

ЗАВИСИМОСТЬ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОДНОСЛОЙНОЙ УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКИ ОТ ЕЕ ХИРАЛЬНОСТИ

Е.С. Сергеева

sergeeva.e.s@outlook.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Композиционные материалы, состоящие из матрицы и упрочняющих элементов, в последнее время широко применяют в качестве конструкционных материалов различных технических устройств, работающих в условиях одновременного интенсивного теплового и механического воздействия. Модификация композитов структурно-чувствительными включениями, такими как однослойные углеродные нанотрубки, значительно улучшает термомеханические характеристики получаемого материала. Найдены зависимости эквивалентных коэффициентов теплопроводности однослойной углеродной нанотрубки от ее хиральности с использованием математической модели переноса тепловой энергии теплопроводностью в трансверсально-изотропной среде. Такие коэффициенты позволяют провести условную замену однослойной углеродной нанотрубки сплошным анизотропным волокном, что дает возможность в дальнейшем для оценки теплофизических свойств композитов, армированных такими объектами, использовать известные модели, разработанные для волокнистых композитов. Представленные результаты могут быть применены для оценки теплофизических характеристик композитов, армированных углеродными нанотрубками

Ключевые слова

Композит, структурно-чувствительный элемент, углеродная нанотрубка, эквивалентный коэффициент теплопроводности, термомеханическая характеристика, индекс хиральности

Поступила в редакцию 09.03.2017
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки России (проект № 9.7784.2017/БЧ) и в рамках гранта МК-1069.2018.8 программы Президента России государственной поддержки молодых кандидатов наук

Введение. В качестве модифицирующих элементов композиционных материалов активно рассматривают наноразмерные объекты, обладающие высокими термоупругими характеристиками, например пластинки из графена, волокна, однослойные и многослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ, МУНТ) [1–9]. Такие объекты способны образовывать конгломераты — нанокластеры, однако удается достичь и статистически равномерного дисперсного упрочнения. Известно, что даже малая концентрация наноструктурных объектов из графена приводит к значительному улучшению термоупругих характеристик композита, армированного ими [10, 11]. При создании конструкции из композита, работающей под одновре-

менным интенсивным воздействием механических и тепловых нагрузок, необходимо иметь оценки как упругих, так и теплофизических характеристик этого материала, которые в большей степени определены соответствующими характеристиками армирующих элементов. В свою очередь, свойства армирующих элементов зависят от набора их геометрических параметров. Изучению зависимости упругих свойств наноструктурных элементов от их геометрии посвящено значительное число работ. Однако зависимость теплофизических свойств таких объектов от характерных размеров менее исследована.

Для построения математических моделей, описывающих теплофизические характеристики композита, армированного ОУНТ, нанотрубку можно представить анизотропным круговым цилиндром, длина которого значительно превосходит его радиус. При такой замене возможно последующее применение известных математических моделей, разработанных для оценки коэффициента теплопроводности волокнистых композитов [12].

Цель настоящей работы — изучение зависимости эквивалентных коэффициентов теплопроводности ОУНТ в осевом направлении и в плоскости поперечного сечения от ее диаметра и типа конфигурации, определяемых индексами хиральности [13].

Основные соотношения. Однослойные углеродные нанотрубки — цилиндрические структуры диаметром до нескольких десятков нанометров, состоящие из одной графеновой плоскости, свернутой без швов в трубку, т. е. поверхности, выложенной правильными шестиугольниками, в вершинах которых расположены атомы углерода [13, 14]. Результат такой операции зависит от угла ориентации графеновой плоскости относительно оси нанотрубки. Угол ориентации, в свою очередь, задает хиральность нанотрубки, которая определяет ее характеристики. Хиральность нанотрубок обозначают набором символов (m, n) , указывающих координаты шестиугольника, который в результате сворачивания плоскости должен совпадать с шестиугольником, находящимся в начале координат (рис. 1).

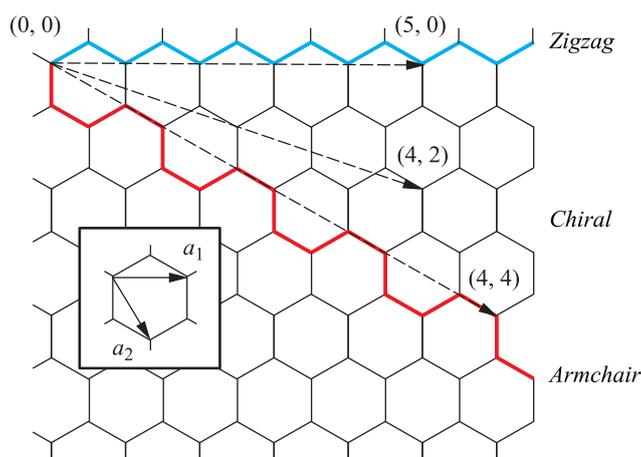


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая способы сворачивания графеновой плоскости и соответствующие им конфигурации ОУНТ

Индексы хиральности однослойной нанотрубки (m, n) однозначным образом определяют ее диаметр [15]

$$D = \frac{\sqrt{3}d_0}{\pi} \sqrt{m^2 + n^2 + mn}, \quad (1)$$

где $d_0 = 0,142$ нм — расстояние между соседними атомами углерода в графеновой плоскости. Связь между индексами хиральности и углом сворачивания α установлена соотношением

$$\sin \alpha = \frac{m\sqrt{3}}{2\sqrt{m^2 + n^2 + mn}}.$$

Среди различных возможных направлений сворачивания нанотрубок выделяют те, для которых совмещение шестиугольника (m, n) с началом координат не требует искажения его структуры. Этим направлениям соответствуют, в частности, углы $\alpha = 0^\circ$ (*armchair*-конфигурация) и $\alpha = 30^\circ$ (*zigzag*-конфигурация). Указанные конфигурации отвечают хиральностям (n, n) и $(m, 0)$ соответственно. Остальные комбинации индексов хиральности описывают *chiral*-конфигурацию.

Для построения математической модели нанотрубку представим в виде круговой цилиндрической оболочки, образованной сворачиванием многоатомного графенового слоя, с половинами молекул фуллеренов на торцах [10]. Пусть в плоскости изотропии графена его коэффициент теплопроводности равен λ_0 . Следовательно, в любом направлении, касательном к срединной поверхности оболочки, коэффициент теплопроводности равен λ_0 [16]. Однако при условной замене ОУНТ сплошным круговым цилиндром эквивалентные коэффициенты теплопроводности λ_{\parallel} и λ_{\perp} в направлении продольной оси и в плоскости, перпендикулярной ей, будут различны. Длину ОУНТ полагаем намного больше ее внешнего радиуса, что позволяет пренебречь влиянием полусферических частей оболочки на значения λ_{\parallel} и λ_{\perp} .

Эквивалентные коэффициенты теплопроводности. Для получения зависимостей эффективных коэффициентов теплопроводности ОУНТ от ее диаметра и типа используем математическую модель переноса тепловой энергии теплопроводностью в нанотрубке [14].

Эквивалентный коэффициент теплопроводности λ_{\parallel} в направлении оси ОУНТ найден из равенства термических сопротивлений в осевом направлении соответствующей круговой цилиндрической оболочки с коэффициентом теплопроводности λ_0 в любом тангенциальном направлении и заменяющего оболочку сплошного кругового цилиндра и выражен соотношением

$$\frac{L}{2\pi R_0 h_0 \lambda_0} = \frac{L}{\pi (R_0 + h_0/2)^2 \lambda_{\parallel}},$$

где L — длина оболочки и цилиндра; R_0 , h_0 — радиус срединной поверхности и толщина оболочки. Величину h_0 принимают равной расстоянию 0,34 нм меж-

ду соседними атомными плоскостями в кристалле графита [16]. Из приведенного равенства следует

$$\lambda_{\parallel} = \frac{2R_0 h_0 \lambda_0}{\tilde{R}^2}. \quad (2)$$

Здесь $\tilde{R} = (R_0 + h_0/2)$. Соотношение (2) имеет смысл при $R_0 \geq h/2$, что, согласно равенству (1), для ОУНТ *zigzag*-конфигурации соответствует условию $n \geq 5$, а для ОУНТ *armchair*-конфигурации — условию $n = m \geq 3$. В случае других комбинаций индексов хиральности (ОУНТ *chiral*-конфигурации) необходимо выполнение условия $n + m \geq 5$. В зависимости от индексов хиральности, а точнее от их суммы, многоугольник, которым является поперечное сечение ОУНТ, стремится к окружности. Для получения оценки в первом приближении примем, что ОУНТ может быть заменена цилиндром при условии $n + m \geq 5$.

Для нахождения эквивалентного коэффициента теплопроводности λ_{\perp} использована математическая модель взаимодействия достаточно длинной круговой цилиндрической оболочки с окружающей средой неограниченного объема с коэффициентом λ [14]. При установившемся распределении температуры в области, где $L/\tilde{R} \gg 1$, его можно представить функцией $T(r, \varphi)$, т. е. оно не изменяется вдоль оси оболочки и удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0$$

в полярной системе координат с началом на этой оси.

При задании вектора градиента температурного поля с модулем G в направлении оси отсчета полярного угла φ в окружающей среде установившееся распределение температуры описывает соотношение [14]

$$T(r, \varphi) = Gr \cos \varphi + \frac{B_0}{r} \cos \varphi, \quad r \geq \tilde{R}, \quad 0 \leq \varphi < 2\pi, \quad (3)$$

в котором постоянный коэффициент B_0 может быть определен из условия теплового взаимодействия окружающей среды с цилиндрической оболочкой. Здесь принято, что $r \gg \tilde{R}$.

По толщине оболочки температуру T_0 предполагаем зависящей только от полярного угла φ . Полагаем тепловой контакт между оболочкой и окружающей средой идеальным, из равенства температуры на цилиндрической поверхности при $r = \tilde{R}$ с учетом соотношения (3) можно получить

$$T_0(\varphi) = \left(G\tilde{R} + \frac{B_0}{\tilde{R}} \right) \cos \varphi. \quad (4)$$

С учетом условий теплового баланса в оболочке из уравнений (3) и (4) определим

$$\frac{B_0}{\tilde{R}^2} = G \frac{1 - \beta_0}{1 + \beta_0}, \quad \beta_0 = \frac{\lambda_0 h_0}{\lambda R_0}. \quad (5)$$

Замена цилиндрической оболочки сплошным цилиндром радиусом \tilde{R} с искомым эквивалентным коэффициентом теплопроводности λ_{\perp} также вызовет возмущение температурного поля в окружающей среде, описываемое слагаемым $(\tilde{B}/r^2)\cos\varphi$, в котором [15]

$$\tilde{B} = G\tilde{R}^2 \frac{\lambda - \lambda_{\perp}}{\lambda + \lambda_{\perp}}. \quad (6)$$

Из условия совпадения распределений температуры на внешней поверхности цилиндрической оболочки и поверхности заменяющего эту оболочку сплошного цилиндра определяем $B_0 = \tilde{B}$, что с учетом (5) и (6) позволяет получить соотношение для нахождения второго эквивалентного коэффициента теплопроводности ОУНТ:

$$\lambda_{\perp} = \frac{\lambda_0 h_0}{R_0}. \quad (7)$$

Анализ результатов расчетов. В качестве исходной информации для коэффициента теплопроводности λ_0 ОУНТ было выбрано значение 3500 Вт/(м·К) [16]. В таблице приведены выбранные значения индексов хиральности для различных конфигураций ОУНТ.

По формуле (1) вычислены значения диаметров ОУНТ при различных сочетаниях индексов хиральности, приведенных в таблице, с учетом ранее введенных ограничений на их значения.

Значения индексов хиральности для различных конфигураций ОУНТ

<i>Armchair</i>	<i>m</i>	5	10	20	50	100	200
	<i>n</i>	5	10	20	50	100	200
<i>Zigzag</i>	<i>m</i>	5	10	20	50	100	200
	<i>n</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Chiral</i>	<i>m</i>	10	10	10	10	10	10
	<i>n</i>	1	5	11	50	100	200

Из соотношений (2) и (7) найдены значения коэффициентов λ_{\parallel} и λ_{\perp} соответственно. По полученной из расчетов информации установлена зависимость эквивалентных коэффициентов теплопроводности ОУНТ от ее диаметра, следовательно, и от типа хиральности. Зависимость показана на рис. 2.

Согласно результатам расчетов (см. рис. 2), значения эквивалентных коэффициентов теплопроводности ОУНТ уменьшаются с увеличением ее диаметра. Зависимости коэффициента $\tilde{\lambda} = (\lambda_{\parallel}/\lambda_{\perp}) / (\lambda'_{\parallel}/\lambda'_{\perp})$ от безразмерного коэффициента $\tilde{d} = d/d'$, где λ'_{\parallel} , λ'_{\perp} и d' — максимальные значения эквивалентных коэффициентов теплопроводности и диаметра для каждого типа ОУНТ, приведены на рис. 3.

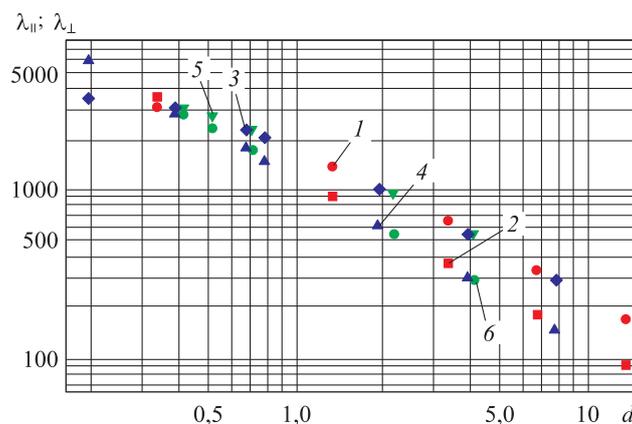


Рис. 2. Зависимость значений эквивалентных коэффициентов теплопроводности ОУНТ от ее диаметра и типа хиральности:

1, 2 — $\lambda_{||}$ и λ_{\perp} для ОУНТ *armchair*-конфигурации; 3, 4 — $\lambda_{||}$ и λ_{\perp} для ОУНТ *zigzag*-конфигурации; 5, 6 — $\lambda_{||}$ и λ_{\perp} для ОУНТ *chiral*-конфигурации

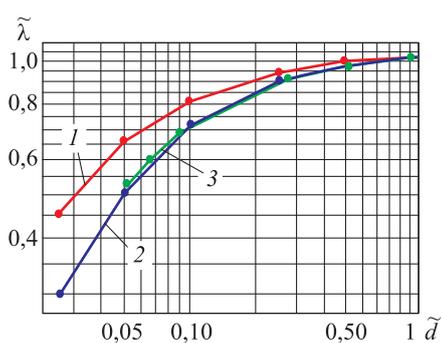


Рис. 3. Зависимость коэффициента $\tilde{\lambda}$ от безразмерного коэффициента \tilde{d} для ОУНТ *armchair*- (1), *zigzag*- (2) и *chiral*-конфигураций (3)

Значения $\tilde{\lambda}$ для ОУНТ *armchair*-конфигурации выше, чем для ОУНТ *zigzag*- и *chiral*-конфигураций при выбранных индексах хиральности, однако при значении безразмерного коэффициента $\tilde{d} = 0,5$ и более различие становится почти незаметным. Следует также отметить, что значения $\tilde{\lambda}$ для ОУНТ *chiral*-конфигурации с выбранными индексами хиральности почти совпадают со значениями, полученными для ОУНТ *zigzag*-конфигурации.

Заключение. Приведенные в работе соотношения могут быть применимы к оценке эквивалентных коэффициентов

теплопроводности ОУНТ, которые в последнее время активно рассматривают в качестве армирующих включений перспективных материалов конструкций, работающих при интенсивных нагрузках различной природы. С помощью этих коэффициентов и представления нанотрубки анизотропным сплошным круговым цилиндром возможна реализация последующего прогноза теплофизических характеристик материала с использованием математических моделей, разработанных для волокнистых композитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Palmero P.* Structural ceramic nanocomposites: A review of properties and powders' synthesis methods // *Nanomaterials*. 2015. Vol. 5. No. 2. P. 656–696. DOI: 10.3390/nano5020656

2. *Casati R., Vedani M.* Metal matrix composites reinforced by nano-particles — a review // *Metals*. 2014. Vol. 4. No. 1. P. 65–83. DOI: 10.3390/met4010065
3. *Alibeigloo A., Liew K.M.* Thermoelastic analysis of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plate using theory of elasticity // *Composite Structures*. 2013. Vol. 106. P. 873–881. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.07.002
4. *Ayatollahi M.R., Shadlou S., Shokrieh M.M.* Multiscale modeling for mechanical properties of carbon nanotube reinforced nanocomposites subjected to different types of loading // *Composite Structures*. 2011. Vol. 93. Iss. 9. P. 2250–2259. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.03.013
5. *Liew K.M., Lei Z.X., Zhang L.W.* Mechanical analysis of functionally graded carbon nanotube reinforced composites: A review // *Composite Structures*. 2015. Vol. 120. P. 90–97. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.09.041
6. *Montinaro N., Pantano A.* Parameters influencing the stiffness of composites reinforced by carbon nanotubes — a numerical-analytical approach // *Composite Structures*. 2014. Vol. 109. P. 246–252. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.11.004
7. *Understanding the polymer type and CNT orientation effect on the dynamic mechanical properties of high volume fraction CNT polymer nanocomposites / D. Ürk, E. Demir, O. Bulut, D. Çakıroğlu, et al.* // *Composite Structures*. 2016. Vol. 155. P. 255–262. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.05.087
8. *Konstantinos G. Dassios, Costas Galiotis.* Polymer-nanotube interaction in MWCNT/poly(vinyl alcohol) composite mats // *Carbon*. 2012. Vol. 50. P. 4291–4301. DOI: 10.1016/j.carbon.2012.04.042
9. *Thermal conductivity of MWCNT/epoxy composites: The effects of length, alignment and functionalization / Jin Gyu Park, Q. Cheng, Lu Jun, Jianwen Bao, et al.* // *Carbon*. 2012. Vol. 50. Iss. 6. P. 2083–2090. DOI: 10.1016/j.carbon.2011.12.046
10. *Кац Е.А.* Фуллерены, углеродные нанотрубки и нанокластеры. Родословная форм и идей. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 294 с.
11. *Зарубин В.С., Сергеева Е.С., Шишкина С.И.* Оценки упругих свойств матрицы композита, упрочненной углеродными нанотрубками // *Наука и образование: научное издание*. 2016. № 9. С. 155–170. DOI: 10.7463/0916.0844318
URL: <http://technomag.neicon.ru/doc/844318.html>
12. *Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю.* Теплопроводность волокнистых композитов: вывод, оценка достоверности и параметрический анализ расчетных формул. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 121 с.
13. *Елецкий А.В.* Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // *Успехи физических наук*. 2002. Т. 172. № 4. С. 403–438. DOI: 10.3367/UFNr.0172.200204b.0401
14. *Зарубин В.С.* Оценки эквивалентных коэффициентов теплопроводности фуллерена и однослойной углеродной нанотрубки // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. Вып. 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-4-669
URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/hidden/669/html>
15. *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.
16. *Елецкий А.В., Искандарова И.М., Книжник А.А., Красиков Д.Н.* Графен: методы получения и теплофизические свойства // *Успехи физических наук*. 2011. Т. 181. № 3. С. 234–268. DOI: 10.3367/UFNr.0181.201103a.0233

Сергеева Елена Сергеевна — ассистент кафедры «Прикладная математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Сергеева Е.С. Зависимость эквивалентных коэффициентов теплопроводности однослойной углеродной нанотрубки от ее хиральности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2018. № 2. С. 97–106. DOI: 10.18698/1812-3368-2018-2-97-106

DEPENDENCE OF THERMAL-CONDUCTIVITY EQUIVALENT COEFFICIENTS OF SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES OF ITS CHIRALITY

E.S. Sergeeva

sergeeva.e.s@outlook.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

In recent years composite materials, consisting of matrix and reinforcing elements, have been widely used as constructional materials of different technical equipment operating in conditions of simultaneous intensive thermal and mechanical impact. Modification of composites by structure-sensitive inclusions, such as single-walled carbon nanotubes, significantly improves the thermomechanical properties of the resultant material. The research helped to discover the dependences of the thermal conductivity equivalent coefficients of a single-walled carbon nanotube on its chirality. For this purpose we applied a mathematical model of heat energy transfer by thermal conductivity in the transversely isotropic medium. Meanwhile, we presented and justified the restrictions concerning the chirality index values which this model can be applied with. These restrictions resulted from the requirements of reliability of approximation of single-walled carbon nanotubes cross-section. Various configurations of single-walled carbon nanotubes — armchair, zigzag and chiral were reviewed. For each of the configurations we obtained the dependences of the thermal conductivity equivalent coefficients on the combination of chirality indices and the diameter. These coefficients make it possible to provide the replacement for a single-walled carbon nanotube by anisotropic continuous fiber. For further evaluation of thermophysical properties of composites, reinforced with such objects there appears an opportunity to use the models developed for fiber composites. The results obtained can be used to estimate thermophysical characteristics of the composites reinforced by carbon nanotubes

Keywords

Composite, structure-sensitive elements, carbon nanotube, thermal-conductivity equivalent coefficient, thermomechanical properties, chirality index

Received 09.03.2017
© BMSTU, 2018

The work was carried out as a part of the state task from the Ministry of Education and Science of Russian Federation (project no. 9.7784.2017/BP) and as a part MK-1069.2018.8 of the program of the President of Russian Federation for state support of young candidates of science

REFERENCES

- [1] Palmero P. Structural ceramic nanocomposites: A review of properties and powders' synthesis methods. *Nanomaterials*, 2015, vol. 5, no. 2, pp. 656–696. DOI: 10.3390/nano5020656
- [2] Casati R., Vedani M. Metal matrix composites reinforced by nano-particles — a review. *Metals*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 65–83. DOI: 10.3390/met4010065
- [3] Alibeigloo A., Liew K.M. Thermoelastic analysis of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plate using theory of elasticity. *Composite Structures*, 2013, vol. 106, pp. 873–881. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.07.002
- [4] Ayatollahi M.R., Shadlou S., Shokrieh M.M. Multiscale modeling for mechanical properties of carbon nanotube reinforced nanocomposites subjected to different types of loading. *Composite Structures*, 2011, vol. 93, iss. 9, pp. 2250–2259. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.03.013
- [5] Liew K.M., Lei Z.X., Zhang L.W. Mechanical analysis of functionally graded carbon nanotube reinforced composites: A review. *Composite Structures*, 2015, vol. 120, pp. 90–97. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.09.041
- [6] Montinaro N., Pantano A. Parameters influencing the stiffness of composites reinforced by carbon nanotubes — a numerical-analytical approach. *Composite Structures*, 2014, vol. 109, pp. 246–252. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.11.004
- [7] Ürk D., Demir E., Bulut O., Çakıroğlu D., Cebeci F.C., Lütfi Öveçoğlu M., Cebeci H. Understanding the polymer type and CNT orientation effect on the dynamic mechanical properties of high volume fraction CNT polymer nanocomposites. *Composite Structures*, 2016, vol. 155, pp. 255–262. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.05.087
- [8] Konstantinos G. Dassios, Costas Galiotis. Polymer-nanotube interaction in MWCNT/poly (vinyl alcohol) composite mats. *Carbon*, 2012, vol. 50, pp. 4291–4301. DOI: 10.1016/j.carbon.2012.04.042
- [9] Park Jin Gyu, Cheng Q., Jun Lu, Bao Jianwen, et al. Thermal conductivity of MWCNT/epoxy composites: The effects of length, alignment and functionalization. *Carbon*, 2012, vol. 50, iss. 6, pp. 2083–2090. DOI: 10.1016/j.carbon.2011.12.046
- [10] Kats E.A. Fullereny, uglerodnye nanotrubki i nanoklastery. Rodoslovnaya form i idey [Fullerenes, carbon nanotubes and nanoclusters. Genealogy of forms and ideas]. Moscow, LKI Publ., 2008. 294 p.
- [11] Zarubin V.S., Sergeeva E.S., Shishkina S.I. Estimating the elastic properties of the carbon nanotube-reinforced composite matrix. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2016, no. 9, pp. 155–170 (in Russ.). DOI: 10.7463/0916.0844318 Available at: <http://technomag.neicon.ru/doc/844318.html>
- [12] Zarubin V.S., Kuvyrkin G.N., Savel'yeva I.Yu. Teploprovodnost' voloknistykh kompozitov: vyvod, otsenka dostovernosti i parametricheskiy analiz raschetnykh formul [Thermal conductivity of fiber composites: derivation, confidence estimation and parametric analysis of formulas]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 121 p.
- [13] Elets'kii A.V. Carbon nanotubes and their emission properties. *Physics-Uspekhi*, 2002, vol. 45, no. 4, pp. 369–402. DOI: 10.1070/PU2002v045n04ABEH001033
- [14] Zarubin V.S. Estimates of equivalent coefficients of thermal conductivity of fullerenes and single-walled carbon nanotubes. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 4 (in Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-4-669 Available at: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/hidden/669/html>

- [15] Carslaw H., Jaeger J. Conduction of heat in solids. Oxford University Press, USA, 1959. 510 p.
- [16] Eletsii A.V., Iskandarova I.M., Knizhnik A.A., Krasikov D.N. Graphene: fabrication methods and thermophysical properties. *Physics–Uspekhi*, 2011, vol. 54, no. 3, pp. 227–258.
DOI: 10.3367/UFNe.0181.201103a.0233

Sergeeva E.S. — Assistant, Department of Applied Mathematics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Sergeeva E.S. Dependence of Thermal-Conductivity Equivalent Coefficients of Single-Walled Carbon Nanotubes on its Chirality. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2018, no. 2, pp. 97–106 (in Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2018-2-97-106



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышел в свет учебник (5-е издание)
под редакцией **К.С. Колесникова, В.В. Дубинина**

«Курс теоретической механики»

Изложены кинематика, статика, динамика точки, твердого тела и механической системы; аналитическая механика; теория колебаний; теория удара; введение в динамику тел переменной массы; основы небесной механики. Приведены примеры решения задач. Содержание учебника соответствует программе и курсу лекций, которые читаются в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для студентов машиностроительных вузов и технических университетов. Может быть полезен аспирантам и преподавателям, а также специалистам в области статике и динамики механических систем.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru