



DOI: 10.18721/JEST.25116  
УДК 539.2-022.532

*Т.П. Дьячкова<sup>1</sup>, Д.В. Таров<sup>2</sup>, Д.Е. Кобзев<sup>1</sup>*

1 – Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

2 – ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК**

Показана эффективность применения добавок функционализированных стеаратом титана углеродных нанотрубок (УНТ) для модифицирования термостойкого полиэтилена PE-RT. Для этого были определены прочностные характеристики, твердость по Шору, термическая стабильность, тепло- и температуропроводность композитов PE-RT с техническим углеродом, исходными и функционализированными нанотрубками при различных концентрациях модификаторов. Показано слабое влияние углеродных наполнителей (0,01–1,5 масс. %) на величины коэффициентов тепло- и температуропроводности. Установлено, что улучшение физико-механических показателей композитов наблюдается при концентрациях исходных и функционализированных УНТ, равных соответственно 1–1,5 и 0,01–0,1 масс. %. Применение функционализированных стеаратом титана УНТ позволяет увеличить твердость по Шору на 7 единиц, устойчивость к весовому износу – на 54 %, прочностные характеристики – на 8–12 %, а также снизить суточное влагопоглощение до нуля. Таким образом, данный способ функционализации позволяет снизить расходные нормы УНТ на порядок и более при устойчивом положительном влиянии на свойства полиэтиленовых композитов.

*Ключевые слова:* функционализация, углеродные нанотрубки, полиэтилен, композит, физико-механические свойства, стеарат-титанатные группы.

*Ссылка при цитировании:*

Т.П. Дьячкова, Д.В. Таров, Д.Е. Кобзев. Исследование свойств полиэтиленовых композитов на основе функционализированных углеродных нанотрубок // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 163–173. DOI: 10.18721/JEST.25116.

*T.P. Dyachkova<sup>1</sup>, D.V. Tarov<sup>2</sup>, D.E. Kobzev<sup>1</sup>*

1 – Tambov State Technical University, Tambov, Russia

2 – «Nanotechcenter» Ltd, Tambov, Russia

## **STUDY OF PROPERTIES OF POLYETHYLENE COMPOSITES BASED ON FUNCTIONALIZED CARBON NANOTUBES**

The efficiency of using additives of carbon nanotubes (CNTs) functionalized by titanium stearate for modification of heat-resistant polyethylene PE-RT is shown. For this purpose, we have determined strength characteristics, Shore hardness, thermal stability, thermal conductivity and thermal diffusivity of PE-RT composites with technical carbon, raw and functionalized nanotubes at different concentrations of modifiers. The influence of carbon fillers (0.01–1.5 mass. %) on the values of thermal conductivity coefficients and thermal diffusivity is weak. Physical and mechanical properties of composites have been observed to improve at the concentrations of raw and functionalized CNTs equal to 1–1.5 and 0.01–0.1 mass. % respectively. Application of CNTs functionalized by titanium stearate allows to increase Shore hardness by 7 units, resistance to weight wear by 54%, strength characteristics by 8–12 %, as well as to reduce daily moisture absorption to zero. Thus, this method of functionalization reduces the consumption rate of CNTs by an order of magnitude and more with a stable positive effect on the properties of polyethylene composites.

*Keywords:* functionalization, carbon nanotube, polyethylene, composites, physico-mechanical properties, stearate-titanate groups.

*Citation:*

T.P. Dyachkova, D.V. Tarov, D.E. Kobzev, Study of properties of polyethylene composites based on functionalized carbon nanotubes, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 163–173, DOI: 10.18721/JEST.25116.

### Введение

Ковалентная и нековалентная функционализации углеродных нанотрубок (УНТ) – один из общепринятых методов решения проблемы распределения УНТ в полимерах и растворителях [1–3]. Например, для модифицирования эпоксидных связующих успешно используются УНТ с кислородсодержащими [4, 5] и азотсодержащими [6, 7] группами. Для использования в составе композитов на основе полиэтилена (ПЭ) подходят функционализированные УНТ, обладающие сродством к неполярным матрицам. В частности, эффективными модификаторами ПЭ являются алкилированные [8], фторированные [9] и силанизированные [10] УНТ. Однако реализация представленных методов функционализации УНТ технологически сложна из-за большого количества стадий, использования дорогостоящих и/или токсичных реагентов. Более экологичным и экономичным является описанный в [11–13] способ функционализации стеаратом титана, способствующий получению олеофильных УНТ.

**Целью настоящей работы** было исследование эффективности применения добавок функционализированных стеаратом титана УНТ для модифицирования термостойкого полиэтилена PE-RT. Для этого были определены прочностные характеристики, твердость по Шору, термическая стабильность, тепло- и температуропроводность композитов PE-RT с техническим углеродом, исходными и функционализированными нанотрубками при различных концентрациях модификаторов.

### Материалы и методы

В работе использованы углеродные многослойные цилиндрические углеродные нанотрубки «Таунит-М» производства ООО «Нанотехцентр» (Россия, г. Тамбов) диаметром 10–20 нм, длиной не менее 2 мкм, полученные CVD-методом на катализаторе Co-Mo/Mg-Al. Их

функционализацию стеарат-титанатными группами осуществляли по методике [11]. Для этого сначала 10 г УНТ подвергали обработке в 500 мл концентрированной азотной кислоты (квалификации «хч») при 110 °С в течение 5 часов, после чего промывали на фильтре дистиллированной водой до нейтрального *pH*. При этом была получена 40 %-ная (масс.) водная паста карбоксилированных УНТ с содержанием COOH-групп, равным (по данным титриметрии) 0,6 ммоль/г. К ней было добавлено 1,5 г триэтанолamina и 200 мл дистиллированной воды, после чего смесь механически перемешивали до образования однородной суспензии, обрабатывали ультразвуком на установке ИЛ-100 в течение 0,5 часа и охлаждали. Затем в нее при перемешивании было добавлено 100 мл раствора, содержащего 7 г триэтанолaminтитаната, и 150 мл раствора, содержащего 11 г стеариновой кислоты и 6,5 г триэтанолamina. Полученную смесь перемешивали в течение 2 часов. Одновременно в нее пропускали углекислый газ со скоростью 1 л/мин. По окончании процесса продукт представлял собой осадок, который промывали на фильтре дистиллированной водой и высушивали в вакуумном сушильном шкафу при 80 °С до прекращения потери массы. В результате было получено 22,2 г функционализированных УНТ, в которых массовая доля стеарата титана составила около 55 %.

ПЭМ-изображения (полученные на просвечивающем электронном микроскопе Jeol JEM 2100) исходных и функционализированных УНТ представлены на рис. 1. В последнем случае на поверхности нанотрубок идентифицирован модифицирующий слой стеарата титана толщиной до 2 нм.

Усиление пика D (при  $\sim 1300 \text{ см}^{-1}$ ) относительно G (при  $\sim 1500 \text{ см}^{-1}$ ) на спектрах КР (рис. 2) функционализированных УНТ по сравнению с исходными обусловлено тем, что алкильные группы стеарата титана образованы атомами углерода в  $sp^3$ -состоянии.

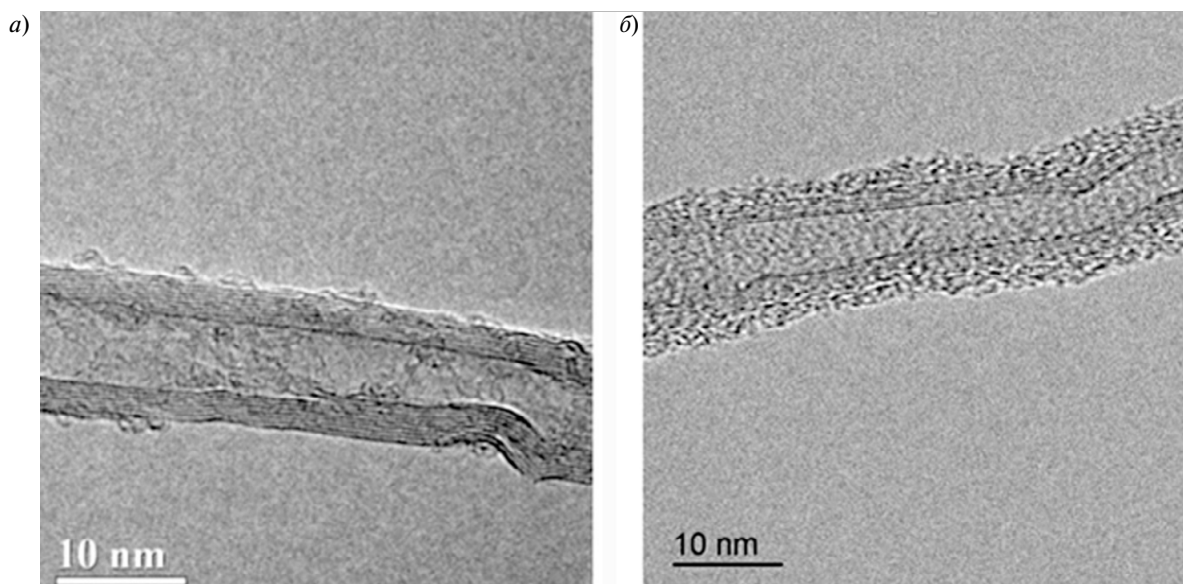


Рис. 1. ПЭМ-изображения исходных (а) и функционализированных стеаратом титана (б) УНТ  
 Fig. 1. TEM-images of the raw (a) and functionalized by titanium stearate (б) SNTs

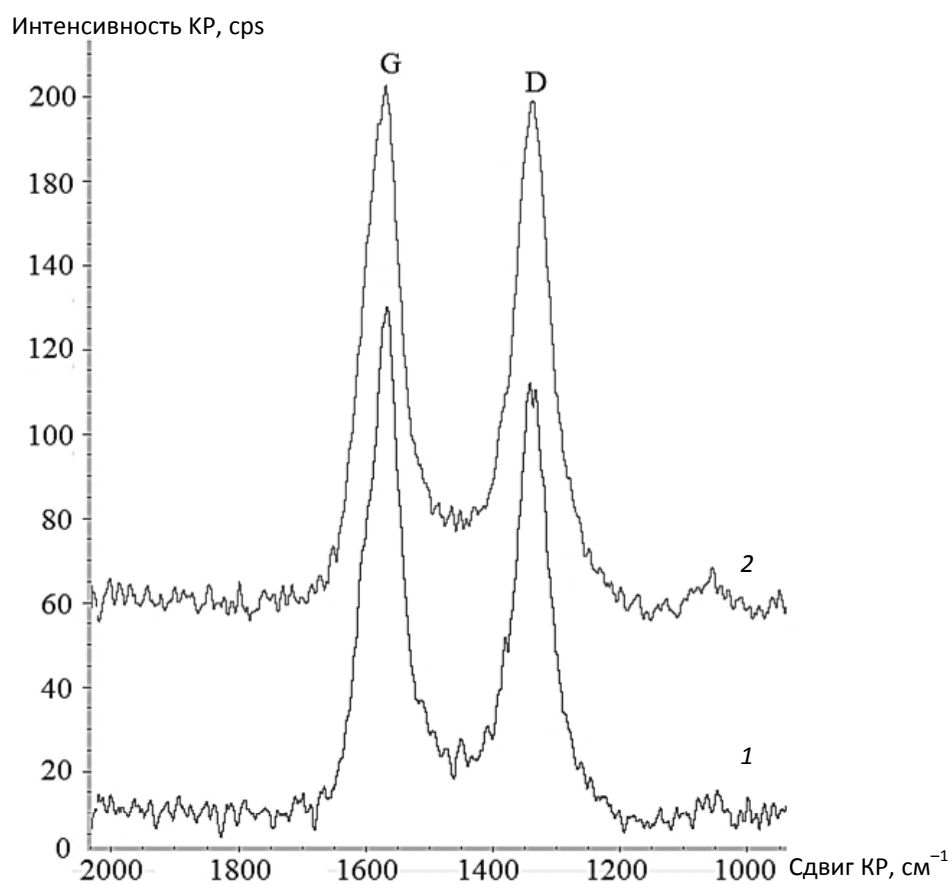


Рис. 2. Фрагмент спектра КР (DXR Raman Microscope,  $\lambda = 532$  нм) исходных (1) и функционализированных стеаратом титана (2) УНТ  
 Fig. 2. Fragment of the spectrum КР (DXR Raman Microscope,  $\lambda = 532$  нм) of the raw (1) and functionalized by titanium stearate (2) CNTs

Для сравнения в качестве наполнителя использован технический углерод П-234.

Модифицированию подвергался термостойкий полиэтилен марки PE-RT SP 988 (LG Chem, Южная Корея). Концентрация наполнителя (УНТ, функционализированные УНТ, технический углерод) составляла 0,01–1,5 масс. %. Смешение модифицирующих добавок с гранулированным полиэтиленом осуществляли в расплаве в роторном смесителе «Брабендер». Необходимые для исследования образцы получали методом литья под давлением.

Исследования твердости композитов по Шору (шкала Д) проводили на приборе модели ИТ 5069 УХЛ 4,2 (ГОСТ 23677–79). Прочностные характеристики оценивали на машине для испытания полимеров DBVMTCL-500 kg (Testometric, Великобритания). Погрешность измерений на этом приборе составляет  $\pm 5$  %.

Исследование триботехнических характеристик проводили на машине трения определением весового износа [15]. Образцы цилиндрической формы, диаметром 35 мм, высотой 6,5 мм закреплялись винтом в центре на столе машины трения. В качестве контртела использовалась сетка абразивная P150 (75–106 мкм), диаметр рабочей зоны контртела составлял 120 мм. Весовой износ определяли по разнице массы образца до и после испытания. Время проведения эксперимента составляло 20 минут, нагрузку на образец задавали усилием 0,5 кг с плечом 200 мм от оси механизма опускания патрона и контролировали пружинными весами на протяжении всего времени эксперимента. Частота вращения контртела составляла 12,5 об/мин.

Суточное водопоглощение композитов оценивали по ГОСТ 4650–2014.

Исследование тепло- и температуропроводности проводили с помощью информационно-измерительной системы теплофизических свойств твердых материалов (ИИС НК

ТФСМ) [14], которая предварительно калибровалась на эталонных материалах (полиметилметакрилат и рипор). Цилиндрический образец диаметром 35 мм помещали на лабораторный стол, сверху устанавливали измерительный зонд. После 10 минут термостатирования производили измерение теплопроводности. Время между экспериментами составляло 15 минут.

Термическую стабильность композитов оценивали на основании анализа ТГ/ДСК-кривых, полученных на приборе синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter (Netzsch). Во время измерений печь заполняли воздухом с расходом 30 мл/мин. Температурная программа включала выдержку при температуре 30°C в течение 10 минут, нагрев от 30 до 900 °C со скоростью 10 °C/мин и охлаждение образцов до комнатной температуры со скоростью 15 °C/мин.

#### Экспериментальное исследование

Результаты механических испытаний полиэтиленовых композитов с различными типами углеродных модификаторов (технический углерод П-234, исходные и функционализированные УНТ) представлены в таблице.

Необходимо отметить, что введение как технического углерода, так и УНТ, как правило, способствует улучшению физико-механических показателей полиэтилена.

Увеличение твердости по Шору может достигать 3,5 и 7 единиц в присутствии соответственно П-234 и углеродных нанотрубок. Однако необходимо отметить, что данный показатель наблюдается при концентрации исходных УНТ в композите, равной 1,5 масс. %. Функционализированных УНТ для достижения аналогичного эффекта требуется всего 0,1 масс. %, т. е. в 15 раз меньше. Максимальный скачок твердости наблюдается при наиболее низком содержании модификатора, затем происходит ее плавное снижение, увеличение или стабилизация.

**Физико-механические свойства полиэтиленовых композитов**  
**Physico-mecanical properties of the polyethylene composites**

Модификатор	Масс. доля, %	Твердость по Шору	Весовой износ, г	Максимальное напряжение, Н/мм <sup>2</sup>	
				при срезе	при изгибе
Отсутствует (исходное состояние)	—	56	0,0409	17,1	37,9
П-234	0,01	58	0,0356	17,2	38,9
	0,1	57,5	0,0321	16,6	41,5
	0,5	57,5	0,0289	17,1	37,1
	1,0	59,5	0,0336	18,2	42,5
	1,5	59,5	0,0347	17,1	42,2
УНТ	0,01	60	0,0293	17,2	38,4
	0,1	61	0,0261	17,2	37,7
	0,5	61	0,0241	17,5	38
	1,0	62	0,0238	17,5	37,5
	1,5	63	0,0248	17,5	38
Функционали- зированные УНТ	0,01	62,5	0,0187	18,5	38,9
	0,1	63	0,0191	17,3	41,5
	0,5	62,5	0,0219	17,5	37,1
	1,0	62	0,0227	16,5	42,5
	1,5	62	0,0223	17,5	42,2

Устойчивость к весовому износу также заметно повышается в присутствии уже 0,01 масс. % углеродных материалов. Причем самыми эффективными оказываются функционализированные УНТ при самой низкой концентрации. Они позволяют снизить весовой износ композита на 54 %.

Показатели максимального напряжения полиэтилена на изгиб и срез под действием углеродных модификаторов меняются не столь однозначно. При некоторых концентрациях П-234, исходных и функционализированных УНТ возможно ухудшение данных свойств. В лучшем случае можно достичь прироста максимального напряжения в условиях среза на 8,2 % в присутствии 0,01 масс. % функционализированных УНТ, а в условиях сгиба – на 12,1 % в присутствии 1 масс. % П-234 или функционализированных УНТ.

Зависимость суточного водопоглощения полиэтиленового композита от концентрации углеродного модификатора представлена на рис. 3. Введение П-234 и УНТ способствует гидрофобизации материала. Причем зависимость показателя водопоглощения композита от концентрации наполнителя может быть различной. В присутствии П-234 она имеет минимум при 0,1 масс. %. При добавлении нефункционализированных УНТ минимальное водопоглощение композита наблюдается при 0,1 масс. %. Зависимость данного показателя от концентрации функционализированных УНТ носит изменчивый характер. Первый минимум водопоглощения (0 %) наблюдается при 0,01 %-ном содержании модификатора, затем происходит незначительное увеличение до 0,06 %, а при 1 и 1,5 %-ном содержании функционализированных УНТ снова наблюдается нулевой показатель.

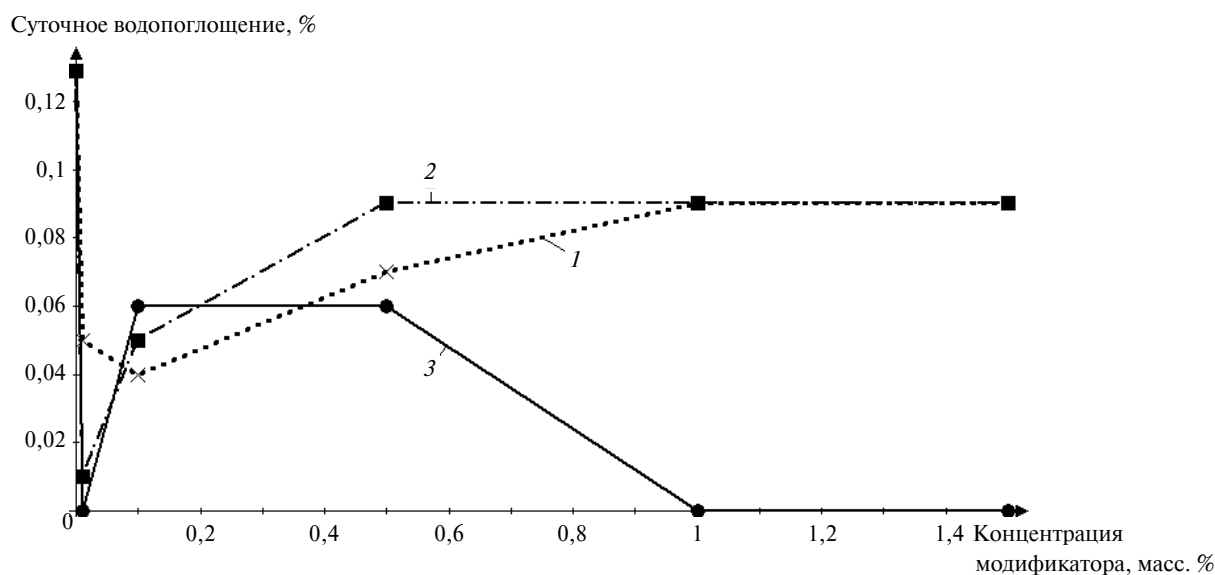


Рис. 3. Влияние концентрации технического углерода П-234 (1), исходных (2) и функционализированных (3) УНТ на суточное водопоглощение полиэтиленовых композитов  
 Fig. 3. Influence of concentrations of technical carbon П-234 (1), raw (2) and functionalized (3) CNTs on the daily moisture absorption of polyethylene composite

Согласно данным, представленным на рис. 4, теплофизические характеристики полиэтилена при модифицировании как техническим углеродом, так и функционализированными нанотрубками изменяются незначительно (не на порядки). Вместо ожидаемого повышения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  в большинстве случаев при введении П-234 и УНТ происходит его некоторое снижение. Температуропроводность  $\alpha$  материала возрастает примерно на 34 % в присутствии 1 масс. % функционализированных нанотрубок.

Анализ ТГ/ДСК-кривых (рис. 5) композитов «полиэтилен – функционализированные УНТ» показывает их высокую термостабильность. Плавление материала происходит при 140–150 °С. Это заметно превосходит температурный интервал эксплуатации изделий из полиэтилена PE-RT SP 988. Остальные присутствующие на кривых рис. 5 пики и характерные участки при более высоких температурах характеризуют термоокислительную деструкцию различных фракций полиэтилена.

### Обсуждение результатов

Таким образом, углеродные материалы способствуют улучшению ряда физико-механических параметров полиэтилена. Однако показатели эффективности зависят от типа применяемого углеродного модификатора, его концентрации и предварительной химической обработки (функционализации).

С позиций улучшения механических свойств более высокая эффективность УНТ по сравнению с техническим углеродом П-234 обусловлена их структурой и уникальными свойствами [16]. Функционализированные УНТ обладают повышенным химическим сродством к модифицируемой матрице, благодаря чему для достижения необходимых показателей композитов требуется их расход, на порядок и более сниженный по сравнению с исходными УНТ. Необходимо отметить, что в ранее опубликованных работах [17] для повышения твердости и устойчивости к износу в композиты на основе полиэтилена вводилось до 5–10 масс. % углеродных нанотрубок.



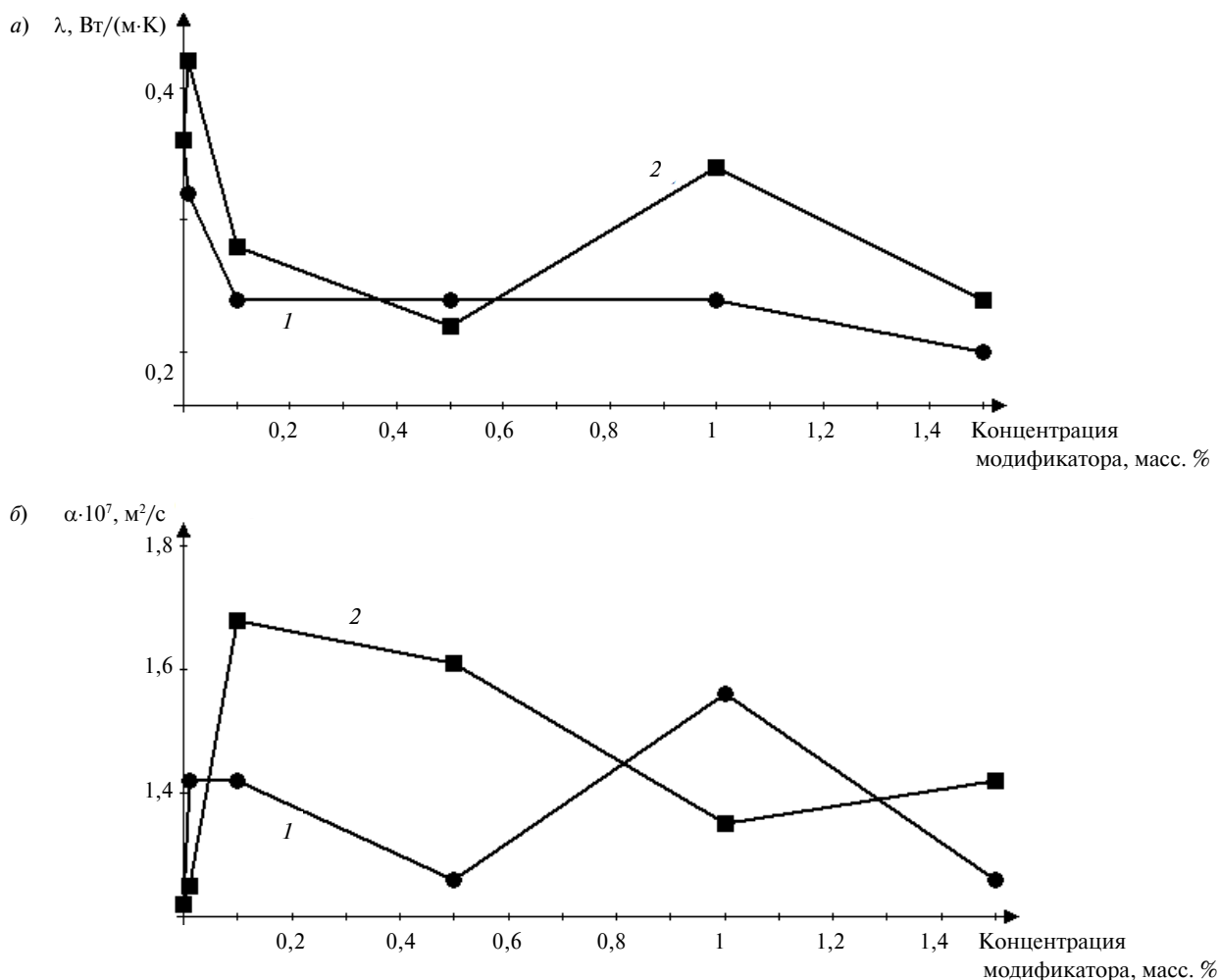


Рис. 4. Изменение коэффициентов теплопроводности  $\lambda$  (а) и температуропроводности  $\alpha$  (б) полиэтилена в присутствии технического углерода П-234 (1) и функционализированных УНТ (2)

Fig. 4. Change in values of the coefficients of thermal conductivity  $\lambda$  (a) and thermal properties  $\alpha$  (b) of polyethylene technical carbon П-234 (1) and functionalized CNTs (2)

Другим положительным моментом при применении функционализированных УНТ в составе полиэтиленовых композитов является возможность повышения устойчивости к воздействию влаги. Уже при минимальном содержании (0,01 масс. %) углеродных нанотрубок с титан-стеаратными группами суточное влагопоглощение может снижаться до нуля. Это может быть обусловлено как более равномерным диспергированием функционализированных УНТ в полимерной матрице, так и их более высокими гидрофобными свойствами. Для сравнения в [18] для придания полиэтилену устойчивости к влаге в него вводят 1,5 масс. % УНТ.

Слабое влияние использованных в работе углеродных модификаторов на теплофизические характеристики композитов можно объяснить двумя причинами. Во-первых, это высокая агломерация и недостижение порога перколяции для П-234 и исходных УНТ. В случае использования функционализированных УНТ в дополнение к этой причине влияние может оказывать усиленное взаимодействие с матрицей, в результате чего УНТ перестают контактировать друг с другом, будучи разделены прослойками из менее проводящего полимера. Однако заметим: учитывая, что слишком высокая теплопроводность материала может

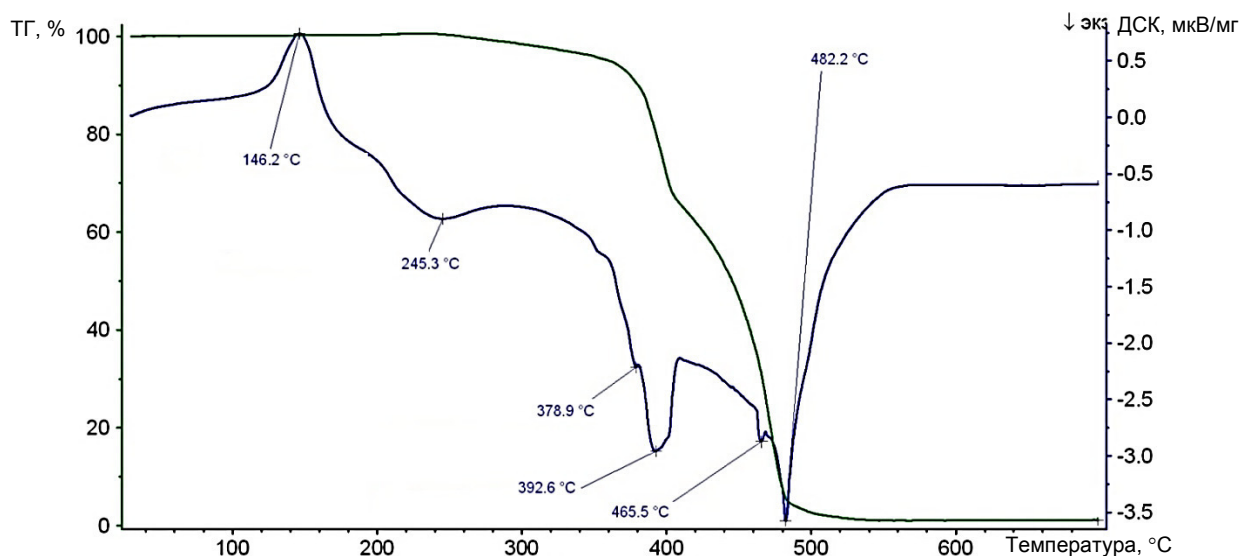


Рис. 5. ТГ/ДСК-кривые композита «полиэтилен – 0,01 масс. % функционализированных УНТ»  
 Fig. 5. TG/DTG-curve of composite «polyethylene – 0,01 mass. % functionalized CNTs»

способствовать потерям тепла в окружающую среду, при применении полиэтилена, например для изготовления труб горячего водоснабжения, низкая теплопроводность является скорее преимуществом, чем недостатком.

### Выводы

Функционализация углеродных нанотрубок титанат-стеаратными группами способствует их адаптации к полимерной матрице на основе полиэтилена и эффективному применению в составе композитов, обладающих повышенной твердостью, устойчивостью к износу и воздействию влаги. Данные эффекты достаточно выражены при концентрациях функционализированных нанотрубок, равных 0,01–0,1 масс. %.

Аналогичных результатов с исходными (нефункционализированными) УНТ удастся достичь при концентрациях на порядок и более высоких, чем указанные.

Таким образом, использование функционализированных УНТ для модифицирования термостойкого полиэтилена PE-RT SP 988 целесообразно и способствует улучшению эксплуатационных характеристик изделий на его основе, например труб ХВС, ГВС и отопления.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (2018–2019 гг.).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Punetha V.D., Rana S., Yoo H.J., Chaurasia A., McLeskey J.T., Ramasamy M.S., Sahoo N.G., Cho J.W. Functionalization of carbon nanomaterials for advanced polymer nanocomposites: A comparison study between CNT and graphene // *Progress in Polymer Science*. 2017. Vol. 67. P. 1–47.
2. Dyachkova T.P., Rukhov A.V., Tkachev A.G., Tugolukov E.N. Functionalization of Carbon Nanotubes: Methods, Mechanisms and Technological Realization // *Advanced Materials and Technologies*. 2018. No 2. P. 18–41.
3. Ma P.-C., Siddiqui N.A., Marom G., Kim J.-K. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010. Vol. 41. P. 1345–1367.





4. **Gantayat S., Rout D., Swain S.K.** Mechanical properties of functionalized multiwalled carbon nanotube/epoxy nanocomposites // *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4, Вып. 2, Part A. P. 4061–4064.
5. **Cha J., Jin S., Shim J.H., Park C.S., Ryu H.J., Hong S.H.** Functionalization of carbon nanotubes for fabrication of CNT/epoxy nanocomposites // *Materials & Design*. 2016. Vol. 95. P. 1–8.
6. **Neves J.C., de Castro V.G., Assis A.L.S., Veiga A.G., Rocco M.L.M., Silva G.G.** In situ determination of amine/epoxy and carboxylic/epoxy exothermic heat reaction on surface of modified carbon nanotubes and structural verification of covalent bond formation // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 436. P. 495–504.
7. **Jin F.-L., Ma C.-J., Park S.-J.** Thermal and mechanical interfacial properties of epoxy composites based on functionalized carbon nanotubes // *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528. P. 8517–8522.
8. **Ferreira F.V., Franceschi W., Meneces B.R.C., Brito F.S., Lozano K., Coutinho A.R., Cividanes L.S., Thim G.P.** Dodecylamine functionalization of carbon nanotube to improve dispersion, thermal and mechanical properties of polyethylene based nanocomposites // *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 410. P. 266–277.
9. **Kharitonov A.P., Maksimkin A.V., Mostovaya K.S., Kaloshkin S.D., Gorshenkov M.V., D'yachkova T.P., Tkachev A.G., Alekseiiko L.N.** Reinforcement of bulk ultrahigh molecular weight polyethylene by fluorinated carbon nanotubes insertion followed by hot pressing and orientation stretching // *Composite Science and Technology*. 2015. Vol. 120. P. 26–31.
10. **Kuan C.-F., Kuan H.-C., Ma C.-C.M., Chen C.-H., Wu H.-L.** The preparation of carbon nanotube/linear low density polyethylene composite by a water-crosslinking reaction // *Materials Letters*. 2007. Vol. 61. P. 2744–2748.
11. **Мележик А.В., Хохлов П.А., Ткачев А.Г.** Функционализация углеродных нанотрубок органоитанатами // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация*. 2013. № 1. С. 31–35.
12. **Таров Д.В., Гурова Т.В., Шубин И.Н.** Аппаратурное оформление функционализации нанотрубок стеаратом титана // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2015. Т. 21, № 2. С. 360–366.
13. **Ткачев А.Г., Таров Д.В., Таров В.П., Шубин И.Н.** Технологические основы функционализации многостенных углеродных нанотрубок стеаратом титана для последующего производства композитов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2016. Т. 22, № 3. С. 501–509.
14. **Селиванова З.М., Самохвалов А.А.** Интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических свойств материалов и изделий // *Измерительная техника*. 2012, № 9. С. 38–42.
15. **Баронин Г.С., Худяков В.В., Мещерякова Ю.В.** Теплофизические и триботехнические свойства фторполимерных молекулярных композитов // *Вестник Тамбовского университета. Научно-теоретический журнал. Серия: Естественные науки*. 2013. Т. 18, № 4. С. 1922–1923.
16. **Раков Э.Г.** Нанотрубки и фуллерены. М.: Университетская книга, Логос, 2006. 376 с.
17. **McNally T., Pötschke P., Halley P., Murthy M., Martin D., Bell S., Brennan G.P., Bein D., Lemoine P., Quinn J.P.** Polyethylene multiwalled carbon nanotube composites // *Polymer*. 2005. Vol. 46. P. 8222–8232.
18. **Azam M.U., Samad M.A.** UHMWPE hybrid nanocomposite coating reinforced with nanoclay and carbon nanotubes for tribological applications under water with/without abrasives // *Tribology International* 2018. Vol. 124. P. 145–155.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ДЬЯЧКОВА Татьяна Петровна** – доктор химических наук профессор Тамбовского государственного технического университета

E-mail: dyachkova\_tp@mail.ru

**ТАРОВ Дмитрий Владимирович** – Заместитель генерального директора ООО «НаноТехЦентр»

E-mail: d\_tarov@mail.ru

**КОБЗЕВ Дмитрий Евгеньевич** – кандидат технических наук доцент Тамбовского государственного технического университета

E-mail: kobzeff.dmitry@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 11.10.2018

## REFERENCES

- [1] **Punetha V.D., Rana S., Yoo H.J., Chaurasia A., McLeskey J.T., Ramasamy M.S., Sahoo N.G., Cho J.W.** Functionalization of carbon nanomaterials for advanced polymer nanocomposites: A comparison study between CNT and grapheme. *Progress in Polymer Science*. 2017. Vol. 67. P. 1–47.
- [2] **Dyachkova T.P., Rukhov A.V., Tkachev A.G., Tugolukov E.N.** Functionalization of Carbon Nanotubes: Methods, Mechanisms and Technological Realization. *Advanced Materials and Technologies*. 2018. No 2. P. 18–41.
- [3] **Ma P.-C., Siddiqui N.A., Marom G., Kim J.-K.** Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010. Vol. 41. P. 1345–1367.
- [4] **Gantayat S., Rout D., Swain S.K.** Mechanical properties of functionalized multiwalled carbon nanotube/epoxy nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4, I. 2, Part A. P. 4061–4064.
- [5] **Cha J., Jin S., Shim J.H., Park C.S., Ryu H.J., Hong S.H.** Functionalization of carbon nanotubes for fabrication of CNT/epoxy nanocomposites. *Materials & Design*. 2016. Vol. 95. P. 1–8.
- [6] **Neves J.C., de Castro V.G., Assis A.L.S., Veiga A.G., Rocco M.L.M., Silva G.G.** In situ determination of amine/epoxy and carboxylic/epoxy exothermic heat reaction on surface of modified carbon nanotubes and structural verification of covalent bond formation. *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 436. P. 495–504.
- [7] **Jin F.-L., Ma C.-J., Park S.-J.** Thermal and mechanical interfacial properties of epoxy composites based on functionalized carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528. P. 8517–8522.
- [8] **Ferreira F.V., Franceschi W., Meneces B.R.C., Brito F.S., Lozano K., Coutinho A.R., Cividanes L.S., Thim G.P.** Dodecylamine functionalization of carbon nanotube to improve dispersion, thermal and mechanical properties of polyethylene based nanocomposites. *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 410. P. 266–277.
- [9] **Kharitonov A.P., Maksimkin A.V., Mostovaya K.S., Kaloshkin S.D., Gorshenkov M.V., D'yachkova T.P., Tkachev A.G., Alekseiko L.N.** Reinforcement of bulk ultrahigh molecular weight polyethylene by fluorinated carbon nanotubes insertion followed by hot pressing and orientation stretching. *Composite Science and Technology*. 2015. Vol. 120. P. 26–31.
- [10] **Kuan C.-F., Kuan H.-C., Ma C.-C.M., Chen C.-H., Wu H.-L.** The preparation of carbon nanotube/linear low density polyethylene composite by a water-crosslinking reaction // *Materials Letters*. 2007. Vol. 61. P. 2744–2748.
- [11] **Melezhik A.V., Khokhlov P.A., Tkachev A.G.** Funktsionalizatsiya uglerodnykh nanotrubok organotitanatami [Functionalization of carbon nanotubes by organic titanium compounds – in Russian]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*. 2013. № 1. P. 31–35.
- [12] **Tarov D.V., Gurova T.V., Shubin I.N.** Apparaturnoye oformleniye funktsionalizatsii nanotrubok steatomom titana [Hardware design of the functionalization of nanotubes by titanium stearate – in Russian]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Transactions of TSTU)*. 2015. T. 21, № 2. P. 360–366.
- [13] **Tkachev A.G., Tarov D.V., Tarov V.P., Shubin I.N.** Tekhnologicheskiye osnovy funktsionalizatsii mnogostennykh uglerodnykh nanotrubok steatomom titana dlya posleduyushchego proizvodstva kompozitov [Technological basis for the functionalization of multi-walled carbon nanotubes by titanium stearate for the subsequent production of composites – in Russian]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Transactions of TSTU)*. 2016. T. 22, № 3. S. 501–509.
- [14] **Selivanova Z.M., Samokhvalov A.A.** Intel'ektual'naya informatsionno-izmeritel'naya sistema dlya opredeleniya teplofizicheskikh svoystv materialov i izdeliy [Intelligent information-measuring system for determining the thermophysical properties of materials and products – in Russian]. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2012, № 9. P. 38–42.
- [15] **Baronin G.S., Khudyakov V.V., Meshcheryakova Yu.V.** Teplofizicheskiye i tribotekhnicheskkiye svoystva ftoropolimernykh molekulyarnykh kompozitov [Thermophysical and tribological properties of fluoropolymer molecular composites – in Russian]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Nauchno-teoreticheskiy zhurnal, Seriya: Yestestvennyye nauki*. 2013. T. 18, № 4. P. 1922–1923.
- [16] **Rakov E.G.** Nanotrubki i fullereny (Nanotubes and fullerenes – in Russian). M.: Universitetskaya kniga, Logos, 2006. 376 s.

[17] McNally T., Pötschke P., Halley P., Murthy M., Martin D., Bell S., Brennan G.P., Bein D., Lemoine P., Quinn J.P. Polyethylene multiwalled carbon nanotube composites // Polymer. 2005. Vol. 46. P. 8222–8232.

[18] Azam M.U., Samad M.A. UHMWPE hybrid nanocomposite coating reinforced with nanoclay and carbon nanotubes for tribological applications under water with/without abrasives. Tribology International 2018. Vol. 124. P. 145–155.

#### THE AUTHORS

**DYACHKOVA Tatiana P.** – *Tambov state technical university*

E-mail: dyachkova\_tp@mail.ru

**TAROV Dmitriy V.** – *«Nanotechcenter» Ltd.*

E-mail: d\_tarov@mail.ru

**KOBZEV Dmitriy.E.** *Tambov state technical university.*

E-mail: kobzeff.dmitry@yandex.ru

Received: 11.10.2018