



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2019

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2019.3.09

УДК 539.3; 539.612

ОБ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЫ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

В.А. Семенов, С.В. Русаков, В.Г. Гилев

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 13 апреля 2019 г.

Принята: 17 сентября 2019 г.

Опубликована: 17 октября 2019 г.

Ключевые слова:

композитные материалы, эпоксидная матрица, углеродные нанотрубки, электропроводность, температурная зависимость.

АННОТАЦИЯ

Полимерные материалы на основе эпоксидных смол широко применяются при создании различных устройств и конструкций. В настоящей работе экспериментально исследована электропроводность эпоксидных матриц, модифицированных углеродными нанотрубками, при непрерывном протекании тока в процессе их полимеризации при постоянном напряжении. Актуальность проведенного исследования связана с необходимостью построения адекватной теоретической модели ориентационного упорядочивания углеродных нанотрубок в жидкой полимерной матрице в электрическом поле. Приводится описание экспериментальной установки и методики измерений. Представлены результаты измерения вольт-амперных характеристик образцов композитных материалов с различными массовыми концентрациями углеродных нанотрубок, из которых следует, что проводимость имеет омический характер. Определены времена установления тока, протекающего через образцы, после начала полимеризации при постоянном напряжении. По установившимся значениям тока показано, что проводимость образцов эпоксидных матриц, через которые протекал ток при полимеризации, больше проводимости образцов, через которые ток не протекал. При этом с увеличением концентрации нанотрубок наблюдается увеличение разности проводимостей образцов. Проведено исследование зависимости проводимости образцов от температуры через сутки после начала полимеризации композитного материала. Установлено, что при нагревании до 90 °С проводимость образца, через который пропускаться ток при полимеризации, уменьшается до значений проводимости образца без тока. Проведенное в работе исследование связано с изучением возможных технологий ускорения отверждения композитных материалов при изготовлении крупногабаритных конструкций на их основе в условиях космоса. Полученные результаты также могут быть использованы для разработки перспективных технологий изготовления композитных материалов с заданными электрофизическими и механическими свойствами путем воздействия на материалы электрических полей соответствующей конфигурации в процессе их полимеризации.

© ПНИПУ

© Семенов Виталий Анатольевич – д.ф.-м.н., доц., e-mail: semenov@psu.ru, [iD: 0000-0003-4643-6187](https://orcid.org/0000-0003-4643-6187).

Русаков Сергей Владимирович – д.ф.-м.н., проф., зав. каф., e-mail: rusakov@psu.ru, [iD: 0000-0001-6862-1100](https://orcid.org/0000-0001-6862-1100)

Гилев Валерий Григорьевич – к.ф.-м.н., доц., доцент, e-mail: gvg@psu.ru, [iD: 0000-0001-8067-1522](https://orcid.org/0000-0001-8067-1522).

Vitaly A. Semenov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, [iD: 0000-0003-4643-6187](https://orcid.org/0000-0003-4643-6187).

Sergey V. Rusakov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Department,

e-mail: rusakov@psu.ru, [iD: 0000-0001-6862-1100](https://orcid.org/0000-0001-6862-1100).

Valery G. Gilev – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, [iD: 0000-0001-8067-1522](https://orcid.org/0000-0001-8067-1522).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)



ABOUT ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE EPOXY MATRIX WITH CARBON NANOTUBES

V.A. Semenov, S.V. Rusakov, V.G. Gilev

Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 13 April 2019
Accepted: 17 September 2019
Published: 17 October 2019

Keywords:

composite materials, epoxy matrix, carbon nanotubes, conductivity, temperature dependence.

ABSTRACT

Polymeric materials on the basis of epoxy resins are widely applied in production of various devices and structures. In real work electrical conductivity of epoxy matrixes modified by carbon nanotubes under continuous current in the course of their polymerization at a constant tension is experimentally investigated. The relevance of the research is bound to an adequate theoretical model of orientation ordering of carbon nanotubes for a liquid polymeric matrix for an electric field. The description of the pilot unit and measurement technique is provided. The paper presents the measurement results of volt-ampere characteristics of specimens of composite materials with various percentages (by weight) of carbon nanotubes, which prove that the conductivity has an ohmic character. Stabilization times of the current proceeding through the specimens after the beginning of polymerization at a constant tension are defined. According to established values of current it is shown that the conductivity of the specimens of epoxy matrixes through which current at polymerization proceeded is higher than the conductivity of specimens through which current didn't proceed. At the same time with an increase of nanotubes concentration, there comes an increase of difference of the specimens' conductivity. The research of dependence of the specimen conductivity on temperature in a day after the beginning of polymerization of the composite material is conducted. It is established that when heating to 90°C, the conductivity of the specimen imposed with the current during polymerization decreases to values of the specimen conductivity without current. The research is aimed at studying how to make solidification technologies of composite materials faster for production of large parts in space applications. The received results can be also used for development of prospective manufacturing techniques of composite materials with the given electrophysical and mechanical characteristics using electric fields of the corresponding configuration in the course of their polymerization.

© PNRPU

Вопрос об электропроводности эпоксидных матриц с присадкой углеродных нанотрубок (УНТ) актуален при разработке различных прикладных технологий использования композитных материалов (КМ) в связи с достаточно высокой электропроводностью УНТ [1–6]. В настоящее время опубликовано много теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию диэлектрических свойств и электропроводности таких КМ [7–30]. При этом измерения проводимости выполнялись как в постоянных, так и в переменных электрических полях [7, 10, 13, 20, 25, 29]. В работах [7, 11–13, 15, 22, 27], в частности, показано, что под действием внешнего электрического поля при полимеризации КМ в результате пространственной ориентации УНТ может возникать анизотропия их электрических свойств. Однако необходимо отметить, что в данных работах экспериментальное исследование свойств КМ проводилось, как правило, на одном образце с определенной концентрацией УНТ. Поскольку, как показано в [25, 28], проводимость существенно зависит от методики приготовления КМ, представляет интерес одновременное изучение проводимости двух одинаково приготовленных образцов КМ, один из которых подвергается воздействию электрического поля в процессе полимеризации, а другой находится без воздействия поля.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование проводимости двух одинаково приготовленных образцов эпоксидных матриц с УНТ, через один из которых непрерывно протекает постоянный ток в процессе полимеризации.

Измерения проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1. Для каждой концентрации УНТ эпоксидной матрицы изготавливались две кюветы 1 из обрезка поливинилхлоридного кабеля-канала, к торцам которого прижимались электроды 2 из фольгированного стеклотекстолита. Конкретные размеры кювет для каждого образца КМ измерялись после полимеризации эпоксидной матрицы. Характерный размер кювет 35×14×3 мм. Обе кюветы закреплялись в одном зажимном устройстве 7. Кюветы 1 подключались к лабораторному блоку питания GPS-3030DD – 3. Ток, напряжение на образцах и показания термопары измерялись универсальными вольтметрами В7-78/1 4, 5, 6 соответственно. Температура образцов измерялась термопарой 8, прикрепленной к дну кюветы.

Измерения выполнялись по следующей методике. Эпоксидная матрица с УНТ изготавливалась на основе эпоксидной смолы L и отвердителя EPH 161, модифицированного концентратом TUBALL MATRIX 301. Массовое содержание концентрата варьировалось от 0,02 % до 0,2 %. Однородная диспергация смеси в эпок-

сидной смоле достигалась в результате использования нескольких последовательных циклов ультразвукового воздействия и электромеханического смещения. После смешивания с отвердителем смесь вновь диспергировалась ультразвуком и заливалась в две кюветы 1. Затем в течение 5 мин измерялась начальная вольт-амперная характеристика (ВАХ) образца, через который далее в процессе полимеризации непрерывно пропусклся постоянный электрический ток. На рис. 2 приведены начальные ВАХ образцов с различной массовой концентрацией УНТ. Из графиков следует, что в данном диапазоне напряжений ВАХ линейные. Это означает, что проводимость в данном диапазоне значений напряжений и токов носит омический характер, а перколяционные эффекты, обуславливающие нелинейную проводимость [29], незначительны.

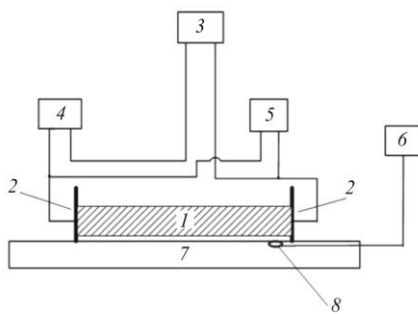


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Scheme of the experimental facilities (explanations are in the text)

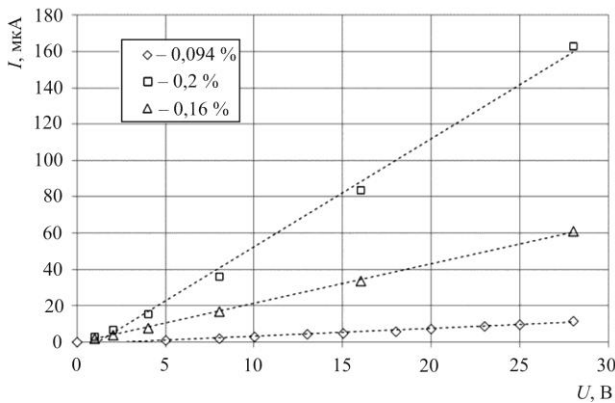


Рис. 2. Начальные ВАХ образцов с различной массовой концентрацией УНТ

Fig. 2. Initial VAC of specimens with various percentage by weight of CNT

На следующем этапе исследовалось изменение тока при постоянном напряжении (28 В) с течением времени от момента добавления отвердителя. Результаты представлены на рис. 3, из которых следует, что для выбранных размеров кювет характерное время установления тока составляет 100–120 мин. Через 24 ч после смешивания с отвердителем по установившимся значениям тока определялась удельная проводимость образцов КМ, через которые пропускался ток при полимери-

зации. Одновременно измерялась проводимость образцов без тока. На рис. 4 представлены результаты измерений удельной проводимости эпоксидной матрицы при разных массовых концентрациях УНТ после их полимеризации, из которых следует, что проводимость образцов, через которые пропускался ток при полимеризации, больше вдоль линий тока, чем у образцов без тока. При этом с увеличением концентрации УНТ наблюдается рост относительной разности проводимостей.

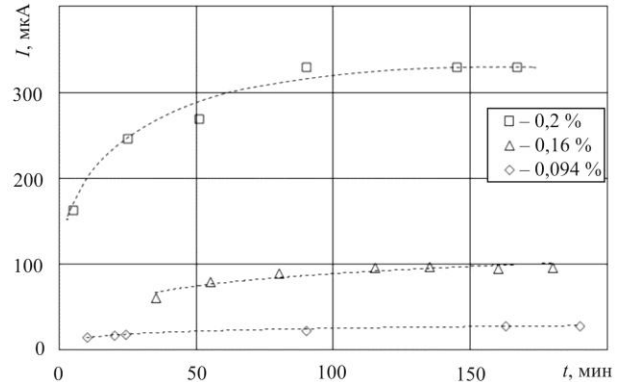


Рис. 3. Изменение тока при постоянном напряжении после добавления отвердителя ($t = 0$) для различных концентраций УНТ

Fig. 3. Change of current under constant tension after addition of a hardener ($t = 0$) for various concentrations of CNT

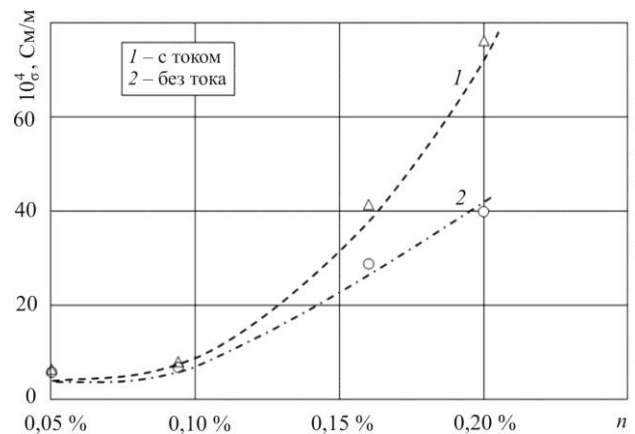


Рис. 4. Удельная проводимость σ эпоксидной матрицы при различных массовых концентрациях n УНТ: 1 – образцы, через которые пропускался ток в процессе полимеризации; 2 – ток не пропускался

Fig. 4. Specific conductivity σ the epoxy matrix at different mass concentrations of n CNT: 1 – specimens through which current in the course of polymerization was passed; 2 – without current

В ряде работ представлены результаты исследования зависимости проводимости КМ с УНТ от температуры [13, 20, 30]. Однако при этом, как правило, не указывается, через какое время от начала полимеризации КМ выполнены измерения. В связи с этим в настоящей работе исследована зависимость проводимости образцов от температуры через 24 ч после добавления отвердителя. Образцы нагревались до температуры 95 °С при постоянном напряжении (28 В).

Время от начала нагрева образцов до их остывания до начальной температуры (20 °С) составило 50 мин. Исследовались образцы с массовой концентрацией УНТ 0,2 %.

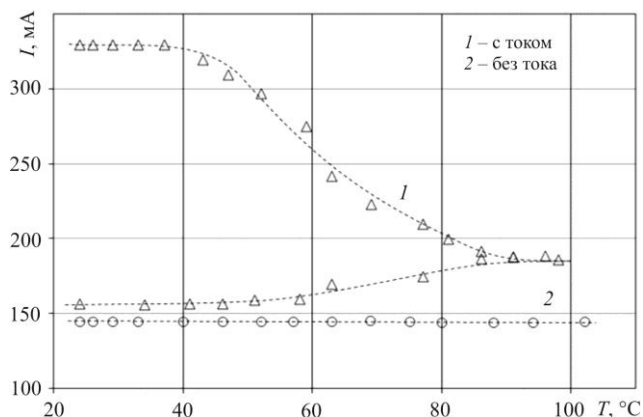


Рис. 5. Изменение тока при постоянном напряжении при нагревании образцов

Fig. 5. Current alternation at a constant voltage when heating specimens

На рис. 5 представлены результаты измерений, из которых следует, что с увеличением температуры проводимость образца, через который пропускался ток при

Библиографический список

- Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки // Успехи физических наук. – 1997. – Т. 167, № 9. – С. 945–972.
- Investigation on Sensitivity of a Polymer/carbon Nanotube Composite Strain Sensor / N. Hu, Y. Karube, Arai [et al.] // Carbon. – 2010. – No. 48. – P. 680–687. DOI: 10.1016/j.carbon.2009.10.012
- Electrical Percolation Behavior in Silver Nanowire – Polystyrene Composites: Simulation and Experiment / S.I. White, R.M. Mutiso, D. Jahnke, S. Hsu, J. Li, J.E. Fischer, K.I. Winey // Advanced Functional Materials. – 2010. – No. 20. – P. 2709–2716. DOI: 10.1002/adfm.2010.00.451
- Абдрахимов Р.Р., Сапожников С.Б., Силицын В.В. Сенсоры давления и температуры на основе суспензии эпоксидной смолы и углеродных нанотрубок // Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2013. – Т. 13, № 4. – С. 16–23.
- Mechanical and electrical property improvement in CNT/Nylon composites through drawing and stretching / X. Wang, P.D. Bradford, W. Liu [et al.] // Composites Science and Technology. – 2011. – Vol. 71. – No. 14. – P. 1677–1683. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.07.023.
- Electrical conductivity of individual carbon nanotubes / T.W. Ebbesen, H.J. Lezec, H. Hiura [et al.] // Nature. – 1996. – No. 382. – P. 54–56.
- Percolation-dominated conductivity in a conjugated-polymer-carbon-nanotube composite / J.N. Coleman, S. Curran, A.B. Dalton [et al.] // Physical Review B. – 1998. – Vol. 58. – No. 12. – P. 7492–7495. DOI: 10.1103/PhysRevB.58.R7492
- Wang L., Dang Z.-M. Carbon nanotube composites with high dielectric constant at low percolation threshold [Электронный документ] // Applied Physics Letters. – 2005. – Vol. 87. – P. 042903. DOI: 10.1063/1.1996842

полимеризации, уменьшается и в итоге после остывания исчезает различие в проводимостях образцов.

При этом проводимость второго образца не зависит от температуры. Полученный результат, вероятно, обусловлен тем, что через 24 ч в данных условиях еще не наступает полная полимеризация КМ.

Полученные в работе экспериментальные результаты могут быть использованы для построения и уточнения моделей ориентационного упорядочивания УНТ в жидкой полимерной матрице в электрическом поле, а также для разработки перспективных технологий изготовления КМ с заданными электрофизическими и механическими свойствами.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-41-590649) и Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/793.

Acknowledgment

This work was financially supported by the Russian Federal Property Fund (grant No. 17-41-590649) and the Government of the Perm Region as part of the scientific project No. S-26/793.

- Electrical and thermophysical behaviour of PVC-MWCNT nanocomposites / Ye. Mamunya, A. Boudenne, N. Lebovka [et al.] // Composites Science and Technology. – 2008. – Vol. 68. – No. 9. – P. 1981–1988. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.11.014
- Электропроводность механической смеси углеродных нанотрубок и терморасширенного графита при различных концентрациях и степени сжатия / М.М. Нищенко [и др.] // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2009. – Т. 7, № 3. – С. 717–726.
- Electric field-induced aligned multi-wall carbon nanotube networks in epoxy composites / C.A. Martin, J.K.W. Sandler, A.H. Windle [et al.] // Polymer. – 2005. – Vol. 46. – No. 3. – P. 877–886. DOI: 10.1016/j.polymer.2004.11.081
- Блохин А.Н. Влияние углеродных нанотрубок на электропроводность эпоксидной матрицы // Вопросы современной науки и практики. – 2012. – № 3(41). – С. 384–386.
- Электропроводность полипропиленовых волокон с дисперсными углеродными наполнителями / О.А. Москалюк [и др.] // Физика твердого тела. – 2012. – Т. 54, № 10. – С. 1993–1998.
- Мищенко С.В., Ткачев А.Г. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
- Bauhofer W., Kovacs J. A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites // Composites Science and Technology. – 2009. – Vol. 69. – No. 10. – P. 1486–1498. DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.06.018
- Carbon nanotube–polymer composites: chemistry, processing, mechanical and electrical properties / Z. Spitalsky, D. Tasis, K. Papagelis [et al.] // Progress in Polymer Science. – 2010. – Vol. 35. – No. 3. – P. 357–401. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2009.09.003

17. Xie X.-L., Mai Y.-W., Zhou X.-P. Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: a review // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. – 2005. – Vol. 49. – No. 4. – P. 89–112. DOI: 10.1016/j.mser.2005.04.002

18. Wang M.-W., Hsu T.-C., Weng C.-H. Alignment of MWCNTs in polymer composites by dielectrophoresis // *The European Physical Journal Applied Physics*. – 2008. – Vol. 42. – No. 3. – P. 241–246. DOI: 10.1051/epjap:2008069

19. Shao-Jie M., Guo W.-L. Mechanism of carbon nanotubes aligning along applied electric field // *Chinese Physics Letters*. – 2008. – Vol. 25. – No. 1. – P. 270–273.

20. Electrical/dielectric properties and conduction mechanism in melt processed polyamide/multi-walled carbon nanotubes composites / E. Logakis, Ch. Pandis, V. Peoglos [et al.] // *Polymer*. – 2009. – Vol. 50. – No. 21. – P. 5103–5111. DOI: 10.1016/j.polymer.2009.08.038

21. Battisti A., Skordos A.A., Partridge I.K. Percolation threshold of carbon nanotubes filled unsaturated polyesters // *Composites Science and Technology*. – 2010. – Vol. 70. – No. 4. – P. 633–637. DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.12.017

22. Preparation, characterization, and modeling of carbon nanofiber/epoxy nanocomposites / L.-H. Sun, Z. Ounaies, X.-L. Gao [et al.] // *Journal of Nanomaterials*. – Vol. 2011. – Article ID 307589. DOI: 10.1155/2011/307589

23. Analysis of DC electrical conductivity models of carbon nanotube-polymer composites with potential application to nanometric electronic devices / R. Vargas-Bernal, G. Herrera-Pérez, M.E. Calixto-Olalde [et al.] // *Journal of Electrical and Computer Engineering*. – 2013. – No. 1. DOI: 10.1155/2013/179538

24. Dielectrophoretic modeling of the dynamic carbon nanotube network formation in viscous media under alternating current

electric fields / A.I. Oliva-Aviles, F. Aviles, V. Sosa [et al.] // *Carbon*. – 2014. – Vol. 69. – P. 342–354. DOI: 10.1016/j.carbon.2013.12.035.

25. Электрические характеристики полимерных композитов, содержащих углеродные нанотрубки / А.В. Елецкий, А.А. Книжник, Б.В. Потапкин, Х.М. Кенни // *Успехи физических наук*. – 2015. – Т. 185, № 3. – С. 225–270. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201503a.0225

26. Электропроводящие гибридные полимерные композиционные материалы на основе нековалентно функционализированных углеродных нанотрубок / С.В. Кондрашов [и др.] // *Труды ВИАМ*. – 2016. – № 2. – С. 81–93. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-10-10

27. Исследование влияния функционализированных многостенных углеродных нанотрубок на электропроводность и механические характеристики эпоксидных композитов / Е.А. Яковлев [и др.] // *Вестн. Том. гос. ун-та. Химия*. – 2016. – № 3. – С. 15–23. DOI: 10.17223/24135542/5/2

28. Диэлектрические свойства композиционных материалов с ориентированными углеродными нанотрубками / Е.С. Яковенко [и др.] // *Неорганические материалы*. – 2016. – Т. 52, № 11. – С. 1271–1276.

29. Бочаров Г.С., Елецкий А.В., Книжник А.А. Нелинейное сопротивление полимерных нанокompозитов с присадкой углеродных нанотрубок в условиях перколяции // *Журнал технической физики*. – 2016. – Т. 86, № 10. – С. 64–68.

30. Electrical, thermal and mechanical properties of epoxy/CNT/calcium carbonate nanocomposites / E.H. Backes, T.S. Sene, F.R. Passador [et al.] // *Materials Research*. – 2018. – Vol. 21. – No. 1. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0801

References

- Eletskiy A.V. Uglernodnye nanotrubki [Carbon nanotubes]. *Physics-Uspokhi*, 1997, vol. 167, no. 9, pp. 945-972.
- Hu N., Karube Y., Arai et al. Investigation on Sensitivity of a Polymer/carbon Nanotube Composite Strain Sensor. *Carbon*, 2010, no. 48, pp. 680-687. DOI: 10.1016/j.carbon.2009.10.012.
- White S.I., Mutiso R.M., Jahnke D., Hsu S., Li J., Fischer J.E., Winey K.I. Electrical Percolation Behavior in Silver Nanowire – Polystyrene Composites: Simulation and Experiment. *Advanced Functional Materials*, 2010, no.20, pp. 2709-2716. DOI: 10.1002/adfm.2010.00.451.
- Abdrakhimov R.R., Sapozhnikov S.B., Sinitsyn V.V. Sensory davleniia i temperatury na osnove suspenzii epoksidnoi smoly i uglernodnykh nanotrubok [Pressure and temperature sensors based on a suspension of epoxy resin and carbon nanotubes]. *Vestnik IuURGU. Seriya «Komp'uternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika»*, 2013, vol.13, no. 4, pp.16-23.
- Wang X., Bradford P.D., Liu W. et al. Mechanical and electrical property improvement in CNT/Nylon composites through drawing and stretching. *Composites Science and Technology*, 2011, vol. 71, no. 14, pp.1677-1683. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.07.023.
- Ebbesen T.W., Lezec H.J., Hiura H. et al. Electrical Conductivity of Individual Carbon Nanotubes. *Nature*, 1996, no. 382, pp. 54-56.
- Coleman J.N., Curran S., Dalton A.B. et al. Percolation-dominated Conductivity in a Conjugated-Polymer-Carbon-Nanotube Composite. *Physical Review B*, 1998, vol. 58, no. 12, pp. 7492-7495. DOI: 10.1103/PhysRevB.58.R7492.
- Wang L., Dang Z.-M. Carbon Nanotube Composites with high Dielectric Constant at low Percolation Threshold. *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 87, p.042903. DOI:10.1063/1.1996842
- Mamunya Ye., Boudenne A., Lebovka N. et al. Electrical and thermophysical Behaviour of PVC-MWCNT Nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 2008, vol. 68, no. 9, pp. 1981-1988. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.11.014.
- Nishchenko M.M. Elektroprovodnost' mekhanicheskoi smesi uglernodnykh nanotrubok i termorasshirenno go grafita pri razlichnykh konsentratsiakh i stepeni szhatiia [Electrical conductivity of a mechanical mixture of carbon nanotubes and thermally expanded graphite at various concentrations and compression ratios]. *Nanosistemi, nanomateriali, nanotekhnologii*, 2009, vol. 7, no. 3, pp. 717-726.
- Martin C.A., Sandler J.K.W., Windle A.H. et al. Electric field-induced aligned multi-wall Carbon Nanotube Networks in epoxy Composites. *Polymer*, 2005, vol. 46, no. 3, pp.877-886. DOI: 10.1016/j.polymer.2004.11.081.
- Blokhin A.N. Vliianie uglernodnykh nanotrubok na elektroprovodnost' epoksidnoi matritsy [The effect of carbon nanotubes on the conductivity of an epoxy matrix]. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I.Vernadskogo*, 2012, no. 3(41), pp. 384-386.
- Moskaliuk O.A. Elektroprovodnost' polipropilenovykh volokon s dispersnymi uglernodnymi napolniteliami [The electrical conductivity of polypropylene fibers with dispersed carbon fillers]. *Fizika tverdogo tela*, 2012, vol.54, no.10, pp.1993-1998.
- Mishchenko S.V., Tkachev A.G. Uglernodnye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoistva, primenenie [Carbon nanomaterials. Production, properties, application]. *Moscow, Mashinostroenie*, 2008, 320 p.
- Bauhofer W., Kovacs J. A Review and Analysis of Electrical Percolation in Carbon Nanotube Polymer Composites. *Com-*

posites Science and Technology, 2009, vol. 69, no. 10, pp. 1486-1498. DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.06.018.

16. Spitalsky Z., Tasis D., Papagelis K. et al. Carbon Nano-tube–polymer Composites: Chemistry, Processing, mechanical and electrical Properties. *Progress in Polymer Science*, 2010, vol. 35, no. 3, pp.357-401. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2009.09.003.

17. Xie X.-L., Mai Y.-W., Zhou X.-P. Dispersion and Alignment of Carbon Nanotubes in Polymer Matrix: a Review. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2005, vol. 49, no. 4, pp. 89-112. DOI: 10.1016/j.mser.2005.04.002.

18. Wang M.-W., Hsu T.-C., Weng C.-H. Alignment of MWCNTs in Polymer Composites by Dielectrophoresis. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2008, vol. 42, no. 3, pp.241-246. DOI: 10.1051/epjap:2008069.

19. Shao-Jie M., Guo W.-L. Mechanism of Carbon Nanotubes Aligning along Applied Electric Field. *Chinese Physics Letters*, 2008, vol. 25, no. 1, pp.270-273.

20. Logakis E., Pandis Ch., Peoglos V. et al. Electrical/dielectric Properties and Conduction Mechanism in melt Processed Polyamide/multi-walled Carbon Nanotubes Composites. *Polymer*, 2009, vol.50, no.21, pp.5103-5111. DOI: 10.1016/j.polymer.2009.08.038.

21. Battisti A., Skordos A.A., Partridge I.K. Percolation threshold of Carbon Nanotubes filled unsaturated Polyesters. *Composites Science and Technology*, 2010, vol. 70, no. 4, pp. 633-637. DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.12.017.

22. Sun L.-H., Ounaies Z., Gao X.-L. et al. Preparation, Characterization, and Modeling of Carbon Nanofiber/Epoxy Nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*, vol. 2011, article ID 307589. DOI: 10.1155/2011/307589.

23. Vargas-Bernal R., Herrera-Pérez G., Calixto-Olalde M.E. et al. Analysis of DC Electrical Conductivity Models of Carbon Nanotube-Polymer Composites with Potential Application to Nanometric Electronic Devices. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2013, no.1. DOI: 10.1155/2013/179538.

24. Oliva-Aviles A.I., Aviles F., Sosa V. et al. Dielectrophoretic Modeling of the Dynamic Carbon Nanotube Network For-

mation in Viscous Media under Alternating Current Electric Fields. *Carbon*, 2014, vol. 69, pp.342-354. DOI: 10.1016/j.carbon.2013.12.035.

25. Eletsii A.V., Knizhnik A.A., Potapkin B.V., Kenni Kh.M. Elektricheskie kharakteristiki polimernykh kompozitov, sodержashchikh uglerodnye nanotrubki [Electrical Characteristics of Polymer Composites Containing Carbon Nanotubes]. *Physics-Uspekhii*, 2015, vol.185, no 3, pp. 225-270. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201503a.0225.

26. Kondrashov S.V. Elektroprovodiashchie gibridnye polimernye kompozitsionnye materialy na osnove nekovalentno funktsionalizirovannykh uglerodnykh nanotrubok [Electrically conductive hybrid polymer composite materials based on non-covalently functionalized carbon nanotubes]. *Trudy VIAM*, 2016, no. 2, pp. 81-93. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-10-10.

27. Iakovlev E.A. Issledovanie vlianiia funktsionalizirovannykh mnogostennykh uglerodnykh nanotrubok na elektroprovodnost' i mekhanicheskie kharakteristiki epoksidnykh kompozitov [Investigation of the effect of functionalized multi-walled carbon nanotubes on the electrical conductivity and mechanical characteristics of epoxy composites]. *Vestn. Tom. gos. un-ta. Khimiia*, 2016, no. 3, pp.15-23. DOI: 10.17223/24135542/5/2.

28. Iakovenko E.S. Dielektricheskie svoistva kompozitsionnykh materialov s orientirovannymi uglerodnymi nanotrubkami [Dielectric properties of composite materials with oriented carbon nanotubes]. *Neorganicheskie materialy*, 2016, vol. 52, no. 11, pp. 1271-1276.

29. Bocharov G.S., Eletsii A.V., Knizhnik A.A. Nelineinoe soprotivlenie polimernykh nanokompozitov s prisadkoi uglerodnykh nanotrubok v usloviakh perkoliatsii [Nonlinear resistance of polymer nanocomposites with an additive of carbon nanotubes under percolation conditions]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2016, vol. 86, no. 10, pp.64-68.

30. Backes E.H., Sene T.S., Passador F.R. et al. Electrical, Thermal and Mechanical Properties of Epoxy/CNT/Calcium Carbonate Nanocomposites. *Materials Research*, 2018, vol. 21, no. 1. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0801.