

## Аспекты направленного синтеза углеродных нанотрубок для создания иерархических радиопоглощающих композитных материалов

Александр В. Щегольков	<sup>1</sup>	Energynano@yandex.ru
Алексей В. Щегольков	<sup>1</sup>	alex5000@mail.ru
Иван Д. Парфимович	<sup>2</sup>	parfimovich@bsu.by
Елена А. Буракова	<sup>1</sup>	elenburakova@yandex.ru.
Александр В. Кобелев	<sup>1</sup>	kobelev77@rambler.ru
Татьяна П. Дьячкова	<sup>1</sup>	mashtatpetr@mail.ru

<sup>1</sup> Тамбовский государственный технический университет улица Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ», ул. Курчатова 7, г. Минск, 220045, Беларусь

**Аннотация.** Проведённый информационный обзор показал, что существуют различные типы радиопоглощающих материалов. Расширение рабочего диапазона волн для радиопоглощающих композитов возможно за счет совместного применения проводящих наполнителей, характеризующихся различными магнитными и диэлектрическими характеристиками и величиной электропроводности. Как правило, рост эффективности радиопоглощения материалов связан с увеличением концентрации в них металлических наполнителей, в результате чего пропорционально увеличиваются массогабаритные параметры. Избежать этого позволяет применение углеродных наноматериалов, которые обладают способностью создавать самоорганизующиеся иерархические структуры в объеме композита. Варьирование состава каталитических систем CVD-процесса позволяет вести направленный синтез углеродных наноматериалов с необходимыми морфологическими характеристиками. Для оценки влияния состава катализатора на морфологию и структуру синтезируемых УНТ были выбраны 3 состава Ni/MgO катализатора с различным содержанием активного компонента (Ni). Эффективность полученных катализаторов определяли по удельному выходу УНТ (гC/гкат). Морфологию и структуру катализаторов и синтезированных УНТ изучали посредством сканирующей электронной микроскопии. Применение катализатора на основе никеля обеспечивает материалу магнитные свойства. Диаметр углеродных нитевидных образований, синтезированных на Ni/0,16MgO и Ni/0,3MgO катализаторах, составляет ~30÷60 нм. Система Ni/0,5MgO характеризуется низкой продуктивностью по одномерным наноструктурам, образец после CVD-процесса содержит большое количество неструктурированных форм углерода и неизменного катализатора. Структурное разнообразие в углеродных наноматериалах позволяет получить на их основе эффективную иерархическую структуру в радиопоглощающем композите.

**Ключевые слова:** радиопоглощающие материалы, углеродные нанотрубки, электромагнитное излучение, синтез.

## Aspects of the directional synthesis of carbon nanotubes to create hierarchical radio-absorbing composite materials

Alexandr V. Shchegolkov	<sup>1</sup>	Energynano@yandex.ru
Aleksei V. Shchegolkov	<sup>1</sup>	alex5000@mail.ru
Ivan D. Parafimovich	<sup>2</sup>	parfimovich@bsu.by
Elena A. Burakova	<sup>1</sup>	elenburakova@yandex.ru.
Alexander V. Kobelev	<sup>1</sup>	kobelev77@rambler.ru
Tatyana P. Dyachkova	<sup>1</sup>	mashtatpetr@mail.ru

<sup>1</sup> Tambov State Technical University Sovetskaya street, 106, Tambov, 392000, Russia

<sup>2</sup> Research Institution "Institute of Applied Physical Problems named after A.N. Sevchenko BSU", st. Kurchatov 7, Minsk, 220045, Belarus

**Abstract.** The conducted information review showed that there are various types of radio absorbing materials. The expansion of the working wavelength range for radio-absorbing composites is possible due to the combined use of conductive fillers, characterized by different magnetic and dielectric characteristics and the value of electrical conductivity. As a rule, the increase in the efficiency of radio absorption of materials is associated with an increase in the concentration of metal fillers in them, as a result of which the weight and size parameters increase proportionally. To avoid this, the use of carbon nanomaterials, which have the ability to create self-

Для цитирования

Щегольков А.В., Щегольков А.В., Парфимович И.Д., Буракова Е.А., Кобелев А.В., Дьячкова Т.П. Аспекты направленного синтеза углеродных нанотрубок для создания иерархических радиопоглощающих композитных материалов // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 4. С. 337–343. doi:10.20914/2310-1202-2018-4-337-343

For citation

Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Parfimovich I.D., Burakova E.A., Kobelev A.V., Dyachkova T.P. Aspects of the directional synthesis of carbon nanotubes to create hierarchical radio-absorbing composite materials. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 4. pp. 337–343. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-4-337-343

organizing hierarchical structures in the bulk of the composite, allows. Varying the composition of the catalytic systems of the CVD process allows directional synthesis of carbon nanomaterials with the necessary morphological characteristics. To assess the effect of the composition of the catalyst on the morphology and structure of the synthesized CNTs, 3 Ni / MgO catalyst compositions with different contents of the active component (Ni) were selected. The effectiveness of the obtained catalysts was determined by the specific yield of CNTs (gC/gkat). The morphology and structure of the catalysts and the synthesized CNTs were studied by means of scanning by transmission electron microscopy. The use of a nickel-based catalyst provides the material with magnetic properties. The diameter of carbon filiform formations synthesized on Ni/0.16MgO and Ni / 0.3MgO catalysts is  $\sim 30 \div 60$  nm. The Ni/0.5MgO system is characterized by low productivity in one-dimensional nanostructures; the sample after the CVD process contains a large number of unstructured forms of carbon and an unchanged catalyst. Structural diversity in carbon nanomaterials allows to obtain on their basis an effective hierarchical structure in the radio absorbing composite..

**Keywords:** radar absorbing materials, carbon nanotubes, electromagnetic radiation, synthesis.

## Введение

Создание нового поколения радиопоглощающих материалов является важным направлением развития современной техники. Радиопоглощающие материалы находят применение в авиакосмической, электротехнической и военной сфере. Диапазон частот приборов, которые требуют использования радиопоглощающих материалов, постоянно увеличивается [1–4]. В связи с этим растут требования к таким материалам по диапазону рабочих частот при сохранении массогабаритных параметров.

Экспериментальные и теоретические исследования последних лет показывают, что улучшение характеристик радиопоглощающих покрытий может быть достигнуто путем создания новых композиционных материалов с использованием наночастиц. Так, в работе Д.О. Смирнова [1] показано, что введение в состав композиционного материала углеродных нанотрубок (УНТ) приводит к увеличению значения поглощения на 15 дБ или приблизительно в 30 раз (при добавке УНТ в количестве 1% масс.). При этом также наблюдается увеличение действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости полученного композита и тангенса угла диэлектрических потерь.

В последние несколько лет большое внимание уделяют функциональным материалам с иерархической архитектурой, т. к. именно многоуровневая организация структуры материала позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики [2]. Иерархические композиты в зависимости от своей природы могут отражать или пропускать ЭМИ. Эта способность может быть использована для создания экранирующих и поглощающих ЭМИ (в частности, радиоволны) устройств. С целью получения слабоотражающих поглотителей могут использоваться материалы с низкими значениями диэлектрической и магнитной проницаемости. Это свойство используется для согласования импеданса свободного пространства и внешнего

слоя поглотителя [5]. Авторы работ [6, 7] установили, что материал, обеспечивающий наименьший коэффициент отражения ( $K_{отр}$ ) электромагнитной волны, должен обладать одновременно магнитными и диэлектрическими характеристиками. Для того, чтобы выполнялось равенство  $K_{отр} = 0$ , необходимым условием является равенство  $\epsilon' = \mu'$ , где  $\epsilon'$  и  $\mu'$  – действительные части диэлектрической и магнитной проницаемости материала [6, 7].

Таким образом, с целью получения радиопоглощающего материала, обладающего одновременно магнитными и диэлектрическими свойствами, следует использовать технологию получения иерархического композиционного материала. Из [6] следует, что наиболее эффективными для работы при заданной частоте являются частицы наполнителя размером от  $\lambda/4$  до  $\lambda/2$ .

При этом толщина материала также играет важное значение для обеспечения эффективного радиопоглощения. В [7] показано, что эффективными радиопоглощающими свойствами при прочих равных условиях будет обладать материал толщиной порядка  $\lambda/20$ , где  $\lambda$  – длина волны поглощаемого излучения.

В настоящее время существуют иерархические (многослойные) радиопоглощающие композиционные материалы на основе полимерной матрицы с хорошей диэлектрической проницаемостью, но имеющие узкий диапазон рабочих частот. Этот недостаток обусловлен особенностями наполнителя композита. Каждый наполнитель или модификатор имеет свою резонансную частоту, при которой радиопоглощение будет наиболее эффективным. Введение большого количества наполнителей для расширения рабочего диапазона нецелесообразно из-за удорожания полученного композита. Для создания нового типа композиционного материала с уменьшенными массогабаритными параметрами в качестве наполнителя можно применять углеродные наноструктурные материалы (фуллерен, нанотрубки, графен и др.), что частично подтверждается в [1]. Разработка

и создание нанокompозитов в настоящее время является одним из актуальных направлений научных и прикладных исследований. Благодаря модифицированию можно создать материалы на основе полимерных матриц, обладающие устойчивостью к механическим воздействиям [8], эрозионному износу [9], а при введении углеродных наноструктур – высокой электропроводностью [10, 11].

При этом известно, что углеродные нанотрубки характеризуются большим многообразием морфологических и геометрических параметров, могут иметь разное количество слоев, отличающихся по форме (цилиндрические и конические) и типу проводимости (металлическая, полупроводниковая). В зависимости от условий получения УНТ могут быть пригодными или непригодными для использования в составе поглощающих ЭМИ композитов, также различной может быть эффективность.

**Цель работы** – направленный синтез углеродных нанотрубок для модификации композиционных материалов с радиопоглощающими свойствами на основе полимерных матриц и характеристика их свойств.

#### Материалы и методы

Синтез УНТ осуществлялся на Ni/MgO каталитической системе, полученной методом термического разложения. Исходные компоненты ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , аминокислотная кислота квалификации «хч») растворяли в воде при 50–60 °С. Полученный предкатализатор подвергали термической обработке в муфельной печи «СНОЛ» в течение 30 мин при 500 °С. CVD-синтез УНТ осуществлялся в полупромышленном реакторе периодического действия в течение 40 мин при 650 °С. В качестве углеродсодержащего сырья использовали пропан-бутановую смесь.

Для оценки влияния состава катализатора на морфологию и структуру синтезируемых УНТ были выбраны 3 состава Ni/MgO катализатора с различным содержанием активного компонента (Ni). Эффективность полученных катализаторов определяли по удельному выходу УНТ (гС/гкат). Морфологию и структуру катализаторов и синтезированных УНТ изучали посредством сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (просвечивающий электронный микроскоп Hitachi H-800).

Спектры комбинационного рассеяния (КР) образцов получены на рамановском микроскопе DXR Raman Microscope (Thermo Scientific) при длине волны возбуждающего лазера 532 нм.

В качестве полимерной матрицы для получения композита с иерархической структурой использован полиуретан (двухкомпонентный полиуретановый компаунд Силагерм (ТУ 2513-006-01296014-2015). Методика введения УНТ в полиуретан включала следующие стадии:

1) получение смеси УНТ, синтезированных на каталитических системах разного состава в равных пропорциях. Массы УНТ, добавляемых в полиуретан, рассчитывались по формуле

$$\text{МП-УНТ} = \frac{(\text{МП} \cdot \text{СУНТ})}{(100 - \text{СУНТ})},$$

где МП-УНТ – масса УНТ; МП – масса чистого полиуретанового образца (компонент А + компонент Б); СУНТ – требуемая концентрация УНТ в мас.%;

2) добавление навески УНТ в компонент А небольшими порциями при постоянном перемешивании в течение 5 мин;

3) после диспергирования УНТ к компоненту А добавлялся компонент Б так, чтобы соотношение объемов компонента А (без учета УНТ) и компонента Б составляло  $\approx 1/1$ ; затем композиция перемешивалась в течение 10 мин;

4) при застывании полиуретанового композита на него воздействовали магнитным полем от неодимовых магнитов с магнитной индукцией 2000 мТл в течение 1 мин.

5) сополимеризация нанокompозита в вакуумном шкафу при температуре 70 °С в течение 5 ч.

Для определения эффектов взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с композитными материалами (прохождение, отражение, поглощение ЭМИ) использовался скалярный анализатор цепей, построенный на основе генератора качающейся частоты, прямоугольного волноводного измерительного тракта, блока анализатора и системы обработки сигналов. Подробное описание установки можно найти в работе [12]. Измерения проводились в четырех диапазонах частот: 8–12; 12–18; 18–26 и 26–40 ГГц. Исследуемые образцы композитов вырезались в форме параллелепипеда с размерами (в мм)  $23 \times 10 \times 2$ ;  $16 \times 8 \times 2$ ;  $11 \times 5,5 \times 2$ ;  $7,2 \times 3,4 \times 2$ . Размер исследуемых композитных материалов жестко связан с размерами канала волновода, который определяет частотный диапазон измерений. В качестве выходных данных выступали S-параметры пропускания S21 и отражения S11. Коэффициенты пропускания, отражения и поглощения рассчитывались по формулам:

$$K_{\text{прох}} = (S21)^2,$$

$$K_{\text{отр}} = (S11)^2,$$

$$K_{\text{погл}} = 1 - (S21)^2 - (S11)^2.$$

Исследование распределения температурного поля модифицированных полиуретановых композитов проводилось с помощью тепловизора Flir 9. Обработка тепловизионных снимков проводилась с помощью программы SmartView 3.14.

### Результаты и обсуждение

Для синтеза УНТ были получены три Ni/MgO каталитические системы, отличающиеся содержанием активного компонента: Ni<sub>0,16</sub> MgO; Ni<sub>0,3</sub> MgO; Ni<sub>0,5</sub> MgO.

Ni/MgO-катализаторы, содержащие более 50% активного компонента, имеют кораллообразную структуру (рисунок 1, а), которая не сохраняется при уменьшении доли Ni (рисунок 1, б).

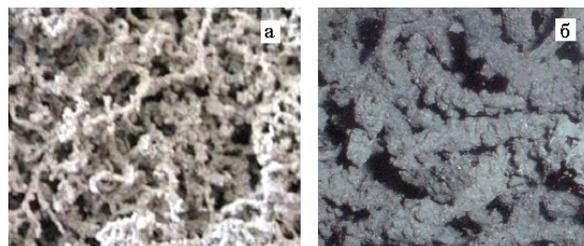


Рисунок 1. Структура Ni/MgO катализатора при содержании активного компонента: а – более 50%; б – менее 50%

Figure 1. Structure Or/MgO Catalyst in the content of the active component: а – More than 50%; б – Less than 50%

Изображения углеродных наноструктур, синтезированных на данных катализаторах, представлены на рисунке 2.

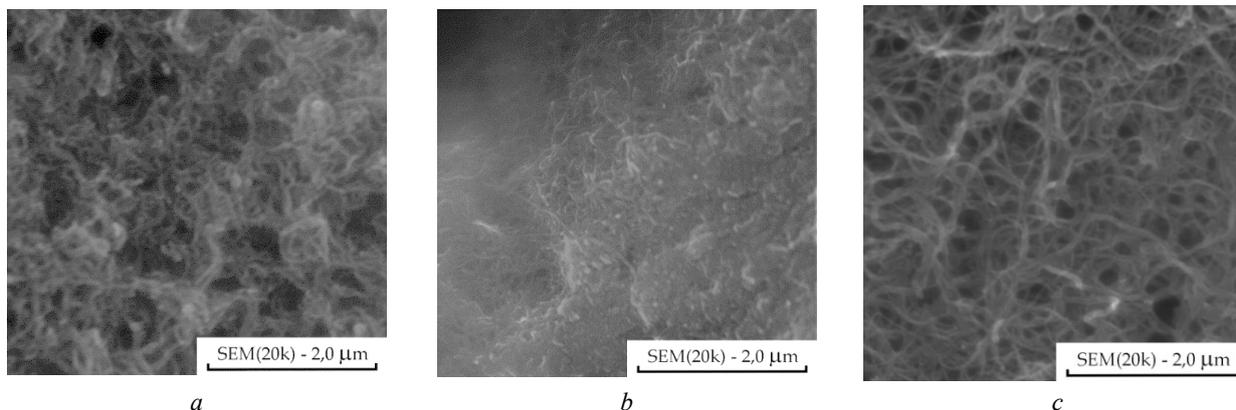


Рисунок 2. СЭМ-изображения углеродных наноструктур, синтезированных на катализаторе: а – Ni<sub>0,3</sub> MgO; б – Ni<sub>0,5</sub> MgO; с – Ni<sub>0,16</sub> MgO

Figure 2. Sam-Images of carbon nanostructures synthesized on the catalyst: а – Or<sub>0,3</sub> MgO; б – Or<sub>0,5</sub> MgO; с – Or<sub>0,16</sub> MgO

Все синтезированные образцы состоят, главным образом, из нитевидных образований (нанотрубок). Наиболее четкую и упорядоченную структуру имеют материалы, синтезированные на Ni<sub>0,3</sub> MgO и Ni<sub>0,16</sub> MgO катализаторах. Диаметр углеродных нитевидных образований,

синтезированных на Ni<sub>0,16</sub> MgO и Ni<sub>0,3</sub> MgO катализаторах, составляет ~30÷60 нм. В образце, полученном на Ni<sub>0,5</sub> MgO каталитической системе, помимо нанотрубок содержится значительное количество не подвергшегося изменениям катализатора.

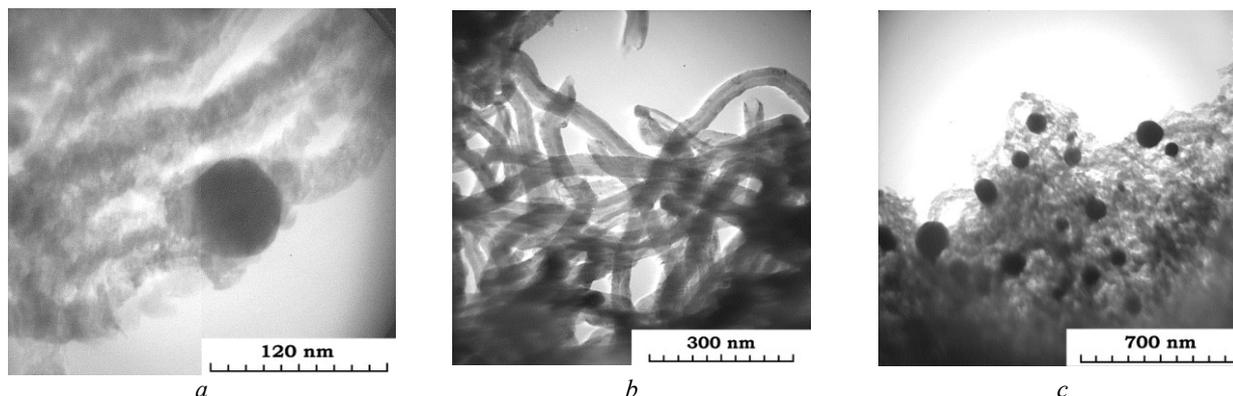


Рисунок 3. ПЭМ-изображения образцов, синтезированных на катализаторе: а – Ni<sub>0,3</sub> MgO; б – Ni<sub>0,5</sub> MgO; с – Ni<sub>0,16</sub> MgO

Figure 3. Pam-images of samples synthesized on the catalyst: а – Or<sub>0,3</sub> MgO; б – Or<sub>0,5</sub> MgO; с – Or<sub>0,16</sub> MgO

Анализ ПЭМ-изображений синтезированных образцов (рисунок 3) подтверждает ранее высказанное предположение о том, что нитевидные образования представляют собой

многослойные углеродные нанотрубки диаметром ~ 40 нм, содержащие на своих концах металлические частицы никеля.

Качественная оценка структурной дефектности графеновых слоев синтезированных углеродных наноматериалов осуществлялась с помощью спектров КР (рисунок 4), на которых присутствуют характеристические пики с положением около 1300 (D) и 1600  $\text{cm}^{-1}$  (G). Первый из них указывает на образование  $\text{sp}^3$ -связей при возникновении топологических дефектов в графеновых слоях и наличие частиц аморфного углерода; второй – свидетельствует о присутствии правильных графеновых слоев, состоящих из атомов углерода в состоянии  $\text{sp}^2$ -гибридизации. Значения соотношения интенсивностей пиков D/G для образцов, синтезированных на Ni/0,3 MgO катализаторе, составляют 1,44, на Ni/0,5 MgO – 1,1 и на Ni/0,16 MgO – 1,64. Таким образом, углеродные нанотрубки с наиболее упорядоченной структурой графеновых слоев синтезированы на катализаторе с минимальным содержанием активных частиц.

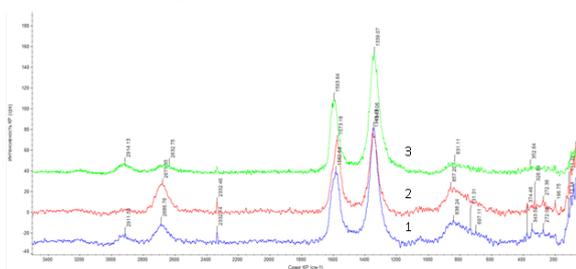


Рисунок 4. Спектры КР образцов, синтезированных на катализаторе: 1 – Ni/0,3 MgO; 2 – Ni/0,5 MgO; 3 – Ni/0,16 MgO

Figure 4. Spectra of the KR samples synthesized on the catalyst: 1 – Or/0,3 MgO; 2 – Or/0,5 MgO; 3 – Or/0,16 MgO

Результаты исследования взаимодействия электромагнитных волн с композитами, содержащими образцы УНТ с различной структурной дефектностью и степенью конверсии, представлены на рисунке 5–6.

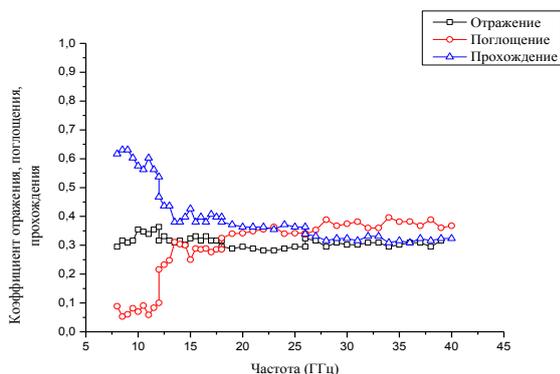


Рисунок 5. Коэффициенты отражения, поглощения, прохождения электромагнитного излучения для композитных материалов на основе полиуретанового компаунда Силагерм с добавками УНТ Ni/0,5 MgO

Figure 5. Factors of reflection, absorption, passing of electromagnetic radiation for composite materials on the basis of the polyurethane compound of silagim with additives of UNT Or/0,5 MgO

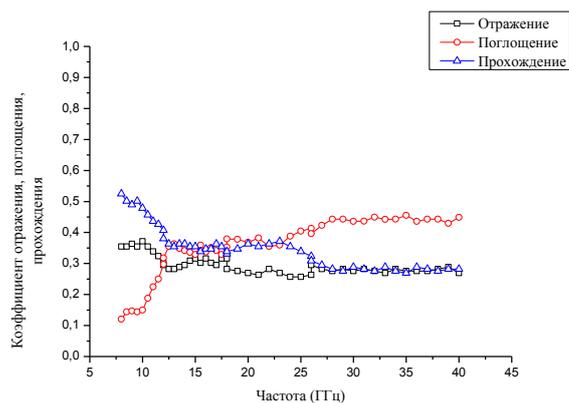


Рисунок 6. Коэффициенты отражения, поглощения, прохождения электромагнитного излучения для композитных материалов на основе полиуретанового компаунда Силагерм с добавками УНТ Ni/0,16 MgO

Figure 6. Factors of reflection, absorption, passing of electromagnetic radiation for composite materials on the basis of the polyurethane compound of silagim with additives of UNT Or/0,16 MgO

Для образцов композитов, содержащих УНТ Ni/0,5 MgO и Ni/0,3 MgO, параметры взаимодействия с электромагнитным полем носят идентичный характер в рамках погрешности. В целом наблюдается линейная зависимость коэффициента отражения от частоты для композитов, модифицированных УНТ Ni/0,5 MgO и Ni/0,16 MgO. Для композитов, полученных на основе УНТ Ni/0,5 MgO и Ni/0,16 MgO, значение коэффициента отражения практически не зависит от частоты и составляет ~30–35% в диапазоне от 8 до 40 ГГц. Значения коэффициентов прохождения для первой и второй системы монотонно убывают от 65 до 35% и от 55 до 35% соответственно в исследуемом диапазоне частот.

Композиты, содержащие УНТ Ni/0,5 MgO и Ni/0,16 MgO, позволяют добиться более низких значений коэффициента отражения и независимости коэффициента отражения от роста частоты. Таким образом, нет прямой корреляции между способностью полимерных композитов к отражению ЭМИ и структурной дефектностью графеновых слоев, использованных в качестве модификаторов УНТ, а также степенью конверсии активных частиц металлоокисного катализатора.

Распределения профилей температурного поля под действием неодимового магнита для полиуретановых композитов, содержащих в качестве наполнителя только один из видов синтезированных УНТ, представлены на рисунке 7.

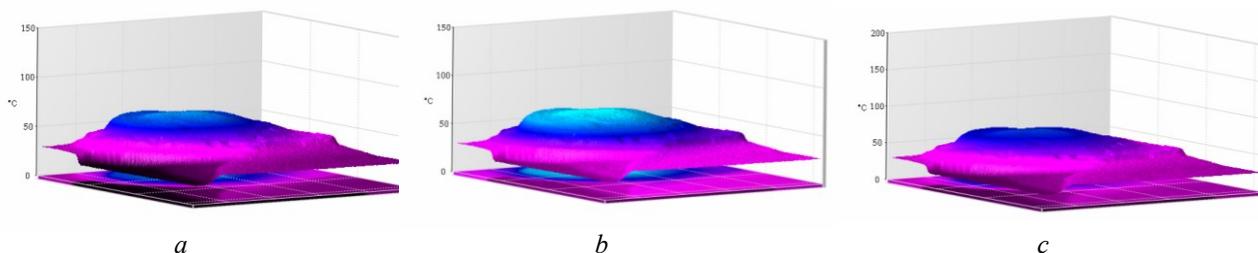


Рисунок 7. 3D-термограммы в процессе полимеризации модифицированного полиуретанового композита, содержащего (сколько масс. %) углеродных нанотрубок, синтезированных на катализаторе: *a* – Ni<sub>0,5</sub> MgO; *b* – Ni<sub>0,5</sub> MgO; *c* – Ni<sub>0,16</sub> MgO

Figure 7. 3D-Thermograms in the process of polymerization of the modified polyurethane composite containing (How many masses. %) Carbon nanotubes synthesized on the catalyst: *a* – Or<sub>0,5</sub> MgO; *b* – Or<sub>0,5</sub> MgO; *c* – Or<sub>0,16</sub> MgO

На рисунке 8 представлено распределение температурного поля при введении в полиуретан равной пропорции трех различных УНТ, полученных на Ni<sub>0,5</sub> MgO, Ni<sub>0,5</sub> MgO и Ni<sub>0,16</sub> MgO.

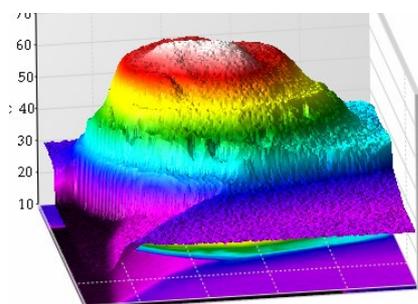


Рисунок 8. 3D-термограмма в процессе полимеризации полиуретанового композита, модифицированного смесью УНТ (по ск. масс.%), синтезированных на Ni<sub>0,5</sub> MgO, Ni<sub>0,5</sub> MgO и Ni<sub>0,16</sub> MgO

Figure 8. 3D-Thermogram in the process of polymerization of polyurethane composite, modified by the mixture of UNT (by SK. Mass%) Synthesized on Or<sub>0,5</sub> MgO, Or<sub>0,5</sub> MgO And Or<sub>0,16</sub> MgO

Разный цвет слоев соответствует своему уровню УНТ. УНТ в полиуретановой матрице выстраиваются в соответствии с тем типом катализатора, на основе которого они получены.

Таким образом, применение в составе полимерного композита смеси УНТ способствует формированию иерархической структуры в полиуретановой матрице.

### Заключение

Разработанная методика направленного синтеза углеродных наноматериалов позволяет

### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Смирнов Д.О. Композиционные радиопоглощающие материалы на основе ферри-магнитных соединений. Москва, 2009. 176 с.
- 2 Abrashova E.V., Gracheva I.E., Moshnikov V.A. Functional nanomaterials based on metal oxides with hierarchical structure // Journal of Physics: Conference Series. 2013. V. 461. № 1. P. 012019. doi: 10.1088/1742-6596/461/1/012019
- 3 Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. М.: Наука, 1982. 164 с.
- 4 Богородицкий Н.П. Электротехнические материалы. Л.: Энергия, 1977. 352 с.

получить материалы с разнообразными морфологическими параметрами. Применение катализатора на основе никеля обеспечивает материалу магнитные свойства. Диаметр углеродных нитевидных образований, синтезированных на Ni<sub>0,16</sub> MgO и Ni<sub>0,3</sub> MgO катализаторах, ~30÷60 нм. В образце, полученном на Ni<sub>0,5</sub> MgO каталитической системе, помимо нитевидных образований присутствует много непрореагировавшего катализатора. Структурное разнообразие УНТ может способствовать созданию эффективной иерархической структуры в радиопоглощающем композите. Для образцов композитов, содержащих УНТ Ni<sub>0,5</sub> MgO и Ni<sub>0,3</sub> MgO, параметры взаимодействия с электромагнитным полем носят идентичный характер в рамках погрешности. В целом наблюдается линейная зависимость коэффициента отражения от частоты для композитов, модифицированных УНТ Ni<sub>0,5</sub> MgO и Ni<sub>0,16</sub> MgO. Для композитов, полученных на основе УНТ Ni<sub>0,5</sub> MgO и Ni<sub>0,16</sub> MgO, значение коэффициента отражения практически не зависит от частоты и составляет ~30–35% в диапазоне от 8 до 40 ГГц. Значения коэффициентов прохождения для первой и второй системы монотонно убывают от 65 до 35% и от 55 до 35% соответственно в исследуемом диапазоне частот.

### Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-53-00032 Бел\_a.

- 5 Б.М. Тареев, Н.В. Коротков, В.М. Петров и др. Электрорадиоматериалы. М.: Высшая школа, 1976. 336 с.
- 6 Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. М.: Советское радио, 1962, 243 с.
- 7 Розанов. Н. Фундаментальное ограничение для ширины рабочего диапазона радиопоглощающих покрытий // Радиотехника и электроника. 1999. Т.44, № 5. С. 526–530.
- 8 Gao J., Li Ch., Shilpakar U., Shen Y. Improvements of mechanical properties in dissimilar joints of HDPE and ABS via carbon nanotubes during friction stir welding process // Materials and Design. 2015. V. 86. P. 289–296. doi: 10.1016/j.matdes.2015.07.095

9 Chen J., Hutchings I.M., Deng T., Bradley M.S.A. et al. The effect of carbon nanotube orientation on erosive wear resistance of CNT-epoxy based composites // Carbon. 2014. V. 73. P. 421–431. doi: 10.1016/j.carbon.2014.02.083

10 Al-Saleh M.H., Al-Anid H.K., Hussain Y.A. CNT/ABS nanocomposites by solution processing: Proper dispersion and selective localization for low percolation threshold // Composites: Part A. 2013. V. 46. P. 53–59. doi: 10.1016/j.compositesa.2012.10.010

11 Bauhofer W., Kovacs J.Z. A Review and Analysis of Electrical Percolation in Carbon Nanotube Polymer Composites // Composites Science and Technology. 2009. V. 69. P. 1486–1498. doi: 10.1016/j.compscitech.2008.06.018

12 Bychanok D., Gorokhov G., Meisak D., Plyushch A. et al. Exploring Carbon Nanotubes/BaTiO<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposites as Microwave Absorbers // Progress In Electromagnetics Research C. 2016. V. 66. P. 77–85. doi:10.2528/PIERC16051106

#### REFERENCES

1 Smirnov D.O. Kompozitsionnye radiopogloshchayushchie materialy na osnove ferrimagnitnykh soedinenij [Composite radio-absorbing materials on the basis of ferrimagnetic compounds]. Moscow, 2009. 176 p. (in Russian).

2 Abrashova E.V., Gracheva I.E., Moshnikov V.A. Functional nanomaterials based on metal oxides with hierarchical structure. Journal of Physics: Conference Series. 2013. vol. 461. no. 1. pp. 012019. doi: 10.1088/1742-6596/461/1/012019

3 Kovneristiy Yu.K., Lazareva I.Yu., Ravaev A.A. Materialy, pogloshchayushchie SVCh-izlucheniya. [Materials absorbing microwave radiation]. Moscow, Nauka, 1982. 164 p. (in Russian).

4 Bogoroditsky N.P. Ehlektrotehnicheskie materialy [Electrotechnical materials]. Leningrad, Energy, 1977. 352 p. (in Russian).

5 Tareev B.M., Korotkov N.V., Petrov V.M. et al. Ehlektromaterialy [Electromaterials]. Moscow, Higher School, 1976. 336 p. (in Russian).

6 Ufimtsev P.Ya. Metod kraevykh voln v fizicheskoy teorii difrakcii [Edge wave method in the physical theory of diffraction]. Moscow, Soviet radio, 1962. 243 p. (in Russian).

7 Rozanov N. Fundamental restriction for the width of the working range of radio-absorbing coatings. Radiotekhnika i ehlektronika [Radio Engineering and Electronics]. 1999. vol. 44. no. 5. pp. 526–530. (in Russian).

8 Gao J., Li Ch., Shilpakar U., Shen Y. Improvements of mechanical properties in dissimilar joints of HDPE and ABS via carbon nanotubes during friction stir welding process. Materials and Design. 2015. vol. 86. pp. 289–296. doi: 10.1016/j.matdes.2015.07.095

9 Chen J., Hutchings I.M., Deng T., Bradley M.S.A. et al. The effect of carbon nanotube orientation on erosive wear resistance of CNT-epoxy based composites. Carbon. 2014. vol. 73. pp. 421–431. doi: 10.1016/j.carbon.2014.02.083

10 Al-Saleh M.H., Al-Anid H.K., Hussain Y.A. CNT/ABS nanocomposites by solution processing: Proper dispersion and selective localization for low percolation threshold. Composites: Part A. 2013. vol. 46. pp. 53–59. doi: 10.1016/j.compositesa.2012.10.010

11 Bauhofer W., Kovacs J.Z. A Review and Analysis of Electrical Percolation in Carbon Nanotube Polymer Composites. Composites Science and Technology. 2009. vol. 69. pp. 1486–1498. doi: 10.1016/j.compscitech.2008.06.018

12 Bychanok D., Gorokhov G., Meisak D., Plyushch A. et al. Exploring Carbon Nanotubes/BaTiO<sub>3</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposites as Microwave Absorbers. Progress In Electromagnetics Research C. 2016. vol. 66. pp. 77–85. doi:10.2528/PIERC16051106

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Александр В. Щегольков** к.т.н., доцент, кафедра техники и технологии производства нанопродуктов, Тамбовский государственный технический университет, улица Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия, Energynano@yandex.ru

**Алексей В. Щегольков** аспирант, кафедра техники и технологии производства нанопродуктов, Тамбовский государственный технический университет, улица Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия, alexxx5000@mail.ru

**Иван Д. Парфимович** младший научный сотрудник, лаборатория элионики, Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» БГУ, Курчатова, 7, г. Минск, 220045, Беларусь, parfimovich@bsu.by

**Елена А. Буракова** к.т.н., доцент, кафедра техники и технологии производства нанопродуктов, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия, elenburakova@yandex.ru

**Александр В. Кобелев** к.т.н., доцент, кафедра электроэнергетики, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия, kobelev77@rambler.ru

**Татьяна П. Дьячкова** д.х.н., профессор, кафедра техники и технологии производства нанопродуктов, Тамбовский государственный технический университет, улица Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия, mashtatpetr@mail.ru

#### КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 28.09.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 02.11.2018

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Alexandr V. Shchegolkov** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, department of technique and production technology of nanoproducts, Tambov State Technical University, Technical University, Sovetskaya str., 106., Energynano@yandex.ru

**Aleksei V. Shchegolkov** graduate student, department of technique and production technology of nanoproducts, Tambov State Technical University, Technical University, Sovetskaya, 106, alexxx5000@mail.ru

**Ivan D. Parafimovich** junior researcher, laboratoty of elioniks, A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarussian State University, Kurchatova Av., 7, 220045, Belarus, parfimovich@bsu.by

**Elena A. Burakova** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, department of technique and production technology of nanoproducts, Tambov State Technical University, Sovetskaya, 106, Tambov, 392000, Russia, elenburakova@yandex.ru

**Alexander V. Kobelev** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, department of electrical power engineering, Tambov State Technical University, Sovetskaya str., 106, Tambov, 392000, Russia, kobelev77@rambler.ru

**Tatyana P. Dyachkova** Dr. Sci. (Chem.), professor, department of technique and production technology of nanoproducts, Tambov State Technical University, Sovetskaya str., 106, Tambov, 392000, Russia, mashtatpetr@mail.ru

#### CONTRIBUTION

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

#### CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 9.28.2018

ACCEPTED 11.2.2018