), с содержанием MWCNT в огнезащитной краске 1,25 % об. (при воздействии ПЧМП).

Для образцов ОВК с грунтом ГФ-021 без MWCNT скорость роста температуры металла в основном обратно пропорциональна концентрации MWCNT в огнезащитном составе как без электрофизического воздействия, так и при воздействии ПЧМП (рис. 5, а и 6, а). Для образцов ОВК с грунтом ГФ-021 с MWCNT в концентрации 1,0 % об. скорость роста температуры металла не имеет четкой зависимости от концентрации MWCNT в огнезащитном составе (рис. 5, б и 6, б).

Вместе с тем следует отметить, что для всех образцов ОВК скорость роста температуры увеличивается при достижении металлом 350...450 °С, что может быть объяснено разрушением слоя пенококса в зоне пламенного воздействия и дальнейшим окислением углерода в интумесцентном слое.

На рис. 7 представлены фотографии образцов ОВК после испытаний на лабораторной установке

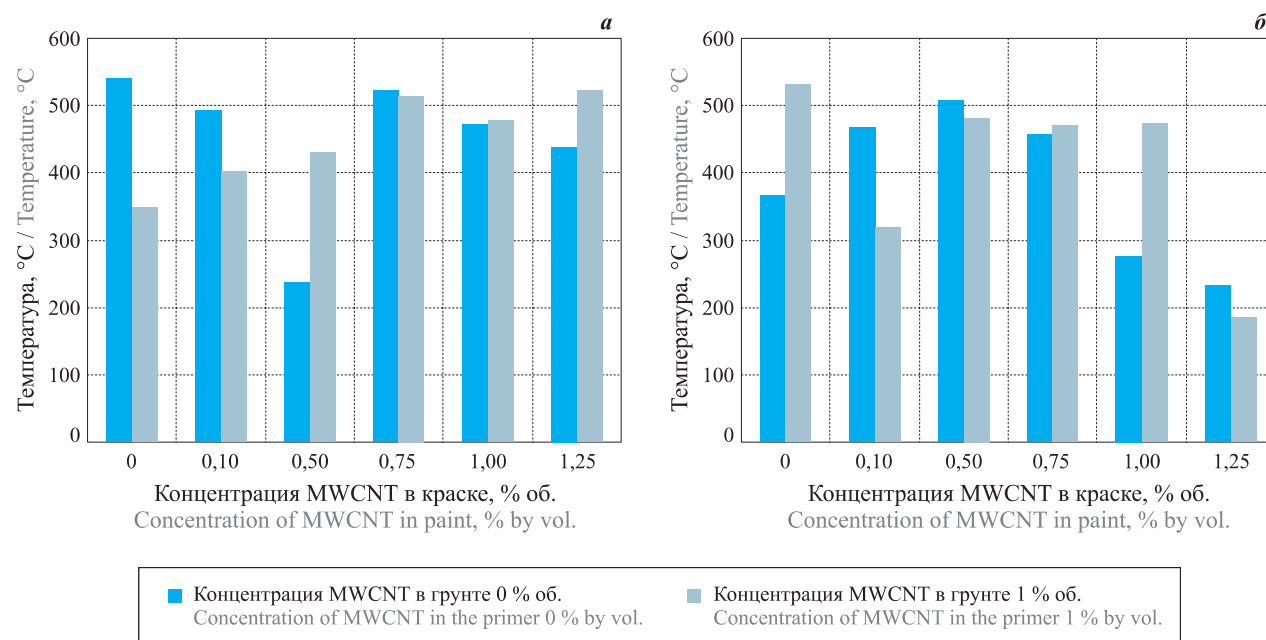


Рис. 4. Максимальная температура металла в зависимости от концентрации MWCNT в огнезащитном покрытии: а — без электрофизического воздействия; б — при воздействии ПЧМП

Fig. 4. The maximum temperature of the metal depending on the concentration of MWCNT in flame-retardant coating: а — without electrical effects; б — by influence of VFMP

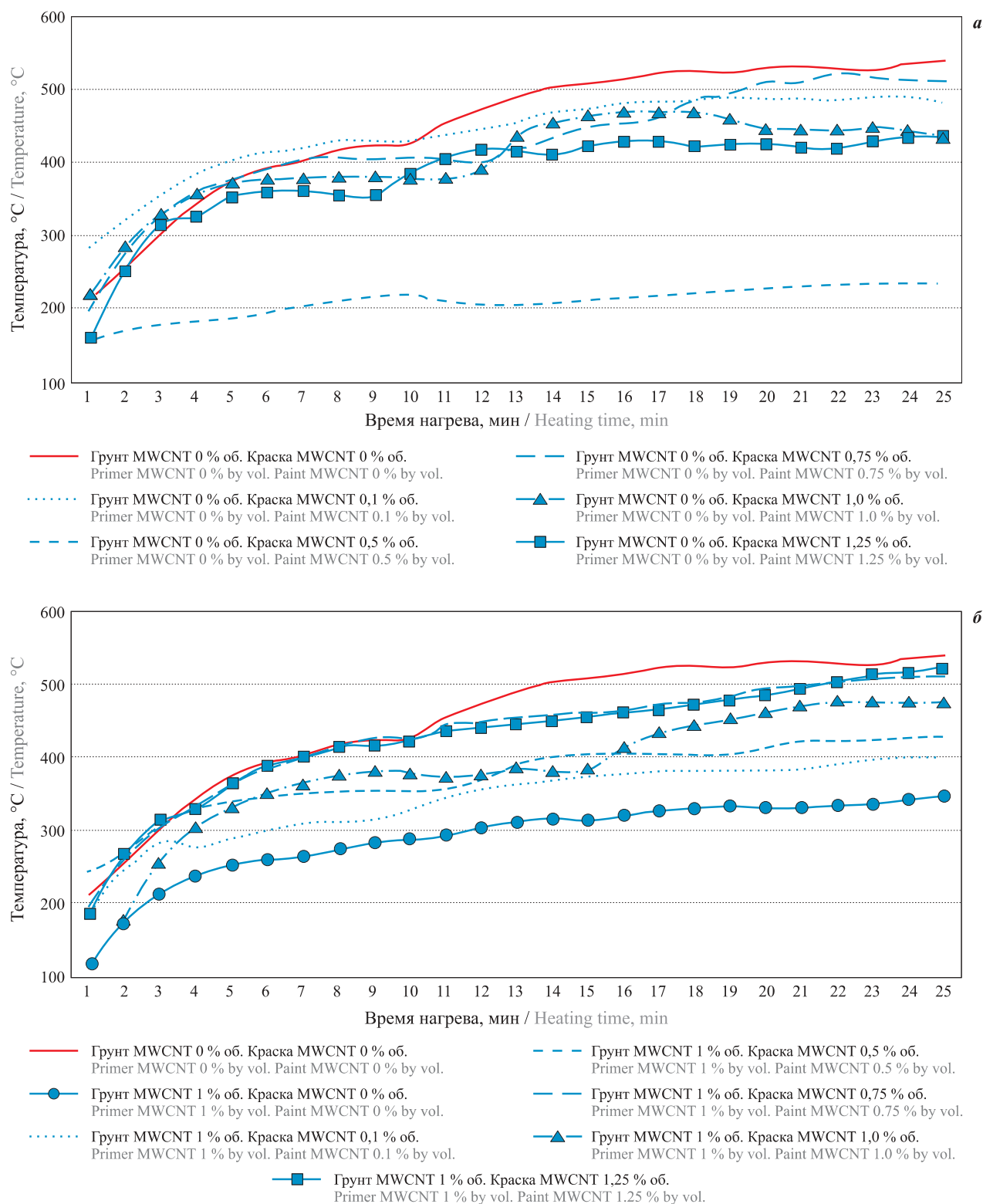


Рис. 5. Результаты лабораторных теплофизических испытаний огнезащитных покрытий, полученных без электрофизического воздействия: *а* — при отсутствии MWCNT в грунте ГФ-021; *б* — при концентрации MWCNT в грунте ГФ-021 1,0 % об.
Fig. 5. The results of lab thermal testing of fire resistant coatings obtained without the electro-physical effects: *a* — in the absence of MWCNT in the primer GF-021; *b* — when the concentration of MWCNT in the primer GF-021 1.0 % by vol.

в течение 25 мин. Для немодифицированного покрытия (см. рис. 7,а) наблюдается значительное уменьшение толщины слоя пенококса в зоне непосредственного контакта с пламенем горелки, в то время

как модифицированные покрытия (см. рис. 7,б и 7,в) преимущественно сохранили вспучившийся защитный слой, что может быть объяснено более низкой скоростью термической деструкции ОБК вследствие

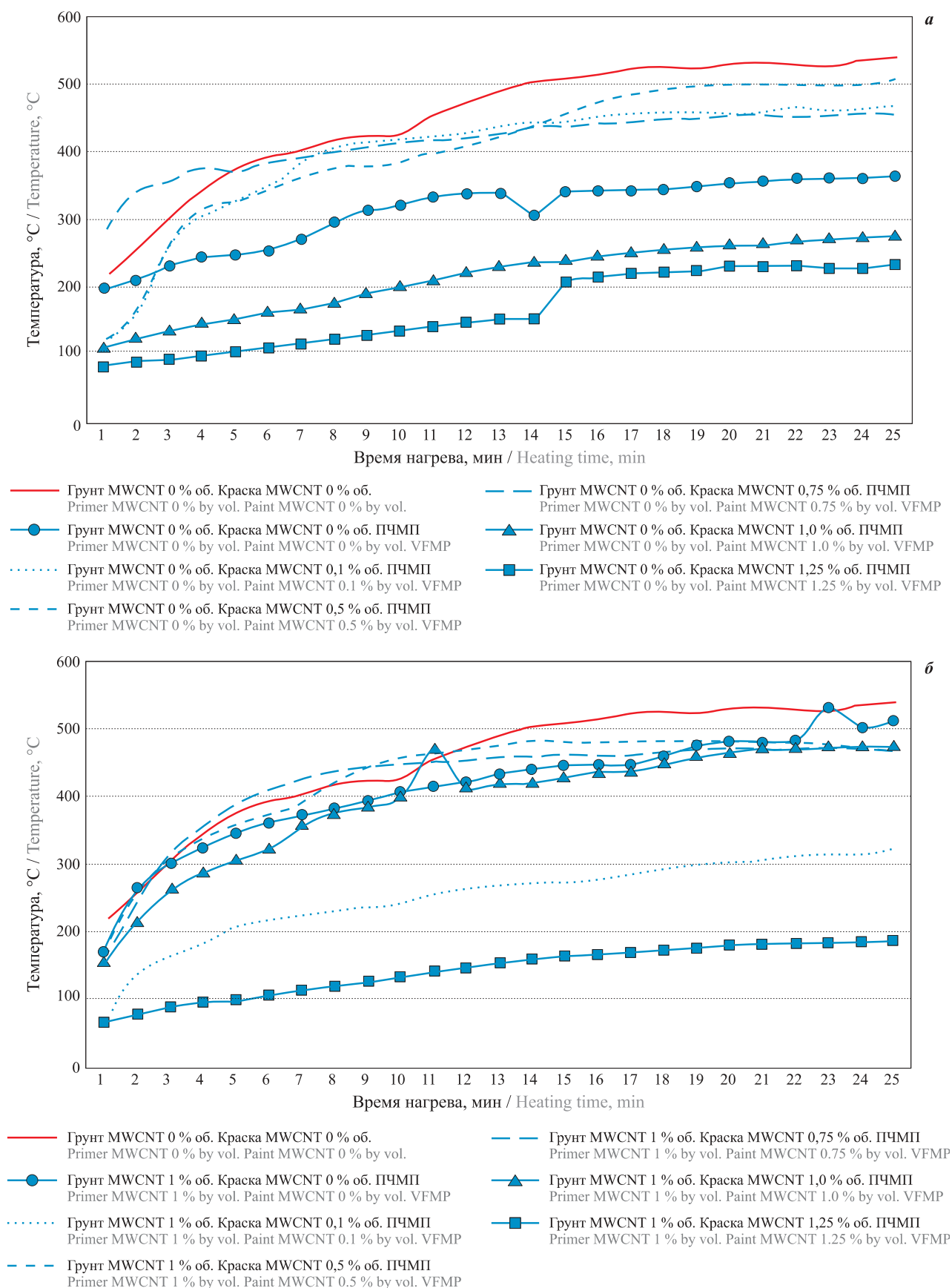


Рис. 6. Результаты лабораторных теплофизических испытаний огнезащитных покрытий, полученных в условиях воздействия ПЧМП: *а* — при отсутствии MWCNT в грунте ГФ-021; *б* — при концентрации MWCNT в грунте ГФ-021 1,0 % об.

Fig. 6. The results of lab thermal testing of fire resistant coatings obtained in the conditions of influence VFMP: *a* — in the absence of MWCNT in the primer GF-021; *b* — when the concentration of MWCNT in the primer GF-021 1.0 % by vol.

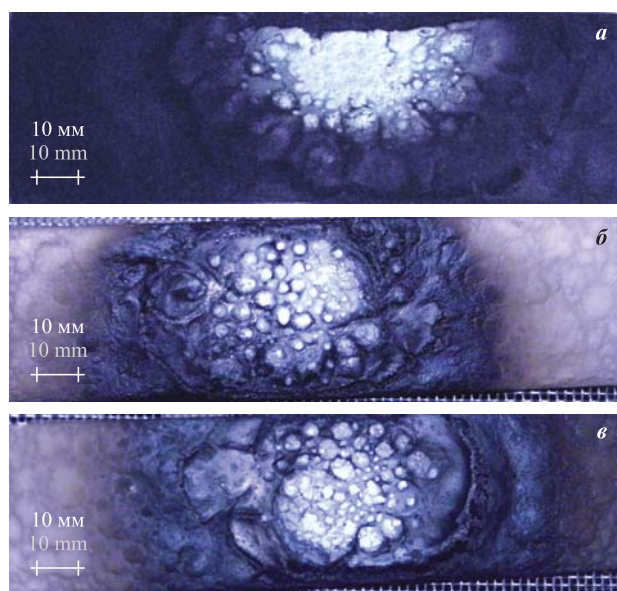


Рис. 7. Образцы с интумесцентным покрытием после огневых испытаний: *a* — немодифицированное покрытие; *b* — модифицированное покрытие (MWCNT); *v* — модифицированное покрытие (MWCNT), полученное при электрофизическом воздействии

Fig. 7. The samples with intumescent coating after fire tests: *a* — unmodified coating; *b* — modified coating (MWCNT); *v* — modified coating (MWCNT) obtained by electrophysical exposure

большей стойкости пенококса в условиях высокотемпературного воздействия. Следует также отметить, что для модифицированных ОБК отслаивание пенококса наблюдается в значительно меньшей степени в сравнении с контрольными образцами, что, очевидно, обуславливается более медленной потерей адгезионной прочности покрытия при высокотемпературном воздействии.

Сведения о коэффициенте вспучивания исследуемых модифицированных ОБК приведены на рис. 8. Внедрение в базовый огнезащитный состав MWCNT в целом приводит к снижению коэффициента вспучивания, что, безусловно, негативно влияет на общую эффективность модифицированных ОБК. Вместе с тем для ряда образцов ОБК без MWCNT в грунте наблюдается рост коэффициента вспучивания для концентраций MWCNT в огнезащитном составе 0,5...0,75 % об.

Исследование адгезионной прочности наномодифицированных огнезащитных вспучивающихся покрытий

Исследование адгезии модифицированных вспучивающихся огнезащитных составов проводилось методом отрыва по ГОСТ 32299–2013. Метод отрыва позволяет определить количественные показатели адгезионной прочности и основан на определении усилия отрыва предварительно приклеенных к поверхности покрытия образцов стандартного раз-

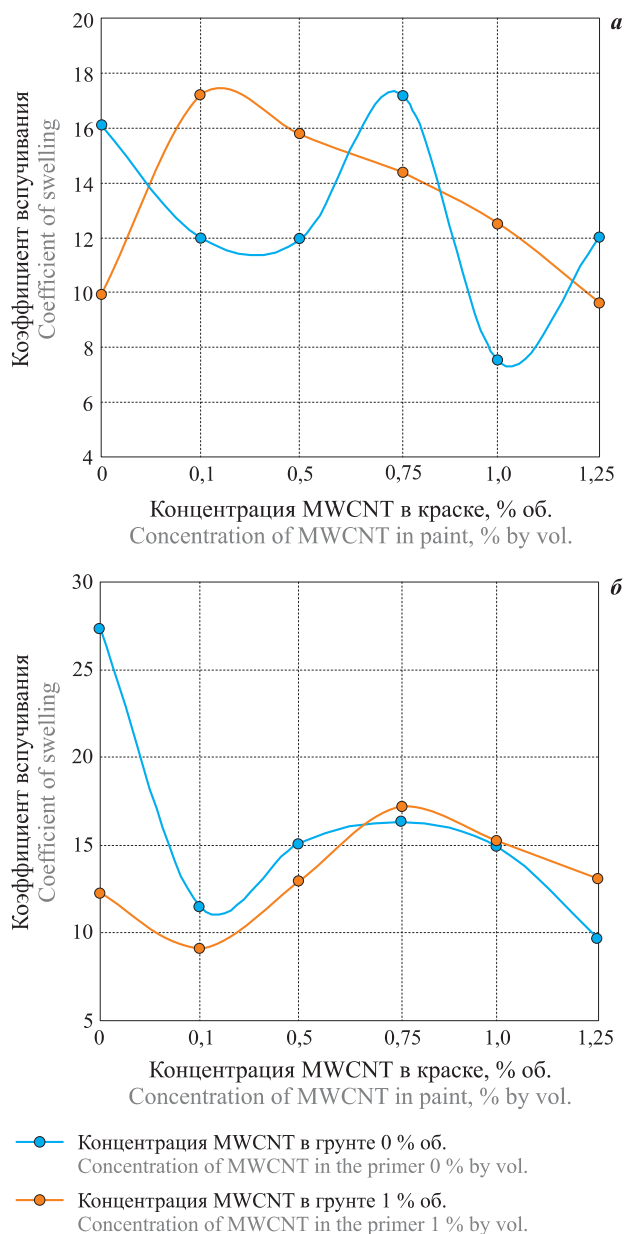


Рис. 8. Зависимость коэффициента вспучивания огнезащитных покрытий от концентрации MWCNT: *a* — без электрофизического воздействия; *б* — при воздействии ПЧМП

Fig. 8. The dependence of the coefficient of swelling fire protective coatings on the concentration of MWCNT: *a* — without electrical effects; *b* — by influence of VFMP

мера (“грибков”). После высыхания клея образцы отрывали от пластины с помощью специального приспособления, позволяющего определить усилие отрыва. Исходя из величины усилия отрыва и площади образца, определяли адгезионную прочность на отрыв. При обработке результатов учитывали как значение адгезионной прочности, так и характер разрушений, который может быть адгезионным (полный отрыв от металла или от слоя грунта), когезионным (разрыв по слою огнезащитного покрытия), отрыв по клеевому слою, и когезионно-адгезионным (смешанным) (табл. 3, рис. 9) [9].

Таблица 3. Результаты исследования характеристик исходных покрытий ОВК (адгезии методом нормального отрыва)

Table 3. The results of the study of the characteristics of the original coating intumescent fire retardant paint (adhesion by means of normal separation)

№ п/п No.	Концентрация MWCNT, % об. Concentration of MWCNT, % by vol.		Наличие ПЧМП Availability VFMP	Адгезия, кг/см ² Adhesion, kg/cm ²	Характер отрыва Breakaway character
	в грунте ГФ-021 in the primer GF-021	в огнезащитном составе in fire retardant composition			
1	0	0	—	48	Коге- зи- онный Cohesive
2	0	0,10	—	72	
3	0	0,50	—	54	
4	0	0,75	—	46	
5	0	1,00	—	44	
6	0	1,25	—	38	
7	1,00	0	—	34	Смешан- ный Mixed
8	1,00	0,10	—	36	
9	1,00	0,50	—	45	
10	1,00	0,75	—	48	
11	1,00	1,00	—	60	Коге- зи- онный Cohesive
12	1,00	1,25	—	39	
13	0	0	+	64	
14	0	0,10	+	52	
15	0	0,50	+	50	Смешан- ный Mixed
16	0	0,75	+	60	
17	0	1,00	+	62	
18	0	1,25	+	50	
19	1,00	0	+	42	Коге- зи- онный Cohesive
20	1,00	0,10	+	34	
21	1,00	0,50	+	46	
22	1,00	0,75	+	60	
23	1,00	1,00	+	54	Смешан- ный Mixed
24	1,00	1,25	+	46	

В результате испытаний установлено, что депонирование MWCNT в грунт ГФ-021, как правило, уменьшает адгезионную прочность ОВК на 10...20 % при концентрации MWCNT в огнезащитном составе от

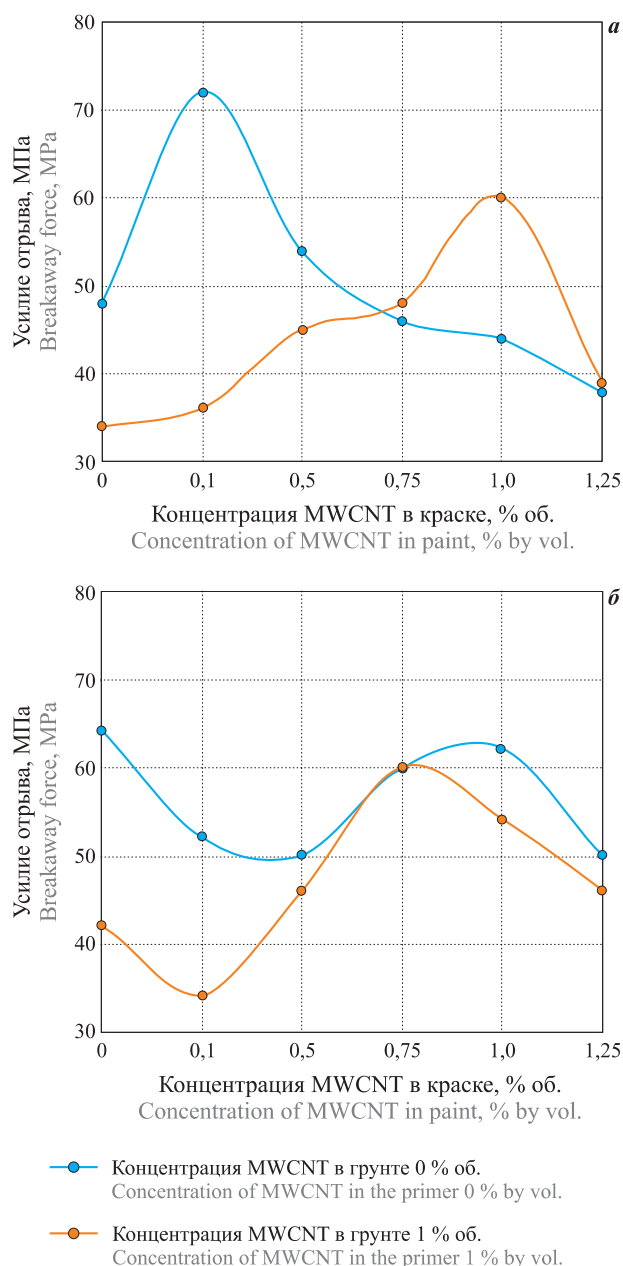


Рис. 9. Результаты исследования характеристик огнезащитных покрытий (адгезии методом отрыва), модифицированных MWCNT: а — без электрофизического воздействия; б — полученных при воздействии ПЧМП

Fig. 9. The results of research of characteristics of fire-retardant coatings (adhesion method of separation), modified MWCNT: а — without electrical effects; б — by influence of VFMP

0 до 0,5 % об. При дальнейшем увеличении концентрации MWCNT в огнезащитном составе до 1,25 % об. адгезионная прочность ОВК с MWCNT, депонированными в грунт ГФ-021, оказывается несколько выше в сравнении с ОВК с немодифицированным грунтом и исходным образцом.

Для образцов ОВК, полученных при воздействии ПЧМП, наблюдается существенное (до 40 %) увеличение адгезионной прочности для покрытий с немодифицированным грунтом ГФ-021.

Влияние условий модификации на эксплуатационные характеристики огнезащитных вспучивающихся покрытий

ОВК, подверженные термическому воздействию при пожаре, обладают сложным составом исходных, промежуточных компонентов и конечных продуктов деструкции, пространственным распределением температуры, концентраций различных веществ в конденсированной и газовой фазах. Условия углеводородного пожара выдвигают более высокие требования к огнезащитной эффективности ОВК. Использование в технологии получения лакокрасочного покрытия наноматериалов с MWCNT, в том числе при электрофизическом воздействии, позволяет улучшить эксплуатационные характеристики ОВК на технологических стадиях подготовки, формирования, эксплуатации и огнезащитного действия.

Реагентная модификация (депонирование наноматериала с MWCNT) дает возможность изменять адгезионные и когезионные характеристики лакокрасочного материала (ЛКМ) в процессе формирования слоя ОВК [12, 22]. При электрофизическом воздействии наблюдается изменение давления насыщенного пара и поверхностного натяжения компонентов растворителя и, как следствие, переориентация углеродных наночастиц в структуре полимеров, снижение агрегации наночастиц в окрашиваемом слое. Уменьшение размера капель ЛКМ обеспечивает более равномерное распределение состава на окрашиваемой поверхности. Это позволяет улучшить прочностные характеристики слоя ОВК и обеспечить их достаточную адгезию при реактивном воздействии пламени [22].

По мнению авторов настоящей статьи, коэффициент вспучивания интумесцентных покрытий не может быть рассмотрен как решающий фактор повышения огнезащитной эффективности при данных условиях. Повышение стабильности пенококса, предположительно, связано с увеличением индукционного периода разложения составляющих модифицированной ОВК, при этом начало деструкции элементов композиции смещается в область более высоких температур [9, 13, 15].

Увеличение температуры разложения полимеров в слое ОВК, модифицированных наноматериалом с MWCNT, повышение адгезионной прочности

вспененного карбонизата, а также снижение горючести позволяют улучшить эксплуатационные характеристики огнезащитного покрытия [9]. При воздействии ПЧМП возможно изменение теплопроводности в слое ОВК за счет переориентации MWCNT в структуре *полимер – наноматериал* [19].

Выводы

1. Модификация компонентов ОВК путем депонирования MWCNT в сочетании с электрофизическим воздействием влечет за собой улучшение их технологических и эксплуатационных характеристик, в том числе снижение скорости роста температуры защищенного металла в условиях углеводородного горения, разностороннее изменение коэффициента вспучивания и увеличение адгезионной прочности покрытия.

2. Огнезащитное действие модифицированных ОВК, помимо известных механизмов действия применяющихся в настоящее время вспучивающихся огнезащитных покрытий, основано на увеличении термической стойкости и адгезионной прочности покрытий, а также возможности безреагентного управления упорядоченностью наноструктур для достижения требуемых параметров теплопроводности.

3. Оптимизация рецептуры и технологии нанесения модифицированных ОВК позволяет успешно применять их для защиты металлоконструкций установок на объектах транспортировки нефтепродуктов, характеризующихся высоким риском возникновения углеводородного пожара.

4. Область применения модифицированных ОВК должна определяться при проведении соответствующих сертификационных испытаний как при стандартном температурном режиме (по ГОСТ 30247.0–94), так и при альтернативных температурных режимах (по ГОСТ Р ЕН 1363-2–2014). Вместе с тем полученные результаты позволяют говорить о возможности повышения эффективности огнезащитных покрытий за счет внедрения технологии электрофизической и реагентной модификации в процессы получения и формирования ОВК для решения задач обеспечения тепловой защиты объектов транспортировки нефтепродуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коннова Г. В. Оборудование транспорта и хранения нефти и газа : учеб. пособие для вузов. — Ростов-на-Дону : Феникс, 2006. — 128 с.
2. Абдрахманов Н. Х. Научно-методические основы обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных объектов нефтегазового комплекса на основе управления системными рисками : дис. ... д-ра техн. наук. — Уфа, 2014. — 292 с.

3. Еремина Т. Ю. Моделирование и оценка огнезащитной эффективности вспучивающихся огнезащитных составов // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2003. — Т. 12, № 5. — С. 22–29.
4. Иванов С. А., Уколов Д. С., Нурутдинов Г. Н., Таров В. П., Баронин Г. С. Исследование структурно-механических свойств твердофазных углеродсодержащих ПЭВП-нанокмпозитов и прогнозирование результатов с помощью нейросетевых технологий // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. — 2013. — Т. 18, № 5. — С. 2366–2368.
5. Крупкин В. Г., Мохин Г. Н., Халтуринский Н. А. Моделирование образования многослойной структуры огнезащитными вспучивающимися составами при воздействии пожара // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2013. — № 8(145). — С. 202–206.
6. Халтуринский Н. А., Крупкин В. Г. О механизме образования огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2011. — Т. 20, № 10. — С. 33–36.
7. Страхов В. Л., Гаращенко А. Н., Кузнецов Г. В., Рудзинский В. П. Тепломассообмен в тепло- и огнезащите с учетом процессов термического разложения, испарения-конденсации, уноса массы и вспучивания-усадки // Математическое моделирование. — 2000. — Т. 12, № 5. — С. 107–113.
8. Голованов В. И. Прогнозирование огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой : дис. ... д-ра техн. наук. — М., 2008. — 337 с.
9. Зыбина О. А. Теоретические принципы и технология огнезащитных вспучивающихся материалов : дис. ... д-ра техн. наук. — СПб., 2015. — 260 с.
10. Пищулин В. П., Сваровский А. Я., Кузьменко В. П. Термическая деструкция и огнестойкость огнезащитных покрытий для объектов энергетики и химической промышленности // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — Т. 315, № 2. — С. 151–154.
11. Цой А. А., Демехин Ф. В. Испытание огнезащитных материалов в условиях углеводородного температурного режима // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России : научно-аналитический журнал. — 2015. — № 4. — С. 20–24.
12. Николайчик А. В., Прокопчук Н. Р., Шпигель Т. А., Николайчик И. В. Новые грунтовочные лакокрасочные материалы, содержащие углеродные нанотрубки // Труды БГТУ. Серия 4: Химия, технология органических веществ и биотехнология. — 2010. — Т. 1, № 4. — С. 139–142.
13. Shen J., Huang W., Wu L., Hu Y., Ye M. The reinforcement role of different amino-functionalized multi-walled carbon nanotubes in epoxy nanocomposites // Composites Science and Technology. — 2007. — Vol. 67, No. 15-16. — P. 3041–3050. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.04.025.
14. Ganguli S., Aglan H., Dennig P., Irvin G. Effect of loading and surface modification of MWCNTs on the fracture behavior of epoxy nanocomposites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. — 2006. — Vol. 25, No. 2. — P. 175–188. DOI: 10.1177/0731684405056425.
15. Jin Z., Pramoda K. P., Xu G., Goh S. H. Dynamic mechanical behavior of melt-processed multi-walled carbon nanotube/poly(methyl methacrylate) composites // Chemical Physics Letters. — 2001. — Vol. 337, No. 1-3. — P. 43–47. DOI: 10.1016/S0009-2614(01)00186-5.
16. Кондрашов С. В., Дьячкова Т. П., Богатов В. А., Мансурова И. А., Мараховский П. С., Мокрецова И. А., Фокин А. С. Использование углеродных нанотрубок для увеличения теплостойкости эпоксидных связующих // Перспективные материалы. — 2013. — № 2. — С. 17–23.
17. Яковлев Г. И., Михалкина Т. М., Багимов А. М., Евсягина А. В. Модификация огнезащитного силикатного покрытия углеродными нанотрубками // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2012. — № 8(163). — С. 44–45.
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. 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.
20. 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., Клячков 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: 10.08.2017).

21. Андрюшкин А. Ю., Цой А. А. О методике определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России : научно-аналитический журнал. — 2016. — № 2. — С. 45–53.
22. Яковлев А. Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий : учебное пособие для вузов. — 4-е изд., испр. — СПб. : Химиздат, 2010. — 448 с.
23. Цой А. А. Методика определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения : дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2017. — 134 с.

Материал поступил в редакцию 24 мая 2017 г.

Для цитирования: Иванов А. В., Боева А. А., Ивахнюк Г. К., Терехин С. Н., Пророк В. Я. Исследование эксплуатационных характеристик наномодифицированных огнезащитных вспучивающихся композиций в условиях углеводородного пожара на объектах транспортировки нефтепродуктов // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. — 2017. — Т. 26, № 10. — С. 5–19. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.5-19.

English

RESEARCH OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF NANOMODIFIED FIRE-RESISTANT INTUMESCENT COMPOSITIONS IN THE CONDITIONS OF HYDROCARBON FIRE AT OIL TRANSPORTATION FACILITIES

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

BOEVA A. A., Adjunct of Faculty of Training Personnel of Higher Qualification, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: silina.2015@mail.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)

TEREKHIN S. N., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Fire Safety of Buildings and Automated Fire Suppression Systems, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: expert_terehin@inbox.ru)

PROROK V. Ya., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Fire Safety of Buildings and Automated Fire Suppression Systems, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: aist_ugps@mail.ru)

ABSTRACT

One way to provide the required fire resistance of steel structures for oil and gas facilities is the use of intumescent compositions. With the flare burning of vapors of petroleum products, the deformation and collapse of structures subjected to high temperature (up to 1200 °C) and erosion.

As objects of study the carbon nanomaterials containing MWCNT with parameters $d = 30$ nm, $l = 2...5$ μ m were selected. The basis for the modified material was intumescent paint for steel structures "Thermal barrier", produced by TU 2313-001-30642285-2011. Modification of a flame retardant was conducted using the Deposit of MWCNT in solvent (o-xylene), with further stirring the filler at a concentration of 0.10...1.25 % by vol. Individual components of the intumescent compositions were subjected to electrophysical influence with the parameters of variable frequency-modulated potential (VFMP) 56 V, 50 Hz. Study of fire resistance performance of nano-modified intumescent compositions was conducted in a laboratory setting, simulating the conditions of hydrocarbon combustion. For almost all samples of modified intumescent compositions containing MWCNT, there is a slower (10...55 %) increase in the temperature of the object of protection within

the time of observation, in comparison with non-modified coating intumescent compositions. For samples with intumescent compositions with the primer GF-021 without MWCNT, the rate of temperature increase of metal in general, inversely proportional to the concentration of MWCNT in flame-retardant composition as no electrical influence, and when exposed to VFMP. For samples with intumescent compositions with the primer GF-021 with MWCNT at a concentration of 1.0 % by vol., the growth rate of metal temperature has a clear dependence on the concentration of MWCNT in flame-retardant composition.

Depositing in the basic fire retardant composition of MWCNT as a whole leads to a decrease in the coefficient of swelling, which certainly negatively affects the overall effectiveness of modified intumescent compositions. However, for a number of samples of the intumescent compositions without MWCNT in primer the rise of the coefficient of swelling for the concentrations of MWCNT in flame-retardant composition 0.50 to 0.75 % by vol.

It is also established that the deposition of MWCNT in the primer GF-021 as a rule, reduces the adhesion strength of the intumescent compositions for 10...20 % at the concentration of MWCNT in flame-retardant composition from 0 to 0.5 %. With a further increase in the concentration of MWCNT in flame-retardant composition to 1.25 % adhesive strength of the intumescent compositions with MWCNT deposited in the primer GF-021, slightly higher in comparison with the intumescent compositions with non-modified primer and the original sample. For samples intumescent compositions obtained with VFMP, there is a significant (40 %) increase in adhesion strength for coatings with unmodified primer GF-021.

Upon further study of modified intumescent flame retardant compositions, we plan to conduct a comprehensive thermal analysis of samples to determine the nature of a fire retardant effect of sample coverings from the nature of their modification.

Thus, optimization of the formulation and application technology of modified fire-resistant intumescent compositions allows applying them successfully to protect the metal installations on the transportation of petroleum products, characterized by a high risk of hydrocarbon fire.

Keywords: fire-retardant intumescent coating; reagent modification; electrophysical modification; hydrocarbon fire; variable frequency-modulated potential; transportation of petroleum products.

REFERENCES

1. Konnova G. V. *Oborudovaniye transporta i khraneniya nefi i gaza* [Equipment of transport and storage of oil and gas]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2006. 128 p. (in Russian).
2. Abdrakhmanov N. Kh. *Scientific and methodical bases of ensuring safe operation of hazardous production facilities of an oil and gas complex based on management of system risks*. Dr. tech. sci. diss. Ufa, 2014. 292 p. (in Russian).
3. Eremina T. Yu. Modelling and estimation of fire protection efficiency of bloating fireproof compounds. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, vol. 12, no. 5, pp. 22–29 (in Russian).
4. Ivanov S. A., Ukolov D. S., Nurutdinov G. N., Tarov V. P., Baronin G. S. Study of structural-mechanical properties of solid-phase carbonaceous HDPE-nanocomposites and results prediction using neural networks. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki / Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2013, vol. 18, no. 5, pp. 2366–2368 (in Russian).
5. Krupkin V. G., Mokhin G. N., Khalturinsky N. A. Modeling of the formation of multilayered structure by fire-retardant intumescent coatings under the influence of a fire. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki / Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2013, no. 8(145), pp. 202–206 (in Russian).
6. Khalturinskiy N. A., Krupkin V. G. On mechanism of fire retardant intumescent coating formation. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 10, pp. 33–36 (in Russian).
7. Strakhov V. L., Garashenko A. N., Kuznetsov G. V., Rudzinskii V. P. Heat and mass transfer in thermo- and fire protection, taking into account the processes of thermal decomposition, evaporation-condensation, mass transfer and swelling shrinkage. *Matematicheskoe modelirovanie / Mathematical Models and Computer Simulations*, 2000, vol. 12, no. 5, pp. 107–113 (in Russian).
8. Golovanov V. I. *The prediction of the fire resistance of steel structures fire protection*. Dr. tech. sci. diss. Moscow, 2008. 337 p. (in Russian).
9. Zyбина O. A. *Theoretical principles and technology of intumescent materials*. Dr. tech. sci. diss. Saint Petersburg, 2015. 260 p. (in Russian).

10. Pishchulin V. P., Svarovskiy A. Ya., Kuzmenko V. P. Thermal degradation and fire resistance fire protective coatings for power facilities and chemical industries. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta / Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 2, pp. 151–154 (in Russian).
11. Tsoy A. A., Demehin F. V. Testing of fire resistant materials in the conditions of the hydrocarbon temperature mode. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2015, no. 4, pp. 20–24 (in Russian).
12. Nikolaychik A. V., Prokopchuk N. R., Shpigel T. A., Nikolaychik I. V. New priming coating materials containing carbon nanotubes. *Trudy BGTU. Seriya 4: Khimiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya / Proceedings of BSTU. Series 4: Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology*, 2010, vol. 1, no. 4, pp. 139–142 (in Russian).
13. Shen J., Huang W., Wu L., Hu Y., Ye M. The reinforcement role of different amino-functionalized multi-walled carbon nanotubes in epoxy nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 2007, vol. 67, no. 15–16, pp. 3041–3050. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.04.025.
14. Ganguli S., Aglan H., Dennig P., Irvin G. Effect of loading and surface modification of MWCNTs on the fracture behavior of epoxy nanocomposites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2006, vol. 25, no. 2, pp. 175–188. DOI: 10.1177/0731684405056425.
15. Jin Z., Pramoda K. P., Xu G., Goh S. H. Dynamic mechanical behavior of melt-processed multi-walled carbon nanotube/poly(methyl methacrylate) composites. *Chemical Physics Letters*, 2001, vol. 337, no. 1–3, pp. 43–47. DOI: 10.1016/S0009-2614(01)00186-5.
16. Kondrashev S. V., Dyachkova N. P., Bogatov V. A., Mansurova I. A., Marakhovskii P. S., Mokretsova I. A., Fokin A. S. Use of carbon nanotubes for epoxy binders heat resistance increase. *Perspektivnyye materialy / Journal of Advanced Materials*, 2013, no. 2, pp. 17–23 (in Russian).
17. Yakovlev G. I., Mikhalkina T. M., Bagimov A. M., Evsyagina A. V. Modification of silicate coating fire protection by carbon nanotubes. *Stroitelnyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka / Construction Materials, Equipment, Technologies of XXI Century*, 2012, no. 8(163), pp. 44–45 (in Russian).
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. Ivanov A. V., Ivakhnyuk G. K., Medvedeva L. V. Methods of control properties of hydrocarbon liquids in the problems of fire safety. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 9, pp. 30–37 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.09.30-37.
20. Ivakhnyuk G. K., Matjukhin V. N., Klachkov V. A., Shevchenko A. O., Knjazev A. S., Ivakhnyuk 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).
21. Andryushkin A. Yu., Tsoy A. A. The methods of definition of fire rating of flame-retardant coating for steel structures in hydrocarbon jet fire. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Herald of St. Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*, 2016, no. 2, pp. 45–53 (in Russian).
22. Yakovlev A. D. *Khimiya i tekhnologiya lakokrasochnykh pokrytiy* [Chemistry and technology of paint coatings]. Saint Petersburg, Khimizdat, 2010. 448 p. (in Russian).
23. Tsoy A. A. *Method for determining the effectiveness of flame retardant coatings for steel structures under flare hydrocarbon combustion conditions*. Cand. tech. sci. diss. Saint Petersburg, 2017. 134 p. (in Russian).

For citation: Ivanov A. V., Boeva A. A., Ivakhnyuk G. K., Terekhin S. N., Prorok V. Ya. Research of operational characteristics of nanomodified fire-resistant intumescent compositions in the conditions of hydrocarbon fire at oil transportation facilities. *Pozharovzryvbezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 10, pp. 5–19 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.5-19.