

ДИСПЕРСНЫЕ СИСТЕМЫ С МНОГОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

**Е.С. Климов¹, И.А. Макарова¹, М.В. Бузаева¹, О.А. Давыдова¹,
Е.С. Ваганова¹, А.В. Исаев¹, Д.В. Козлов², Н.А. Бунаков²**

¹ Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

² Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск, Россия

Исследованы функционализация поверхности многостенных углеродных нанотрубок полярными группами, влияние типа и размеров частиц наноуглеродных материалов на устойчивость дисперсной системы. Изучено образование дисперсных систем многостенных углеродных нанотрубок с акриловыми мономерами. Физико-химическими методами анализа исследована структура и свойства многостенных углеродных нанотрубок после различных способов модифицирования их поверхности. Углеродные нанотрубки склонны к образованию агломератов, что затрудняет их введение в композиционные материалы, в том числе на основе полимерных матриц. Для придания необходимых технологических свойств (совместимость с матрицей материала, образование устойчивой дисперсии) их модифицируют различными способами. Карбоксилирование поверхности приводит к лучшей совместимости многостенных углеродных нанотрубок с полярными растворителями или мономерами, следовательно для диспергирования в матрицу материала наиболее перспективными по технологическим свойствам являются многостенные углеродные нанотрубки, функционализированные прививкой на поверхности полярных карбоксильных групп и образующие устойчивую дисперсную систему с акриловыми мономерами. Обработка химическими реагентами приводит к уменьшению диаметра нанотрубок за счет снятия графеновых слоев, поверхность трубок при этом становится микродисперсной. На образование устойчивой дисперсной системы оказывают влияние тип углеродных нанотрубок, содержание трубок в мономере, вязкость дисперсионной среды. Уменьшение размеров частиц приводит к большей устойчивости дисперсной системы, однако при этом увеличивается удельная поверхность и способность углеродных нанотрубок к агломерации, что приводит к уменьшению устойчивости системы, поэтому для получения дисперсионной системы необходима ультразвуковая обработка в течение нескольких минут. Время диспергирования для получения устойчивой системы зависит как от процентного содержания многостенных углеродных нанотрубок в мономере, так и от строения мономера. При использовании более вязкого раствора полимера – полиметилметакрилата в собственном мономере дисперсия стабильна. В этом случае процесс термоотверждения метилметакрилата протекает без отклонений и нанотрубки равномерно распределяются в образующемся полимере.

Ключевые слова: дисперсная система, функционализация, многостенные углеродные нанотрубки.

Введение

Открытие в 1991 г. Ииджимой углеродных нанотрубок дало мощный стимул для проведения интенсивных исследований как по изучению физико-химических свойств нанотрубок, так и по поиску областей их применения [1–4].

В настоящее время углеродные нанотрубки получили широкое распространение для получения нового поколения композиционных материалов различного назначения [5–8]. Их широкий спектр применения основан на уникальных механических, электрических и термических свойствах наноструктур, что проявляется при включении нанотрубок в матрицы различных материалов

и приводит к появлению новых структурно-реологических и физико-химических свойств композиций [9–11].

В практике получения композиционных материалов на основе твердой и жидкой фаз особое значение имеет приготовление устойчивой дисперсной системы, состоящей из твердой дисперсной фазы и дисперсионной среды. В качестве дисперсной фазы могут применяться твердые микрочастицы, в том числе и углеродные нанотрубки [12–15]. В качестве дисперсионной среды применяются растворители, различные жидкости, в том числе и мономеры для получения полимерных материалов [16–18]. Гетерогенные дисперсные системы чаще всего термодинамически неустойчивы. Особое место занимают ультрамикроретерогенные системы со свободными частицами (коллоидные системы) [19–20]. По стандартной классификации Оствальда степени дисперсности системы делятся на следующие классы: грубодисперсные с размером частиц более 10^{-5} м; тонкодисперсные (микроретерогенные) от 10^{-5} до 10^{-7} м; коллоидно-дисперсные (ультрамикроретерогенные) с частицами размером от 10^{-7} до 10^{-9} м. Эта классификация уточняется для наноразмерных структур по агрегатным состояниям (Ребиндер), где все дисперсные системы делятся на два класса: свободнодисперсные системы (золи), в которых не образуются жестких каркасных структур, и сплошные (или связнодисперсные) системы, в которых образуются сетки или каркасы (гели) [21].

В настоящее время единой точки зрения на механизм образования дисперсной системы с участием наноразмерных структур не имеется. Все известные подходы основаны на размерности частиц, их способности совмещаться со средой. С этой точки зрения применительно к углеродным наноструктурам на первый план выступает строение углеродных нанотрубок и их химическая активность. Поверхность нанотрубок химически инертна, в связи с чем ее активируют прививкой различных полярных групп [22–24]. Модифицирование разными группами проводится для решения конкретных технологических задач совмещения наночастиц с матрицей материала и гомогенного распределения в ней. На гомогенное распределение сильное влияние оказывает тип нанотрубок, а также размер наночастиц. Уменьшение размеров частиц приводит к большей устойчивости дисперсной системы, однако при этом резко увеличивается удельная поверхность и способность углеродных нанотрубок к агломерации, что приводит к уменьшению устойчивости системы. Степень дисперсности увеличивается при интенсивном перемешивании, ультразвуковой обработке, модифицировании поверхности углеродных наночастиц физико-химическими методами.

Целью настоящей работы явилось получение устойчивых дисперсных систем многостенных углеродных нанотрубок с акриловыми мономерами.

Экспериментальная часть

Синтез многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) проводили в токе аргона методом химического осаждения из паровой фазы с использованием металлоорганических соединений (метод МОСVD) на разработанной нами экспериментальной установке. В качестве прекурсоров использовали толуол и ферроцен [25]. Осаждение проводили в трубчатом реакторе с изотермической зоной 200 мм на цилиндрических кварцевых вкладышах. Оптимальные параметры синтеза МУНТ следующие: температура зоны осаждения 850 °С, температура испарителя ферроцена 105 °С, расход аргона 800 см³/мин, время синтеза 7 ч.

Углеродные нанотрубки предварительно измельчали в механическом гомогенизаторе до получения мелкодисперсного продукта. Диспергирование МУНТ в различные среды проводили с использованием лабораторной ультразвуковой установки погружного типа ИЛ 100-6/4, частота 22 кГц.

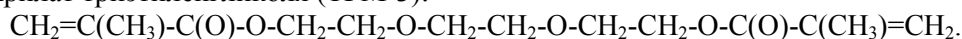
Функционализацию МУНТ полярными группами проводили обработкой окислительной смесью концентрированных азотной и серной кислот по методике, описанной в [26]. Количество привитых на поверхности карбоксильных групп (-COOH) составило 4,0 мас. % (МУНТ-COOH).

В работе использовали акриловую кислоту и мономеры акрилового ряда: метилметакрилат, диметакрилат триэтиленгликоля (ТГМ-3).

Акриловая кислота (АК): $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}(\text{O})-\text{OH}$. Прозрачная жидкость, $d = 1,05 \text{ г/см}^3$, $T_{\text{кип}} = 141 \text{ °С}$. ГОСТ 11097-86 (CAS 79-10-7).

Метилметакрилат (ММА): $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{C}(\text{O})-\text{OCH}_3$. Прозрачная жидкость, $d = 0,94 \text{ г/см}^3$, $T_{\text{кип}} = 101 \text{ °С}$. ГОСТ 16756-71 (CAS 80-62-6).

Диметакрилат триэтиленгликоля (ТГМ-3):



Прозрачная жидкость, $d = 1,08 \text{ г/см}^3$, динамическая вязкость $0,014 \text{ Па}$. ТУ 6-02-109-9.

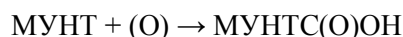
Использовали методы электронной микроскопии: сканирующий электронный микроскоп Phenom proX. Термические свойства изучали с помощью метода термогравиметрического анализа (TGA/SGTA 851 e). Условия проведения эксперимента: атмосфера – азот (воздух); скорость потока 20 мл/мин; скорость нагрева 8 град/мин; навеска порошка 10 мг. Дисперсность образцов исследовали методом рентгеновского малоуглового рассеяния на установке Nesus S3-MICRO (Cu K α излучение, $\lambda = 1,542 \text{ \AA}$) с коллиматором Кратки.

Результаты и обсуждение

Важным звеном при изучении образования дисперсных систем углеродных нанотрубок является размер самих частиц, а также изменений дисперсного распределения при различных операциях с трубками.

В ходе синтеза МУНТ осаждаются на цилиндрических подложках в виде массива, сформированного из переплетающихся нитей. Диаметр большей части нанотрубок 4090 нм, длина составляет десятки мкм. При ультразвуковой обработке происходит расщепление жгутов и дробление нитей на более короткие фрагменты.

Углеродные нанотрубки склонны к образованию агломератов, что затрудняет их введение в композиционные материалы. Для придания необходимых технологических свойств (совместимость с матрицей материала, образование устойчивой дисперсии) МУНТ модифицируют различными способами. Из них наибольшее распространение получил метод обработки сильными окислительными смесями с образованием на поверхности полярных групп (-ОН, =C=O, -CHO, -COOH).



Карбоксилирование поверхности (МУНТ-COOH) приводит к лучшей совместимости МУНТ с полярными растворителями или мономерами.

Обработка химическими реагентами приводит к уменьшению диаметра нанотрубок за счет снятия слоев МУНТ. Средний диаметр составляет 40–50 нм. Поверхность трубок становится микродисперсной. Изменения в структуре поверхности отчетливо прослеживаются на микрофотографиях, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа (рис. 1, 2).

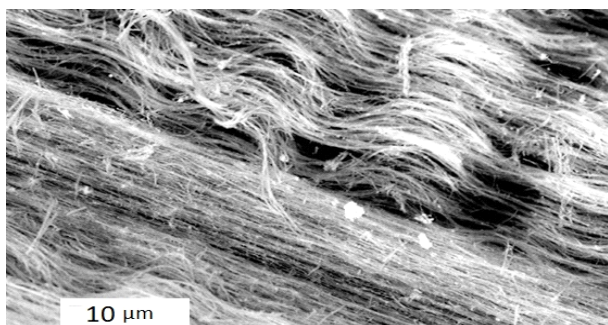


Рис. 1. СЭМ микрофотография поверхности МУНТ после синтеза

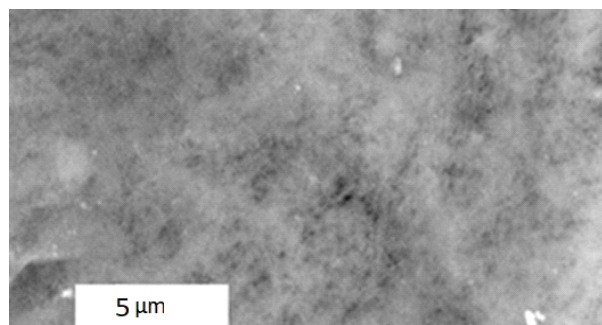


Рис. 2. СЭМ микрофотография поверхности МУНТ-COOH после обработки исходных МУНТ окислительной смесью

Методом термогравиметрического анализа в атмосфере азота была изучена термическая стабильность функционализированных МУНТ-COOH. В области температур 173–841 °С потеря массы составила 28 %, что обусловлено выделением абсорбированной воды и CO₂, образовавшегося при разложении карбоксильных групп, а также в результате сгорания примесей аморфного углерода в образце (рис. 3).

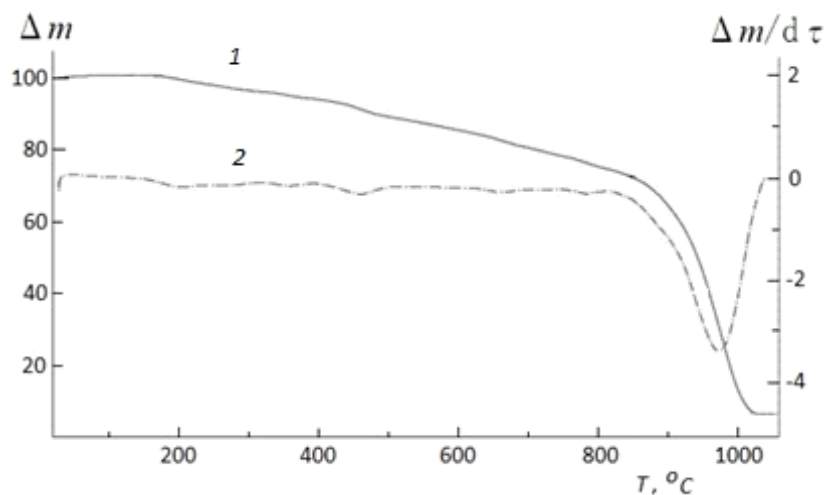


Рис. 3. Профиль потери массы Δm (%) (1) и дифференциальная кривая скорости потери массы $d\Delta m/d\tau$ (%·мин⁻¹) (2) для МУНТ-СООН

Методом рентгеновского малоуглового рассеяния нами исследовано распределение частиц в исходных и карбоксилированных МУНТ (рис. 4).

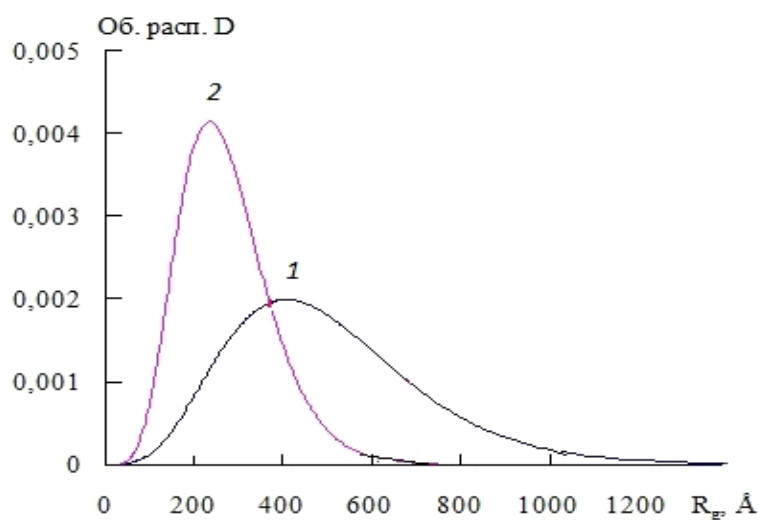


Рис. 4. Объемное распределение структурных образований МУНТ по радиусу инерции R_g : 1 – исходные МУНТ; 2 – МУНТ-СООН

Линейные размеры связаны с полученным радиусом инерции соотношением: $R_g^2 = 3 \cdot R^2/5$, где R – радиус рассеивающих образований. Площади под каждым распределением приведены к единице. Таким образом, кривые распределения представляют собой вероятность нахождения рассеивающих объектов в образце в заданном интервале радиусов инерции [27].

Из полученных результатов следует, что для исходных МУНТ радиус инерции приходится на область $R_g = 400$ Å. Вид кривой ассиметричен, что связано с агломерацией. Обработка кислотами существенно влияет на объемное распределение структурных образований МУНТ-СООН. Максимум распределения смещается в область меньших значений радиуса инерции, $R_g = 240$ Å.

МУНТ-СООН имеют меньшие размеры, чем исходные нанотрубки, и наиболее перспективны для диспергирования в мономеры. Однако для них также характерна высокая склонность к агломерации, в связи с чем для получения дисперсионной системы необходима ультразвуковая обработка. Время диспергирования для получения устойчивой системы зависит как от процентного содержания МУНТ в мономере, так и от строения мономера. Полярные группы на поверхности МУНТ по-разному взаимодействуют с полярными группами мономеров. В таблице приве-

дены результаты по диспергированию МУНТ-СООН в мономерах при ультразвуковой обработке. В качестве мономеров брали акриловые мономеры.

Диспергирование МУНТ-СООН в мономерах при ультразвуковой обработке

Мономер	Содержание МУНТ, %			
	0,1	0,2	0,5	1,0
АК (τ, мин)	6	7	10	13
ММА (τ, мин)	5	8	10	12
ТГМ-3 (τ, мин)	5	7	9	11

АК – акриловая кислота; ММА – метилметакрилат; ТГМ-3 – диметакрилат триэтиленгликоля; τ – время образования устойчивой дисперсии, мин.

Для образования устойчивой дисперсионной системы большое значение имеет вязкость дисперсионной среды. При введении МУНТ-СООН в ММА полученная дисперсионная система стабильна в меньшей степени, чем для других мономеров. При дальнейших операциях при проведении полимеризации (введение инициатора, нагревание) устойчивость дисперсии нарушается и полимеризацию провести не удастся. При использовании более вязкого раствора полимера в собственном мономере (3 г ПММА в 10 г ММА) дисперсия стабильна, время обработки ультразвуком составило 1 мин. В этом случае процесс термоотверждения ММА протекает без отклонений и нанотрубки равномерно распределяются в образующемся полимере.

На рис. 5 представлены дисперсионные системы, полученные при обработке ультразвуком смесей МУНТ-СООН в мономерах.

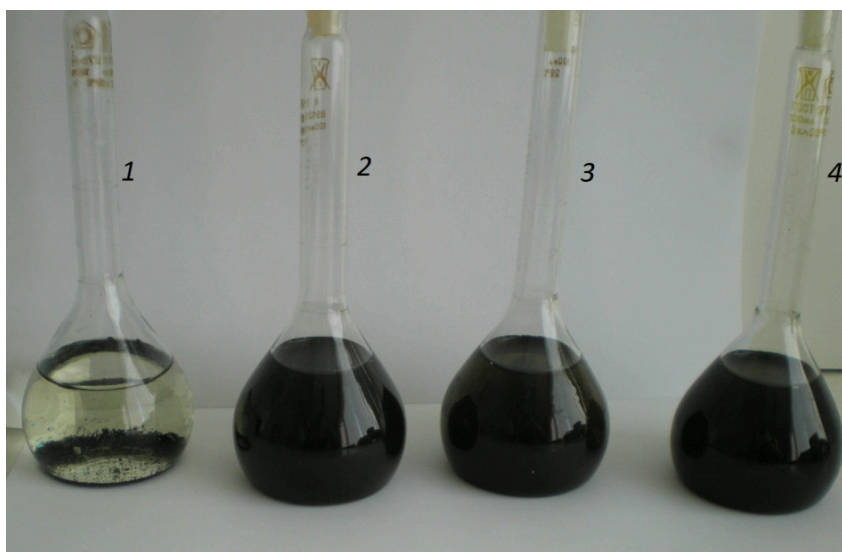


Рис. 5. Дисперсионные системы МУНТ-СООН в мономерах:
1 – неустойчивая система в ММА; 2, 3, 4 – устойчивая система в АК, ММА, ТГМ-3

Выводы

1. Для диспергирования в матрицу материала наиболее перспективными по технологическим свойствам являются многостенные углеродные нанотрубки, функционализированные прививкой на поверхности полярных карбоксильных групп и образующие устойчивую дисперсионную систему с акриловыми мономерами.

2. На образование устойчивой дисперсионной системы оказывают влияние тип углеродных нанотрубок, содержание трубок в мономере, вязкость дисперсионной среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-43-732026).

Литература

1. Iijima, S. Helical microtubules of graphitic carbon / S. Iijima // *Nature*. – 1991. – Vol. 354, № 7. – P. 56–58.
2. Раков, Э.Г. Нанотрубки и фуллерены / Э.Г. Раков. – М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 376 с.
3. Sanchez, F. Nanotechnology in Concrete – a Review / F. Sanchez, K. Sobolev // *Construction and Building Materials*. – 2010. – № 24 (11). – P. 60–71.
4. Abu Al-Rub, R.K. On the Aspect Ratio Effect of Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforcements on the Mechanical Properties of Cementitious Nanocomposites / R.K. Abu Al-Rub, A.I. Ashour, B.M. Tyson // *Construction and Building Materials*. – 2012. – V. 35. – P. 647–655.
5. Лукашин, А.В. Функциональные наноматериалы / А.В. Лукашин, А.А. Елисеев, Ю.Д. Третьякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 456 с.
6. Углеродный наноматериал «Таунит» – структура, свойства, производство и применения / А.Г. Ткачев // *Перспективные материалы*. – 2007. – Т. 177, № 3. – С. 5–9.
7. Дьячков, П.Н. Углеродные нанотрубки. Строение, свойства, применения / П.Н. Дьячков. – М.: Бином, 2006. – 293 с.
8. Микитаев, А.К. Полимерные нанокомпозиты. Многообразие структурных форм и приложений / А.К. Микитаев, Г.В. Козлов, Г.Е. Заиков. – М.: Наука, 2009. – 278 с.
9. Carbon nanotube–polymer composites: chemistry, processing, mechanical and electrical properties / Z. Spitalsky, D. Tasis, K. Papagelis, C. Galiotis // *Progress in Polymer Science*. – 2010. – V. 35. – P. 357–401.
10. Rheological behaviour of multiwalled carbon nanotubes/polycarbonate composites / P. Potschke, T.D. Fornes, D.R. Paul // *Polymer*. – 2002. – V. 43. – P. 3247–3255.
11. Experimental study on the thermal and mechanical properties of multi-walled carbon nanotube-reinforced epoxy / Y. Zhou, F. Pervin, L. Lewis, S. Jeelani // *Materials Science and Engineering*. – 2007. – V. 452–453. – P. 657–664.
12. New solvents for Nanotubes: Approaching the dispersibility of surfactants / S.D. Bergin, Z. Sun, P. Streich et al. // *J. Phys. Chem. C*. – 2010. – V. 114. – P. 231–237.
13. Optimizing surfactant concentrations for dispersion of single-walled carbon nanotubes in aqueous solution / A.J. Blanch, C.E. Lenehan, J.S. Quinton // *J. Phys. Chem. B*. – 2010. – V. 114. – P. 9805–9811.
14. Surface oxidation and effect of electric field on dispersion and colloids stability of multiwalled carbon nanotubes / M. Farbod, S.K. Tadavani, A. Kiasat // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2011. – V. 384. – № 1. – P. 685–690.
15. Модифицирование углеродных нанотрубок и синтез полимерных композитов с их участием / Э.Р. Бадамшина, М.П. Гафурова, Я.И. Эстрин // *Успехи химии*. – 2010. – Т. 79, № 11. – С. 1027–1064.
16. Нанокомпозиты: проблемы наполнения / Н. Степанищев // *Пластикс*. – 2010. – Т. 86, № 4. – С. 23–27.
17. Изменение поверхности полимерных композитов, армированных углеродными нанотрубками / Е.С. Ваганова, О.А. Давыдова, М.В. Бузаева и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия»*. – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 35–41.
18. Акриловый композит с включением многостенных углеродных нанотрубок / Е.С. Ваганова, О.А. Давыдова, М.В. Бузаева и др. // *Пластические массы*. – 2017. – № 5–6. – С. 25–27.
19. Arjayan, P.M. Nanocomposite science and technology / P.M. Arjayan, L.S. Schadler, P.V. Braun. – Wiley, 2003. – 223 p.
20. Коллоидно-химические аспекты взаимодействия ПАВ с поверхностью полимеров / В.П. Барабанов, С.А. Богданова // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2010. – № 4. – С. 7–25.
21. Градус, Л.Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии / Л.Я. Градус. – Москва, 1979. – 287 с.
22. Wang, J.J. High utilization platinum deposition on single-walled carbon nanotubes as catalysts for direct methanol fuel cell / J.J. Wang, G.P. Yin, J. Zhang // *Electrochimica Acta*. – 2007. – V. 52. – P. 7042–7050.

23. Chiang, Y.C. The influence of treatment duration on multiwalled carbon nanotubes functionalized by H₂SO₄ / HNO₃ oxidation / Y.C. Chiang, W.H. Lin, Y.C. Chang // Applied Surface Science. – 2011. – V. 257. – P. 2401–2410.

24. Модифицирование многостенных углеродных нанотрубок карбоксильными группами и определение степени функционализации / М.Н. Кирикова, А.С. Иванов, С.В. Савилов, В.В. Лушин // Известия АН. Сер. химическая. – 2008. – № 2. – С. 291–295.

25. Некоторые аспекты синтеза многостенных углеродных нанотрубок химическим осаждением из паровой фазы и характеристики полученного материала / Е.С. Климов, М.В. Бузаева, О.А. Давыдова и др. // Журнал прикладной химии. – 2014. – Т. 87. – № 8. – С. 1128–1132.

26. Изменение поверхности и свойств многостенных углеродных нанотрубок при физико-химическом модифицировании / Е.С. Климов, М.В. Бузаева, О.А. Давыдова и др. // Журнал прикладной химии. – 2015. – Т. 88. – № 8. – С. 1105–1110.

27. Структура и свойства «нематически упорядоченных» аэрогелей / В.Е. Асадчиков, Р.Ш. Асхадуллин, В.В. Волков и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2015. – Т. 101, № 8. – С. 613–619.

Климов Евгений Семенович – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой «ХТКМиПЭ», Ульяновский государственный технический университет. 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32. E-mail: eugen1947@mail.ru

Макарова Ирина Алексеевна – старший преподаватель кафедры «ХТКМиПЭ», Ульяновский государственный технический университет. 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32. E-mail: gorlovskaya.irin@bk.ru

Бузаева Мария Владимировна – доктор химических наук, профессор кафедры «ХТКМиПЭ», Ульяновский государственный технический университет. г. Ульяновск, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32. E-mail: m.buzaeva@mail.ru

Давыдова Ольга Александровна доктор химических наук, профессор кафедры «ХТКМиПЭ», Ульяновский государственный технический университет. 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32. E-mail: olga1103@inbox.ru

Ваганова Екатерина Сергеевна – кандидат химических наук, доцент кафедры «ХТКМиПЭ», Ульяновский государственный технический университет. 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32. E-mail: katrin_sv@bk.ru

Исаев Артем Владимирович – аспирант кафедры «ХТКМиПЭ», Ульяновский государственный технический университет. 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32. E-mail: artimka.92@mail.ru

Козлов Дмитрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории материаловедения Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы, Ульяновский государственный университет. 432063, г. Ульяновск, Университетская Набережная, 1, корпус 4. E-mail: niih325@bk.ru

Бунаков Никита Андреевич – инженер-исследователь Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы, Ульяновский государственный университет. 432063, г. Ульяновск, Университетская Набережная, 1, корпус 4. E-mail: math08@mail.ru

Поступила в редакцию 20 февраля 2018 г.

DISPERSE SYSTEMS WITH THE MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES

E.S. Klimov¹, eugen1947@mail.ru

I.A. Makarova¹, gorlovskaya.irin@bk.ru

M.V. Buzaeva¹, m.buzaeva@mail.ru

O.A. Davydova¹, olga1103@inbox.ru

E.S. Vaganova¹, katrin_sv@bk.ru

A.V. Isaev¹, artimka@mail.ru

D.V. Kozlov², niih325@bk.ru

N.A. Bunakov², math08@mail.ru

¹ Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation

² Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russian Federation

The functionalization of the surface of multi-walled carbon nanotubes by polar groups, as well as the influence of the type and size of particles of nanocarbon materials on the stability of the disperse system have been investigated. The formation of disperse systems of multi-walled carbon nanotubes with acrylic monomers has been studied. Physicochemical methods of analysis have been used to investigate the structure and properties of multi-walled carbon nanotubes after various ways of modifying their surface. Carbon nanotubes tend to form agglomerates, which makes it difficult to introduce them into composite materials, including those based on polymer matrices. To give the necessary technological properties (compatibility with the matrix of the material, the formation of stable dispersion), they are modified in various ways. Carboxylation of the surface leads to better compatibility of multi-walled carbon nanotubes with polar solvents or monomers, hence the multi-walled carbon nanotubes functionalized by grafting polar carboxyl groups on the surface and forming a stable dispersion system with acrylic monomers are the most promising in terms of processing properties for dispersion. Treatment with chemical reagents leads to reduction in the diameter of nanotubes due to removal of graphene layers, the surface of the tubes becomes microdispersed at the same time. The formation of a stable disperse system is affected by the type of carbon nanotubes, the content of tubes in the monomer, and the viscosity of the dispersion medium. Reducing the size of particles leads to greater stability of the disperse system, but this increases the specific surface area and the ability of carbon nanotubes to agglomerate, which leads to a decrease in the stability of the system; therefore, ultrasonic treatment is required for several minutes to obtain the disperse system. The dispersion time for obtaining a stable system depends both on the percentage of the multi-walled carbon nanotubes in the monomer and on the structure of the monomer. When a more viscous polymer solution is used, namely polymethyl methacrylate in its own monomer, the dispersion is stable. In this case, the process of thermosetting of methyl methacrylate proceeds without deviations and the nanotubes are evenly distributed in the resulting polymer.

Keywords: disperse system, functionalization, multi-walled carbon nanotubes.

References

1. Iijima S. [Helical Microtubules of Graphitic Carbon]. *Nature*, 1991, vol. 354, no. 7, pp 56–58.
2. Rakov E.G. *Nanotrubkiifullereny* [Nanotubes and Fullerenes]. Moscow, University Book, Logos, 2006. 376 p.
3. Sanchez F., Sobolev K. [Nanotechnology in Concrete – a Review]. *Construction and Building Materials*, 2010, no. 24 (11), pp. 60–71.
4. Abu Al-Rub R.K., Ashour A.I., Tyson B.M. [On the Aspect Ratio Effect of Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforcements on the Mechanical Properties of Cementitious Nanocomposites]. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 35, pp. 647–655.
5. Lukashin A.V., Eliseev A.A., Tret'yakova Yu.D. *Funktsional'nyye nanomaterialy* [Functional Nanomaterials]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2007. 456 p.

6. Tkachev A.G. [Carbon Nanomaterial “Taunit” – Structure, Properties, Production and Applications]. *Advanced Materials*, 2007, vol. 177, no. 3, pp. 5–9. (in Russ.)
7. D'yachkov P.N. *Uglerodnyye nanotrubki. Stroyeniye, svoystva, primeneniya* [Carbon Nanotubes. Structure, Properties, Applications]. Moscow, Binom Publ., 2006. 293 p.
8. Mikitaev A.K., Kozlov G.V., Zaikov G.E. *Polimernyye nanokompozity. Mnogoobraznye strukturnyykh form i prilozheniy* [Polymer Nanocomposites. Variety of Structural Forms and Applications]. Moscow, Nauka Publ., 2009. 287 p.
9. Spitalsky Z., Tasis D., Papagelis K., Galiotis C. [Carbon Nanotube – Polymer Composites: Chemistry, Processing, Mechanical and Electrical Properties]. *Progress in Polymer Science*, 2010, vol. 35, pp. 357–401.
10. Potschke P., Fornes T.D., Paul D.R. [Rheological Behaviour of Multiwalled Carbon Nanotubes/polycarbonate Composites]. *Polymer*, 2002, vol. 43, pp. 3247–3255.
11. Zhou Y, Pervin F., Lewis L., Jeelani S. [Experimental study on the thermal and mechanical properties of multi-walled carbon nanotube-reinforced epoxy]. *Materials Science and Engineering*, 2007, vol. 452–453, pp. 657–664.
12. Bergin S.D., Sun Z., Streich P. [New solvents for Nanotubes: Approaching the dispersibility of surfactants]. *J. Phys. Chem. C.*, 2010, vol. 114, pp. 231–237.
13. Blanch A.J., Lenehan C.E., Quinton J.S. [Optimizing Surfactant Concentrations for dispersion of single-walled carbon nanotubes in aqueous solution]. *J. Phys. Chem. B.*, 2010, vol. 114, pp. 9805–9811.
14. Farbod M., Tadavani S.K., Kiasat A. [Surface Oxidation and Effect of Electric Field on Dispersion and Colloids Stability of Multiwalled Carbon Nanotubes]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2011, vol. 384, no. 1, pp. 685–690.
15. Badamshina E.R., Gafurova M.P., Estrin Y.I. Modification of Carbon Nanotubes and Synthesis of Polymeric Composites Involving the Nanotubes. *Russian Chemical Reviews*, 2010, vol. 79. no. 11. pp. 945–979. DOI: 10.1070/RC2010v079n11ABEH004114
16. Stepanishchev N. [Nanocomposites: Filling Problems]. *Plastics*, 2010, vol. 86, no. 4, pp. 23–27. (in Russ.)
17. Vaganova E.S., Davydova O.A., Buzaeva M.V., Klimov, E.S., Frolov I.V., Sergeev V.A., Fomin A.N., Svetukhin, V.V. Hange of Surface of Polymeric Composites, Reinforced by Carbon Nanotubes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chemistry.* 2016, vol. 8, no. 3, pp. 35–41. DOI: 10.14529/chem160305
18. Vaganova E.S., Davydova O.A., Buzaeva M.V., Klimov E.S., Fomin A.N., Svetukhin V.V., Nishchev K.N., Pynenkov A.A. [Acrylic Polymeric Composite with the Multi-walled Carbon Nanotubes]. *Plastic masses*, 2017, no. 5–6, pp. 25–27. (in Russ.)
19. Arjayan P.M., Schadler L.S., Braun P.V. [Nanocomposite Science and Technology]. Wiley, 2003, 223 p.
20. Barabanov V.P., Bogdanova S.A. [Colloid-chemical Aspects of the Interaction of Surfactants with the Surface of Polymer]. *Bulletin of the Kazan University of Technology.* 2010, no. 4, pp. 7–25. (in Russ.)
21. Gradus L.Ya. *Rukovodstvo po dispersionnomu analizu metodom mikroskopii* [A Guide to Variance Analysis by Microscopy]. Moscow, 1979. 287 p.
22. Wang J.J., Yin G.P., Zhang J. [High Utilization Platinum Deposition on Single-walled Carbon Nanotubes as Catalysts for Direct Methanol Fuel Cel]. *Electrochimica Acta*, 2007, vol. 52, pp. 7042–7050.
23. Chiang Y.C., Lin W.H., Chang Y.C. [The Influence of Treatment Duration on Multiwalled Carbon Nanotubes Functionalized by H₂SO₄ / HNO₃ Oxidation]. *Applied Surface Science*, 2011, vol. 257, pp. 2401–2410.
24. Kirikova M.N., Ivanov A.S., Savilov S.V., Lunin V.V. Modification of Multiwalled Carbon Nanotubes by Carboxy Groups and Determination of the Degree of Functionalization. *Russian Chemical Bulletin.* 2008. vol. 57, no. 2, pp. 298–303. DOI: 10.1007/s11172-008-0046-3
25. Klimov E.S., Buzaeva M.V., Davydova O.A. Makarova I.A., Svetukhin V.V., Kozlov D.V., Pchelintseva E.S., Bunakov N.A. Some Aspects of the Synthesis of Multiwalled Carbon Nanotubes by

Chemical Vapor Deposition and Characteristics of the Material Obtained. *Russian journal of applied chemistry*, 2014, vol. 87, no 10, pp. 1109–1113. DOI: 10.1134/S1070427214080163

26. Klimov E.S., Buzaeva M.V., Davydova O.A., Isaev A.V., Nishchev K.N., Pynenkov A.A., Kallashnikov E.G., Fomin A.N., Svetukhin V.V. Changes of the Surface and Properties of Multi-walled Carbon Nanotubes in Physicochemical Modification. *Russian journal of applied chemistry*, 2015, vol. 88, no. 8, pp. 1229–1234. DOI: 10.1134/S1070427215080017

27. Asadchikov V.E., Volkov V.V., Chekrygina D.I., Askhadullin R.S., Martynov P.N., Osipov A.A., Dmitriev V.V., Senin A.A., Soldatov A.A., Yudin A.N., Kitaeva N.K. Structure and Properties of “Nematically Ordered” Aerogels. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters)*, 2015, vol. 101, no. 8, pp. 556–561. DOI: 10.1134/S0021364015080020.

Received 20 February 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Дисперсные системы с многостенными углеродными нанотрубками / Е.С. Климов, И.А. Макарова, М.В. Бузаева и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». – 2018. – Т. 10, № 2. – С. 5–14. DOI: 10.14529/chem180201

FOR CITATION

Klimov E.S., Makarova I.A., Buzaeva M.V., Davydova O.A., Vaganova E.S., Isaev A.V., Kozlov D.V., Bunakov N.A. Disperse Systems with the Multi-Walled Carbon Nanotubes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chemistry*. 2018, vol. 10, no. 2, pp. 5–14. (in Russ.). DOI: 10.14529/chem180201
