

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПОЛИПРОПИЛЕНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ MgO

М. М. Михайлов, В. А. Горончко✉

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
г. Томск, Российская Федерация

Полимерные композиционные материалы широко используются в космических аппаратах и станциях в терморегулирующих покрытиях, в качестве герметиков, уплотнений, теплоизоляции, а также во многих других конструкциях и изделиях. Основной характеристикой таких материалов является стабильность свойств и рабочих характеристик к действию факторов космического пространства, среди которых основными повреждающими являются различные виды излучений. Поэтому актуальными являются исследования влияния потоков электронов, протонов, квантов солнечного спектра на изменение оптических, электрических, механических и других свойств полимерных композиционных материалов. В данной работе представлены результаты исследования оптических свойств и радиационной стойкости нанокompозитов на основе полипропилена, модифицированного твердотельным способом наночастицами MgO в диапазоне концентраций 1–5 масс.%. Регистрацию спектров диффузного отражения осуществляли в вакууме  $2 \cdot 10^{-6}$  торр до и после облучения электронами (*in situ*,  $E = 30$  кэВ,  $\Phi = 2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>). Выполнен анализ природы полос поглощения, зарегистрированных в спектрах диффузного отражения, которые обусловлены образованием свободных радикалов:  $-C_3H_5-$ ,  $-C_3H_6-$ ,  $-C_4H_6-$ ,  $-C_4H_7-$ ,  $-C_4H_8-$ ,  $-C_4H_{12}-$ ,  $-C_5H_7-$ ,  $-C_5H_{10}-$ . Установлено оптимальное значение концентрации наночастиц, равное 2 масс.%, при которой площадь интегральной полосы поглощения при 360 нм после облучения уменьшилась в 3,35 раза, ее интенсивность в максимуме – в 3,88 раза по сравнению с немодифицированным полипропиленом.

**Ключевые слова:** полипропилен, оптические свойства, модифицирование, оксидные соединения, наночастицы, радиационная стойкость.

### Введение

Полимерные нанокompозиты являются перспективными материалами для использования в условиях космического пространства благодаря небольшому весу, дешевизне и легкости в обработке. Введение добавок в полимеры приводит к изменению рабочих характеристик: электропроводности, механических свойств, стойкости к ионизирующим излучениям, высоким и низким температурам. В космической технике нанокompозиты могут найти применение в качестве конструкционных и изоляционных материалов, герметиков, клеев, лент, теплоизоляции, терморегулирующих покрытий, уплотнений, упрочняющих материалов. Они также могут быть использованы в ядерной энергетике, в ускорительной и рентге-

новской технике, в нефтегазовой промышленности (улучшение механических свойств изоляции кабелей нефтепогружных насосов), в медицине, в том числе радиационной, и других отраслях промышленности [1; 2].

Под действием излучения в полимерных материалах образуются радиационные дефекты, появляются полосы поглощения, уменьшается коэффициент отражения, увеличивается интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения ( $a_s$ ), изменяются механические и другие свойства. Основное требование, определяющее сроки эксплуатации композитных материалов в условиях действия излучений – способность долговременно сохранять исходные характеристики.

Наночастицы за счет большого отношения площади поверхности к объему обладают высокой способностью выступать в качестве стока радиационных дефектов, образованных действием излучений. Также при воздействии излучения

✉ w\_goronchko@mail.ru

в полимере происходит разрыв химических связей. Наночастицы могут встраиваться в эти разрывы, препятствуя деструкции полимера, образуя органокерамические комплексы, вследствие чего дефектообразование будет снижено. Наночастицы могут выступать в качестве защитного слоя, который обладает большей радиационной стойкостью относительно полимера и во время облучения способен поглощать часть падающего излучения, что также приводит к меньшему дефектообразованию в полимере [3; 4].

Целью настоящей работы является изучение влияния модифицирования наночастицами MgO различной концентрации на спектры отражения в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной (ИК) областях спектра полипропилена и их изменение после облучения электронами.

## 1. Используемое оборудование и методика эксперимента

В работе использовали гранулы полипропилена (ПП) марки PPH030GP диаметром 2–4 мм. Модификатором служил нанопорошок MgO с размером наночастиц 60 нм и удельной поверхностью 26 м<sup>2</sup>/г. Получение образцов необходимой формы осуществлялось методами термопрессования и экструзии при температуре 165 °С. Благодаря хорошей перерабатываемости материала изделие радиационной защиты из данного материала может быть изготовлено практически любой формы.

Изготовление нанокompозитного материала осуществляли на лабораторной установке, пластографе Брабендера [5]. Полимер в виде гранул засыпали на приводимые в движение подогреваемые шнеки. С изменением крутящего момента шнеков температура достигала температуры плавления (165 °С). После расплавления в полимер вводили необходимое количество нанопорошка из расчета массы добавленных гранул ПП. Равномерное распределение наполнителя осуществлялось при перемешивании расплава и происходило до момента образования однородной массы. Готовый образец запекали при температуре 165 °С под давлением в прессе. В результате были получены образцы нанокompозитов на основе ПП в виде прямоугольных блоков 0,2×3×5 см<sup>3</sup> с концентрацией наночастиц MgO: 0, 1, 2, 3 и 5 масс.%. Диапазон концентраций наночастиц от 1 до 5 масс.% является оптимальным, о чем свидетельствуют результаты наших предыдущих исследований, выполненных на полипропиле [6], а также исследований радиационной стойкости, модифицированных наночастицами других органических [7] и неорганических соединений [8].

Исследование спектров диффузного отражения ( $\rho_\lambda$ ) и их изменение после облучения ( $\Delta\rho_\lambda$ ) осуществляли в установке – имитаторе ус-

ловий космического пространства «Спектр» [9]. Установка снабжена источниками электронов, протонов, ионов водорода, квантов солнечного спектра в диапазоне 0,2–3,0 мкм. Наличие интегрирующей сферы внутри вакуумной камеры обеспечивает возможность регистрировать спектры диффузного или зеркального отражения, спектры пропускания и поглощения до и после определенного периода облучения на месте облучения (in situ), что позволяет избежать взаимодействия образованных в ПП дефектов с газами. Образцы закрепляли в алюминиевые подложки диаметром 28 мм, которые выступали в качестве отражающего слоя.

Облучение проводили электронами с энергией  $E = 30$  кэВ, потоком  $\phi = 5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>, флюенсом  $\Phi = 2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> в вакууме  $2 \cdot 10^{-6}$  торр при  $T = 300$  К. Пробег электронов такой энергии не превышает 10 мкм, что значительно меньше толщины образцов, составляющей 2 мм. Поэтому изменения в спектрах  $\rho_\lambda$  после облучения определяются изменениями в образцах ПП из-за появления радиационных дефектов и соответствующих им полос поглощения. Разностные спектры  $\Delta\rho_\lambda$  можно рассматривать как спектры поглощения, наведенного облучением.

Регистрацию спектров  $\rho_\lambda$  осуществляли до облучения и после набранного флюенса электронов на месте облучения (in situ) без выноса образцов в атмосферу в диапазоне 0,2–2,2 мкм. Погрешность определения коэффициента отражения составляла 0,2±0,3 % абс. в области 0,3±1 мкм и 2 % в области 1±2,1 мкм. Анализ проводили по площади полос поглощения, коэффициенту  $\Delta\rho_\lambda$  в максимуме полос и изменению интегрального коэффициента солнечного поглощения  $\Delta a_s$ .

## 2. Результаты и их обсуждение

В спектрах диффузного отражения  $\rho_\lambda$  (рис. 1) регистрируются полосы поглощения при 1199, 1395 и 1720 нм. Наиболее интенсивной является полоса при 1720 нм. Зарегистрированные полосы поглощения в исследуемых образцах определяются обертонами колебаниями молекулярных групп СН, СН<sub>2</sub> и СН<sub>3</sub> и хемосорбированными ОН группами. Данные полосы являются характерными для полиэтилена, полипропилена, акрилового пластика и других видов пластиков [10]. Наличие плеч в полосах может объясняться разветвлениями в цепи полимера [11]. Введение наночастиц в ПП приводит к уменьшению отражательной способности и смещению края поглощения в более длинноволновую область.

Разностные спектры отражения  $\Delta\rho_\lambda$  образцов, полученные вычитанием спектров модифицированных образцов из спектра не модифицированного образца, показывают (рис. 2) влияние

модифицирования на отражательную способность полипропилена.

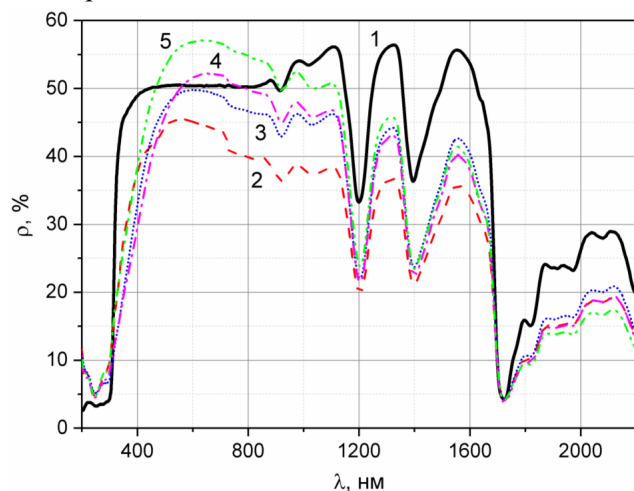


Рис. 1. Спектры диффузного отражения образцов ПП исходного (1) и модифицированных наночастицами MgO, масс.‰: 1 (2), 2 (3), 3 (4), 5 (5)

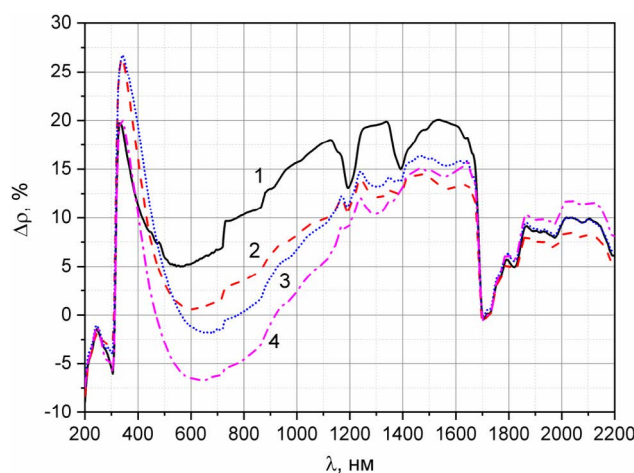


Рис. 2. Разностные спектры диффузного отражения модифицированных образцов ПП с концентрацией наночастиц MgO, масс.‰: 1 (1), 2 (2), 3 (3), 5 (4)

Из спектров  $\Delta\rho_\lambda$  после модифицирования следует, что при концентрации наночастиц от 1 до 2 масс.‰ регистрируется уменьшение коэффициента отражения в диапазоне 300–2200 нм. При этом регистрируется хорошо разрешаемая полоса поглощения при 380 нм.

Изменения коэффициента отражения могут быть обусловлены изменением поглощения и рассеяния. При больших значениях концентрации ( $C = 3\text{--}5$  масс.‰) в диапазоне 460–920 нм определенное влияние может оказывать рассеяние, поскольку коэффициент отражения при этом превосходит значения для не модифицированного ПП.

После облучения электронами построены разностные спектры  $\Delta\rho_\lambda$  (рис. 3), которые получены вычитанием спектров облученных образцов из спектров до облучения.

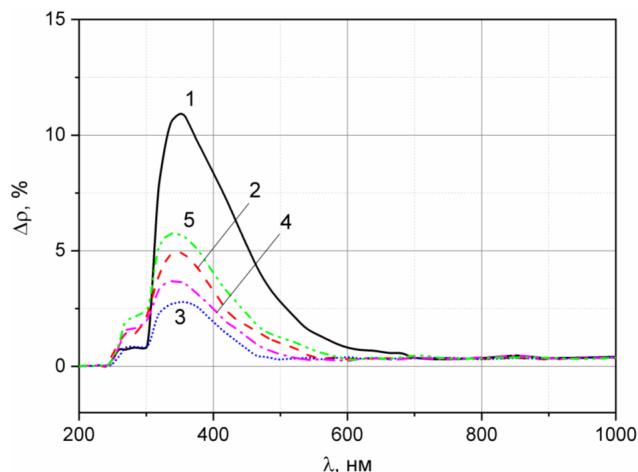


Рис. 3. Разностные спектры диффузного отражения после облучения для образцов ПП исходного (1) и модифицированных с концентрацией наночастиц MgO, масс.‰: 1(2), 2(3), 3(4), 5(5)

После облучения в разностных спектрах регистрируется полоса поглощения сложной формы в диапазоне 250–700 нм с максимумом при 360 нм. Она может быть обусловлена поглощением свободными радикалами  $-\text{C}_3\text{H}_5-$ ,  $-\text{C}_3\text{H}_6-$  в полипропилене при разрыве основной цепи. В меньшем количестве могут образовываться более сложные радикалы:  $-\text{C}_4\text{H}_6-$ ,  $-\text{C}_4\text{H}_7-$ ,  $-\text{C}_4\text{H}_8-$ ,  $-\text{C}_4\text{H}_{12}-$ ,  $-\text{C}_5\text{H}_7-$ ,  $-\text{C}_5\text{H}_{10}-$ . Эти радикалы могут разлагаться на меньшие радикалы и продукты, такие как этилен, пропилен, бутан, этан, пропан и другие [12–14].

Определение влияния концентрации наночастиц на радиационную стойкость модифицированных образцов ПП, рассчитанного по площади этой полосы и значению  $\Delta\rho_\lambda$  в максимуме при 360 нм, приведено в табл. 1 и рис. 4.

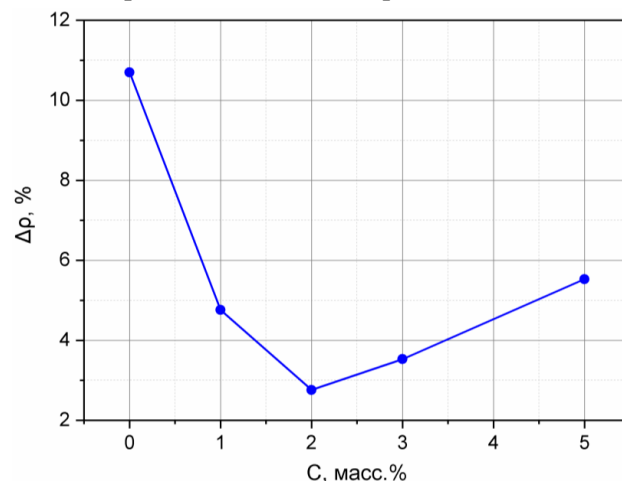


Рис. 4. Зависимость  $\Delta\rho_\lambda$  в максимуме полосы при 360 нм от концентрации наночастиц в ПП

При флюенсе электронов  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  оптимальной для увеличения радиационной стойкости является концентрация 2 масс.‰ наночастиц MgO. Отношение значения  $\Delta\rho_\lambda$  немодифицированного образца к  $\Delta\rho_\lambda$  образца ПП+2 масс.‰ MgO соста-

вило 3,88. Площадь полосы поглощения при такой концентрации уменьшается в 3,35 раза по сравнению с не модифицированным образцом. При большей концентрации наночастиц в ПП возрастает деградация стойкости к воздействию излучения.

Наиболее важной характеристикой материалов космической техники является интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения  $a_s$  и его изменение после облучения  $\Delta a_s$  (табл. 2). Этот коэффициент определяется нормированием спектра  $\rho_\lambda$  на спектр излучения Солнца согласно стандарту [15; 16] по формуле:

$$a_s = 1 - \rho_s = 1 - \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_\lambda S_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda d\lambda}, \quad (1)$$

где  $\rho_s$  – интегральный коэффициент отражения;  $\rho_\lambda$  – спектр отражения;  $S_\lambda$  – спектр излучения

Солнца;  $\lambda_1, \lambda_2$  – спектральный диапазон излучения Солнца.

Интегральный коэффициент отражения  $\rho_s$  рассчитывали суммированием значений  $\rho$  во всем спектральном диапазоне:

$$\rho_s = \frac{\sum_{i=1}^n \rho(\lambda_i) S(\lambda_i) \Delta(\lambda_i)}{\sum_{i=1}^n S(\lambda_i) \Delta(\lambda_i)}, \quad (2)$$

где  $n = 24$ .

Из зависимости  $\Delta a_s$  от концентрации наночастиц (рис. 5) следует, что оптимальной концентрацией для улучшения стойкости к действию излучения является 2 масс.% MgO. Значение  $\Delta a_s$  образца ПП+2 масс.% MgO в 5,4 раза меньше по сравнению с немодифицированным образцом. При введении в ПП большей концентрации наночастиц наблюдается деградация стойкости к воздействию излучения.

Таблица 1

Значения площадей интегральной полосы поглощения и изменения коэффициента диффузного отражения на длине волны 360 нм чистого ПП и модифицированного наночастицами MgO после облучения электронами

$C_{MgO}, \%$	0	1	2	3	5
$S, \text{отн. ед.}$	1780	860	532	697	1040
$\Delta\rho_{360}, \%$	10,7	4,76	2,76	3,53	5,53

Таблица 2

Значения интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения чистого ПП, модифицированного наночастицами MgO, и его изменений после облучения электронами

$C_{MgO}, \%$	0	1	2	3	5
$a_s$	0,6	0,6	0,593	0,589	0,54
$\Delta a_s$	0,019	0,013	0,0035	0,007	0,012

## Заключение

Выполнено твердотельное модифицирование полипропилена наночастицами MgO в диапазоне концентраций 1–5 масс.%. Установлено уменьшение отражательной способности после модифицирования во всем спектре 0,2–2,2 мкм, за исключением областей 560–770 нм (для  $C = 3$  масс.%) и 460–920 нм (для  $C = 5$  масс.%). Зарегистрированные полосы поглощения в ближней ИК области спектров немодифицированного ПП и модифицированного наночастицами MgO определяются обертовыми колебаниями молекулярных групп  $\text{C-H}$ ,  $\text{C-H}_2$  и  $\text{C-H}_3$  и хемосорбированными ОН группами.

В разностных спектрах отражения после облучения электронами проявляется полоса поглощения сложной формы с максимумом при 360 нм,

обусловленная образованием свободных радикалов в ПП при разрыве основной цепи. Установлено оптимальное значение концентрации наночастиц, равное 2 масс.%. При такой концентрации площадь интегральной полосы после облучения уменьшается в 3,35 раза, значение  $\Delta\rho_\lambda$  в максимуме полосы при 360 нм – в 3,88 раза, изменение коэффициента поглощения  $\Delta a_s$  – в 5,4 раза по сравнению с немодифицированным ПП.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (проект «Науки о космосе и инжиниринг»).

## Список литературы

- [1] Лисаневич М. С., Галимзянова Р. Ю., Мукменева Н. А., Хакимуллин Ю. Н., Рахматуллина Э. Р., Хуснутдинова Э. В., Сиразетдинов Д. С., Гарипов И. И. Исследование радиационной стойкости блоксополимера пропилена и этилена и возможности ее повышения // Вестник Технологического университета. 2018. Т. 21. № 10. С. 100–103.
- [2] Suljovrujic E., Stojanovic Z., Dudic D., Milicevic D. Radiation, thermo-oxidative and storage induced changes in microstructure, crystallinity and dielectric properties of (un)oriented isotactic polypropylene // Polymer Degradation and Stability. 2021. vol. 188. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109564.
- [3] Милинчук В. К., Тупиков В. И. Радиационная стойкость органических материалов. М. : Энергоатомиздат, 1986. 271 с.
- [4] Mohammadi H., Morovati V., Korayem A.-E., Poshtan E., Dargazany R. Constitutive modeling of elastomers during photo- and thermo-oxidative aging // Polymer Degradation and Stability. 2021. vol. 191. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109663.
- [5] Михайлов М. М., Горончко В. А. Радиационно стойкий полипропилен. Пат. № 2767524 Российская Федерация, 2021. Бюл. № 8.
- [6] Mikhailov M. M., Lebedev S. M., Sokolovskiy A. N., Goronchko V. A. Investigation of radiation stability of optical properties of polypropylene modified with ZrO<sub>2</sub> nanoparticles // Polymer Composites. 2019. vol. 40. issue 8. pp. 3050–3055. doi: 10.1002/pc.25148.
- [7] Nalwa H. S. Nanostructured Materials and Nanotechnology. USA, 2002.
- [8] Mikhailov M. M., Neshchimenko V. V., Yuryev S. A., Grigorevsky A. V., Lovitskiy A. A., Vashchenkov I. S. On the Radiation Stability of BaSO<sub>4</sub> Pigment Modified with SiO<sub>2</sub> Nanoparticles and Applied for Spacecraft Thermal Control Coatings // Defect and Diffusion Forum. 2018. vol. 386. pp. 277–282. doi: 10.4028/www.scientific.net/ddf.386.277.
- [9] Kositsyn L. G., Duoretskii M. I., Kuznetsov N. Ya., Mikhailov M. M. Apparatus for study of diffuse-reflection and luminescence spectra of solids in vacuum // Instruments and experimental techniques. 1985. vol. 28. issue 4. pp. 929–932.
- [10] Pakhomova S., Zhdanov I., van Bavel B. Polymer Type Identification of Marine Plastic Litter Using a Miniature Near-Infrared Spectrometer (MicroNIR) // Applied Sciences. 2020. no. 10 (23). doi: 10.3390/app10238707.
- [11] Mizushima M., Kawamura T., Takahashi K., Nitta K. In situ near-infrared spectroscopic studies of the structural changes of polyethylene during melting // Polym J. 2012. vol. 44. pp. 162–166. doi: 10.1038/pj.2011.100.
- [12] Huang J. B., Zeng G. S., Li X. S., Cheng X. C., Tong H. Theoretical studies on bond dissociation enthalpies for model compounds of typical plastic polymers // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. vol. 167. doi: 10.1088/1755-1315/167/1/012029.
- [13] Tyapkova O., Czerny M., Buettner A. Characterisation of flavour compounds formed by  $\gamma$ -irradiation of polypropylene // Polymer Degradation and Stability. 2009. vol. 94. issue 5. pp. 757–769. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2009.02.006.
- [14] Mikhailov M. M. Recording of carbon clusters and  $(-\text{CH}_2)_n$  radicals in a vacuum at the site of irradiation (in situ) of polyethylene // Polymer Degradation and Stability. 2021. vol. 191. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109682.
- [15] ASTM E490-00a. Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables. USA : ASTM International, 2019.
- [16] ASTM E903–96. Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. USA : ASTM International, 2012.

## OPTICAL PROPERTIES AND RADIATION STABILITY OF POLYPROPYLENE MODIFIED WITH MgO NANOPARTICLES

**M. M. Mikhailov, V. A. Goronchko**

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
Tomsk, Russian Federation*

*Polymer composite materials are widely used in spacecraft and stations in thermal control coatings, as sealants, seals, thermal insulation, as well as in many other structures and products.*

The main characteristic of such materials is the stability of properties and performance characteristics to the action of space factors, among which various types of radiation are the main damaging ones. Therefore, it is relevant to study the influence of electron, proton, solar spectrum quanta on the change in optical, electrical, mechanical, and other properties of polymer composite materials. This paper presents the results of a investigation of the optical properties and radiation stability of nanocomposites based on polypropylene modified by the solid state method with MgO nanoparticles in the concentration range of 1–5 mass.%. Diffuse reflectance spectra were recorded in a vacuum of  $2 \cdot 10^{-6}$  Torr before and after electron irradiation (in situ,  $E = 30$  keV,  $H = 2 \cdot 10^{16}$  cm<sup>-2</sup>). The analysis of the nature of the absorption bands recorded in the diffuse reflection spectra, which are due to the formation of free radicals:  $-C_3H_5-$ ,  $-C_3H_6-$ ,  $-C_4H_6-$ ,  $-C_4H_7-$ ,  $-C_4H_8-$ ,  $-C_4H_{12}-$ ,  $-C_5H_7-$ ,  $-C_5H_{10}-$ , was performed. The optimal value of the concentration of nanoparticles was established, equal to 2 mass.%, at which the area of the integral absorption band at 360 nm after irradiation decreased by 3,35 times, its intensity at the maximum by 3,88 times compared with unmodified polypropylene.

**Keywords:** polypropylene, optical properties, modification, oxide compounds, nanoparticles, radiation stability.

## References

- [1] Lisanevich M. S., Galimzyanova R. Yu., Mukmeneva N. A., Khakimullin Yu. N., Rakhmatullina E. R., Khusnutdinova E. V., Sirazetdinov D. S., Garipov I. I. *Issledovanie radiacionnoj stojkosti blokopolimera propilena i etilena i vozmozhnosti ee povysheniya* [Investigation of the radiation resistance of the block copolymer of propylene and ethylene and the possibility of its improvement] // Bulletin of the Technological University, 2018, vol. 21, no. 10, pp. 100–103. (In Russian)
- [2] Suljovrujic E., Stojanovic Z., Dudic D., Milicevic D. Radiation, thermo-oxidative and storage induced changes in microstructure, crystallinity and dielectric properties of (un)oriented isotactic polypropylene // Polymer Degradation and Stability, 2021, vol. 188. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109564.
- [3] Milinchuk V. K., Tupikov V. I. *Radiacionnaya stojkost' organicheskikh materialov* [Radiation resistance of organic materials]. Moscow, Energoatomizdat, 1986, 271 p. (In Russian)
- [4] Mohammadi H., Morovati V., Korayem A.-E., Poshtan E., Dargazany R. Constitutive modeling of elastomers during photo- and thermo-oxidative aging // Polymer Degradation and Stability, 2021, vol. 191. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109663.
- [5] Mikhailov M. M., Goronchko V. A. *Radiacionno stojkij polipropilen* [Radiation-resistant polypropylene]. Patent RU 2767524, 2021, bulletin no. 8.
- [6] Mikhailov M. M., Lebedev S. M., Sokolovskiy A. N., Goronchko V. A. Investigation of radiation stability of optical properties of polypropylene modified with ZrO<sub>2</sub> nanoparticles // Polymer Composites, 2019, vol. 40, issue 8, pp. 3050–3055. doi: 10.1002/pc.25148.
- [7] Nalwa H. S. *Nanostructured Materials and Nanotechnology*. USA, 2002.
- [8] Mikhailov M. M., Neshchimenko V. V., Yuryev S. A., Grigorevsky A. V., Lovitskiy A. A., Vashchenkov I. S. On the Radiation Stability of BaSO<sub>4</sub> Pigment Modified with SiO<sub>2</sub> Nanoparticles and Applied for Spacecraft Thermal Control Coatings // Defect and Diffusion Forum, 2018, vol. 386, pp. 277–282. doi: 10.4028/www.scientific.net/ddf.386.277.
- [9] Kositsyn L. G., Duoretskii M. I., Kuznetsov N. Ya., Mikhailov M. M. Apparatus for study of diffuse-reflection and luminescence spectra of solids in vacuum // Instruments and experimental techniques, 1985, vol. 28, issue 4, pp. 929–932.
- [10] Pakhomova S., Zhdanov I., van Bavel B. Polymer Type Identification of Marine Plastic Litter Using a Miniature Near-Infrared Spectrometer (MicroNIR) // Applied Sciences, 2020, no. 10 (23). doi: 10.3390/app10238707.
- [11] Mizushima M., Kawamura T., Takahashi K., Nitta K. In situ near-infrared spectroscopic studies of the structural changes of polyethylene during melting // Polym J., 2012, vol. 44, pp. 162–166. doi: 10.1038/pj.2011.100.
- [12] Huang J. B., Zeng G. S., Li X. S., Cheng X. C., Tong H. Theoretical studies on bond dissociation enthalpies for model compounds of typical plastic polymers // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, vol. 167. doi: 10.1088/1755-1315/167/1/012029.
- [13] Tyapkova O., Czerny M., Buettner A. Characterisation of flavour compounds formed by  $\gamma$ -irradiation of polypropylene // Polymer Degradation and Stability, 2009, vol. 94, issue 5, pp. 757–769. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2009.02.006.
- [14] Mikhailov M. M. Recording of carbon clusters and  $(-CH_2)_n$  radicals in a vacuum at the site of irradiation (in situ) of polyethylene // Polymer Degradation and Stability, 2021, vol. 191. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109682.
- [15] ASTM E490-00a. Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables. USA : ASTM International, 2019.

- [16] ASTM E903–96. Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. USA : ASTM International, 2012.

### Сведения об авторах

*Горончко Владимир Александрович* – младший научный сотрудник лаборатории радиационного и космического материаловедения ТУСУР, аспирант кафедры ЭП ТУСУР. Окончил магистратуру в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники с отличием в 2018 году. Область научных интересов: физика и химия поверхности, оптика, радиационная физика твердого тела, космическое материаловедение.

ORCID: 0000-0002-1033-3912

*Михайлов Михаил Михайлович* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией радиационного и космического материаловедения ТУСУР. В 1986 году защитил докторскую диссертацию в Московском институте электронной техники. Область научных интересов: физика и химия поверхности, оптика, радиационная физика твердого тела, космическое материаловедение.

ORCID: 0000-0003-0657-1122