

Технічні науки

УДК 538.9:536.6

**Фиалко Наталия Михайловна**

*доктор технических наук, профессор,*

*член-корреспондент НАН Украины,*

*заведующий отделом*

*Отдел теплофизики энергоэффективных теплотехнологий*

*Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины*

**Fialko Nataliia**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,*

*Corresponding Member of the NAS of Ukraine,*

*Head of Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**Динжос Роман Владимирович**

*доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник*

*Отдел теплофизики энергоэффективных теплотехнологий*

*Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины*

**Dinzhos Roman**

*Doctor of Technical Sciences,*

*Assistant Professor, Senior Researcher of the*

*Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**Меранова Наталия Олеговна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
ведущий научный сотрудник*

*Отдел теплофизики энергоэффективных теплотехнологий  
Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины*

**Meranova Nataliia**

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Scientific Researcher,  
Leading Researcher of the*

*Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Клищ Андрей Владимирович**

*младший научный сотрудник*

*Отдел теплофизики энергоэффективных теплотехнологий  
Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины*

**Klishch Andriy**

*Junior Research of the*

*Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Хмил Дмитрий Петрович**

*младший научный сотрудник*

*Отдел теплофизики энергоэффективных теплотехнологий  
Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины*

**Khmil Dmytro**

*Junior Research of the*

*Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ  
МИКРО- И НАНОКОМПОЗИТОВ НА ИХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF METHODS FOR PRODUCING  
POLYMER MICRO- AND NANOCOMPOSITES ON THEIR  
THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS**

*Аннотация.* Приводятся результаты экспериментальных исследований физических свойств полимерных композитов на основе полипропилена с различными наполнителями – углеродными нанотрубками и частицами алюминия. Рассмотрено два метода получения исследуемых композитов, базирующихся на смешении компонентов в сухом виде и в расплаве полимера. Представлены закономерности влияния указанных методов на теплопроводящие свойства и плотность композитов при изменении массовой доли наполнителя в широком диапазоне. Даны объяснения механизмов влияния методов получения полимерных композитов на основе анализа эффективности образования перколяционных структур.

*Ключевые слова:* углеродные нанотрубки, частицы алюминия, коэффициент теплопроводности полимерных композитов, методы получения композитов.

**Summary.** *The results of experimental studies of the physical properties of polymer composites with a polypropylene matrix and various fillers — carbon nanotubes and aluminum particles — are presented.. Two methods for obtaining the studied composites based on the mixing of components in dry form and in polymer melt are considered. The regularities of the influence of these methods on the heat-conducting properties and density of composites when changing the mass fraction of the filler in a wide range are presented. Explanations of the influence mechanisms of methods for producing polymer composites based on an analysis of the efficiency of percolation structures formation are given.*

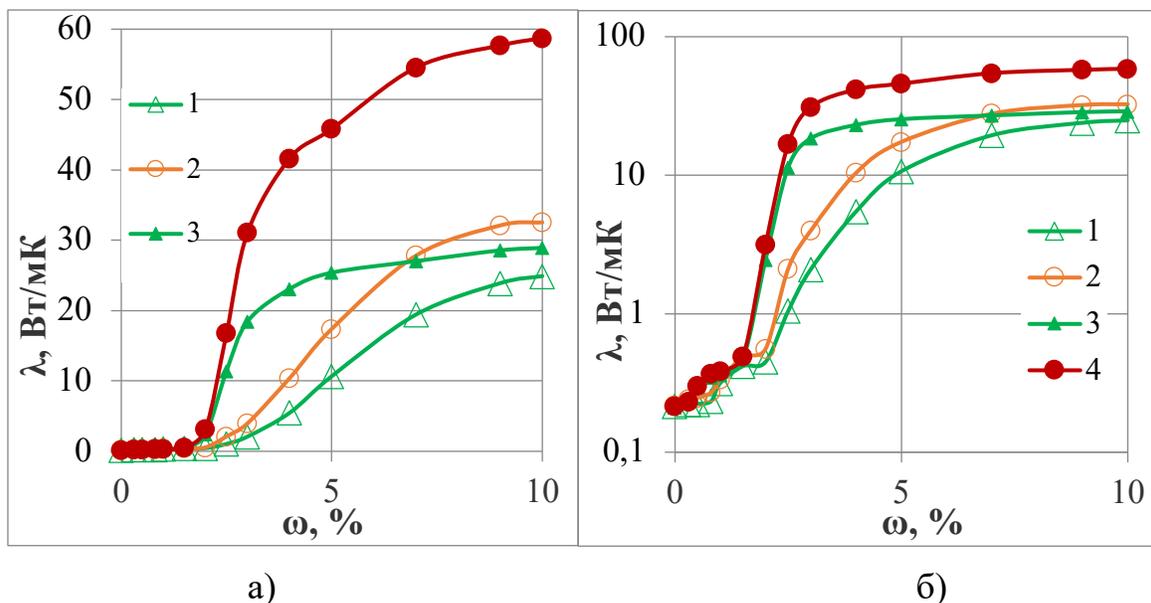
**Key words:** *carbon nanotubes, aluminum particles, heat conductivity of polymer composites, methods for producing composites.*

Все более широкое использование в теплоэнергетике получают полимерных микро- и нанокомпозиционные материалы благодаря комплексу их уникальных физических характеристик. К важнейшим из них относятся теплопроводность, теплоемкость, теплота кристаллизации и пр. Перспективные направления использования полимерных микро- и нанокомпозиционных материалов в теплоэнергетике связаны, во первых, с применением для изготовления теплообменных поверхностей различного назначения их высокотеплопроводных модификаций и, во вторых, с использованием для создания трубопроводов разных энергетических систем (воздухо-, водо-, масло-, топливопроводов), дымовых труб, защитных теплоизоляционных слоев теплоэнергетического оборудования и пр. низкотеплопроводных модификаций данных композиционных материалов [1-5]. В связи с этим актуальным является проведение исследований, направленных на выбор композиционных материалов с требуемыми свойствами для изготовления указанных элементов теплоэнергетического оборудования.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований физических свойств полимерных микро- и нанокомпозитов, полученных на основе различных методов. Сопоставлялись два наиболее широко используемых метода. Один из них (метод *A*) основан на смешении в сухом виде компонентов магнитной мешалкой и ультразвуковым диспергатором при дальнейшем горячем прессовании полученной композиции; другой (метод *B*), базируется на смешении компонентов в расплаве полимера с применением экструдера и горячего прессования для придания композиту необходимой формы.

При проведении исследований в качестве полимерной матрицы использовался полипропилен, в качестве наполнителей – углеродные нанотрубки (УНТ) или частицы алюминия.

Результаты экспериментальных исследований зависимости коэффициентов теплопроводности  $\lambda$  полимерных композитов от массовой доли наполнителей (УНТ или микрочастиц алюминия) при использовании для получения данных композитов методов, основанных на смешении компонентов в сухом виде и в расплаве полимера, представлены на рис. 1.

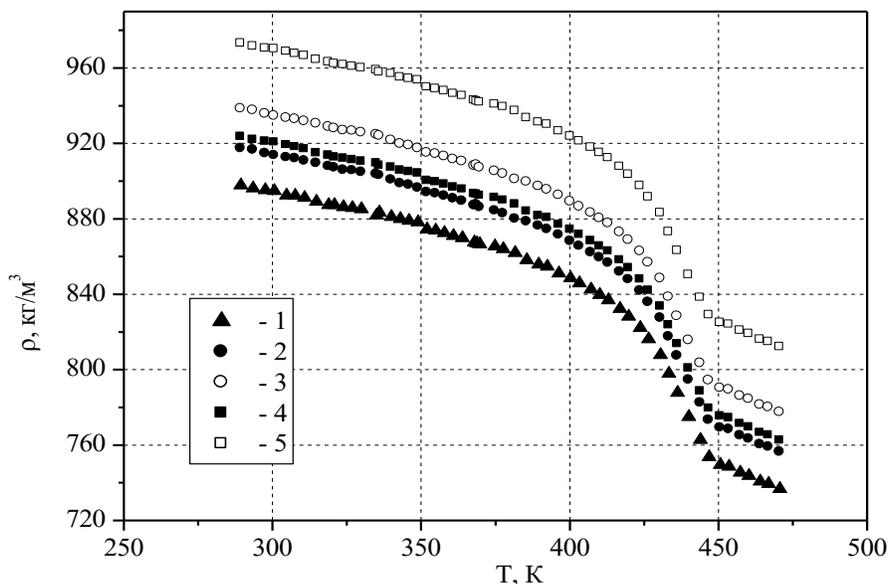


**Рис. 1. Зависимость от массовой доли наполнителя  $\omega$  коэффициента теплопроводности полимерных композитов на основе полипропилена, полученных с использованием методов смешения компонентов в сухом виде (1, 2) и в расплаве полимера (3,4) при наполнении полимерной матрицы УНТ (2, 4) и микрочастицами алюминия (1, 3); а, б) – линейная и логарифмическая шкала по оси ординат соответственно**

Как следует из полученных данных, с применением второго из указанных методов могут быть получены композиты, имеющие более высокие коэффициенты теплопроводности. При этом в случае наполнения полимерной матрицы УНТ увеличение  $\lambda$ , связанное с использованием метода *B*, оказывается более существенным, чем при наполнении ее алюминием. Так, отличия значений  $\lambda$  для двух рассматриваемых методов при массовой доле наполнителей 4,0 % составляют 31,2 Вт/(м·К) при использовании в качестве наполнителя УНТ, а при наполнении полимера микрочастицами алюминия – лишь 18,6 Вт/(м·К). Из рисунка также видно, что рассматриваемые расхождения коэффициентов теплопроводности полимерных композитов, полученных различными методами, существенно зависят от массовой доли наполнителя  $\omega$ . На рис. 1,б на кривых зависимости  $\lambda = f(\omega)$  для обоих рассматриваемых композитов наблюдаются два скачка коэффициента

теплопроводности. Первый из них отвечает образованию из частиц наполнителей перколяционных кластеров, представляющих собой своеобразные теплопроводящие каналы, второй – формированию перколяционной сетки, являющейся высокотеплопроводной средой. Так, для обоих рассматриваемых композитов первый перколяционный порог равняется 1,15 и 0,55 % соответственно при получении данных композитов методами *A* и *B*. Второй перколяционный порог отвечает концентрации УНТ, равной 4,2 %, и частиц алюминия – 4,6 % для метода *A*. Данный порог снижается при использовании метода *B* до 3,15 и до 2,85 % при наполнении полимера УНТ и микрочастицами алюминия. Как показали результаты выполненных исследований, применение для получения композитов метода *B* обеспечивает более равномерное распределение наполнителя в полимерной матрице. Это в свою очередь обуславливает большую эффективность образования из частичек наполнителя непрерывных перколяционных кластеров и перколяционных сеток, ответственных за повышение коэффициента теплопроводности материалов.

Рисунок 2 иллюстрирует результаты экспериментальных исследований температурной зависимости плотности рассматриваемых полимерных композитов, полученных на основе различных методов, при массовой доле наполнителя  $\omega = 3\%$ .



**Рис. 2. Температурная зависимость плотности полипропилена (1) и композиционных материалов на его основе, полученных с использованием метода смешения компонентов в сухом виде (2, 4) и в расплаве полимера (3, 5), при наполнении полипропилена УНТ (4, 5) и частицами алюминия (2, 3) для  $\omega = 3\%$**

Как следует из рисунка, для обоих исследуемых методов во всем диапазоне изменения температур плотность композитов, наполненных УНТ, оказывается выше соответствующих значений плотности при наполнении полимера частицами алюминия. При этом соотношение плотностей рассматриваемых наполнителей является противоположным, а именно, плотность УНТ составляет  $2200 \text{ кг/м}^3$ , а алюминия –  $2700 \text{ кг/м}^3$ .

Следовательно, большая плотность композитов, наполненных УНТ, обуславливается не уровнем плотности наполнителя, а механизмами формирования данных композиционных материалов. Это объясняется тем, что в аморфных зонах полимера ввиду электромагнитного взаимодействия частиц наполнителя с полимерной матрицей наблюдается уплотнение материала в целом. Причем такое уплотнение происходит несколько более интенсивно при наполнении полимера УНТ, поскольку эти силы в данном случае оказываются

более значительными из-за особенностей формы трубок и их огромной удельной площади поверхности (190 м<sup>2</sup>/г).

Относительно влияния на плотность композитов методов их получения, то можно отметить, что большей плотности отвечает метод В. Это связано с описанной выше картиной увеличения уровня равномерности распределения наполнителей в матрице и, как следствие, с большей разветвленностью формирующихся перколяционных структур при реализации данного метода. Наличие таких структур определяет усиление электромагнитного взаимодействия между наполнителями и полимерной матрицей, что и приводит к уплотнению материала. Согласно данным выполненных экспериментальных исследований отличия плотности композитов, полученных разными методами, оказываются более существенными для композитов, наполненных УНТ.

### **Литература**

1. Dolinskiy A.A. Thermophysical properties of polymer micro- and nanocomposites based on polycarbonate / A.A. Dolinskiy, N.M. Fialko, R.V. Dinzhos, R.A. Navrodsкая // *Industrial Heat Engineering*. 2015. 37, № 2. P.12-18.
2. Fialko N.M. Heat conductivity of polymeric micro- and nanocomposites based on polyethylene at various methods of their preparation / N.M. Fialko, R.V. Dinzhos, Ju.V. Sherenkovskiy, N.O. Meranova, R.A. Navrodsкая // *Industrial Heat Engineering*. 2017. 39, № 4. P. 21-26.
3. Dolinskiy A.A. Thermophysical properties of the highly heat-conducting polymer micro-and nanocomposites / A.A. Dolinskiy, N.M. Fialko, R.V. Dinzhos, R.A. Navrodsкая // *Industrial Heat Engineering*. 2015. 37, № 5. P. 5-15.

4. Dolinskiy A.A. Temperature dependence of conductive coefficients of polymer micro- and nanocomposites for heat-exchange apparatus / A.A. Dolinskiy, N.M. Fialko, R.V. Dinzhos, R.A. Navrodsкая // *Industrial Heat Engineering*. 2016. 38, № 1. P. 5-14.
5. Dinzhos R.V. Analysis of the thermal conductivity of polymer nanocomposites filled with carbon nanotubes and carbon black / R.V. Dinzhos, N.M. Fialko, E.A. Lysenkov // *Journal Nano and Electronic Physics*. 2014. 6, № 1. 01015(6 pp).