

## СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОВАЛЕНТНОЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Г.В. Козлов, И.В. Долбин

Георгий Владимирович Козлов, Игорь Викторович Долбин \*

Управление научно-исследовательской и инновационной деятельности, Кафедра органической химии и высокомолекулярных соединений, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, 173, Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика, Российская Федерация, 360004  
E-mail: i\_dolbin@mail.ru\*

*Функционализация углеродных нанотрубок (ковалентная и нековалентная) является эффективным и часто применяемым методом повышения их взаимодействия с полимерной матрицей нанокомпозитов. В настоящей работе предложена трактовка, впервые позволившая количественную оценку эффективности (качества) функционализации этого нанонаполнителя. Для этой цели использована предложенная ранее обобщенная модель, учитывающая характеристики матричного полимера и нанонаполнителя, а также тип последнего. Применение указанной модели позволяет получить количественную характеристику эффективности функционализации, а также выяснение взаимосвязи указанной эффективности со структурой углеродных нанотрубок в полимерной матрице нанокомпозита, а именно, радиусом их кольцеобразных структур. Обнаружено, что один и тот же с химической точки зрения метод функционализации может изменять свою эффективность в 20 раз в зависимости от структуры (радиуса) кольцеобразных формирований углеродных нанотрубок. Более точной характеристикой этих формирований является их удельная поверхность. Эта поверхность служит индикатором интенсивности контакта полимерной матрицы и поверхности нанотрубок, который в конечном итоге формирует механические и другие свойства рассматриваемых нанокомпозитов. Получено уравнение, показывающее зависимость эффективности функционализации от двух параметров: эффективной удельной поверхности и содержания углеродных нанотрубок. При достижении порога перколяции нанонаполнителя происходит резкое дискретное снижение эффективности функционализации. Это означает, что функционализация локальных структур углеродных нанотрубок более эффективна, чем непрерывных структур этого нанонаполнителя. Наиболее важное механическое свойство полимерных нанокомпозитов, а именно, степень усиления, однозначно определяется эффективностью функционализации. Такой подход позволяет структурное прогнозирование механических свойств нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки в зависимости от эффективности функционализации нанонаполнителя.*

**Ключевые слова:** нанокомпозит, углеродные нанотрубки, функционализация, структура, удельная поверхность, степень усиления

## STRUCTURAL MODEL OF EFFICIENCY OF COVALENT FUNCTIONALIZATION OF CARBON NANOTUBES

G.V. Kozlov, I.V. Dolbin

Georgii V. Kozlov, Igor V. Dolbin \*

Management of Research and Innovation Activities, Department of Organic Chemistry and High-Molecular Compounds, Kh.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevsky st., 173, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Russia  
E-mail: i\_dolbin@mail.ru\*

*Functionalization of carbon nanotubes (covalent and noncovalent ones) is effective and often applied method of enhancement of their interaction with polymer matrix of nanocomposites. In present work the treatment is proposed, for the first time allowing quantitative estimation of efficiency (quality) of this nanofiller functionalization. For this purpose proposed earlier generalized model was used, taking into consideration characteristics of matrix polymer and nanofiller and also type of the last. Application of the indicated model allows to obtain quantitative characteristic of functionalization efficiency and also elucidation of interconnection of the indicated efficiency with structure of carbon nanotubes in polymer matrix of nanocomposite, namely, with radius of their annular structures. It has been found that the same method of functionalization from the chemical point of view can be changed its efficiency in 20 times that is dependent upon structure (radius) of annular formations of carbon nanotubes. Their specific surface is the more precise characteristic of these formations. This surface serves as indicator of intensity of contact of polymer matrix and surface of nanotubes, which in the end forms mechanical and other properties of the considered nanocomposites. The equation has been obtained, showing the dependence of functionalization efficiency on two parameters: effective specific surface and content of carbon nanotubes. The sharp discrete reduction of functionalization occurs at reaching of percolation threshold of nanofiller. This means that functionalization of local structures of carbon nanotubes is more effective than functionalization of uninterrupted structures of this nanofiller. The most important mechanical property of polymer nanocomposites, namely, the reinforcement degree, is defined unequivocally by efficiency of functionalization. This approach allows making structural prediction of mechanical properties of nanocomposites polymer/carbon nanotube depending of efficiency of nanofiller functionalization.*

**Key words:** nanocomposite, carbon nanotubes, functionalization, structure, specific surface, reinforcement degree

**Для цитирования:**

Козлов Г.В., Долбин И.В. Структурная модель эффективности ковалентной функционализации углеродных нанотрубок. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 10. С. 118–123

**For citation:**

Kozlov G.V., Dolbin I.V. Structural model of efficiency of covalent functionalization of carbon nanotubes. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 10. P. 118–123

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время углеродные нанотрубки наряду с графеном считаются наиболее перспективными нанонаполнителями для создания полимерных нанокомпозитов высокого качества [1]. Это положение обусловлено их исключительно высокими механическими характеристиками и большой степенью анизотропии. Однако для получения нанокомпозитов высокого качества необходимо дополнительно обеспечить эффективный перенос приложенного к образцу механического напряжения от полимерной матрицы к нанонаполнителю или достаточно высокий уровень межфазной адгезии [2]. Для этой цели часто используются методы ковалентной или нековалентной функционализации углеродных нанотрубок введением дополнительных химических или физических связей между ними и полимерной матрицей [3, 4]. Следует отметить, что локальные деформации в углеродных нанотрубках, которые появляются благодаря пирамидальности и нарушению ориентации  $\pi$ -орбиталей  $sp^2$ -гибридизированных атомов углерода, де-

лают этот нанонаполнитель более реакционноспособным для присоединения различных химических групп по сравнению с их гладкой аллотропической формой (графеном) [1]. Указанные обстоятельства обусловили разработку большого числа методов функционализации углеродных нанотрубок, подробности которых изложены в ряде обзоров [1, 5, 6]. Однако, все эти работы рассматривают химические аспекты функционализации, не затрагивая структуру углеродных нанотрубок в полимерной матрице нанокомпозита, хотя этот фактор является критическим в определении свойств указанных наноматериалов [7]. Кроме того, отсутствует количественная характеристика эффективности функционализации, особенно для разных ее методов и различных матричных полимеров, что не позволяет сделать их адекватное сравнение. Поэтому целью настоящей работы является выяснение влияния структуры углеродных нанотрубок на эффективность функционализации этого класса нанонаполнителей и, в конечном итоге, на свойства нанокомпозитов, а также вывод количественного показателя, позволяющего оценить эффективность того

или иного способа функционализации (ковалентной или нековалентной).

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В настоящей работе выполнен теоретический анализ результатов, полученных авторами работы [8], где в качестве нанонаполнителя были использованы многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), имеющие диаметр  $16,6 \pm 3,9$  нм и длину  $1,20 \pm 0,6$  мкм. Указанные МУНТ функционализировались группами  $-OH$  для получения смеси с полиметилметакрилатом (ПММА). Содержание МУНТ в рассматриваемых нанокompозитах варьировалось в пределах 0,065-1,30 масс. % [8].

Нанокompозиты ПММА/МУНТ синтезированы методом радикальной полимеризации *in situ*. Пленки нанокompозитов толщиной 75 мкм получены методом полива их растворов в толуоле на поверхность тефлона. Для испытаний использовались образцы в виде полос размером  $10 \times 2,5$  мм [8].

Механические испытания на одноосное растяжение пленочных образцов нанокompозитов ПММА/МУНТ выполнены на приборе для растяжения Zwick модели Z100 при температуре 293 К и скорости деформации  $\sim 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  [8].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Авторы [9] предложили следующее обобщенное уравнение для описания свойств полимерных нанокompозитов разных классов:

$$\frac{E_n}{E_m} = 1 + c_0 D_n^m W_n^n l_{cm} \quad (1)$$

где  $E_n$  и  $E_m$  – модули упругости нанокompозита и матричного полимера, соответственно (отношение  $E_n/E_m$  принято называть степенью усиления нанокompозита),  $c_0$  – коэффициент,  $m$  и  $n$  – показатели,  $D_n$  – базовый размер исходного нанонаполнителя (для углеродных нанотрубок таким размером служит их диаметр  $D_{УНТ}$ ),  $W_n$  – массовое содержание нанонаполнителя,  $l_{cm}$  – длина статистического сегмента цепи матричного полимера,  $D_n$  и  $l_{cm}$  даются в нанометрах,  $W_n$  – масс. %.

Уравнение (1) успешно использовано для описания степени усиления  $E_n/E_m$  нанокompозитов разных классов: дисперсно-наполненных нанокompозитов полипропилен/глобулярный нанокompозит [2], полиамид-6/органоглина (монтмориллонит, гекторил, сапонит) [2], полипропилен/углеродные нанотрубки (нановолокна) [9]. Соответствие уравнения (1) и экспериментальных данных для нанокompозитов эпоксиполимер/углеродные нанотрубки [10] рассмотрено ниже.

В случае углеродных нанотрубок  $c_0 = 0,05$ ,  $m = 0,5$  и  $n = 0,25$  [9]. Важно отметить, что коэффициент  $c_0 = 0,05$  получен для случая нефункционализированных углеродных нанотрубок на примере нанокompозитов полипропилен/углеродные нанотрубки [9]. Для проверки общности уравнения (1) используем данные работы [10] для нанокompозитов эпоксидный полимер/углеродные нанотрубки (ЭП/УНТ), для которых функционализация не применялась ( $D_{УНТ} = 40$  нм,  $l_{cm} = 1$  нм). На рис. 1 приведено сравнение рассчитанной согласно уравнению (1) и полученной экспериментально зависимостей  $E_n/E_m(\varphi_n)$  для нанокompозитов ЭП/УНТ. Как следует из этого сравнения, получено хорошее соответствие предложенной модели и экспериментальных результатов (их среднее расхождение составляет  $\sim 7,5\%$ ), предполагающее корректность применения уравнения (1) для дальнейших оценок.

Оценки согласно уравнению (1) для нанокompозитов ПММА/МУНТ с функционализированными углеродными нанотрубками показали, что для них коэффициент  $c_0$  (для описания эффективности функционализации в дальнейшем будет использоваться коэффициент  $c_\phi$ ) варьируется в очень широких пределах:  $c_\phi = 0,028-0,456$ . Очевидно, что этот эффект вызван функционализацией МУНТ и можно предположить, что эта вариация обусловлена как функционализацией МУНТ, так и изменением их структуры в полимерной матрице в силу вариации содержания нанонаполнителя.

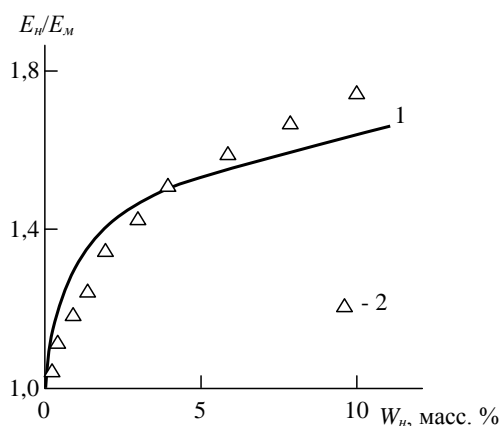


Рис. 1. Сравнение рассчитанной согласно уравнению (1) и полученной экспериментально (2) зависимостей степени усиления  $E_n/E_m$  от массового содержания нанонаполнителя для нанокompозитов ЭП/УНТ [10]

Fig. 1. Comparison calculated according to equation (1) and experimentally obtained (2) dependences of the degree of reinforcement  $E_n/E_m$  on the mass content of nanofiller  $W_n$  for EP/CNT nanocomposites [10]

Указанную структуру можно охарактеризовать эффективной удельной поверхностью нанотрубок  $S_u$ , поскольку сам процесс функционализации является результатом взаимодействия поверхности МУНТ и полимерной матрицы. Эффективную (реальную) величину  $S_u$  можно определить с помощью уравнения [11]:

$$\frac{E_n}{E_m} = 1 + 0,642S_u\varphi_n \quad (2)$$

где  $S_u$  дается в единицах  $m^2/g$ , а  $\varphi_n$  является объемным содержанием нанонаполнителя, которое рассчитано согласно хорошо известной формуле [2]:

$$\varphi_n = \frac{W_n}{\rho_n}, \quad (3)$$

где  $\rho_n$  – плотность нанонаполнителя, которая для наночастиц определяется следующим образом [2]:

$$\rho_n = 188(D_{\text{УНТ}})^{1/3}, \text{ кг/м}^3, \quad (4)$$

где диаметр нанотрубок дается в нм.

На рис. 2 приведено сравнение параметров  $c_\phi$  и  $S_u\varphi_n$  для рассматриваемых нанокомпозитов ПММА/МУНТ. Как и следовало ожидать, наблюдается повышение коэффициента  $c_\phi$  (эффективности функционализации углеродных нанотрубок) по мере роста комплексного параметра  $S_u\varphi_n$ , что аналитически можно выразить следующим уравнением:

$$c_\phi = 0,34S_u\varphi_n. \quad (5)$$

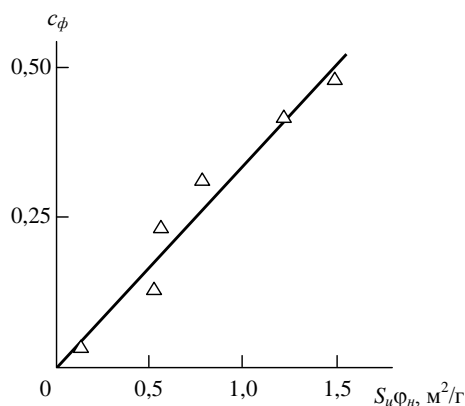


Рис. 2. Зависимость эффективности функционализации углеродных нанотрубок  $c_\phi$  от комплексного показателя  $S_u\varphi_n$  для нанокомпозитов ПММА/МУНТ

Fig. 2. Dependence of the efficiency of functionalization of carbon nanotubes  $c_\phi$  on the complex parameter  $S_u\varphi_n$  for PMMA / MWCNT nanocomposites

Сочетание уравнений (2) и (5) позволяет получить следующую зависимость степени усиления  $E_n/E_m$  от эффективности функционализации, характеризуемой коэффициентом  $c_\phi$ :

$$\frac{E_n}{E_m} = 1 + 1,90c_\phi. \quad (6)$$

На рис. 3 приведено сравнение рассчитанной согласно уравнению (6) и полученной экспериментально (2) зависимостей степени усиления  $E_n/E_m$  от объемного содержания нанонаполнителя  $\varphi_n$  для нанокомпозитов ПММА/МУНТ. Как следует из этого сравнения, получено хорошее соответствие предложенной модели и экспериментальных данных (их среднее расхождение составляет 5%).

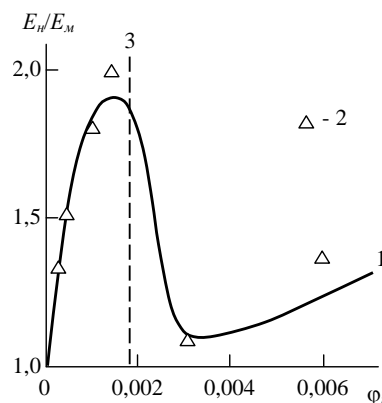


Рис. 3. Сравнение рассчитанной согласно уравнению (6) и полученной экспериментально (2) зависимостей степени усиления  $E_n/E_m$  от объемного содержания нанонаполнителя  $\varphi_n$  для нанокомпозитов ПММА/МУНТ. Вертикальная штриховая линия 3 указывает порог перколяции МУНТ  $\varphi_c$

Fig. 3. Comparison calculated according to equation (6) and experimentally obtained (2) dependences of reinforcement degree  $E_n/E_m$  on the volume content of nanofiller  $\varphi_n$  for PMMA/MCMT nanocomposites. The vertical dashed line indicates the percolation threshold of MCNT  $\varphi_c$

Обращает на себя внимание резкий спад степени усиления  $E_n/E_m$  и, следовательно, эффективности функционализации  $c_\phi$  в интервале  $\varphi_n = 0,0015-0,0030$ . Как показано ранее [12], этот спад реализуется при достижении величиной  $\varphi_n$  порога перколяции  $\varphi_c$  углеродных нанотрубок в полимерной матрице нанокомпозита. Величину  $\varphi_c$  в случае анизотропных нанонаполнителей (включая углеродные нанотрубки) можно определить согласно уравнению [13]:

$$\varphi_c = \frac{\pi}{12} \left( \frac{D_{\text{УНТ}}}{2L_{\text{УНТ}}} \right), \quad (7)$$

где  $L_{\text{УНТ}}$  – длина углеродной нанотрубки.

Для рассматриваемых нанокомпозитов  $\varphi_c = 0,0018$ , которая указана на рис. 3 вертикальной штриховой линией 3 и ее соответствие спаду  $E_n/E_m$  подтверждает упомянутую выше причину спада степени усиления и, следовательно,  $c_\phi$ .

Таким образом, эффективность ковалентной функционализации углеродных нанотрубок имеет сильную структурную подоплеку, физический смысл которой заключается в следующем.

Как хорошо известно [9, 14, 15], углеродные нанотрубки в полимерной матрице нанокompозита образуют кольцеобразные формирования (или их фрагменты), структурно аналогичные макромолекулярным клубкам разветвленных полимеров. Эти формирования являются фрактальными объектами [16], что определяет их влияние на эффективность функционализации углеродных нанотрубок. При компактизации таких формирований, т.е. снижении их радиуса  $R_{\text{УНТ}}$ , большая часть реакционно-способных мест нанотрубки уходит в их внутренние области и становится недоступной для контакта с полимерной матрицей, что резко снижает эффективную удельную поверхность указанных формирований. Определить величину  $R_{\text{УНТ}}$  можно с помощью следующего соотношения [17]:

$$b_{\alpha} = 56(R_{\text{УНТ}}^2 - 0,022), \quad (8)$$

где  $b_{\alpha}$  – безразмерный параметр, характеризующий уровень межфазной адгезии полимерная матрица-нанонаполнитель, а величина  $R_{\text{УНТ}}$  дается в мкм.

В свою очередь, величину  $b_{\alpha}$  можно определить с помощью следующего перколяционного соотношения [2]:

$$\frac{E_n}{E_m} = 1 + 11(2,8b_{\alpha}\varphi_n)^{1,7}. \quad (9)$$

На рис. 4 приведена зависимость эффективной удельной поверхности  $S_u$  кольцеобразных формирований углеродных нанотрубок от их радиуса  $R_{\text{УНТ}}$  для нанокompозитов ПММА/МУНТ, которая имеет ожидаемый характер – наблюдается линейное снижение  $S_u$  по мере уменьшения  $R_{\text{УНТ}}$ , т.е. компактизации указанных формирований, что аналитически можно выразить следующим образом:

$$S_u = 1,63 \cdot 10^3 (R_{\text{УНТ}} - 0,18), \text{ м}^2/\text{г}, \quad (10)$$

где  $R_{\text{УНТ}}$  снова дается в мкм.

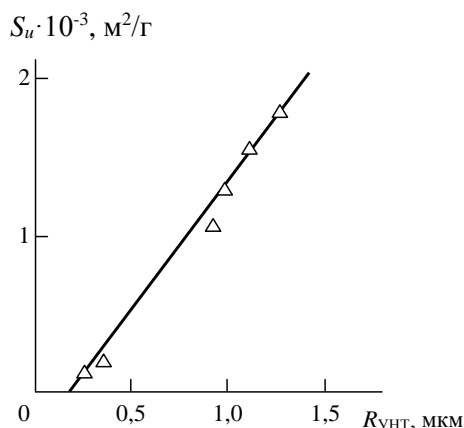


Рис. 4. Зависимость эффективной удельной поверхности углеродных нанотрубок  $S_u$  от радиуса их кольцеобразных формирований  $R_{\text{УНТ}}$  для нанокompозитов ПММА/МУНТ

Fig. 4. Dependence of the effective specific surface of carbon nanotubes  $S_u$  on the radius of their annular formations  $R_{\text{CNT}}$  for ПММА/МСНТ nanocomposites

Отметим, что полученные для нанокompозитов ПММА/МУНТ значения  $S_u$  близки к теоретической величине этого параметра: 1315 м<sup>2</sup>/г [18] или до 1300 м<sup>2</sup>/г [19].

Приведенные выше данные демонстрируют сильное влияние структуры кольцеобразных формирований углеродных нанотрубок на эффективность их функционализации, аналогичное влиянию структуры макромолекулярного клубка на процессы полимеризации [20]. И в заключение отметим, что эффективность функционализации можно альтернативно описать следующим параметром  $k_{\phi}$ :

$$k_{\phi} = \frac{c_{\phi}}{c_0} - 1. \quad (11)$$

Для нефункционализированных нанотрубок  $k_{\phi} = 0$ , для функционализированных –  $k_{\phi} > 1$ .

Как показано в работе [12], соотношение между степенью усиления  $E_n/E_m$  и фрактальной размерностью структуры УНТ в полимерной матрице  $D_f$  можно выразить уравнением:

$$\frac{E_n}{E_m} = 1 + 11(\varphi_n)^{1/D_f}. \quad (12)$$

Далее из сочетания уравнений (6) и (12) можно получить прямую взаимосвязь эффективности функционализации углеродных нанотрубок  $c_{\phi}$  и физической строгой характеристикой нанонаполнителя  $D_f$  следующего вида:

$$c_{\phi} = 5,79(\varphi_n)^{1/D_f}. \quad (13)$$

## ВЫВОДЫ

Таким образом, результаты настоящей работы продемонстрировали сильное влияние структуры углеродных нанотрубок в полимерной матрице нанокompозита на эффективность их функционализации. Количественно эта эффективность может быть охарактеризована коэффициентом  $c_{\phi}$  в уравнении (1). Эффективная удельная поверхность (которая доступна для контакта с полимерной матрицей) является функцией степени компактности кольцеобразных формирований углеродных нанотрубок. Получено соотношение, которое позволяет непосредственно связать степень усиления нанокompозитов полимер/углеродные нанотрубки с эффективностью их функционализации.

## REFERENCES ЛИТЕРАТУРА

1. Moniruzzaman M., Winey K.I. Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes. *Macromolecules*. 2006. V. 39. N 16. P. 5194-5205. DOI: 10.1021/ma060733p
2. Mikitaev A.K., Kozlov G.V., Zaikov G.E. Polymer nanocomposites: variety of structural forms and applications. New York: Science Publishers, Inc. 2008. 319 p.

3. **Mylvaganam K., Zhang L.C.** Chemical bonding in polyethylene-nanotube composites: a quantum mechanics prediction. *Phys. Chem. B*. 2004. V. 108. N 17. P. 5217-5220. DOI: 10.1021/jp037619i.
4. **Liu L., Etika K.C., Liao K.-S., Hess L.A., Bergbreiter D.E., Grunlan J.C.** Comparison of covalently and noncovalently functionalized carbon nanotubes in epoxy. *Macromol. Rapid Commun.* 2008. V. 33. N 3. P. 627-632. DOI: 10.1002/marc.200800778.
5. **Supova M., Martynkova G.S., Barabaszova K.** Effect of nanofiller dispersion in polymer matrices: a review. *Sci. Adv. Mater.* 2001. V. 3. N 1. P. 1-25. DOI: 10.1166/sam.2011.1136.
6. **Sun X., Sun H., Li H., Peng H.** Developing polymer composite materials: carbon nanotubes or graphene? *Adv. Mater.* 2013. V. 25. N 37. P. 5153-5177. DOI: 10.1002/adma.201301926.
7. **Schaefer D.W., Zhao J., Dowty H., Alexander M., Orlor E.B.** Carbon Nanofibre reinforcement of soft materials. *Soft Mater.* 2008. V. 4. N 10. P. 2071-2079. DOI: 10.1039/b805314f.
8. **Blond D., Barron V., Ruether M., Ryan K.P., Nicolosi V., Blau W.J., Coleman J.N.** Enhancement of modulus, strength, and toughness in poly(methyl methacrylate)-based composites by the incorporation of poly(methyl methacrylate)-functionalized nanotubes. *Adv. Funct. Mater.* 2006. V. 16. N 6. P. 1608-1614. DOI: 10.1002/adfm.200500855.
9. **Omidi M., Rokni H., Milani A.S., Seethaler R.J., Arasteh R.** Prediction of the mechanical characteristics of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites using a new form of the rule of mixtures. *Carbon*. 2010. V. 48. N 11. P. 3218-3228. DOI: 10.1016/j.carbon.2010.05.007.
10. **Zhirikova Z.M., Kozlov G.V., Aloyev V.Z.** Nanocomposite polymer/carbon nanotube: the prediction of reinforcement degree. *Nanoindustriya*. 2012. N 3. P. 38-41 (in Russian).  
**Жирикова З.М., Козлов Г.В., Алоев В.З.** Наноккомпозит полимер/углеродные нанотрубки: прогнозирование степени усиления. *Наноиндустрия*. 2012. № 3. С. 38-41.
11. **Yakh'yaeva Kh.Sh., Kozlov G.V., Magomedov G.M.** The role of the nanofiller surface in the reinforcement of nanocomposite polymer-carbon nanotubes. *J. Surface Investigat. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2015. V. 9. N 3. P. 468-470. DOI: 10.1134/S1027451015030143.
12. **Mikitaev A.K., Kozlov G.V.** Description of the degree of reinforcement of polymer/carbon nanotube nanocomposites in the framework of percolation models. *Phys. Solid State*. 2015. V. 57. N 5. P. 974-977. DOI: 10.1134/s1063783415050224.
13. **Bridge B.** Theoretical modeling of the critical volume fraction for percolation conductivity of fibre-loaded conductive polymer composites. *J. Mater. Sci. Lett.* 1989. V. 8. N 2. P. 102-103. DOI: 10.1007/BF00720265.
14. **Zhong-can O.-Y., Su Z.-B., Wang C.-L.** Coil formation in multishell carbon nanotubes: competition between curvature elasticity and interlayer adhesion. *Phys. Rev. Lett.* 1997. V. 78. N 21. P. 4055-4058. DOI: 10.1103/PhysRevLett.78.4055.
15. **Schaefer D.W., Justice R.S.** How nano are nanocomposites? *Macromolecules*. 2007. V. 40. N 24. P. 8501-8517. DOI: 10.1021/ma070356w.
16. **Mikitaev A.K., Kozlov G.V.** Dependence of the degree of reinforcement of polymer/carbon nanotubes nanocomposites on the nanofiller dimension. *Dokl. Phys.* 2015. V. 60. N 5. P. 203-206. DOI: 10.1134/s102833505002x.
17. **Yanovsky Yu.G., Kozlov G.V., Zhirikova Z.M., Aloyev V.Z., Karnet Yu.N.** Special features of the structure of carbon nanotubes in polymer composite media. *Nanomechanics Sci. Techn. An Intern. J.* 2012. V. 3. N 2. P. 99-124. DOI: 10.1615/NanomechanicsSciTechnol.Int.J.v.3.i.2.10.
18. **Peigney A., Laurent C., Flahaut E., Bacsá R., Rousset A.** Specific surface area of carbon nanotubes and bundles of carbon nanotubes. *Carbon*. 2001. V. 39. N 4. P. 507-514. DOI: 10.1016/s0008-6223(00)00155-x.
19. **Jang B.Z., Zhamu A.** Processing of nanographene platelets (NGPs) and NGP nanocomposites: a review. *J. Mater. Sci.* 2008. V. 43. N 22. P. 5092-5101. DOI: 10.1007/s10823-008-2755-2.
20. **Kozlov G.V., Mikitaev A.K., Zaikov G.E.** The fractal physics of polymer synthesis. Toronto, New Jersey: Apple Academic Press. 2014. 359 p.

Поступила в редакцию 14.01.2019  
Принята к опубликованию 27.06.2019

Received 14.01.2019  
Accepted 27.06.2019