



УДК 539.2:537.31

Э.А. Лысенков, канд. физ.-мат. наук
Николаевский национальный университет им. В.А. Сухомлинского
(Украина, 54030, Николаев, ул. Никольская, 24,
тел. (0512) 378812, e-mail: ealysenkov@ukr.net),
В.В. Клепко, д-р физ.-мат. наук
Ин-т химии высокомолекулярных соединений НАН Украины
(Украина, 02160, Киев, Харьковское шоссе, 48,
тел. (044) 5593711, e-mail: klepko_vv@ukr.net)

Комбинированная модель для описания электропроводимости систем на основе простых полиэфигов и углеродных нанотрубок

Предложена комбинированная теоретическая модель электропроводимости полимерных нанокомпозитов, с помощью которой описаны экспериментальные результаты для систем простой полиэфир—углеродные нанотрубки (УНТ). В комбинированной модели учтены вклады в общую электропроводимость от полимерной матрицы, межфазных слоев на границе полимер—УНТ, прямых контактов между УНТ и туннелирования электронов. Предложенная модель хорошо описывает эксперимент в широком интервале концентраций УНТ и позволяет получать исчерпывающую информацию о процессах переноса зарядов в системе.

Запропоновано комбіновану теоретичну модель електропровідності полімерних нанокомпозитів, за допомогою якої описано експериментальні результати для систем полієтер—вуглецеві нанотрубки (ВНТ). В комбінованій моделі враховано внески у загальну електропровідність від полімерної матриці, міжфазних шарів на межі полімер—ВНТ, прямих контактів між ВНТ та тунелювання електронів. Запропонована модель добре описує експеримент у широкому інтервалі концентрацій ВНТ та дозволяє отримувати вичерпну інформацію про процеси перенесення зарядів у системі.

К л ю ч е в ы е с л о в а: перколяционное поведение, полимерные нанокомпозиты, электропроводимость, углеродные нанотрубки.

Для производства электропроводных нанокомпозитных материалов важным является прогнозирование их электрических свойств. Существует большое число моделей, с помощью которых можно описать электрическое поведения полимерных нанокомпозитов [1—4]. Во всех моделях учтено содержание наполнителя, однако существует много других факторов, влияющих на электропроводимость системы полимер—наполнитель, например смачивание частиц наполнителя полимером, контактное сопро-

© Э.А. Лысенков, В.В. Клепко, 2016

тивление между частицами наполнителя, аспектное отношение наполнителя и др. [5]. На свойства нанокompозита влияют также физические свойства наполнителя и полимера, включающие в себя структурные свойства, межфазные свойства и составленную электропроводимость [6, 7]. Свойства наполнителя, играющие значительную роль в определении электропроводимости композита, включают тип, размер и форму наполнителя. Характер и сила взаимодействия между полимером и наполнителем также оказывают существенное влияние на электропроводимость нанокompозита [8]. Все перечисленные факторы — очень важны, поэтому они учтены в большинстве теоретических моделей электропроводимости. Однако, поскольку не существует единственной модели электропроводимости, для каждой отдельной нанонаполненной полимерной системы следует подбирать наиболее точную модель.

Наиболее сложны для прогнозирования электропроводимости системы на основе матриц с высокой собственной электропроводимостью, например простых полиэфи́ров, в которых прыжок электропроводимости при достижении порога перколяции небольшой и составляет два-три порядка. При детальном исследовании перколяционного перехода в системах простой полиэфи́р—УНТ [9] можно заметить, что электропроводимость системы до порога перколяции возрастает нелинейно. Это свидетельствует о вкладе в общую электропроводимость других проводящих фаз кроме УНТ и полимерной матрицы, например поверхностного (межфазного) слоя. Также доказано, что в системе полиэфи́р—УНТ реализуется два механизма переноса зарядов: через прямые контакты между нанотрубками и туннелирование [10].

Учет всех этих факторов позволит создать более совершенную модель для описания перколяционного поведения электропроводности систем полиэфи́р—УНТ.

Соответствие теоретических моделей результатам эксперимента определялось с помощью экспериментальных результатов исследования концентрационной зависимости электропроводимости для систем на основе полиэтиленгликоля-400 (ПЭГ-400—УНТ) [10], полипропиленгликоля-400 (ППГ-400—УНТ) [11], а также систем ПЭГ-400—УНТ и ППГ-400—УНТ, которые содержат 10 % неорганической соли LiClO_4 [12].

Для построения комбинированной модели, обеспечивающей корректное описание электропроводимости систем на основе полиэфи́ров и УНТ, необходимо учитывать вклады в общую электропроводимость от различных проводящих фаз и процессов.

1. *Вклад от полимерной матрицы* (σ_m). На общую электропроводимость системы влияет электропроводимость полиэфи́рной матрицы.

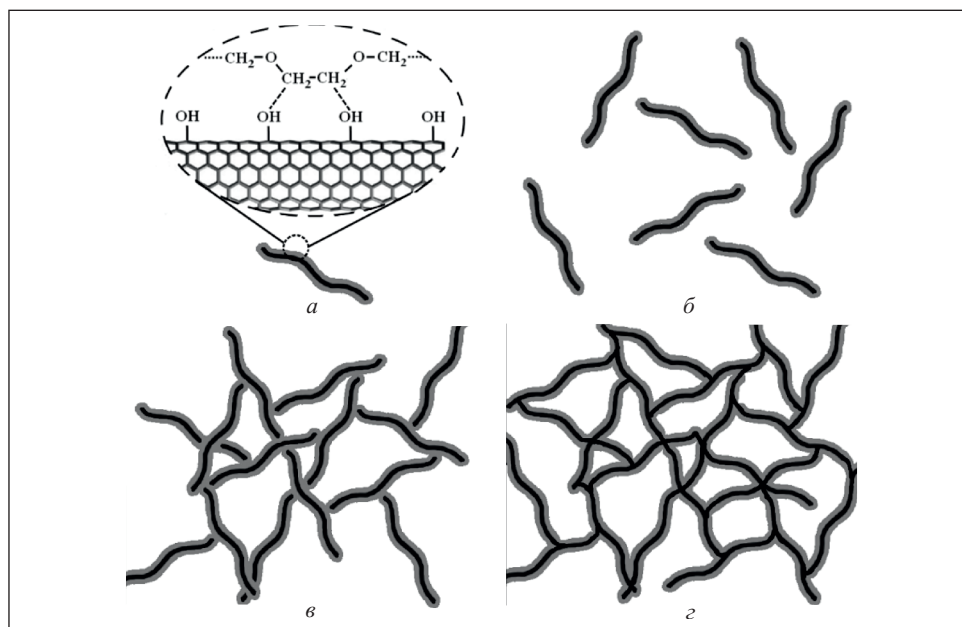


Рис. 1. Схематическое изображение пространственного распределения нанотрубок в системе полиэфир—УНТ

2. Вклад от поверхностного слоя (σ_{surf}). В системах полиэфир—УНТ вокруг нанотрубок, имеющих негативно заряженную поверхность, при наличии гидроксильных, карбоксильных и лактонных групп [13] образуется поверхностный слой, состоящий из макромолекул полиэфира, которые притягиваются к поверхности нанотрубки (рис. 1, а). В связи с этим процесс перколяции в системах полиэфир—УНТ можно представить так.

При небольшом количестве нанотрубок (до 0,3 %) в системе содержатся равномерно распределенные частицы наполнителя, не контактирующие между собой (рис. 1, б).

При концентрации нанотрубок приблизительно 0,4-0,5 % частицы, контактируя между собой, образуют перколяционный кластер, особенность которого состоит в том, что нанотрубки не имеют прямых контактов между собой, а соединяются лишь с использованием поверхностного слоя (рис. 1, в). Именно это приводит к незначительному возрастанию электропроводимости в данном концентрационном диапазоне (нелинейное изменение электропроводимости до порога перколяции), так как электропроводимость поверхностного слоя составляет приблизительно 10^{-5} — 10^{-4} См/см.

При последующем возрастании содержания УНТ в системе они начинают контактировать между собой, т.е. сближаются до расстояний, на которых действует механизм туннелирования σ_{tun} (рис. 1, г). При этом

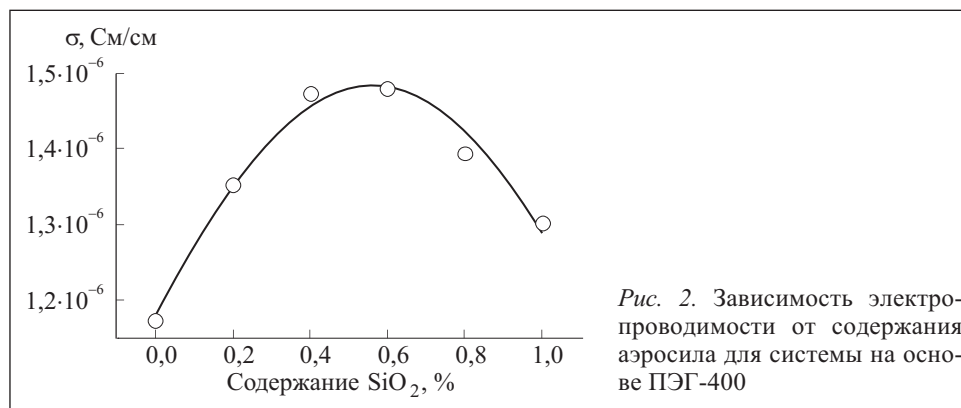


Рис. 2. Зависимость электропроводимости от содержания аэросила для системы на основе ПЭГ-400

электропроводимость систем значительно возрастает, что связано с образованием основного перколяционного кластера из УНТ.

Следовательно, для систем полиэфир—УНТ фактически наблюдается явление двойной перколяции, при котором сначала перколируют поверхностные слои, а затем нанотрубки. Такое двухэтапное перколяционное поведение хорошо согласуется с известными результатами [14—16]. Однако следует заметить, что в указанных работах, явление двойной перколяции наблюдалось в более явном виде, чем в системах полиэфир—УНТ. Авторы работы [14] наблюдали явление двойной перколяции при исследовании перколяционного поведения УНТ в нематическом жидком кристалле 5СВ. Для объяснения этого явления было использовано предположение существования структуры «ядро-оболочка» для УНТ в жидком кристалле и среднеполевая теория для описания электропроводимости таких систем.

Поскольку поверхностный слой образуется на поверхности нанотрубок, общая электропроводимость зависит именно от общей поверхности наполнителя. Для определения зависимости электропроводимости поверхностного слоя от содержания наполнителя φ проведено исследование электропроводимости модельной системы на основе ПЭГ-400 и наноразмерного аэросила SiO₂ (пирогенный диоксид кремния). Аэросил (А-300) имеет близкую по величине (сравнительно с УНТ) площадь поверхности.

Результаты исследования электропроводимости системы ПЭГ—аэросил приведены на рис. 2, из которого видно, что электропроводимость сначала возрастает, достигая максимума при содержании наполнителя приблизительно 0,5 %, а затем снижается. Такой эффект связан с влиянием поверхности наполнителя, которая увеличивается при возрастании содержания наполнителя, а затем уменьшается вследствие значительной агрегации частиц аэросила.

Зависимость электропроводимости от содержания наполнителя для системы ПЭГ—аэросил, а следовательно, и вклад поверхностного слоя в общую электропроводимость сложной системы, с высокой степенью точности ($R^2 = 0,98$) можно описать функцией Гаусса:

$$\sigma_{\text{surf}} = a \exp \left[-\frac{(\varphi - \varphi_m)^2}{2c^2} \right], \quad (1)$$

где a , φ_m , c — константы.

3. *Вклад туннелирования.* На общую электропроводимость значительно влияют нанотрубки, не образующие прямых контактов, однако сближающиеся на расстояния, на которых действует механизм туннелирования. Если допустить, что нанотрубки имеют цилиндрическую форму, зависимость туннельной электропроводимости от содержания наполнителя можно записать в виде [17]:

$$\sigma_{\text{tun}} = \sigma_0 \exp \left[-\frac{2D}{\xi} \frac{\gamma (b/a)^2}{\varphi} \right], \quad (2)$$

где $D = 2 \max(a, b)$; $\gamma = 0,6$; b — диаметр трубки (≈ 40 нм); a — длина трубки (≈ 5 мкм); ξ — туннельное расстояние; σ_0 — константа.

С учетом всех вкладов (1) и (2) общую электропроводимость σ_{total} нанонаполненной системы запишем в следующем виде:

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_m + \sigma_{\text{surf}} + \sigma_{\text{tun}}. \quad (3)$$

На рис. 3, а, приведены результаты моделирования общей электропроводимости системы ПЭГ—УНТ с использованием уравнения (3). Из рис. 3, а, видно, что теоретическая кривая плохо описывает экспериментальные данные в области концентраций наполнителя после порога перколяции. Следовательно, модельные представления нуждаются в последующей модификации.

4. *Вклад от прямых контактов между УНТ.* При увеличении содержания УНТ в системе нанотрубки начинают контактировать, образуя электропроводные кластеры. Такой переход диэлектрик — проводник хорошо описывается в рамках теории перколяции. Поэтому вклад от нанотрубок, контактирующих между собой σ_{cont} , можно определить с помощью следующего скейлингового уравнения: $\sigma_{\text{cont}} = \sigma_0 (\varphi - \varphi_c)^t$, где φ_c — порог перколяции; t — критический индекс электропроводимости; σ_0 — константа. С учетом вклада контактирующих нанотрубок общую электропроводимость системы запишем так:

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_m + \sigma_{\text{surf}} + \sigma_{\text{cont}}. \quad (4)$$

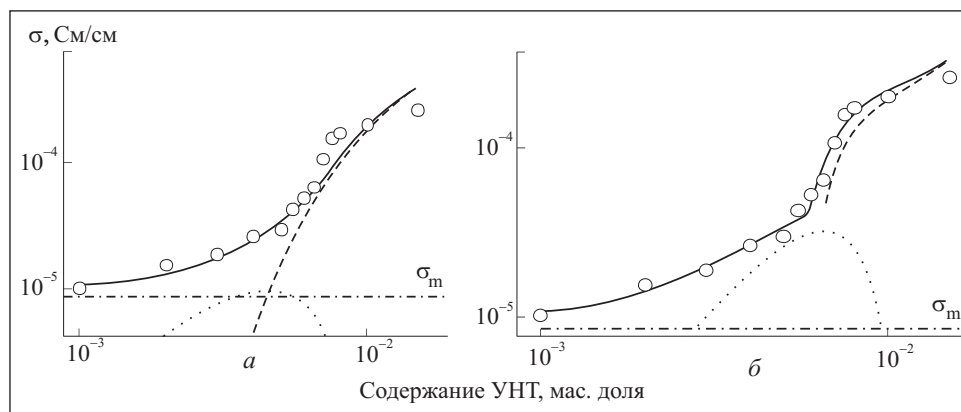


Рис. 3. Результаты моделирования общей электропроводности системы ПЭГ-400—УНТ с использованием уравнения (3) (а) и уравнения (4) (б): ○ — ПЭГ-400+УНТ; — · — вклад полимерной матрицы; · · · · вклад поверхностного слоя; — — — вклад туннелирования; — модель

На рис. 3, б, представлены результаты моделирования общей электропроводности системы ПЭГ—УНТ с использованием уравнения (4). Из рис. 3, б, видно, что теоретическая кривая достаточно хорошо описывает экспериментальные данные. Однако в области больших концентраций УНТ результаты моделирования не совпадают с экспериментальными данными. Это объясняется тем, что в модели предусмотрено образование лишь прямых контактов между УНТ и не учитывается вклад от не прямых контактов (туннелирования) в общую электропроводность.

5. Вклад от прямых контактов между УНТ и туннельной перколяции. Существование прямых контактов и между нанотрубками и наличие механизма туннелирования можно описать с помощью модели туннельной перколяции (σ_{tp}) [18], которая основана на предположении существования составленных частиц и теории критической перколяции. Составленную частицу можно представить, используя модель ядро — оболочка, где ядро — нанотрубка, которая может образовывать прямые контакты с соседними УНТ, а оболочка — тонкий полимерный слой, через который реализуется туннелирование электронов.

Для расчета эффективной электропроводности системы полимер — наполнитель в модели туннельной перколяции используют следующее уравнение:

$$\sigma_{tp} = \sigma_{eq} \left(\frac{\Phi_{eq} - \Phi_{eq}^c}{1 - \Phi_{eq}^c} \right)^t,$$

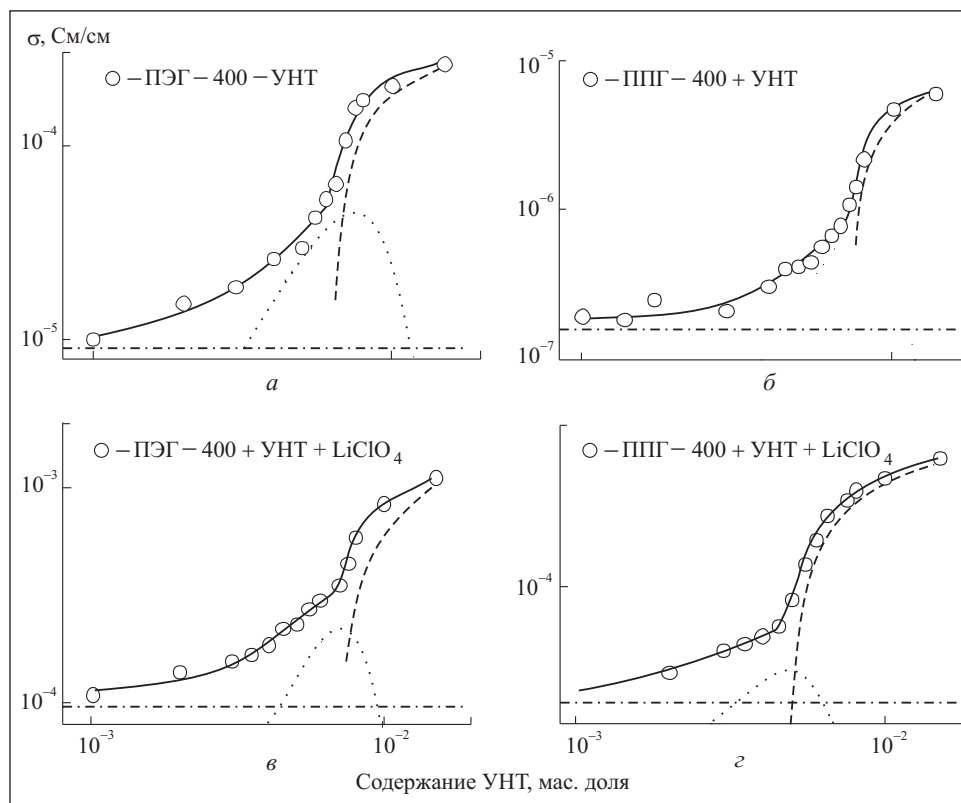


Рис. 4. Результаты моделирования общей электропроводности системы на основе ПЭГ-400 (а), ППГ-400 (б), ПЭГ-400+LiClO₄ (в) и ППГ-400+LiClO₄ (г) с использованием уравнения (5): —·— вклад полимерной матрицы; ···· вклад поверхностного слоя; --- вклад туннельной перколяции; ——— комбинированная модель

где σ_{eq} — эквивалентная электропроводность, зависящая от электропроводностей ядра частицы и полимерной оболочки; t — универсальный критический индекс, который при идеальном контакте и равномерном распределении составленных частиц в композите равен двум; Φ_{eq} — объемное содержание наполнителя в модели ядро — оболочка, который зависит от объемного содержания ядер ϕ (реального содержания частиц наполнителя), радиуса ядра r и толщины оболочки τ ; Φ_{eq}^c — критическая концентрация наполнителя, при которой образуется непрерывная сетка из частиц наполнителя через всю систему.

Учитывая вклад туннельной перколяции (прямых контактов и туннелирования), общую электропроводность системы запишем в виде:

$$\sigma_{total} = \sigma_m + \sigma_{surf} + \sigma_{tp} \quad (5)$$

На рис. 4 приведены результаты моделирования общей электропроводимости систем ПЭГ—УНТ и ППГ—УНТ с использованием модели, описываемой уравнением (5). Как видим, теоретическая кривая хорошо описывает экспериментальные данные.

С помощью моделирования получены следующие характеристики системы:

электропроводимость поверхностного слоя для системы на основе ПЭГ — $4,5 \cdot 10^{-6}$ См/см, а для системы на основе ППГ — $8 \cdot 10^{-7}$ См/см;

при добавлении в систему неорганической соли электропроводимость поверхностного слоя для ПЭГ-400—УНТ—LiClO₄ составила $2,2 \cdot 10^{-4}$ См/см;

максимальная поверхность межфазного слоя для обеих систем достигается при 0,5 — 0,7 % УНТ;

диаметр ядра — 1 мкм, что соответствует результатам работы [19], в которой принято допущение о том, что УНТ представляет собой клубок, имеющий эффективный размер 1,14 мкм.

Толщина полимерной оболочки, через которую реализуется тоннелирование электронов составляет 5 нм для всех исследованных систем. Порог перколяции для систем на основе ПЭГ и ППГ составил соответственно 0,7 % и 0,65 %. Такие значения порогов перколяции оказались значительно выше значений, полученных с помощью скейлинговой модели [4]. Это объясняется тем, что в скейлинговой модели не учтены вклады от не прямых контактов между УНТ и поверхностных слоев в общую электропроводимость системы. Поэтому порог перколяции определяется с учетом образования в системе лишь прямых контактов между частицами наполнителя. Значения критических индексов t также отличаются от рассчитанных ранее и составляют 0,8 и 0,7 для систем на основе соответственно ПЭГ и ППГ.

Выводы

Таким образом, с помощью комбинированной перколяционной модели, описываемой уравнением (5), в которой учтены различные вклады в общую электропроводимость системы, можно с высокой точностью описать электропроводимость систем простой полиэфир — УНТ. Данная модель позволяет разделить вклады от полимерной матрицы, поверхностных слоев, тоннелирования и прямых контактов между частицами наполнителя. Полученные с помощью моделирования параметры дают исчерпывающую информацию о процессах переноса зарядов в системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vargas-Bernal R., Herrera-Perez G., Calixto-Olalde M.E., Tecpoyotl-Torres M.* Analysis of DC electrical conductivity models of carbon nanotube-polymer composites with potential application to nanometric electronic devices // *J. of Electric. and Comput. Engin.* — 2013. — Vol. 2013. — P. 1—14.
2. *Taherian R.* Development of an equation to model electrical conductivity of polymer-based carbon nanocomposites // *ECS J. of Solid State Sci. Technol.* — 2014. — Vol. 3. — P. M26—M38.
3. *Лысенков Э.А., Клепко В.В.* Моделирование электропроводимости систем на основе простых полиэфиров и углеродных нанотрубок // *Электрон. моделирование.* — 2016. — **38**, №1. — С. 115—126.
4. *Лысенков Е.А., Клепко В.В.* Аналіз перколяційної поведінки електропровідності систем на основі поліетерів та вуглецевих нанотрубок // *Журнал нано- та електронної фізики.* — 2016. — Т. 8, № 1. — С. 01017-1—01017-7.
5. *Spitalsky Z., Tasis D., Papagelis K., Galiotisa C.* Carbon nanotube—polymer composites: chemistry, processing, mechanical and electrical properties // *Progress in Polym. Sci.* — 2010. — Vol. 35. — P. 357—401.
6. *Vauhofer W., Kovacs J.Z.* A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotubes polymer composites // *Compos. Sci. Technol.* — 2009. — Vol. 69. — P. 1486—1498.
7. *Елецкий А.В., Книжник А.А., Потапкин Б.В., Кенни Х.М.* Электрические характеристики полимерных композитов, содержащих углеродные нанотрубки // *УФН.* — 2015. — Т. 185. — С. 225—270.
8. *Du J-H., Bai J., Cheng H-M.* The present status and key problems of carbon nanotube based polymer composites // *eXPRESS Polymer Letters.* — 2007. — Vol. 1. — P. 253—273.
9. *Lysenkov E., Melnyk I., Bulavin L. et al.* Structure of polyglycols doped by nanoparticles with anisotropic shape // in L. Bulavin and N. Lebovka (eds.), *Physics of Liquid Matter: Modern Problems, Springer Proceedings in Physics.* — Switzerland: Springer International Publishing, 2015. — P. 165—198.
10. *Лысенков Е.А., Клепко В.В.* Особливості переносу зарядів у системі поліетиленгліколь вуглецеві нанотрубки // *Журнал нано- та електронної фізики.* — 2013. — Т. 5, № 3. — С. 03052-1—03052-6.
11. *Lysenkov E.A., Yakovlev Y.V., Klepko V.V.* Percolative properties of systems based on polypropylene glycol and carbon nanotubes // *Ukr. Phys. J.* — 2013. — Vol. 58, № 4. — P. 378—384.
12. *Lysenkov E.A., Klepko V.V., Yakovlev Yu.V.* Specifics of percolation behavior in the polyether—carbon nanotube systems doped with LiClO_4 // *Surface Engin. and Appl. Electrochem.* — 2016. — Vol. 52, № 2. — P. 186—192.
13. *Manilo M., Lebovka N., Barany S.* Characterization of the electric double layers of multiwalled carbon nanotubes, laponite and nanotube + laponite hybrids in aqueous suspensions // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.* — 2014. — Vol. 462. — P. 211—216.
14. *Tomylo S., Yaroshchuk O., Lebovka N.* Two-step electrical percolation in nematic liquid crystals filled with multiwalled carbon nanotubes // *Phys. Rev. E.* — 2015. — Vol. 92. — P. 12502-1—12502-8.
15. *Nettelblad B., Mertensson E., Önnby C. et al.* Two percolation thresholds due to geometrical effects: experimental and simulated results // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 2003. — Vol. 36, № 4. — P. 399—405.
16. *Pang H., Chen C., Bao Yu. et al.* Electrically conductive carbon nanotube/ultrahigh molecular weight polyethylene composites with segregated and double percolated structure // *Mater. Lett.* — 2012. — Vol. 79. — P. 96—99.
17. *Ambrosetti G., Grimaldi C., Balberg I. et al.* Solution of the tunneling-percolation problem in the nanocomposite regime // *Phys. Rev. B.* — 2010. — Vol. 81, № 15. — P. 155434-1—155434-12.

18. Zhu L.-J., Cai W.-Z., Gu B.-Q., Tu S.-T. Tunneling percolation model of the electrical conductivity of particulate nanocomposites // *Modern Physics Letters B*. — 2009. — Vol. 23, № 10. — P. 1273—1279.
19. Lisetski L.N., Fedoryako A.P., Samoilov A.N. et al. Optical transmission of nematic liquid crystal 5CB doped by single-walled and multi-walled carbon nanotubes // *Eur. Phys. J. E*. — 2014. — Vol. 37. — P. 68-1—68-7.

E.A. Lysenkov, V.V. Klepko

COMBINED MODEL FOR DESCRIPTION OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE SYSTEMS BASED ON POLYETHERS AND CARBON NANOTUBES

The combined theoretical model of electrical conductivity of polymeric nanocomposites is offered and experimental results for the systems polyether–carbon nanotubes (CNT) are described using proposed model. The combined model takes into account contributions from a polymeric matrix, interface layers on a polymer–CNT border, direct contacts between CNT and tunneling to the general conductivity. The proposed model well describes an experiment in the wide interval of CNT concentrations and allows obtaining exhaustive information about the processes of charges transfer in the system.

Key words: percolation behavior, polymer nanocomposites, electrical conductivity, carbon nanotubes.

REFERENCES

1. Vargas-Bernal, R., Herrera-Perez, G., Calixto-Olalde, M.E. and Tecpoyotl-Torres, M. (2013), “Analysis of DC electrical conductivity models of carbon nanotube-polymer composites with potential application to nanometric electronic devices”, *J. of Electric. and Comput. Engin.*, Vol. 2013, pp. 1-14.
2. Taherian, R. (2014), “Development of an equation to model electrical conductivity of polymer-based carbon nanocomposites”, *ECS J. of Solid State Sci. Technol.*, Vol. 3, pp. M26-M38.
3. Lysenkov, E.A. and Klepko, V.V. (2016), “Modelling of electrical conductivity of the systems based on polyethers and carbon nanotubes”, *Elektronnoe modelirovanie*, Vol. 38, no. 1, pp. 115-126.
4. Lysenkov, E.A. and Klepko, V.V. (2016), “Analysis of percolation behavior of electrical conductivity of the systems based on polyethers and carbon nanotubes”, *Journal of Nano- and Electronic Physics*, Vol. 8, no. 1, pp. 01017-1-01017-7.
5. Spitalsky, Z., Tasis, D., Papagelis, K. and Galiotisa, C. (2010), “Carbon nanotube–polymer composites: chemistry, processing, mechanical and electrical properties”, *Progress in Polym. Sci.*, Vol. 35, pp. 357-401.
6. Bauhofer, W. and Kovacs, J.Z. (2009), “A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotubes polymer composites”, *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 69, pp. 1486-1498.
7. Eletsii, A.V., Knizhnik, A.A., Potapkin, B.V. and Kenny Kh.M. (2015), “Electrical characteristics of carbon nanotube doped composites”, *Uspekhi fizicheskikh nauk*, Vol. 185, pp. 225–270.
8. Du, J-H., Bai, J. and Cheng, H-M. (2007), “The present status and key problems of carbon nanotube based polymer composites”, *eXPRESS Polymer Letters*, Vol. 1, pp. 253-273.
9. Lysenkov, E., Melnyk, I., Bulavin, L., Klepko, V. and Lebovka, N. (2015), “Structure of polyglycols doped by nanoparticles with anisotropic shape”, Eds L. Bulavin and N. Lebovka, *Physics of Liquid Matter: Modern Problems, Springer Proceedings in Physics*, Springer International Publishing, Switherland, pp. 165-198.

10. Lysenkov, E.A. and Klepko, V.V. (2013), "Features of charge transfer in the polyethylene glycol / carbon nanotubes system", *Journal of Nano-And Electronic Physics*, Vol. 5, no. 3, pp. 03052-1-03052-6.
11. Lysenkov, E.A., Yakovlev, Y.V. and Klepko, V.V. (2013), "Percolative properties of systems based on polypropylene glycol and carbon nanotubes", *Ukr. J. Phys.*, Vol. 58, no. 4, pp. 378-384.
12. Lysenkov, E.A., Klepko, V.V. and Yakovlev, Yu.V. (2016), "Specifics of percolation behavior in the polyether-carbon nanotube systems doped with LiClO_4 ", *Surface Engin. and Appl. Electrochem.*, Vol. 52, no. 2, pp. 186-192.
13. Manilo, M., Lebovka, N. and Barany, S. (2014), "Characterization of the electric double layers of multi-walled carbon nanotubes, laponite and nanotube + laponite hybrids in aqueous suspensions", *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, Vol. 462, pp. 211-216.
14. Tomylo, S., Yaroshchuk, O. and Lebovka, N. (2014), "Two-step electrical percolation in nematic liquid crystals filled with multiwalled carbon nanotubes", *Phys. Rev. E.*, Vol. 92, pp. 12502-1-12502-8.
15. Nettelblad, B., Mertensson, E., Önnby, C., Gäfvert, U. and Gustafsson, A. (2003), "Two percolation thresholds due to geometrical effects: experimental and simulated results", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 36, no. 4, pp. 399-405.
16. Pang, H., Chen, C., Bao, Yu., Chen, J., Ji, X., Lei, J. and Li, Z.-M. (2012), "Electrically conductive carbon nanotube/ultrahigh molecular weight polyethylene composites with segregated and double percolated structure", *Mater. Lett.*, Vol. 79, pp. 96-99.
17. Ambrosetti, G., Grimaldi, C., Balberg, I., Maeder, T., Danani, A. and Ryser, P. (2010), "Solution of the tunneling-percolation problem in the nanocomposite regime", *Phys. Rev. B.*, Vol. 81, no. 15, pp. 155434-1-155434-12.
18. Zhu, L.-J., Cai, W.-Z., Gu, B.-Q. and Tu, S.-T. (2009), "Tunneling percolation model of the electrical conductivity of particulate nanocomposites", *Modern Physics Letters B.*, Vol. 23, no. 10, pp. 1273-1279.
19. Lisetski, L.N., Fedoryako, A.P., Samoilov, A.N., Minenko, S.S., Soskin, M.S. and Lebovka, N.I. (2014), "Optical transmission of nematic liquid crystal 5CB doped by single-walled and multi-walled carbon nanotubes", *Eur. Phys. J. E.*, Vol. 37, pp. 68-1-68-7.

Поступила 18.07.16

ЛЫСЕНКОВ Эдуард Анатольевич, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики Николаевского национального университета им. В.А. Сухомлинского. В 2008 г. окончил Николаевский госуниверситет им. В.А. Сухомлинского. Область научных исследований — структура, электрические и теплофизические свойства полимерных нанокомпозитов, процессы перколяции в нанонаполненных полимерных системах.

КЛЕПКО Валерий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. отделом физики полимеров, зам. директора по научной работе Ин-та химии высокомолекулярных соединений НАН Украины. В 1985 г. окончил Киевский госуниверситет им. Т. Г. Шевченко. Область научных исследований — процессы перколяции в полимерных гелях и нанонаполненных полимерных системах, критические явления в полимерных растворах, фрактальные структуры в физике полимеров.