

Модификация тонкослойных огнезащитных покрытий многослойными углеродными нанотрубками: физико-технологические принципы и методика применения для объектов трубопроводного транспорта

© А. В. Иванов^{1✉}, А. А. Боева¹, Ф. А. Дементьев¹, А. А. Рябов²

¹ Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149)

² НПК "ОгнеХимЗащита" (Россия, 195279, г. Санкт-Петербург, ш. Революции, 69 А)

РЕЗЮМЕ

Введение. Целью исследования было физическое обоснование принципов модификации тонкослойных вспучивающихся покрытий за счет управления их электрофизическими характеристиками и разработка методики повышения огнезащитной эффективности современных огнезащитных составов при варьировании параметров объемной фракции функционализированных многослойных углеродных нанотрубок (MWCNT).

Материалы. В качестве материалов использовались огнезащитная вспучивающаяся краска "Термобарьер" производства НПК "ОгнеХимЗащита", модифицированная MWCNT.

Экспериментальная часть включала исследование методом синхронного термического анализа, измерение диэлектрической проницаемости, определение адгезии методом отрыва, исследование электризации при нанесении огнезащитного состава на металл.

Результаты и обсуждение. Модификация огнезащитных составов за счет внедрения MWCNT в концентрациях 0,1...1,25 % об. позволяет улучшить эксплуатационные характеристики наноматериалов за счет увеличения термической стабильности огнезащитных составов при концентрации наночастиц до 0,5 % об. При этом потеря массы модифицированного MWCNT образца происходит в среднем на 20–30 % медленнее в сравнении с немодифицированным образцом. Наблюдается повышение прочности огнезащитных вспучивающихся композиций (ОВК) до 40 %. При электрофизическом воздействии происходит упорядочивание MWCNT в материале, а также снижение напряженности электрического поля, возникающего при нанесении модифицированного состава, в среднем на 40–50 %.

Заключение. Модификация огнезащитного состава MWCNT ведет к увеличению адгезионной прочности и термической стойкости ОВК при условии обеспечения стабильности наноструктур в материале. Предложенная технология применения модифицированных вспучивающихся огнезащитных составов на объектах трубопроводного транспорта должна включать элементы подготовки модифицирующей добавки и ее стабилизации для улучшения качественных характеристик огнезащитных составов с MWCNT.

Ключевые слова: огнезащитные вспучивающиеся покрытия; углеродные наноструктуры; углеводороды; синхронный термический анализ; диэлектрическая проницаемость.

Для цитирования: Иванов А. В., Боева А. А., Дементьев Ф. А., Рябов А. А. Модификация тонкослойных огнезащитных покрытий многослойными углеродными нанотрубками: физико-технологические принципы и методика применения для объектов трубопроводного транспорта // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 5. — С. 39–50. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.39-50.

✉ Иванов Алексей Владимирович, e-mail: spark002@mail.ru

Modification of intumescent coatings using multilayer carbon nanotubes: physico-technological principles and method of application on the pipeline transport facilities

© Alexei V. Ivanov^{1✉}, Alina A. Boeva¹, Fedor A. Dementyev¹, Alexander A. Ryabov²

¹ Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation)

² NPK "OgneHimZashchita" (Revol'yutsii Highway, 69 A, Saint Petersburg, 195279, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The aim of the study was to physically substantiate the principles of modification of thin-layer intumescent coatings by controlling their electrophysical characteristics and to develop a technique to improve the fire retardant efficiency of modern fire retardants with varying parameters of the volume fraction of functionalized multilayer carbon nanotubes (MWCNT).

Materials. The materials used in fire retardant intumescent paint “Thermal barrier”, the production of NPK “Ogne-HimZashchita” modified by MWCNT.

Experimental part. The experimental part included a study by the method of synchronous thermal analysis, the measurement of the dielectric constant, determination of adhesion and the study of electrification when applied, a fire retardant metal.

Results and discussion. Modification of fire retardants due to the introduction of MWCNT in concentrations of 0.1...1.25 % by vol. allows to improve the performance of nanomaterials by increasing the thermal stability of fire retardants at a concentration of nanoparticles up to 0.5 % by vol. In this case, the mass loss of the modified MWCNT sample occurs on average 20–30 % slower in comparison with the unmodified sample. There is an increase in the strength of intumescent fire retardant composition (IFRC) to 40 %. When electrophysical action occurs ordering MWCNT in the material, and also reduces the electric field generated by applying the modified composition on average by 40–50 %.

Conclusion. Modification of MWCNT fire retardants leads to an increase in adhesive strength and increase in thermal resistance of IFRC, provided the stability of nanostructures in the material. The proposed technology of application of modified intumescent fire retardants at pipeline transport facilities should include elements of preparation of the modifying additive and its stabilization to improve the quality characteristics of the fire retardants with MWCNT.

Keywords: fire retardant intumescent coating; carbon nanostructures; hydrocarbons; synchronous thermal analysis; dielectric constant.

For citation: A. V. Ivanov, A. A. Boeva, F. A. Dementyev, A. A. Ryabov. Modification of intumescent coatings using multilayer carbon nanotubes: physico-technological principles and method of application on the pipeline transport facilities. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 5, pp. 39–50 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.39-50.

✉ Alexei Vladimirovich Ivanov, e-mail: spark002@mail.ru

Введение

Трубопроводный транспорт является важным звеном в нефтяной и газовой промышленности. В состав трубопроводного транспорта, помимо компрессорных установок, трубопроводов, запорно-регулирующих устройств, входят металлоконструкции, выполняющие несущие функции для его отдельных элементов. При авариях на трубопроводном транспорте наблюдаются взрывы, пожары, сопровождающиеся выбросами нефтепродуктов, а также факельное горение углеводородов. Потеря несущей функции металлоконструкций в условиях углеводородного пожара приводит к деформации и нарушению герметичности аппаратов, трубопроводов и другого технологического оборудования, что может повлечь за собой каскадный характер развития аварии (ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014, [1]).

Для обеспечения требуемых пределов огнестойкости наружные коммуникации объектов транспортировки природного газа, нефти и нефтепродуктов, несущие металлические элементы (опоры и другие металлические конструкции) трубопроводного транспорта обрабатываются тонкослойными огнезащитными покрытиями. В нормативно-правовых документах (ГОСТ Р 57385-2017, [2]) обозначены требования к эксплуатационным характеристикам огнезащитных покрытий трубопроводного транспорта — адгезионной и механической прочности, водонепроницаемости, химической стойкости, электрохимической нейтральности, термостойкости и др. Одной из проблем обеспечения огнезащитного действия покрытий является их недостаточная термическая стойкость при факельном горении углеводородов, характерном для объектов нефтегазового комплекса [3].

Перспективным направлением улучшения эксплуатационных характеристик огнезащитных вспучивающихся композиций (ОВК) является использование в качестве модификаторов углеродных наноструктур (УНС). В отличие от неструктурированных углеродных материалов (терморасширяющийся графит, углеродистые сажи и др.) УНС и материалы на их основе обладают аномальными механическими [4], электрофизическими [5], теплофизическими [6] и сорбционными [7] свойствами. Модификация компонентов огнезащитных вспучивающихся составов многослойными углеродными нанотрубками (MWCNT) приводит к улучшению эксплуатационных характеристик сырья (табл. 1) и продукции на его основе [8–10].

До недавнего времени УНС являлись весьма дорогостоящими модификаторами, однако увеличение объемов их производства [11] позволяет уже сейчас применять их в достаточно больших объемах в строительной отрасли [12].

Применительно к огнезащите металлоконструкций трубопроводного транспорта существуют технологические ограничения по использованию УНС в качестве модификаторов ОВК. Существенной проблемой наномодификации является значительная агрегация УНС при получении, транспортировке и нанесении огнезащитных составов, что может привести к снижению их эксплуатационных характеристик, вплоть до отрицательных эффектов. В данных условиях технология стабилизации наноструктур посредством изменения электрофизических свойств [13, 14] представляется наиболее возможным вариантом решения проблемы, так как не требует изменения

Таблица 1. Влияние УНС на физико-химические свойства и эксплуатационные характеристики компонентов ОБК

Table 1. Effect of MWCNT on the physical and chemical properties and performance characteristics of the components of intumescent fire retardant composition (IFRC)

| Компоненты ОБК IFRC component | Содержание компонента в ОБК, % масс. Component content in IFRC, % by mass | Назначение компонента Component assignment | Концентрация MWCNT, % масс. Concentration of MWCNT, % by mass | Влияние углеродных наноструктур Effect of carbon nanostructures | Источник Source |
|---|--|--|--|---|--------------------|
| Акриловая смола Acrylic resin | 8...14 | Пленкообразователь Film former | 0,1...1,0 | Увеличение трещиностойкости, повышение прочности полимерной матрицы, повышение электропроводности, термической стойкости, адгезионной прочности Increased crack resistance, increased strength of the polymer matrix, electrical conductivity, thermal resistance, adhesive strength | [15–17] |
| Кремний-органическая смола Silica resin | 1,0...1,5 | То же Same | 0,5...5,0 | Снижение электрической сопротивляемости, повышение адгезионной прочности Reducing the electrical resistance, increasing the adhesive strength | [18, 19] |
| Стиролбутадиеновый каучук Styrene-butadiene rubber | 1...2 | » | 0,1...1,0 | Повышение механической прочности полимера Increasing the mechanical strength of the polymer | [16] |
| Диоксид титана Titanium dioxide | 2...4,5 | Способствует формированию ячеистой (вспененной) однородной пенококсовой структуры, укрепляет коксовый слой Contribute to the formation of a cellular (foamed) homogeneous foam coke structure, strengthens the foam layer | 16...38 | Улучшение поглощения световой энергии; каталитическое воздействие на диоксид титана Improved absorption of light energy; catalytic effect on titanium dioxide | [20] |
| Полифосфат аммония Ammonium polyphosphate | 25...30 | Образование пенококсового слоя, замедление распространения пламени, газообразующий элемент при пенообразовании The formation of the foam layer, slowing the spread of the flame, the gas-forming element during foaming | 0,025...1,0 | Повышение термической стабильности Increase thermal stability | [16, 21] |
| Меламин Melamine | ~10 | То же Same | 16...38 | Ускорение процесса окисления в полимерной матрице Acceleration of the oxidation process in the polymer matrix | [22, 23] |
| Пента-эритрит Pentaerythritol | ~10 | Пенообразователь, повышение огнезащитной стойкости покрытия A foaming agent, the fire retardant coating increases resistance | 0,1 | Повышение пластичности полимера Increased plasticity of the polymer | [22] |

| Компоненты ОВК IFRC component | Содержание компонента в ОВК, % масс. Component content in IFRC, % by mass | Назначение компонента Component assignment | Концентрация MWCNT, % масс. Concentration of MWCNT, % by mass | Влияние углеродных наноструктур Effect of carbon nanostructures | Источник Source |
|--|--|---|--|---|--------------------|
| Гидроксид алюминия Aluminum hydroxide | ~2 | Образование негорючих газо- образных продуктов (например, CO ₂ , паров воды) и отведение тепла The formation of non-flammable gaseous products (for example CO ₂ , water vapor) and dissipate heat | 0,5...5,0 | Способствует формирова- нию обугленного слоя, по- вышению теплопроводности полимера, замедлению выделения воды Contributes to the formation of a charred layer, increase the thermal conductivity of the polymer, slow down the release of water | [19, 24] |

химического состава и условий производства компонентов ОВК.

Целью исследования было физическое обоснование принципов модификации тонкослойных вспучивающихся покрытий за счет управления их электрофизическими характеристиками и разработка методики повышения огнезащитной эффективности современных огнезащитных составов при варьировании параметров объемной фракции MWCNT.

Материалы и методы исследования

В качестве материалов исследования использовались образцы модифицированных ОВК. Основой являлась огнезащитная вспучивающаяся краска для стальных конструкций “Термобарьер” (ТУ 2313-001-30642285–2011) с диспергированными многослойными углеродными нанотрубками (MWCNT), синтезированными в Санкт-Петербургском университете Государственной противопожарной службы МЧС России в концентрации 0,10...1,25 % об. в растворителе (о-ксилол по ГОСТ 9410–78) по методике, изложенной в [8], и стабилизированными в условиях электрофизического воздействия [25].

В исследовании использовались методы:

- синхронного термического анализа (СТА) для оценки вклада MWCNT в процесс термического разложения компонентов на приборе NETZSCH STA449F3 STA449F3A-0430-M с параметрами: среда — воздушная, диапазон температур — 30–1000 °C, скорость подъема температуры/режим — 10 K/мин [26];
- измерения диэлектрической проницаемости модифицированных ОВК методом плоского конденсатора на частоте 100 Гц [27] для оценки упорядоченности наноструктур в матрице полимера;

- определения адгезионной прочности ОВК методом отрыва по ГОСТ 32299–2013;
- исследования электризации модифицированного состава при нанесении на металл по методике, изложенной в [28].

Экспериментальная часть

Исследование методом синхронного термического анализа

При исследовании контрольного (немодифицированного) и модифицированного MWCNT в концентрации 0,5 % об. образцов ОВК выявлены незначительные потери массы у модифицированного образца в сравнении с контрольным в интервале температур 400–800 °C, с дальнейшим плавным снижением потери массы при повышении темпе-

ДСК, мВт/мг
DSC, mW/mg

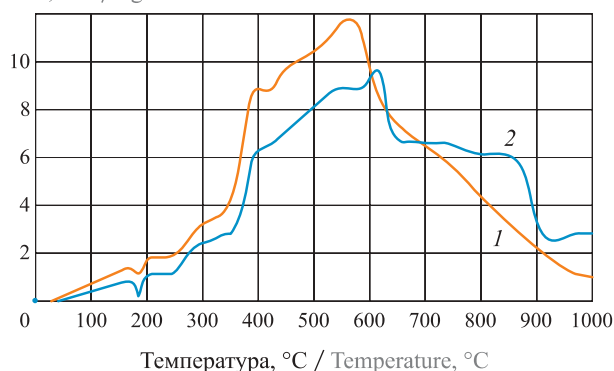


Рис. 1. Результаты исследования образцов ОВК методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК): 1 — немодифицированный образец; 2 — образец, модифицированный MWCNT в концентрации 0,5 % об.

Fig. 1. The results of the study of samples of intumescent fire retardant compositions (IFRC) by the method of differential scanning calorimetry (DSC): 1 — unmodified sample; 2 — sample modified by MWCNT with a concentration 0.5 % by vol.

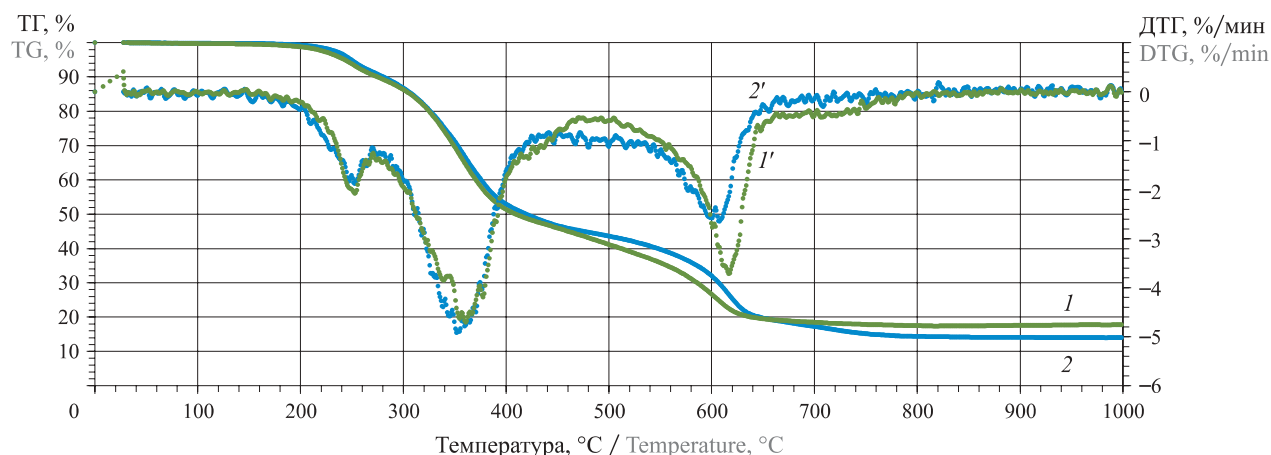


Рис. 2. Результаты исследования образцов ОВК методами термогравиметрического (ТГ) анализа (1, 2) и дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) (1', 2'): 1, 1' — немодифицированный образец; 2, 2' — образец, модифицированный MWCNT в концентрации 0,5 % об.

Fig. 2. The results of the study of samples of IFRC by methods thermogravimetric (TG) analysis (1, 2) and differential thermogravimetry (DTG) (1', 2'): 1, 1' — unmodified sample; 2, 2' — sample modified by MWCNT with a concentration 0.5 % by vol.

ратуры до 900 °C. Для модифицированного образца ОВК происходит сдвиг максимального теплового эффекта в сторону увеличения (до 610 °C) с незначительным уменьшением его в интервале температур 630–850 °C. При дальнейшем повышении температур наблюдается скачкообразное снижение теплового эффекта при температуре выше 850 °C (рис. 1).

Процесс снижения массы для немодифицированного и модифицированного образцов ОВК начинается при температурах соответственно 220–271 и 228–271 °C. Наибольшее расхождение в потере массы образцов наблюдается в интервале температур 443–672 °C — на 1,19 %, при этом потеря массы модифицированного MWCNT образца происходит в среднем на 20–30 % медленнее в сравнении с контрольным образцом. Остаточная масса для немодифицированного образца ОВК составляет 17,76 %, для модифицированного — 14,02 % (рис. 2).

Исследование влияния условий модификаций на диэлектрическую проницаемость модифицированных ОВК

Относительное изменение диэлектрической проницаемости (ДП) при исследовании наномодифицированных материалов определялось по формуле

$$k_m = \varepsilon_{\text{мод}} / \varepsilon_{\text{нач}}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\text{нач}}$, $\varepsilon_{\text{мод}}$ — полученные в ходе экспериментов значения диэлектрической проницаемости соответственно для немодифицированных и модифицированных образцов ОВК.

Наибольшее изменение диэлектрической проницаемости происходит при концентрации MWCNT 0,75 % об., а наименьшее — при концентрации 0,5 % об. (рис. 3). В условиях электрофизического воздействия наблюдаются более интенсивные изме-

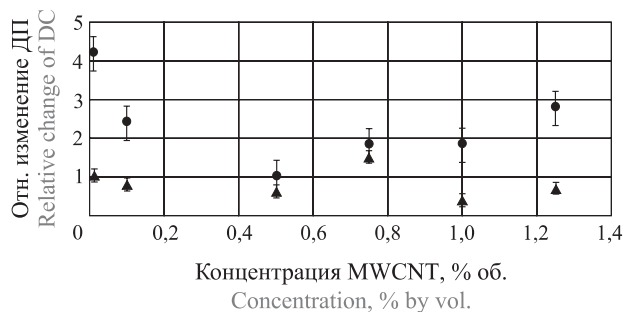


Рис. 3. Зависимость относительного изменения диэлектрической проницаемости ОВК от концентрации MWCNT (0,10–1,25 % об.) в условиях электрофизического воздействия (▲) и без него (●)

Fig. 3. The dependence of relative change in dielectric constant of IFRC on the concentration of MWCNT (0.10–1.25 % by vol.) in terms of electrophysical effects (▲) and without it (●)

нения значений диэлектрической проницаемости при концентрации 1,25 % об.

Исследование влияния MWCNT на теплофизические и адгезионные свойства

Обобщенные данные по адгезионной прочности, а также по времени начала деструкции и максимальной температуре модифицированных образцов [8] приведены в табл. 2.

Для образцов ОВК с немодифицированным грунтом ГФ-021 при увеличении адгезионной прочности с 38 до 72 МПа наблюдается увеличение значений максимальной температуры защищаемого металла до 540 °C, за исключением образца с концентрацией MWCNT 0,5 % об. Для образцов ОВК с модифицированным грунтом при росте адгезионной прочности с 34 до 60 МПа также происходит увеличение температуры образцов ОВК до 522 °C, за исключе-

Таблица 2. Обобщенные результаты испытаний образцов ОБК
Table 2. Generalized test data obtained samples IFRC

| Концентрация MWCNT, % об. Concentration of MWCNT, % by vol. | | Электрический потенциал при обработке грунта (56 В, 50 Гц) Electrical potential during processing in the ground (56 V, 50 Hz) | Адгезионная прочность покрытия (средняя), МПа Adhesive strength coating (average), MPa | Время начала разрушки состава <i>t</i> , мин Start time of destruction <i>t</i> , min | Максимальная температура металлической подложки, °С Maximum temperature of the metal plate, °C |
|--|--|--|---|--|---|
| в грунте ГФ-021 in the ground GF-021 | в огнезащитном составе / in fire retardant composition | | | | |
| 0 | 0 | – | 48 | 10 | 540 |
| 0 | 0,1 | – | 72 | 10 | 492 |
| 0 | 0,5 | – | 54 | 13 | 238 |
| 0 | 0,75 | – | 46 | 11,5 | 523 |
| 0 | 1 | – | 44 | 11 | 472 |
| 0 | 1,25 | – | 38 | 11 | 438 |
| 1 | 0 | – | 34 | 10 | 450 |
| 1 | 0,1 | – | 36 | 9 | 403 |
| 1 | 0,5 | – | 45 | 11,5 | 430 |
| 1 | 0,75 | – | 48 | 7 | 514 |
| 1 | 1 | – | 60 | 11 | 478 |
| 1 | 1,25 | – | 39 | 7 | 522 |
| 0 | 0 | + | 64 | 14 | 500 |
| 0 | 0,1 | + | 51 | 6 | 467 |
| 0 | 0,5 | + | 50 | 5 | 508 |
| 0 | 0,75 | + | 60 | 5 | 457 |
| 0 | 1 | + | 62 | 7 | 276 |
| 0 | 1,25 | + | 49 | 6,5 | 364 |
| 1 | 0 | + | 42 | 17 | 529 |
| 1 | 0,1 | + | 34 | 4 | 319 |
| 1 | 0,5 | + | 47 | 6 | 480 |
| 1 | 0,75 | + | 60 | 11,6 | 470 |
| 1 | 1 | + | 54 | 12 | 473 |
| 1 | 1,25 | + | 46 | 12 | 320 |

нием образца с концентрацией MWCNT 0,5 % об. (рис. 4).

При электрофизическом воздействии для немодифицированного грунта ГФ-021 при росте адгезионной прочности с 49 до 64 МПа наблюдается снижение максимальной температуры образца, в то время как для модифицированного грунта наблюдается повышение адгезионной прочности с 34 до 60 МПа при максимальной температуре образца ОБК до 529 °C. Исключение составляет образец с концентрацией MWCNT в грунте 1,25 % об. (рис. 5).

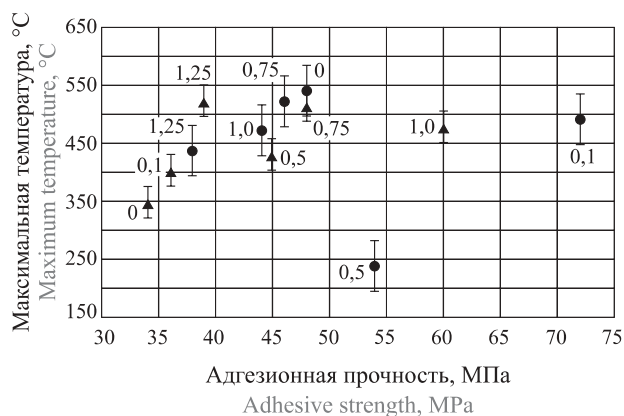


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры защищаемого металла от адгезионной прочности ОБК с MWCNT (концентрации на графике в % об.) без электрофизического воздействия для образцов с немодифицированным грунтом (●) и с грунтом, модифицированным MWCNT 1,0 % об. (▲)

Fig. 4. Dependence of the maximum temperature of the protected metal on the adhesive strength of IFRC, with MWCNT (concentrations are shown in the graph, % by vol.) without electrophysical effects for samples with unmodified ground (●) and with modified ground MWCNT 1.0 % by vol. (▲)

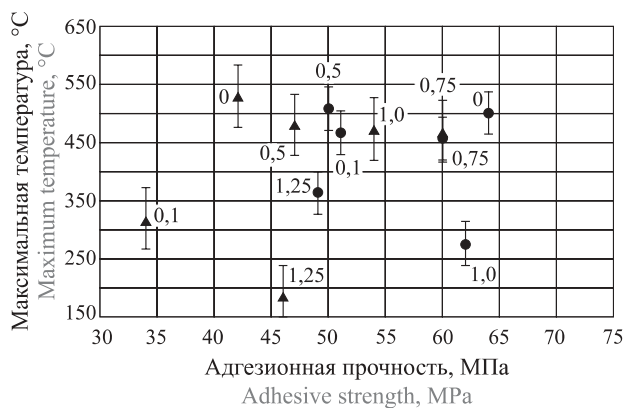


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры защищаемого металла от адгезионной прочности ОБК с MWCNT (концентрации на графике в % об.) при электрофизическом воздействии для образцов с немодифицированным грунтом (●) и с грунтом, модифицированным MWCNT 1,0 % об. (▲)

Fig. 5. Dependence of the maximum temperature of the protected metal on the adhesive strength of IFRC with MWCNT (concentrations are shown in the graph, % by vol.) at electrophysical effects for samples with unmodified ground (●) with modified ground MWCNT 1.0 % by vol. (▲)

Исследование электризации состава при нанесении огнезащитной композиции на металл

Полученные в ходе исследования результаты свидетельствуют об увеличении напряженности электрического поля на 30–50 % при нанесении на металл модифицированного грунта ГФ-021 с концентрацией MWCNT 1,0 % об. и модифицированных огнезащитных составов с MWCNT в концентрации 0,10...1,25 % об. в сравнении с немодифицированными материалами. В условиях электрофизического

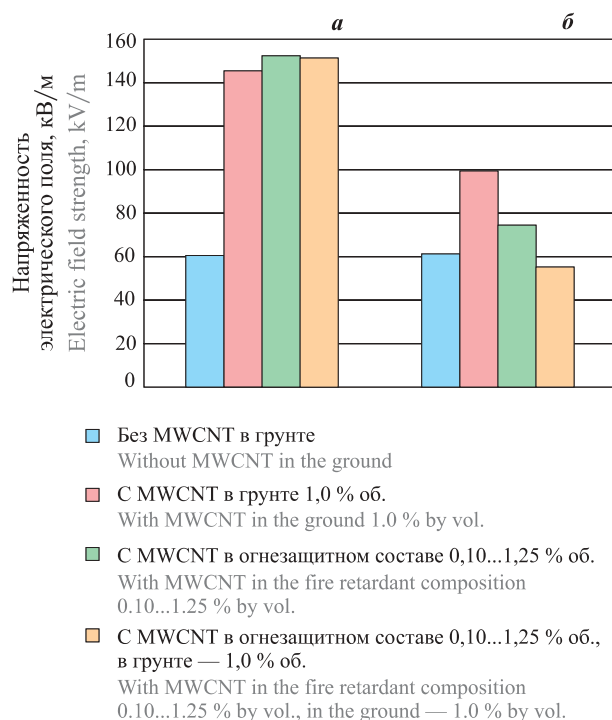


Рис. 6. Напряженность электрического поля при нанесении огнезащитного состава с MWCNT в концентрации 0,10...1,25 % об. при концентрации MWCNT в грунте 1,0 % об.: *a* — без электрофизического воздействия; *b* — при электрофизическом воздействии

Fig. 6. Electric field strength when applying fire retardant composition with MWCNT in concentrations of 0.10...1.25 % by vol., when the concentration of MWCNT in the ground of 1.0 % by vol.: *a* — without electrophysical effects; *b* — with electrophysical effects

го воздействия наблюдается снижение напряженности электрического поля на 40–50 % в сравнении с образцами, наносимыми без электрофизического воздействия (рис. 6).

Результаты и их обсуждение

Результаты СТА компонентов ОВК позволяют сделать вывод, что внедрение MWCNT в матрицу ОВК приводит к увеличению термической стабильности огнезащитного состава, что в целом согласуется с работами [14, 29–33]. Вместе с тем наличие заметного теплового эффекта для модифицированных ОВК в интервале температур 680–850 °C позволяет сделать предположение о сохранении большего количества горючих компонентов в сравнении с немодифицированными составами.

Результаты измерений диэлектрической проницаемости исследуемых образцов ОВК в условиях электрофизического воздействия свидетельствуют о более равномерном распределении УНС при концентрациях MWCNT свыше 0,5 % об. в сравнении с контрольным образцом за счет механизма взаимной ориентации MWCNT вдоль силовых линий внешнего электрического поля [34].

Сопоставляя данные по максимальной температуре и адгезионной прочности образцов ОВК, приведенные в работе [8], можно сделать вывод, что величина адгезионной прочности коррелирует со временем начала температурной деструкции ОВК. Более позднее начало термической деструкции компонентов ОВК приводит к более медленному росту температуры защищаемого металла.

В случае электрофизического воздействия при нанесении огнезащитного состава происходит снижение напряженности возникающего электрического поля, что связано с увеличением его электропроводности и меньшей агрегацией наночастиц при образовании слоя ОВК. При электрофизическом воздействии наблюдается уменьшение размера агрегаций MWCNT в растворителе на 60–70 % [35]. При этом уменьшается размер капель при распыле огнезащитной краски [34], что обеспечивает более равномерное распределение модифицированного состава на поверхности металла и позволяет улучшить адгезионные и прочностные характеристики огнезащитных покрытий. В большинстве случаев сравнительно более высокая термическая устойчивость ОВК наблюдается при концентрации УНС до 0,5 % об. Это объясняется тем, что при увеличении концентрации УНС за счет агрегации наночастиц уменьшается совокупная объемная поверхность наноструктур, в ОВК формируются микросоединения MWCNT — полимер-нанотрубки, за счет чего их огнезащитный эффект заметно снижается [36].

Увеличение термической стойкости ОВК с MWCNT также может быть связано с эффектом “наноармирования”, который препятствует распространению продуктов термического разложения из твердой фазы в газообразную [36], и химическим механизмом взаимодействия на границе металла и полимерной матрицы ОВК, что обеспечивает более высокую адгезионную прочность покрытий [37]. Это накладывает ограничение на тепловое движение молекул в полимерной матрице ОВК, что ведет к увеличению термической стойкости наноматериалов. Формирование и стабилизация термостабильных макрорадикалов MWCNT в объемной матрице ОВК приводят к увеличению термической стабильности состава [38], что обеспечивает большую сохранность вспененного теплоизолирующего слоя при пожаре.

Полученные результаты позволяют сформулировать физико-технологические принципы повышения огнезащитной эффективности тонкослойных вспучивающихся покрытий за счет применения УНС:

1. Эффект модификации с помощью MWCNT имеет комплексный характер и связан преимущественно с увеличением плотности ОВК за счет “наноармирования” и улучшенной адгезией к металлу

и в меньшей степени — с повышением термической стабильности компонентов состава.

2. Эксплуатационные характеристики модифицированных составов зависят не только от концентрации MWCNT, но и от размера агломераций наночастиц и диэлектрических свойств компонентов ОВК. Использование исследуемых MWCNT с концентрацией более 1,0 % об. неэффективно ввиду снижения адгезионной прочности ОВК.

Методика повышения огнезащитной эффективности тонкослойных вспучивающихся покрытий основана на внедрении очищенных от примесей MWCNT в растворитель [38]. Нанесение модифицированного состава на объекте защиты должно проводиться в соответствии с действующими технологическими регламентами на базовые составы, но при этом необходимо использовать оборудование для дополнительного диспергирования MWCNT в краске перед ее распылением. Определение элект-

рофизических свойств наномодификатора и оценка размеров агломераций наночастиц в материале должны проводиться на стадиях нанесения ОВК и контроля качества покрытия.

Выводы

1. Физико-технологические принципы модификации ОВК позволят повысить огнезащитную эффективность тонкослойных вспучивающихся покрытий и тем самым обеспечить устойчивость функционирования объектов нефтегазового комплекса в условиях возможных аварийных ситуаций и пожаров.

2. Технология применения ОВК с MWCNT на объектах трубопроводного транспорта, как правило, характеризующихся удаленностью от производств огнезащитных составов, должна включать элементы подготовки модифицирующей добавки и ее стабилизации для сохранения качественных характеристик наноматериалов на объекте применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. — 266 с.
2. СП 245.1325800.2015. Защита от коррозии линейных объектов и сооружений в нефтегазовом комплексе. Правила производства и приемки работ. — М. : Минстрой России, 2016. — 51 с.
3. Цой А. А. Методика определения эффективности огнезащитных покрытий для стальных конструкций в условиях факельного углеводородного горения : дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2017. — 134 с.
4. Елецкий А. В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // Успехи физических наук. — 2007. — Т. 177, № 3. — С. 233–274.
5. Пономарев А. Н., Юдович М. Е., Груздев М. В., Юдович В. М. Неметаллическая наночастица во внешнем электромагнитном поле. Топологические факторы взаимодействия мезоструктур // Вопросы материаловедения. — 2009. — № 4(60). — С. 59–64.
6. Терехов В. И., Калинина С. В., Леманов В. В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 1. Синтез и свойства наножидкостей // Теплофизика и аэромеханика. — 2010. — Т. 17, № 1. — С. 1–15.
7. Елецкий А. В. Сорбционные свойства углеродных наноструктур // Успехи физических наук. — 2004. — Т. 174, № 11. — С. 1191–1231.
8. 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.
9. Завьялов Д. Е., Зыбина О. А., Чернова Н. С., Варламов А. В., Мнацаканов С. С. Огнезащитные вспучивающиеся композиции на основе интеркалированного графита // Химическая промышленность. — 2009. — Т. 86, № 8. — С. 414–417.
10. Нечаев К. В., Зыбина О. А., Завьялов Д. Е., Бабкин О. Э., Мнацаканов С. С. Реакции, проходящие в огнезащитных вспучивающихся красках в присутствии углеродных нанотел // Лакокрасочные материалы и их применение. — 2012. — № 10. — С. 38–39.
11. Hanus M. J., Harris A. T. Nanotechnology innovations for the construction industry // Progress in materials science. — 2013. — Vol. 58, No. 7. — P. 1056–1102. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2013.04.001.
12. Lee J., Mahendra S., Alvarez P. J. J. Nanomaterials in the construction industry: a review of their applications and environmental health and safety considerations // ACS Nano. — 2010. — Vol. 4, No. 7. — P. 3580–3590. DOI: 10.1021/nn100866w.

13. Yu W., France D. M., Routbort J. L., Choi S. U. S. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements // *Heat Transfer Engineering*. — 2008. — Vol. 29, No. 5. — P. 432–460. DOI: 10.1080/01457630701850851.
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. Ormsby R., McNally T., Mitchell C., Dunne N. Influence of multiwall carbon nanotube functionality and loading on mechanical properties of PMMA/MWCNT bone cements // *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. — 2010. — Vol. 21, No. 8. — P. 2287–2292. DOI: 10.1007/s10856-009-3960-5.
16. Gu L., Qiu J., Yao Y., Sakai E., Yang L. Functionalized MWCNTs modified flame retardant PLA nanocomposites and cold rolling process for improving mechanical properties // *Composites Science and Technology*. — 2018. — Vol. 161. — P. 39–49. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.03.033.
17. Kugler S., Kowalczyk K., Spychar T. Hybrid carbon nanotubes/graphene modified acrylic coats // *Progress in Organic Coatings*. — 2015. — Vol. 85. — P. 1–7. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2015.02.019.
18. Chiolerio A., Castellino M., Jagdale P., Giorcelli M., Bianco S., Tagliaferro A. Electrical properties of CNT-based polymeric matrix nanocomposites // *Carbon nanotubes — polymer nanocomposites* / S. Yellampalli (ed.). — Croatia : InTech Open Access Publisher, 2011. — P. 215–230. DOI: 10.5772/18900.
19. Zhang Y., Xiao S., Wang Q., Liu S., Qiao Z., Chi Z., Xu J., Economy J. Thermally conductive, insulated polyimide nanocomposites by AlO(OH)-coated MWCNTs // *Journal of Materials Chemistry*. — 2011. — Vol. 21, No. 38. — P. 14563–14568. DOI: 10.1039/C1JM12450A.
20. Li Z., Gao B., Chen G. Z., Mokaya R., Sotiropoulos S., Li Puma G. Carbon nanotube/titanium dioxide (CNT/TiO₂) core-shell nanocomposites with tailored shell thickness, CNT content and photocatalytic/photoelectrocatalytic properties // *Applied Catalysis B: Environmental*. — 2011. — Vol. 110. — P. 50–57. DOI: 10.1016/j.apcatb.2011.08.023.
21. Vahabi H., Gholami F., Karaseva V., Laoutid F., Mangin R., Sonnier R., Saeb M. R. Novel nanocomposites based on poly (ethylene-co-vinyl acetate) for coating applications: The complementary actions of hydroxyapatite, MWCNTs and ammonium polyphosphate on flame retardancy // *Progress in Organic Coatings*. — 2017. — Vol. 113. — P. 207–217. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2017.08.009.
22. Li Y., Gao Y., Cao Y., Li H. Electrochemical sensor for bisphenol A determination based on MWCNT/melamine complex modified GCE // *Sensors and Actuators B: Chemical*. — 2012. — Vol. 171–172. — P. 726–733. DOI: 10.1016/j.snb.2012.05.063.
23. Guo Z., Xu X.-F., Li J., Liu Y.-W., Zhang J., Yang C. Ordered mesoporous carbon as electrode modification material for selective and sensitive electrochemical sensing of melamine // *Sensors and Actuators B: Chemical*. — 2014. — Vol. 200. — P. 101–108. DOI: 10.1016/j.snb.2014.04.031.
24. Im J. S., Bai B. C., Bae T.-S., In S. J., Lee Y.-S. Improved anti-oxidation properties of electrospun polyurethane nanofibers achieved by oxyfluorinated multi-walled carbon nanotubes and aluminum hydroxide // *Materials Chemistry and Physics*. — 2011. — Vol. 126, No. 3. — P. 685–692. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2010.12.061.
25. 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., Ключков 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.
26. Альмяшев В. И., Гусаров В. В. Термические методы анализа : учеб. пособие. — СПб. : СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 1999. — 40 с.
27. von Hippel A. R. Dielectrics and waves. — NY : John Wiley and Sons, 1954. — 284 p.
28. Иванов А. В., Скрипник И. Л., Воронин С. В. Исследование процессов электризации при обращении с модифицированными наножидкостями и лакокрасочными материалами // *Проблемы управления рисками в техносфере*. — 2018. — № 3(47). — С. 110–119.
29. Николойчик А. В., Прокопчук Н. Р., Шпигель Т. А., Николойчик 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.
30. 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.
31. 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.

32. 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.
33. 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.
34. Боева А. А., Иванов А. В., Шидловский Г. Л. Исследование компонентов модифицированных огнезащитных вспучивающихся композиций методом атомно-силовой микроскопии // Природные и техногенные риски (Физико-математические и прикладные аспекты). — 2018. — № 1(25). — С. 33–41.
35. Иванов А. В., Мифтахутдинова А. А., Ивахнюк Г. К., Башаричев А. В. Физико-технологические принципы и методика управления пожароопасными процессами при обращении с жидкими углеводородами в условиях стабилизации наноструктур // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 12. — С. 7–18. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.12.7-18.
36. Bikiaris D. Can nanoparticles really enhance thermal stability of polymers? Part II: An overview on thermal decomposition of polycondensation polymers // Thermochemica Acta. — 2011. — Vol. 523, No. 1-2. — P. 25–45. DOI: 10.1016/j.tca.2011.06.012.
37. Зыбина О. А. Теоретические принципы и технология огнезащитных вспучивающихся материалов : дис. ... д-ра техн. наук. — СПб., 2015. — 260 с.
38. Chrissafis K., Bikiaris D. Can nanoparticles really enhance thermal stability of polymers? Part I: An overview on thermal decomposition of addition polymers // Thermochimica Acta. — 2011. — Vol. 523, No. 1-2. — P. 1–24. DOI: 10.1016/j.tca.2011.06.010.

REFERENCES

1. N. Kh. Abdrakhmanov. *Scientific and methodical bases of ensuring safe operation of hazardous production facilities of an oil and gas complex based on management of system risks*. Abstr. Dr. Sci. (Eng.) Diss. Ufa, 2014. 266 p. (in Russian).
2. Set of rules 245.1325800.2015. *Corrosion protection of the main and field pipelines. Building and acceptance*. Moscow, Ministry of Russia Publ., 2015. 51 p. (in Russian).
3. A. A. Tsoy. *Method for determining the effectiveness of flame retardant coatings for steel structures under flare hydrocarbon combustion conditions*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Saint Petersburg, 2017. 134 p. (in Russian).
4. A. V. Eletskii. Mechanical properties of carbon nanostructures and related materials. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 2007, vol. 50, no. 3, pp. 225–261. DOI: 10.1070/PU2007v050n03ABEH006188.
5. A. N. Ponomarev, M. E. Yudovitch, M. V. Gruzdev, V. M. Yudovitch. A nonmetallic nanoparticles in a superficial electromagnetic field. Topological factor of mesostructures interference. *Voprosy materialovedeniya / Problems of Materials Science*, 2009, no. 4(60), pp. 59–64 (in Russian).
6. V. I. Terekhov, S. V. Kalinina, V. V. Lemanov. The mechanism of heat transfer in nanofluids: State of the art (review). Part 1. Synthesis and properties of nanofluids. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2010, vol. 17, no. 1, pp. 1–14. DOI: 10.1134/s0869864310010014.
7. A. V. Eletskii. Sorption properties of carbon nanostructures. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 2004, vol. 47, no. 11, pp. 1119–1154. DOI: 10.1070/PU2004v047n11ABEH002017.
8. A. V. Ivanov, A. A. Boeva, G. K. Ivakhnyuk, S. N. Terekhin, V. Ya. Prorok. Research of operational characteristics of nanomodified fire-resistant intumescent compositions in the conditions of hydrocarbon fire at oil transportation facilities. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 10, pp. 5–19 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.5-19.
9. D. E. Zavyalov, O. A. Zyбина, N. S. Chernova, A. V. Varlamov, S. S. Mnatsakanov. Fire-retardant intumescent composition based on intercalated graphite. *Khimicheskaya promyshlennost' / Russian Chemical Industry*, 2009, vol. 86, no. 8, p. 414–417 (in Russian).
10. K. V. Nechaev, O. A. Zyбина, D. E. Zavyalov, O. E. Babkin, S. S. Mnatsakanov. Reaction, which take place in the intumescent fire-retardant paints in the presence of carbon nanobodies. *Lakokrasochnie materialy i ikh primeneniye / Russian Coatings Journal*, 2012, no. 10, pp. 38–39 (in Russian).
11. M. J. Hanus, A. T. Harris. Nanotechnology innovations for the construction industry. *Progress in materials science*, 2013, vol. 58, no. 7, pp. 1056–1102. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2013.04.001.
12. J. Lee, S. Mahendra, P. J. J. Alvarez. Nanomaterials in the construction industry: a review of their applications and environmental health and safety considerations. *ACS Nano*, 2010, vol. 4, no. 7, pp. 3580–3590. DOI: 10.1021/nn100866w.

13. W. Yu, D. M. France, J. L. Routbort, S. U. S. Choi. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements. *Heat Transfer Engineering*, 2008, vol. 29, no. 5, pp. 432–460. DOI: 10.1080/01457630701850851.
14. S. Ganguli, H. Aglan, P. Denning, G. Irvin. 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. R. Ormsby, T. McNally, C. Mitchell, N. Dunne. Influence of multiwall carbon nanotube functionality and loading on mechanical properties of PMMA/MWCNT bone cements. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2010, vol. 21, no. 8, pp. 2287–2292. DOI: 10.1007/s10856-009-3960-5.
16. L. Gu, J. Qiu, Y. Yao, E. Sakai, L. Yang. Functionalized MWCNTs modified flame retardant PLA nanocomposites and cold rolling process for improving mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 2018, vol. 161, pp. 39–49. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.03.033.
17. S. Kugler, K. Kowalczyk, T. Spychaj. Hybrid carbon nanotubes/graphene modified acrylic coats. *Progress in Organic Coatings*, 2015, vol. 85, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2015.02.019.
18. A. Chiolerio, M. Castellino, P. Jagdale, M. Giorcelli, S. Bianco, A. Tagliaferro. Electrical properties of CNT-based polymeric matrix nanocomposites. In: S. Yellampalli (ed.). *Carbon nanotubes — polymer nanocomposites*. Croatia, InTech Open Access Publisher, 2011, pp. 215–230. DOI: 10.5772/18900.
19. Y. Zhang, S. Xiao, Q. Wang, S. Liu, Z. Qiao, Z. Chi, J. Xu, J. Economy. Thermally conductive, insulated polyimide nanocomposites by AIO(OH)-coated MWCNTs. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, vol. 21, no. 38, pp. 14563–14568. DOI: 10.1039/C1JM12450A.
20. Z. Li, B. Gao, G. Z. Chen, R. Mokaya, S. Sotiropoulos, G. Li Puma. Carbon nanotube/titanium dioxide (CNT/TiO₂) core-shell nanocomposites with tailored shell thickness, CNT content and photocatalytic/photocatalytic properties. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2011, vol. 110, pp. 50–57. DOI: 10.1016/j.apcatb.2011.08.023.
21. H. Vahabi, F. Gholami, V. Karaseva, F. Laoutid, R. Mangin, R. Sonnier, M. R. Saeb. Novel nanocomposites based on poly (ethylene-co-vinyl acetate) for coating applications: The complementary actions of hydroxyapatite, MWCNTs and ammonium polyphosphate on flame retardancy. *Progress in Organic Coatings*, 2017, vol. 113, pp. 207–217. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2017.08.009.
22. Y. Li, Y. Gao, Y. Cao, H. Li. Electrochemical sensor for bisphenol A determination based on MWCNT/melamine complex modified GCE. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, vol. 171–172, pp. 726–733. DOI: 10.1016/j.snb.2012.05.063.
23. Z. Guo, X.-F. Xu, J. Li, Y.-W. Liu, J. Zhang, C. Yang. Ordered mesoporous carbon as electrode modification material for selective and sensitive electrochemical sensing of melamine. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, vol. 200, pp. 101–108. DOI: 10.1016/j.snb.2014.04.031.
24. J. S. Im, B. C. Bai, T.-S. Bae, S. J. In, Y.-S. Lee. Improved anti-oxidation properties of electrospun polyurethane nanofibers achieved by oxyfluorinated multi-walled carbon nanotubes and aluminum hydroxide. *Materials Chemistry and Physics*, 2011, vol. 126, no. 3, pp. 685–692. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2010.12.061.
25. G. K. Ivakhnjuk, V. N. Matjukhin, V. A. Klachkov, A. O. Shevchenko, A. S. Knjazev, K. G. Ivakhnjuk, A. V. Ivanov, V. A. Rodionov. *Method and apparatus for controlling physical-chemical processes in substance and on a phase boundary*. Patent RU, no. 2479005, publ. date 10 April 2013, Bull. No. 10 (in Russian).
26. V. I. Almyashev, V. V. Gusarov. *Termicheskiye metody analiza* [Thermal analysis methods]. Saint Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” Publ., 1999. 40 p. (in Russian).
27. A. R. von Hippel. *Dielectrics and waves*. NY, John Wiley and Sons, 1954. 284 p.
28. A. V. Ivanov, I. L. Skrypnik, S. V. Voronin. Investigation of electrification processes in handling modified nanofluids and paintwork materials. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere / Problems of Technosphere Risk Management*, 2018, no. 3(47), pp. 110–119 (in Russian).
29. A. V. Nikolaychik, N. R. Prokopchuk, T. A. Shpigel, I. V. Nikolaychik. 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).
30. J. Shen, W. Huang, L. Wu, Y. Hu, M. Ye. 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.
31. Z. Jin, K. P. Pramoda, G. Xu, S. H. Gog. 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.

32. S. V. Kondrashev, N. P. Dyachkova, V. A. Bogatov, I. A. Mansurova, P. S. Marakhovskii, I. A. Mokretsova, A. S. Fokin. Use of carbon nanotubes for epoxy binders heat resistance increase. *Perspektivnyye materialy / Journal of Advanced Materials*, 2013, no. 2, pp. 17–23 (in Russian).
33. G. I. Yakovlev, T. M. Mikhalkina, A. M. Bagimov, A. V. Evsyagina. 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).
34. A. A. Boyeva, A. V. Ivanov, G. L. Shidlovsky. Investigation of components of modified fire-protective recovery composition by the atom-force microscopy method. *Prirodnyye i tekhnogennyye riski (Fiziko-matematicheskiye i prikladnyye aspekty) / Natural and Technological Risks (Physics-Mathematical and Applied Aspects)*, 2018, no. 1(25), pp. 33–40 (in Russian).
35. A. V. Ivanov, A. A. Miftakhutdinova, G. K. Ivakhnyuk, A. V. Basharichev. Physical and technological principles and methodology for the management of fire protection processes when treating liquid hydrocarbon in the conditions of stabilization of nanostructures. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 12, pp. 7–18 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.12.7-18.
36. D. Bikiaris. Can nanoparticles really enhance thermal stability of polymers? Part II: An overview on thermal decomposition of polycondensation polymers. *Thermochimica Acta*, 2011, vol. 523, no. 1-2, pp. 25–45. DOI: 10.1016/j.tca.2011.06.012.
37. O. A. Zyбина. *Theoretical principles and technology of intumescent materials*. Dr. Sci. (Eng.) Diss. Saint Petersburg, 2015. 260 p. (in Russian).
38. K. Chrissafis, D. Bikiaris. Can nanoparticles really enhance thermal stability of polymers? Part I: An overview on thermal decomposition of addition polymers. *Thermochimica Acta*, 2011, vol. 523, no. 1-2, pp. 1–24. DOI: 10.1016/j.tca.2011.06.010.

Поступила 06.06.2019, после доработки 23.08.2019;
принята к публикации 16.09.2019

Received 6 June 2019; Received in revised form 23 August 2019;
Accepted 16 September 2019

Информация об авторах

Алексей Владимирович ИВАНОВ, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Россия; Researcher ID: S-9000-2019; ORCID: 0000-0002-4854-9321; e-mail: spark002@mail.ru

Алина Алексеевна БОЕВА, менеджер по персоналу, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0001-9390-1761; e-mail: silina.2015@mail.ru

Федор Алексеевич ДЕМЕНТЬЕВ, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0003-1863-3001; e-mail: demafa@mail.ru

Александр Александрович РЯБОВ, главный технолог, НПК “ОгнеХимЗащита”, г. Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-8171-8350; e-mail: mail@OgneHimZashita.ru

Information about the authors

Alexei V. IVANOV, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Associate Professor of Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; Researcher ID: S-9000-2019; ORCID: 0000-0002-4854-9321; e-mail: spark002@mail.ru

Alina A. BOEVA, HR manager, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9390-1761; e-mail: silina.2015@mail.ru

Fedor A. DEMENTEV, Cand. Sci. (Eng.), Docent, Associate Professor of Criminalistics and Engineering Expertise Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1863-3001; e-mail: demafa@mail.ru

Alexander A. RYABOV, Chief Technologist, NPK “OgneHimZashchita”, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: mail@OgneHimZashita.ru