

## ФОРМИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИИ

Ю.А. Хан, Т.П. Дьячкова, Е.А. Буракова, А.А. Сухинин, Г.А. Титов, А.А. Дегтярев

Юлиан Александрович Хан (ORCID0000-0002-1813-5689)\*, Татьяна Петровна Дьячкова (ORCID0000-0002-4884-5171), Елена Анатольевна Буракова (ORCID 0000-0001-8927-7433), Александр Алексеевич Сухинин (ORCID 0009-0009-9632-0992), Георгий Анатольевич Титов (ORCID 0000-0002-3930-0559), Андрей Александрович Дегтярев (ORCID 0000-0003-3690-4565)

Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, Тамбов, Российская Федерация, 392000

E-mail: khantermail@gmail.com\*, dyachkova\_tp@mail.ru, elenburakova@yandex.ru, suhinin396@yandex.ru, bombercd1@mail.ru, ad.dycost@gmail.com

*Исследованы закономерности процесса формирования гибридных частиц при совмещении цилиндрических и конических углеродных нанотрубок (УНТ) с графеновыми материалами – оксидом графена (ОГ) и графеновыми нанопластинками (ГНП) в различных массовых соотношениях от 1:1 до 1:4. На начальном этапе УНТ вводились в водные суспензии графеновых материалов, полученные смеси подвергались ультразвуковой обработке, а затем лиофильной сушке. Анализировалось изменение состояния системы на каждом этапе обработки. Размеры частиц в водных дисперсиях определялись методом динамического рассеяния света. Для характеристики высушенных образцов использовались методы спектроскопии комбинационного рассеяния и рентгенофазового анализа. Показано, что оксид графена стабилизирует водные суспензии УНТ, и при соотношении УНТ:ОГ, равном 1:4, независимо от типа нанотрубок, в системах присутствуют только мелкие частицы дисперсной фазы со средними эффективными размерами около 20 нм. ГНП слабо взаимодействуют с цилиндрическими УНТ, но способствуют более равномерному диспергированию конических УНТ. По данным спектроскопии КР, типы дефектов структуры гибридных материалов определяются составом и соотношением исходных углеродных наноструктур, планарные размеры формирующихся частиц, а также плотность дефектов на их поверхности зависят главным образом от типа графенового компонента. По данным рентгенофазового анализа, материалы УНТ/ГНП отличаются более плотной упаковкой и количеством слоев, чем УНТ/ОГ, независимо от типа и содержания УНТ. Увеличение доли УНТ способствует изменению размеров кристаллитов в плоскости и их высоты. Конические УНТ в большей степени способствуют изменению параметров гибридных систем УНТ/ГНП, а цилиндрические УНТ сильнее влияют на характеристики материалов УНТ/ОГ.*

**Ключевые слова:** углеродные нанотрубки, оксид графена, графеновые нанопластинки, гибридные частицы

## FORMATION OF HYBRID PARTICLES IN THE INTERACTION OF DIFFERENT CARBON NANOSTRUCTURES

Yu.A. Khan, T.P. Dyachkova, E.A. Burakova, A.A. Sukhinin, G.A. Titov, A.A. Degtyarev

Yulian A. Khan (ORCID 0000-0002-1813-5689) \*, Tatyana P. Dyachkova (ORCID 0000-0002-4884-5171), Elena A. Burakova (ORCID 0000-0001-8927-7433), Aleksandr A. Sukhinin (ORCID 0009-0009-9632-0992), Georgy A. Titov (ORCID 0000-0002-3930-0559), Andrey A. Degtyarev (ORCID 0000-0003-3690-4565)

Tambov State Technical University, Sovetskaya st., 106, Tambov, 392000, Russia

E-mail: khantermail@gmail.com \*, dyachkova\_tp@mail.ru, elenburakova@yandex.ru, suhinin396@yandex.ru, bombercd1@mail.ru, ad.dycost@gmail.com

*The regularities of the formation of hybrid particles at the combination of cylindrical and conical carbon nanotubes (CNT) with graphene materials - graphene oxide (GO) and graphene nanoplates (GNP) in different mass ratios from 1:1 to 1:4 were studied. At the initial stage CNT were introduced into the aqueous suspensions of graphene materials. The obtained mixtures were subjected to ultrasonic treatment, and then lyophilic drying. The change in the state of the system at each stage of processing was analyzed. The particle sizes in the aqueous dispersions were determined by dynamic light scattering. Raman spectroscopy and X-ray phase analysis were used to characterize the dried samples. It is shown that graphene oxide stabilizes aqueous suspensions of CNT, and at a CNT/GO ratio of 1:4, regardless of the nanotube type, only small particles of the dispersed phase with an average effective size of about 20 nm are present in the systems. GNP interact weakly with cylindrical CNTs, but contribute to a more uniform dispersion of conical CNTs. According to the Raman spectroscopy data, the types of defects in the structure of hybrid materials are determined by the composition and the ratio of the initial carbon nanostructures. The planar size of the forming particles, as well as the density of defects on their surface depends mainly on the type of the graphene component. According to the X-ray phase analysis, materials CNT/GNP have a denser packing and number of layers than CNTs/GO regardless of the type and content of CNTs. The increase in the proportion of CNTs contributes to the change in the size of crystallites in the plane and their height. Conical CNTs contribute more to the change in the parameters of CNT/GNP hybrid systems, while cylindrical CNTs have a stronger influence on the characteristics of CNT/GO materials.*

**Key words:** carbon nanotubes, graphene oxide, graphene nanoplates, hybrid particles

**Для цитирования:**

Хан Ю.А., Дьячкова Т.П., Буракова Е.А., Сухинин А.А., Титов Г.А., Дегтярев А.А. Формирование гибридных частиц при взаимодействии углеродных наноструктур различной морфологии. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 10. С. 59–65. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.6907.

**For citation:**

Khan Yu.A., Dyachkova T.P., Burakova E.A., Sukhinin A.A., Titov G.A., Degtyarev A.A. Formation of hybrid particles in the interaction of different carbon nanostructures. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 10. P. 59–65. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.6907.

## ВВЕДЕНИЕ

Углеродные наноструктуры (УНС) представлены многочисленными материалами, обладающими различными морфологическими особенностями и характерными свойствами [1]. Наиболее доступными и распространенными являются УНС на основе графена – углеродные нанотрубки (УНТ), графеновые нанопластины (ГНП), оксид графена (ОГ) и др. Необходимо отметить, что каждый из упомянутых видов УНС представляет собой целый класс отдельных разновидностей. Например, УНТ могут различаться числом и формой графеновых слоев, ГНП и ОГ – также могут состоять из разного количества слоев и содержать разные функциональные группы [2-3].

Ввиду большого разнообразия и набора превосходных характеристик УНС находят широкое применение в электрохимических источниках тока [4, 5], сенсорных устройствах [6], в составе строительных [7] и смазочных материалов [8], в качестве адсорбентов [9, 10] и наполнителей поли-

мерных нанокомпозитов [11-15]. При этом в публикациях последних лет все чаще отмечаются синергетические эффекты, наблюдаемые при совместном применении разных видов УНС, выражающиеся в увеличении показателей механической прочности [16-21], электропроводности [17, 19, 21-23] и теплофизических характеристик [18, 20] по сравнению со значениями, достигаемыми при использовании одного наномодификатора. Данный факт чаще всего объясняют улучшением равномерности распределения УНТ в полимерной матрице в присутствии ГНП или ОГ, однако сведения о влиянии параметров совмещаемых УНС на величину и характер синергетических эффектов весьма малочисленны. В одной из наших предыдущих работ [24] мы установили, что при взаимодействии цилиндрических УНТ с ГНП и ОГ формируются гибридные частицы разного строения, которые могут оказывать положительное действие на свойства эпоксидных композитов.

Целью данного исследования явилось установление закономерностей формирования гибридных

ных частиц при взаимодействии углеродных нанотрубок с конической и цилиндрической формой графеновых слоев и графеновых материалов (оксида графена и графеновых нанопластинок) между собой.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе использованы углеродные нанотрубки и графеновые материалы производства ООО «Нанотехцентр», Тамбов. УНТ «Таунит» и «Таунит-М» с цилиндрической и конической формой графеновых слоев (цУНТ и кУНТ) соответственно получены CVD-методом из пропан-бутановой смеси на каталитических системах Co/Mo/Mg/Al и Ni/Mg/Al. Внешний диаметр УНТ обоих типов составлял 20-40 нм, длина – более 2 мкм.

Оксид графена получен модифицированным методом Хаммерса-Оффемана в виде водной суспензии, содержащей 1 масс.% продукта. По данным производителя, в состав сухого материала входит 40 масс.% кислорода и 2 масс.% серы. Графеновые нанопластины толщиной 6-8 нм, полученные окислительным интеркалированием расширенного графита с последующей ультразвуковой обработкой, состоят из 15-25 графеновых слоев. Размер пластин в плоскости варьирует в диапазоне от 2 до 10 мкм. Материал содержит 10 масс.% кислорода и менее 1 масс.% серы.

Для приготовления гибридных материалов УНТ/ОГ рассчитанные количества цилиндрических или конических нанотрубок добавляли к водной суспензии оксида графена для того, чтобы массовые соотношения исходных компонентов (по сухим материалам) составили 1:1 и 1:4. Полученные смеси подвергали УЗ-обработке на установке ИЛ-10 при 60%-ной мощности излучателя в течение 30 мин, после чего высушивали в лиофилизаторе Scientz-10 N Freeze Dryer (Scientz, Китай), где водная паста замораживалась до температуры минус 25 °С, после чего камера прибора вакуумировалась и происходило сублимационное удаление влаги. Высушенные смеси измельчались с помощью лопастной мельницы «WF-20B» (Китай) в течение 3 мин при частоте вращения лопастей – 25000 об/мин.

Процедура получения частиц УНТ/ГНП была аналогичной с той лишь разницей, что УНТ смешивались с водной пастой ГНП, после чего к полученной смеси добавлялась дистиллированная вода в объеме, необходимом для полноценной УЗ-обработки.

Эффективные размеры частиц дисперсной фазы в водных суспензиях УНТ/ОГ и УНТ/ГНП определялись методом динамического рассеяния света на анализаторе Nicomp 380 ZLS (PSS, США).

Спектры комбинационного рассеяния (КР) образцов регистрировались на приборе DXR Raman Microscope (Thermo Scientific, США) при длине волны 532 нм с апертурой 50 мкм типа «щель».

Рентгеновские дифрактограммы материалов сняты на приборе ARL Equinox 1000 (Thermo Scientific, США) с излучателем мощностью 3 кВт.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Анализ размеров частиц дисперсной фазы в смесях УНТ/ОГ и УНТ/ГНП после ультразвуковой обработки*

В табл. 1 представлены данные об эффективных размерах частиц в водных дисперсиях после озвучивания смесей УНТ с графеновыми компонентами при разных массовых соотношениях (по интенсивности динамического рассеяния).

**Таблица 1**

**Дисперсный состав суспензий, содержащих смеси углеродных нанотрубок и графеновых материалов, после ультразвуковой обработки**  
**Table 1. Disperse composition of suspensions containing mixtures of carbon nanotubes and graphene materials after ultrasonic treatment**

Состав смеси УНС	Количество размерных фракций	Характеристика частиц фракции	
		Средний эффективный размер, нм	Доля от общего количества, %
цУНТ/ОГ (1:1)	2	496,3	76,53
		3291,4	23,47
цУНТ/ОГ (1:4)	1	20,2	100,00
кУНТ/ОГ (1:1)	2	353,7	79,25
		3342,5	20,75
кУНТ/ОГ (1:4)	1	17,6	100
цУНТ/ГНП (1:1)	1	2347,2	100
цУНТ/ГНП (1:4)	3	706,4	63,93
		1261,0	6,84
		4240,3	29,24
кУНТ/ГНП (1:1)	3	172,9	72,47
		821,6	24,34
		4241,8	3,19
кУНТ/ГНП (1:4)	2	131,4	93,57
		500,3	6,43

Смеси цУНТ и кУНТ с оксидом графена имеют практически идентичный дисперсный состав. При соотношении 1:1 в обоих случаях в суспензиях имеется по 2 фракции частиц с близкими значениями средних размеров. В смесях с большим содержанием ОГ (1:4) имеется по одной фракции

частиц с эффективными размерами в нанодиапазоне ( $\approx 20$  нм). Таким образом, оксид графена способствует равномерному диспергированию УНТ и стабилизирует полученные суспензии. О подобном действии ОГ сообщается во многих работах, например, в [25].

Самыми грубодисперсными являются смеси  $\mu$ УНТ/ГНП. При соотношении 1:1 в системе присутствуют только крупные частицы со средними размерами более 2 мкм.

В смеси с  $\kappa$ УНТ/ГНП состава 1:1 присутствует 3 фракции частиц, самые мелкие из которых имеют средние эффективные размеры около 170 нм, а самые крупные – более 4 мкм.

При увеличении доли ГНП система  $\mu$ УНТ/ГНП становится более разнородной по составу. В ней выделяется три фракции фрагментов со средними размерами около 0,7; 1,3 и 4 мкм. В целом, данная картина указывает на слабое взаимодействие между компонентами на данном этапе.

Однако следует отметить, что в смесях  $\kappa$ УНТ/ГНП (1:4) большая часть частиц дисперсной фазы имеет размеры около 130 нм, а частиц со средними размерами около 0,5 мкм всего лишь около 6%. Таким образом, совмещение  $\kappa$ УНТ с графеновыми пластинками способствует проявлению эффекта снижения размеров частиц дисперсной фазы.

#### Анализ спектров комбинационного рассеяния образцов

Спектры КР гибридных материалов различного состава после лиофильной сушки представлены на рис. 1. Наиболее интенсивными на них являются пики D ( $1350\text{ см}^{-1}$ ) и G ( $\sim 1570\text{ см}^{-1}$ ), типичные для УНС [26]. Интегральное соотношение интенсивностей D/G широко используют для характеристики количества дефектов в углеродных материалах. Также, согласно [27] по данным об интенсивностях этих пиков можно получить информацию о средних планарных размерах наночастиц ( $L_a$ ), средних расстояниях между дефектами ( $L_d$ ) и плотности дефектов ( $n_D$ ) по формулам (1-3):

$$L_a \approx \frac{(490 \pm 100)}{E_L^4} \left(\frac{I_D}{I_G}\right)^{-1} \quad (1)$$

$$L_d^2 = \frac{(4.3 \pm 1.3) \times 10^3}{E_L^4} \left(\frac{I_D}{I_G}\right)^{-1} \quad (2)$$

$$n_D = (7.3 \pm 2.2) \times 10^9 E_L^4 \left(\frac{I_D}{I_G}\right) \quad (3)$$

где  $E_L$  – энергия возбуждения лазера,  $I_D$  и  $I_G$  – интенсивности полос D и G соответственно.

Пик 2D ( $\sim 2700\text{ см}^{-1}$ ) чувствителен к  $\pi$ -полосе в электронной структуре. Изменение его положения и интенсивности связано с наличием и локализацией кислородсодержащих групп в базовой плоскости [28].

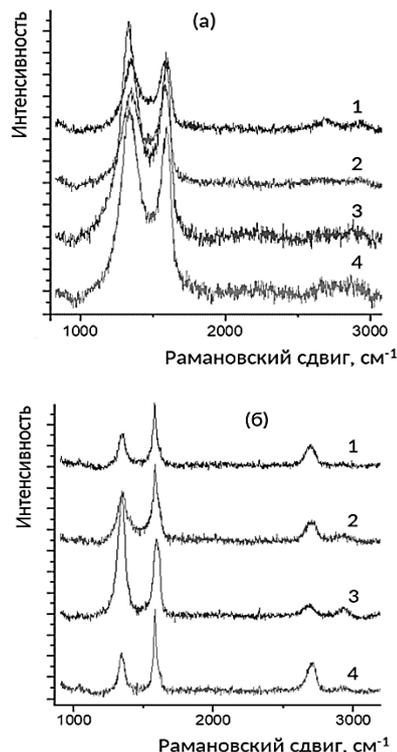


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния образцов гибридных материалов УНТ/ОГ (а) и УНТ/ГНП (б), содержащих цилиндрические (1, 2) и конические (3, 4) нанотрубки при соотношениях компонентов, равных 1:1 (1, 3) и 1:4 (2, 4)

Малые пики D' ( $\sim 1620\text{ см}^{-1}$ ) и D'' ( $\sim 1500\text{ см}^{-1}$ ), согласно [28-29], также характеризуют наличие и локализацию дефектов и кислородсодержащих групп. Результаты обработки спектров КР представлены в табл. 2.

Показатель D/G закономерно зависит от состава материала. Известно, что для  $\mu$ УНТ он ниже, чем для  $\kappa$ УНТ, а для ГНП ниже, чем для ОГ. Следует заметить, что с ростом содержания ОГ показатель D/G снижается для материалов  $\mu$ УНТ/ОГ и несколько увеличивается для  $\kappa$ УНТ/ОГ. Обратная картина наблюдается при изменении доли ГНП в материалах, содержащих  $\kappa$ УНТ и  $\mu$ УНТ. Эти факты указывают на различие во взаимной ориентации компонентов при формировании гибридных частиц и ранее были подтверждены в работе методами молекулярной динамики и сканирующей электронной микроскопии [31].

Согласно значениям соотношений D''/G, гибридные материалы, содержащие ГНП, характеризуются меньшим содержанием аморфной составляющей по сравнению с ОГ-гибридами. Закономерности изменения значений D/G и D''/G качественно коррелируют между собой.

Таблица 2

Результаты обработки спектров комбинационного рассеяния образцов гибридных материалов после лиофильной сушки

Table 2. Results of processing the Raman spectra of samples of hybrid materials after freeze-drying

Параметр	Состав образца							
	цУНТ/ОГ		кУНТ/ОГ		цУНТ/ГНП		кУНТ/ГНП	
	(1:1)	(1:4)	(1:1)	(1:4)	(1:1)	(1:4)	(1:1)	(1:4)
D/G	1,400	1,220	1,639	1,706	0,540	0,620	1,320	0,460
D''/G	0,372	0,290	0,445	0,471	0,081	0,085	0,106	0,019
D'/G	0,744	0,362	0,750	0,765	0,108	0,170	0,213	0,115
D/D'	1,875	3,360	2,185	2,231	5,000	3,625	6,200	4,000
$L_a$ , нм	9,5-11,9	10,8-13,6	8,1-10,1	7,8-9,7	24,5-30,8	21,3-26,8	10,0-12,6	28,8-36,1
$L_D$ , нм	8,6-11,5	9,2-12,3	8,0-10,6	7,8-10,4	13,9-18,5	13,0-17,2	8,9-11,8	15,0-20,0
$n_D \times 10^{-11}$ , см <sup>-2</sup>	2,272-4,020	1,980-3,503	2,660-4,706	2,769-4,898	0,876-1,551	1,006-1,780	2,142-3,790	0,747-1,321

Величина соотношения D/D' для плоских углеродных наноструктур типа графена позволяет получить информацию о доминирующих типах дефектов на поверхности [30]. Значения данного показателя для большей части полученных гибридных материалов указывают на то, что преобладающим типом дефектов в них являются краевые участки графеновых слоев. Более низкое значение D/D' цУНТ/ОГ (1:1) показывает, что в этом материале увеличивается доля дефектов на поверхности графеновых слоев и/или боковых стенок УНТ относительно краевых дефектов.

Планарные размеры гибридных частиц ( $L_a$ ) зависят от типа графенового компонента и имеют более высокие значения для образцов, в состав которых входит ОГ. Содержание и форма графеновых слоев УНТ, используемых для приготовления гибридных материалов, на данный показатель влияет мало. Исключение представляют системы кУНТ/ГНП, в которых увеличение доли нанотрубок способствует снижению  $L_a$ .

Максимальными расстояниями между дефектными участками ( $L_D$ ) и, соответственно, минимальной плотностью дефектов на поверхности ( $n_D$ ), также характеризуются материалы, в состав которых входят ГНП, независимо от соотношения компонентов.

#### Рентгенофазовый анализ образцов

Общий вид рентгеновских дифрактограмм полученных экспериментальных образцов представлен на рис. 2. На них регистрируется ряд типичных для графитовых материалов пиков – (001), (002), (100), по характеристикам которых, используя классические уравнения Дебая-Шеррера, можно рассчитать параметры отдельных кристаллитов, а именно их размеры в плоскости ( $L$ ), высоту домена ( $L_c$ ), и количество слоев ( $n$ ).

Результаты этих расчетов приведены в табл. 3 (см. табл.). Из них следует, что материалы

УНТ/ГНП отличаются более плотной упаковкой и количеством слоев, чем УНТ/ОГ, независимо от типа и содержания УНТ. Увеличение доли УНТ в гибридном материале УНТ/ОГ способствует уменьшению размеров  $L$  и  $L_c$ , причем тип УНТ на эти параметры влияет слабо. В материалах УНТ/ГНП добавление УНТ вызывает обратный эффект.

Причем к УНТ в большей степени влияют на количественные характеристики изменяющихся параметров в гибридных системах на основе ГНП, в то время как цУНТ оказывают более серьезное влияние на гибридные материалы, полученные с использованием ОГ.

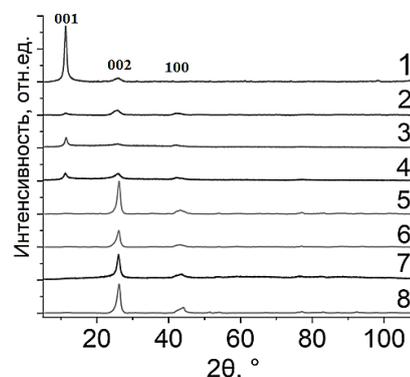


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы образцов:

- 1 – цУНТ/ОГ (1:4); 2 – цУНТ/ОГ (1:1); 3 – кУНТ/ОГ (1:4); 4 – кУНТ/ОГ (1:1); 5 – цУНТ/ГНП (1:4); 6 – цУНТ/ГНП (1:1); 7 – кУНТ/ГНП (1:4); 8 – кУНТ/ГНП (1:1)
- Fig. 2. X-ray diffractograms of the samples: 1 - cylCNT/GO (1:4); 2 - cylCNT/GO (1:1); 3 - conCNT/GO (1:4); 4 - conCNT/GO (1:1); 5 - cylCNT/GNP (1:4); 6 - cylCNT/GNP (1:1); 7 - conCNT/GNP (1:4); 8 - conCNT/GNP (1:1)

#### ВЫВОДЫ

Получены гибридные материалы на основе смесей конических и цилиндрических УНТ с оксидом графена и графеновыми нанопластинками в

различных вариантах и массовых соотношениях. Показано, что оксид графена стабилизирует водные дисперсии как конических, так и цилиндрических УНТ. Графеновые нанопластины способны более равномерно диспергированию только конических УНТ.

Данные спектроскопии КР указывают на различие во взаимной ориентации компонентов гибридных систем в зависимости от их типа. При этом планарные размеры гибридных частиц, преобладающий тип и плотность дефектов на их поверхности определяются, главным образом, типом графенового компонента и мало зависят от формы графеновых слоев и морфологии УНТ.

Тип графенового компонента также оказывает определяющее влияние на кристаллографические параметры гибридных материалов. В общем случае материалы УНТ/ГНП отличаются более плотной упаковкой и количеством слоев, чем УНТ/ОГ.

Изменение концентрации УНТ в гибридном материале влияет на планарные размеры и толщину отдельных частиц. Причем конические УНТ в большей мере определяют характеристики систем, компонентом которых являются ГНП, в то время как цилиндрические УНТ больше влияют на параметры систем УНТ/ОГ.

Таблица 3

Данные рентгенофазового анализа гибридных наноматериалов  
Table 3. XRD data of hybrid nanomaterials

Образец	(hkl)	$2\theta$ , °	d, нм	FWHM, °	L, нм	$L_c$ , нм	n
цУНТ/ОГ (1:1)	(001)	11,28	0,784	1,82	-	4,337	5-6
	(002)	25,79	0,345	2,13	-	3,784	11
	(100)	42,33	0,213	2,52	6,761	-	-
цУНТ/ОГ (1:4)	(001)	11,31	0,782	0,73	-	10,814	14
	(002)	25,85	0,344	2,22	-	3,631	11
	(100)	43,99	0,206	1,26	13,600	-	-
кУНТ/ОГ (1:1)	(001)	11,22	0,788	1,05	-	7,518	10
	(002)	25,94	0,343	1,83	-	4,405	13
	(100)	42,12	0,214	2,73	6,237	-	-
кУНТ/ОГ (1:4)	(001)	11,39	0,776	0,87	-	9,075	12
	(002)	25,88	0,344	1,92	-	4,198	12
	(100)	41,87	0,216	2,07	8,218	-	-
цУНТ/ГНП (1:1)	(002)	26,07	0,342	1,09	-	7,398	22
	(100)	43,28	0,209	2,79	6,127	-	-
цУНТ/ГНП (1:4)	(002)	26,19	0,340	0,96	-	8,402	25
	(100)	43,24	0,209	2,91	5,873	-	-
кУНТ/ГНП (1:1)	(002)	26,18	0,340	1,00	-	8,066	24
	(100)	44,06	0,205	2,00	8,570	-	-
кУНТ/ГНП (1:4)	(002)	26,00	0,342	1,10	-	7,330	21

#### БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

В работе использовано оборудование ЦКП ПГТУ "Получение и применение полифункциональных наноматериалов".

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-23-01072, <https://rscf.ru/project/22-23-01072/>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

*This work has been done using facilities of the shared access center "Production and application of multifunctional nanomaterials" (Tambov State Technical University).*

*The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-23-01072, <https://rscf.ru/project/22-23-01072/>.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

#### REFERENCES ЛИТЕРАТУРА

1. Liu S., Chevali V.S., Xu Z., Hui D., Wang H. // *Composites Part B: Eng.* 2018. V. 136. P. 197-214. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.08.020.
2. Liu S., Yan H., Fang Z., Wang H. // *Composites Sci. and Technol.* 2014. V. 90. P. 40-47. DOI: 10.1016/j.compscitech.2013.10.012.
3. Peng M., Tang X., Zhou Y. // *Polymer.* 2016. V. 93. P. 1-8. DOI: 10.1016/j.polymer.2016.03.016.

4. **El-Seesy A.I., Waly M.S., El-Batsh H.M., El-Zoheiry R.M.** // *Proc. Safety Environ. Protect.* 2023. V. 171. P. 561-577. DOI: 10.1016/j.psep.2023.01.026.
5. **Щегольков А.В., Буракова Е.А., Дьячкова Т.П., Орлова Н.В., Комаров Ф.Ф., Липкин М.С.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 7. С. 74-81. DOI: 10.6060/ivkkt.20206307.6239.  
**Shchegolkov A.V., Burakova E.A., Dyachkova T.P., Orlova N.V., Komarov F.F., Lipkin M.S.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2020. V. 63. N 7. P. 74-81 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206307.6239.
6. **Bahadir E.B., Sezginurk M.K.** // *TrAC Trends Analyt. Chem.* 2016. V. 76. P. 1-14. DOI: 10.1016/j.trac.2015.07.008.
7. **Yaghobian M., Whittleston G.** // *Alexandria Eng. J.* 2022. V. 61. N 5. P. 3417-3433. DOI: 10.1016/j.aej.2021.08.053.
8. **Rukhov A., Bakunin E., Dyachkova T., Rukhov A., Istomin A., Obratsova E., Kornev A., Burakova E., Smirnova A., Usol'tseva N.** // *Proc. of the 15th Internat. Conf. "Advanced Carbon Nanostructures" (ACNS'2021).* 2021. V. 30. N 1. P. 167-170. DOI: 10.1080/1536383X.2021.1964479.
9. **Burakov A., Tyagi I., Karni R.R., Burakova I., Memetova A., Bogoslovskiy V., Shigabaeva G., Galunin E.** // *Sustainable Materials for Sensing and Remediation of Noxious Pollutants.* 2022. Chap. 14. P. 229-245. DOI: 10.1016/B978-0-323-99425-5.00011-6.
10. **Яковлева Е.В., Брудник С.В., Яковлев А.В., Рябухова Т.А., Неверная О.Г., Мостовой А.С., Ольшанская Л.Н.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 5. С. 35-42. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6543.  
**Yakovleva E.V., Brudnik S.V., Yakovlev A.V., Ryabukhova T.O., Nevernaya O.G., Mostovoy A.S., Olshanskaya L.N.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2022. V. 65. N 5. P. 35-42. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6543.
11. **Korolev P.V., Fomin S.V., Shilov M.A.** // *J. Adv. Mater. Technol.* 2022. V. 7. N 2. P. 88-96. DOI: 10.17277/jamt.2022.02.pp.088-096.
12. **Fu X., Lin J., Liang Z., Yao R., Wu W., Fang Z., Zou W., Wu Z., Ning H., Peng J.** // *Surfaces Interfaces.* 2023. V. 37. P. 102747. DOI: 10.1016/j.surfin.2023.102747.
13. **Charapkov N., Dyachkova T., Stolyarov R., Yagubov V., Tkachev A., Memetova A., Memetov N., Pasko T., Burmistrov I.** // *J. Adv. Mater. Technol.* 2022. V. 4. P. 246-255. DOI: 10.17277/jamt.2022.04.
14. **Zhang D., Huang Y., Chia L.** // *Composite Struct.* 2022. V. 296. P. 115942. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115942.
15. **Щегольков А.В., Щегольков А.В.** // *Росс. хим. журн.* 2021. Т. 65. Вып. 4. С. 88-94. DOI: 10.6060/rcj.2021654.15.  
**Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V.** // *Ross. Khim. Zhurn.* 2021. V. 65. N 4. P. 88-94 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2021654.15.
16. **Yue L., Pircheraghi G., Monemian S.A., Manas-Zloczower I.** // *Carbon.* 2014. V. 78. P. 268-278. DOI: 10.1016/j.carbon.2014.07.003.
17. **Wang J., Jin X., Wu H., Guo S.** // *Carbon.* 2017. V. 123. P. 502-513. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.07.055.
18. **Wang B., Fu Q., Liu Y., Yin T., Fu Y.** // *Tribology Int.* 2018. V. 123. P. 200-208. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.03.014.
19. **Valentini L., Bon B., Hernandez M., Lopez-Manchado M.A., Pugno N.M.** // *Composites Sci. Technol.* 2018. V. 166. P. 109-114. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.01.050.
20. **Song S., Zhang Y.** // *Carbon.* 2017. V. 123. P. 158-167. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.07.057.
21. **Cho B.-G., Lee S., Hwang S.-H., Han J. H., Chae H.G., Park Y.-B.** // *Carbon.* 2018. V. 140. P. 324-337. DOI: 10.1016/j.carbon.2018.08.041.
22. **Li C.-Q., Zha J.-W., Li Z.-J., Zhang D.-L., Wang S.-J., Dang Z.-M.** // *Composites Sci. Technol.* 2018. V. 157. P. 134-143. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.01.038.
23. **Ke K., Yue L., Shao H., Yang M.-B., Yang W., Manas-Zloczower I.** // *Carbon.* V. 173. P. 1020-1040. DOI: 10.1016/j.carbon.2020.11.070.
24. **Dyachkova T.P., Khan Yu.A., Burakova E.A., Galunin E.V., Shigabaeva G.N., Stolbov D.N., Titov G.A., Chapakov N.A., Tkachev A.G.** // *Polymers.* V. 15. N 6. P. 1476. DOI: 10.3390/polym15061476.
25. **Min C., Liu D., Shen C., Zhang Q., Song H., Li S., Shen X., Zhu M., Zhang K.** // *Tribology Int.* 2018. V. 117. P. 217-224. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.09.006.
26. **Keszler A.M., Nemes L., Ahmad S.R., Fang X.** // *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 2004. V. 6. N 4. P. 1269 - 1274.
27. **Ribeiro-Soares J., Oliveros M.E., Garin C., David M.V., Martins L.G.P., Almeida C.A., Martins-Ferreira E.H., Takai K., Enoki T., Magalhaes-Paniago R., Malachias A., Jorio A., Archanjo B.S., Achete C.A., Cancado L.G.** // *Carbon.* 2015. V. 95. P. 646-652. DOI: 10.1016/j.carbon.2015.08.020.
28. **Radon A., Wlodarczyk P., Lukowicz D.** // *Physica E: Low-dimensional Syst. Nanostruct.* 2018. 99. P. 82-90. DOI: 10.1016/j.physe.2018.01.025.
29. **Lee A.Y., Yang K., Anh N.D., Park C., Lee S.M., Lee T.G., Jeong M.S.** // *Appl. Surf. Sci.* 2021. V. 536. P. 147990. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.147990.
30. **Eckmann A., Felten A., Mishchenko A., Britnell L., Krupke R., Novoselov K. S., Casiraghi C.** // *Nano Lett.* 2012. V. 12. P. 3925-3930. DOI: 10.1021/nl300901a.
31. **Dyachkova T.P., Rukhov A.V., Khan Yu.A., Protasov D.N., Stolbov D.N., Burakova E.A., Titov G.A., Tkachev A.G.** // *Zhidk. Krist. Ikh Praktich. Ispol'z.* 2022. V. 22. N 4. P. 102-109. DOI: 10.18083/LCAppl.2022.4.102.

Поступила в редакцию 22.05.2023

Принята к опубликованию 21.06.2023

Received 22.05.2023

Accepted 21.06.2023