

DOI: 10.18721/JPM.11408

УДК 536.21

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ КОМПОНЕТОВ НА ЭФФЕКТИВНУЮ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**В.В. Степанов¹, Ю.К. Петреня², А.М. Андреев²,
А.М. Костельов², Э.Р. Маннанов², В.А. Талалов¹**

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² ПАО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Целью данного исследования является повышение эффективной теплопроводности полимерных композитных материалов. В связи с этим проведено численное моделирование теплопроводности при введении в полимерную матрицу композита высокотеплопроводных микрочастиц различной формы. При этом варьировалась объемная концентрация этих микрочастиц. Проанализировано влияние теплопроводности частиц наполнителя на эффективную теплопроводность полимерных композитных материалов. Предложены конкретные рекомендации по повышению эффективной теплопроводности путем изменения формы, концентрации, теплопроводности частиц наполнителя и повышения теплопроводности полимерной матрицы. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными и опубликованными данными. Проведенное исследование позволило глубже понять действие высокотеплопроводных наполнителей на эффективную теплопроводность полимерных композитов.

Ключевые слова: численное моделирование, композитный материал, эффективная теплопроводность, высокотеплопроводный наполнитель

Ссылка при цитировании: Степанов В.В. Петреня Ю.К., Андреев А.М., Костельов А. М., Маннанов Э.Р., Талалов В.А. Влияние свойств компонентов на эффективную теплопроводность полимерных композитных материалов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 4. С. 85–94. DOI: 10.18721/JPM.11408

EFFECTIVE HEAT CONDUCTIVITY OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS: THE INFLUENCE OF COMPONENT PROPERTIES

**V.V. Stepanov¹, Yu. K Petrenya², A.M. Andreev²,
A.M. Kostelov², E.R. Mannanov², V.A. Talalov¹**

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;

² PJSC “Power Machines”, St. Petersburg, Russian Federation

The goal of this study is to increase the effective heat conductivity (EHC) of the polymer composite materials. We have carried out numerical simulation of the polymer composite EHC when making microsized high-thermal conductivity fillers of various shape a component of the composite, and its volume fraction being varied

as well. The influence of particles' thermal conductivity on the polymer composite materials' EHC was analyzed. Recommended practice for the polymer composite EHC increasing was suggested. Shape changing, volume fraction optimization, the filler particles', and the matrix' thermal conductivity increasing was proposed. The calculation results were in good agreement with our experimental data and published in scientific literature. This study gave an insight into the function of high-thermal conductivity fillers on the EHC of the polymer composite materials.

Keywords: numerical simulation, composite material, effective thermal conductivity, high-thermal conductivity filler

Citation: V.S. Stepanov, Yu.K. Petrenya, A.M. Andreev, A.M. Kostelov, E.R. Mannanov, V.A. Talalov, Effective heat conductivity of polymeric composite materials: The influence of component properties, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 11 (4) (2018) 85–94. DOI: 10.18721/JPM.11408

Введение

Полимерные композитные материалы (ПКМ), представляющие собой структуры, состоящие из двух или большего числа компонентов с различными физическими свойствами и четкой границей между ними, широко используются в настоящее время в различных областях науки и техники.

При использовании ПКМ в системах электрической изоляции высоковольтного электрооборудования актуальными являются задачи улучшения теплопередачи с одновременным обеспечением высоких диэлектрических характеристик. Полимерная матрица, как правило, обладает пониженными теплопроводящими и высокими диэлектрическими свойствами. Чтобы улучшить теплопередачу ПКМ, можно вводить в полимерную матрицу диэлектрические наполнители микронных размеров, имеющие высокие теплофизические характеристики [1 – 13].

При такой методике нельзя исключить снижение электроизоляционных свойств ПКМ, характер изменения которых определяется электрофизическими свойствами частиц и их концентраций в ПКМ [9, 13 – 15].

Возможности повышения эффективности теплопередачи в ПКМ будут определяться правильно подобранными свойствами, размерами и концентрацией частиц наполнителя в полимерной матрице. Поскольку исследуемый объект ПКМ представляет собой двухкомпонентную систему, целесообразно использовать аналитические модели для решения теплофизических за-

дач. Наиболее зарекомендовавшие свое применение аналитические модели для приближенного расчета эффективной теплопроводности композитов приведены в работах [1 – 4, 10]. Однако в тех случаях, когда требуется выполнение расчета с возможностью изменения концентраций частиц наполнителя в широком диапазоне или варьирования формы и размера частиц, аналитические модели не могут обеспечить достаточную достоверность получаемых результатов [10].

Разработка численной модели

Современные вычислительные средства позволяют проводить прямое моделирование теплопроводности сред со сложной структурой. При этом можно использовать такие стандартные пакеты как ANSYS, FLUENT и др.

На сегодняшний день среда моделирования ANSYS доказала свою эффективность, гибкость, универсальность, благодаря повсеместному применению для широкого спектра инженерных проблем, в том числе для теплофизических и связанных с ними задач. Указанные особенности пакета позволяют в дальнейшем усовершенствовать расчетные модели, например, добавить модуль расчета электрофизических процессов с использованием программы APDL (ANSYS Parametric Design Language).

На первом этапе моделирования рассматривалось равномерное распределение частиц. Объем матрицы ПКМ можно представить в виде множества элементарных ячеек, в каждой из которых заключена одна частица наполнителя требуемой фор-

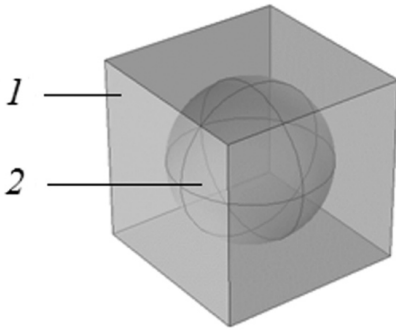


Рис. 1. Модельное представление равномерного распределения частиц наполнителя: элементарный объем ячейки матрицы ПКМ (1) с наполнителем (2) в форме сферы

мы (рис. 1). Расчеты были проведены для частиц различной формы и ориентации.

Чтобы упростить расчетную модель, мы приняли ряд допущений.

1. Задачи рассматриваются как стационарные, поскольку выравнивание температуры в теплопроводящем объеме происходит значительно быстрее, чем изменение внешних условий.

2. Материалы, составляющие композит, считаются изотропными, а их теплопроводность – не зависящей от температуры.

3. Ориентация кубических и цилиндрических частиц наполнителя совпадает с направлением координатных осей.

4. Размеры частиц наполнителя считаются одинаковыми (микронными); фракционный состав частиц не учитывается.

5. Тепловой контакт между частицами и полимером принимается идеальным (данное допущение влечет за собой рост теплопроводности композита вследствие нулевого теплового сопротивления на границе сред полимер – частица).

6. Наличие микродефектов не учитывается.

Параметризация численной модели дает возможность варьировать свойства системы; в данном случае это размеры частиц, их свойства и свойства матрицы ПКМ.

Согласно разработанной модели, связь между длиной L ребра куба (она определяет размер расчетной области, содержащей одну частицу) и объемом частицы V_p дается формулой

$$L = \left(\frac{V_p}{N_v} \right)^{\frac{1}{3}},$$

где N_v – объемная концентрация частиц.

Эффективная теплопроводность λ_{eff} ПКМ рассчитывалась по формуле:

$$\lambda_{eff} = q_m \cdot \frac{L}{\Delta T},$$

где q_m – средний тепловой поток через грань куба с частицей, ΔT – перепад температуры на гранях куба;

$$\Delta T = T_0 - T_L.$$

С целью определения величины q_m выполняется численное решение трехмерной стационарной задачи теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0.$$

Коэффициент теплопроводности в этом уравнении зависит от координат: $\lambda = \lambda(x, y, z)$.

На двух поверхностях куба задаются граничные условия первого рода, на остальных четырех налагаются условия теплоизоляции.

Для удобства расчетов и упрощения анализа результатов вводились безразмерные переменные вида

$$\Theta = \frac{T - T_L}{\Delta T}, \quad \bar{x} = \frac{x}{L}, \quad \bar{y} = \frac{y}{L}, \quad \bar{z} = \frac{z}{L}, \quad (1)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_M}, \quad \bar{q} = \frac{q \cdot L}{\lambda_M \cdot \Delta T}.$$

В двух последних выражениях λ_M – теплопроводность матрицы.

В переменных (1) задача принимает следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\lambda} \frac{\partial \Theta}{\partial \bar{x}} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \left(\bar{\lambda} \frac{\partial \Theta}{\partial \bar{y}} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\bar{\lambda} \frac{\partial \Theta}{\partial \bar{z}} \right) = 0,$$

а граничные условия и коэффициент теплопроводности –

$$\bar{x} = 0, \quad \Theta = 1; \quad \bar{x} = 1, \quad \Theta = 0; \quad \bar{y} = 0, \quad \bar{y} = 1,$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \bar{y}} = 0; \quad \bar{z} = 0, \quad \bar{z} = 1, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial \bar{z}} = 0;$$

при этом $\bar{\lambda} = 1$, если координаты точки принадлежат матрице, и $\bar{\lambda} = \lambda_p / \lambda_M$, если

координаты точки принадлежат частице с теплопроводностью λ_p .

Относительная эффективная теплопроводность (по отношению к теплопроводности матрицы) определяется интегрированием безразмерного теплового потока по безразмерной единичной поверхности грани куба:

$$\overline{\lambda_{eff}} = \frac{\lambda_{eff}}{\lambda_M} = \int_{\bar{S}} \bar{q} \cdot d\bar{s}.$$

Результаты расчетов эффективной теплопроводности в ПКМ

Распределение тепловых потоков для рассматриваемых частиц в поперечном сечении расчетной области приведено на рис. 2. Представленные поля тепловых потоков соответствуют одной объемной концентрации частиц ($N_V = 10\%$) и демонстрируют существенные различия в зависимости от формы и положения (для цилиндрической

частицы) частиц.

Результаты расчета относительной эффективной теплопроводности ПКМ приведены на рис. 3 и 4. Для всех вариантов расчетов объемная концентрация частиц ограничена значением $N_V = 30\%$, что обусловлено необходимостью поддержания допустимых электрофизических свойств ПКМ.

Кроме того, на рис. 3 и 4 проведено сравнение результатов, полученных в настоящей работе, с экспериментальными данными работ [4, 5, 8, 10]. Экспериментальные значения эффективной теплопроводности получены при введении в матрицу (ее теплопроводность $\lambda_M = 0,28$ Вт/(м·К)) частиц гексагональной формы, теплопроводность которых варьировалась в диапазоне $\lambda_p = 40 - 120$ Вт/(м·К) [10]. При численном моделировании мы принимали теплопроводность матрицы равной $\lambda_M = 0,28$ Вт/(м·К), а теплопроводность частиц $\lambda_p = 40$ Вт/(м·К).

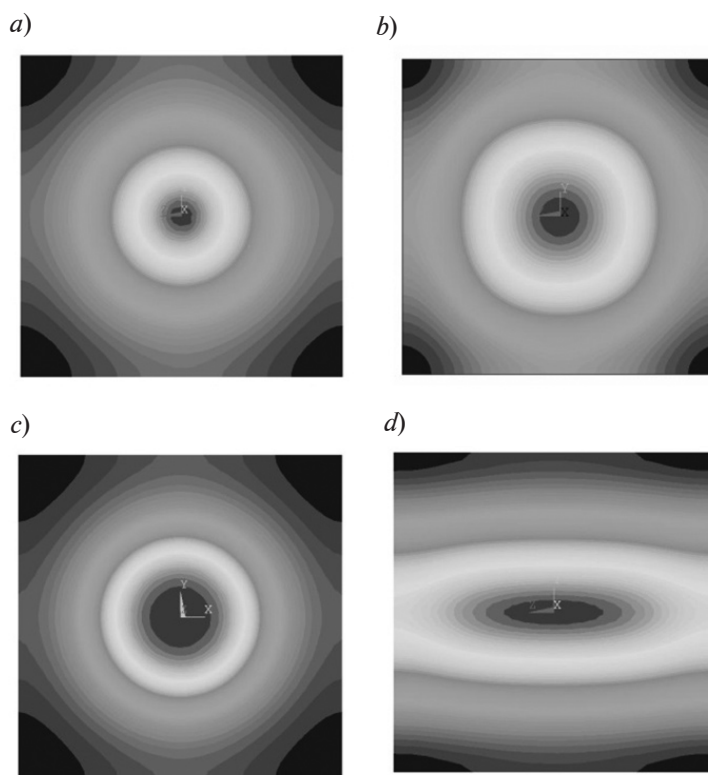


Рис. 2. Распределение тепловых потоков в поперечном сечении расчетной области для микрочастиц разной формы: сферической (a), кубической (b) и цилиндрической (c, d); тепловой поток направлен вдоль (c) и поперек (d) частицы; $N_V = 10\%$

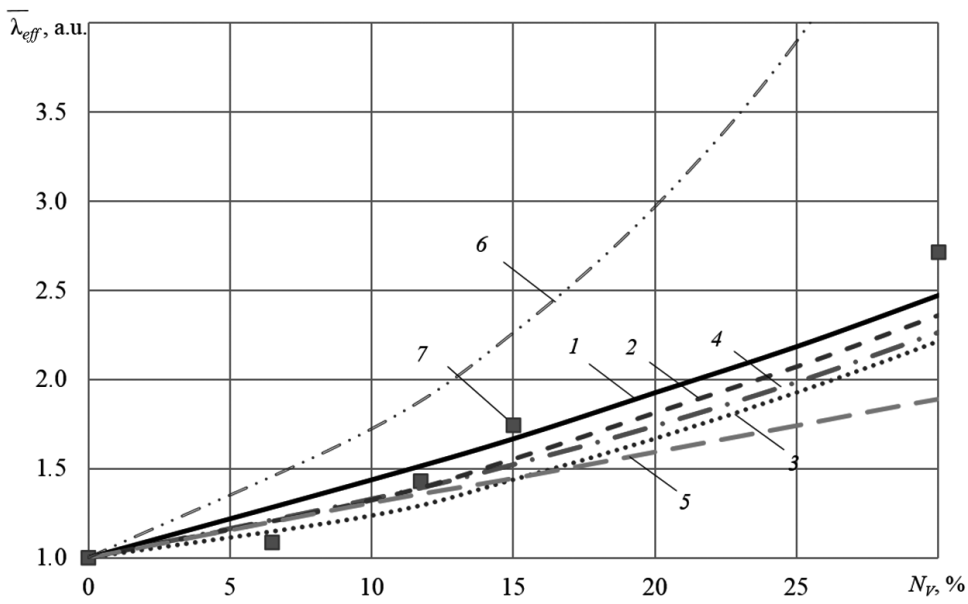


Рис. 3. Расчетные (линии) и экспериментальные [5] (символы 7) данные по относительной эффективной теплопроводности ПКМ с микрочастицами наполнителя разной формы: сферической (1, 7), кубической (2) и цилиндрической при $D = h$ (3). Результаты расчета получены по моделям Максвелла [4, 10] (4), Тимофеевой [4] (5), по геометрической модели [4, 10] (6) и в настоящей работе (1 – 3)

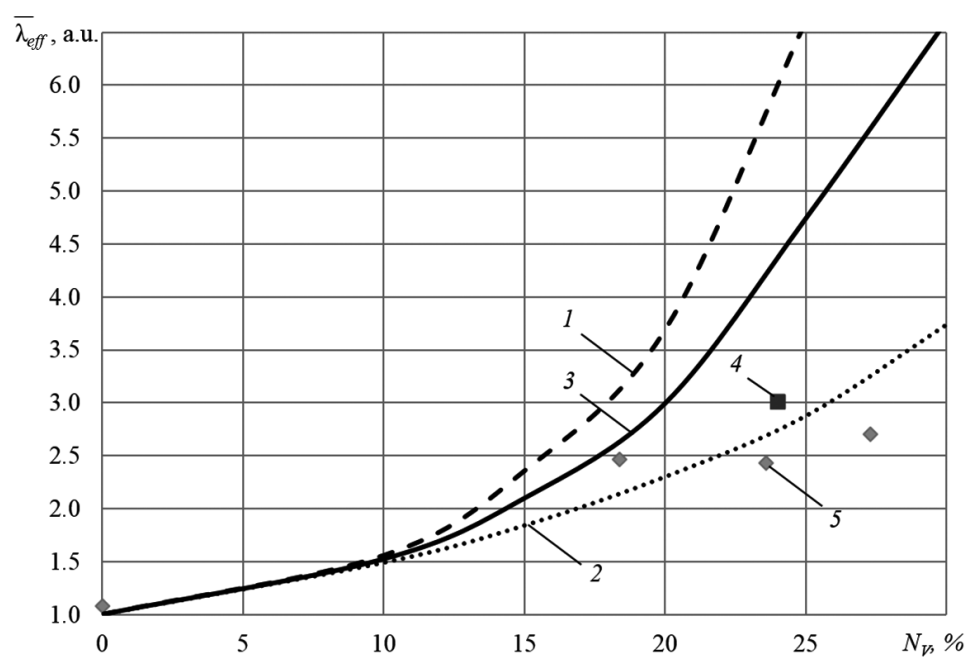


Рис. 4. Расчетные (линии 1 – 3) и экспериментальные [8, 10] (символы 4 и 5 соответственно) данные по концентрационным зависимостям относительной эффективной теплопроводности ПКМ с микрочастицами наполнителя разной формы: цилиндрической при $D/h = 2/3$ (1 – 3) и гексагональной (4, 5). Получены средние значения указанной теплопроводности (3), а также ее значения для тепловых потоков, направленных вдоль (1) и поперек (2) микрочастиц

В рамках рассматриваемой модели эффективная теплопроводность слабо зависит от формы частицы (см. рис. 3, кривые 1 – 3). В случае усложненной модели учет полидисперсности частиц, структуры их поверхности, хаотичность распределения в объеме и случайные образования теплопроводящих мостиков (структуры, образованные группой частиц), может привести к другому результату: к выраженной зависимости эффективной теплопроводности от формы частиц.

Результаты расчетов, в целом, соответствуют экспериментальным данным. Применение аналитических моделей позволяет оценить эффективную теплопроводность для низких концентраций наполнителя. При этом наилучшие результаты дает использование модели Максвелла (рис. 3).

Расчеты также показали, что увеличение теплопроводности матрицы приводит к прямо пропорциональному росту эффективного значения теплопроводности ПКМ. Этот вывод справедлив для низких концентраций наполнителя (до 30 %).

При рассмотрении микрочастиц вытянутой цилиндрической формы (см. рис. 4) наблюдается сильная зависимость эффективной теплопроводности как от концентрации, так

и от ориентации этих частиц относительно теплового потока (вдоль либо поперек).

Таким образом, использование на практике микрочастиц удлиненной формы должно приводить к их более существенному вкладу в увеличение эффективной теплопроводности, по сравнению с другими рассмотренными частицами. Эффект должен быть выражен сильнее для случая ориентации частиц по направлению теплового потока.

На рис. 5 показаны результаты исследования, в котором выяснялось, как влияет длина цилиндрических микрочастиц наполнителя (при их неизменном объеме) на эффективную теплопроводность ПКМ.

Как показало моделирование, увеличение длины микрочастиц сопровождается ростом теплопроводности ПКМ.

На рис. 6 представлены графики зависимостей эффективной теплопроводности ПКМ от теплопроводности частиц различной формы для двух объемных концентраций: 10 и 30 %.

Анализ представленных зависимостей показывает, что увеличения теплопроводности ПКМ можно достичь путем увеличения теплопроводности частиц наполнителя или удлинения частиц при повышении их объемной концентрации в полимерной

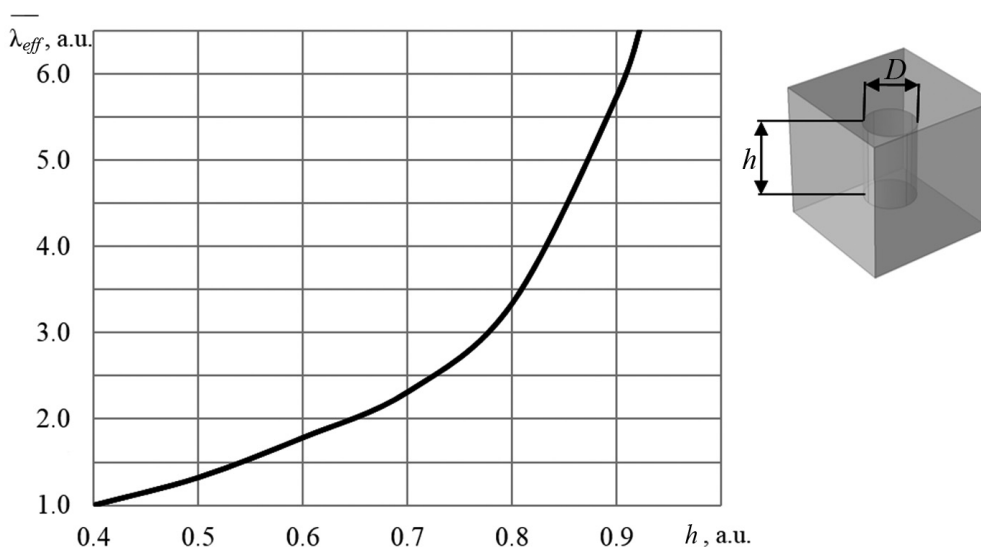


Рис. 5. Расчетная зависимость эффективной теплопроводности ПКМ от относительной длины цилиндрической микрочастицы наполнителя; $N_V = 30\%$. Справа показан элементарный кубический объем ($1 \times 1 \times 1$) ячейки матрицы ПКМ с микрочастицей наполнителя цилиндрической формы

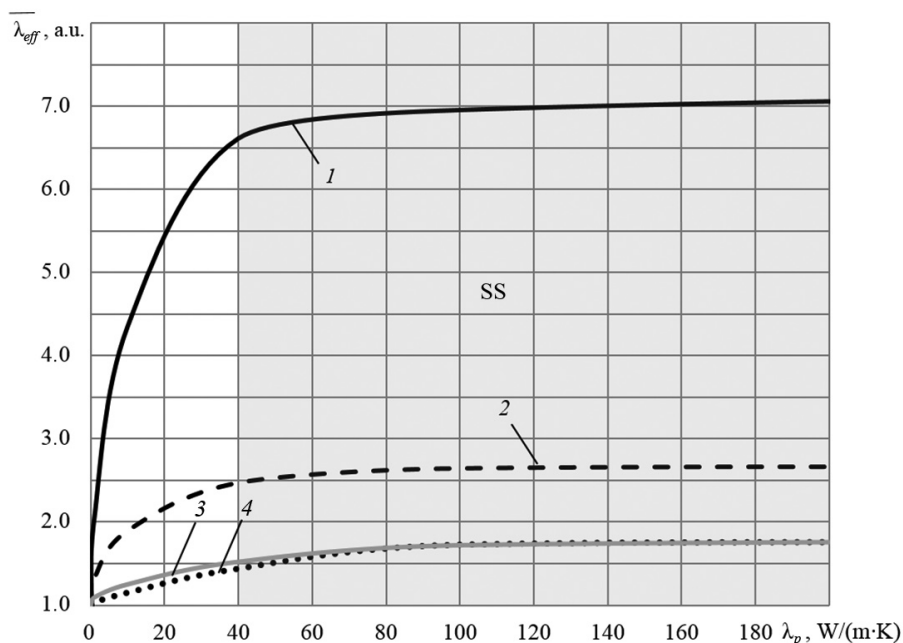


Рис. 6. Расчетная зависимость эффективной теплопроводности ПКМ от теплопроводности микрочастиц наполнителя разной формы: цилиндрической при $D/h = 2/3$ (1, 3) и кубической (2, 4); $N_V = 30\%$ (1, 2) и 10% (3, 4).

Темный фон соответствует области, относящейся к состоянию насыщения (SS – Saturated State)

матрице. Однако повышение теплопроводности частиц имеет практический смысл до значений $40 - 100$ Вт/(м·К), в зависимости от их формы и концентрации.

Этот эффект объясняется тем, что тепловое сопротивление микрочастиц становится значительно меньше теплового сопротивления матрицы и оно практически не влияет на средний тепловой поток.

Тренд зависимостей, представленных на рис. 6, закономерен для частиц любой формы.

Итак, максимальное значение эффективной теплопроводности полимерного композитного материала определяется величинами теплопроводности как полимерной матрицы, так и микрочастиц наполнителя, а также концентрацией частиц, их формой и ориентацией в матрице относительно направления теплового потока.

Заключение

Настоящее исследование, проведенное при помощи пакета ANSYS, состояло в прямом моделировании теплопроводности полимерной двухкомпонентной среды со

сложной структурой.

В результате численного моделирования были решены следующие задачи:

1. Изучено влияние объемной концентрации кубических, сферических и цилиндрических микрочастиц на эффективную теплопроводность ПКМ.

2. Проанализировано влияние формы и положения цилиндрических частиц наполнителя на эффективную теплопроводность ПКМ.

3. Изучено влияние теплопроводности частиц, включенных в матрицу полимера, на эффективную теплопроводность.

4. Установлено влияние теплопроводности полимерной матрицы на эффективную теплопроводность.

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что максимальное значение эффективной теплопроводности ПКМ определяется величинами теплопроводности как полимерной матрицы, так и наполнителя, а также концентрацией частиц, их формой и ориентацией в матрице относительно направления теплового потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mishra D., Satapathy A.** A study on thermal and dielectric characteristics of solid glass microsphere filled epoxy composites // Polymer Science Book Series. No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects. A. Mendez-Vilas, A. Solano (Eds.). Badajoz, Spain: Formatex Research Center, 2016. Pp. 13–28.
2. **Hong He, Renli Fu, Yanchun Han, Yuan Shen, Xiufeng Song.** Thermal conductivity of ceramic particle filled polymer composites and theoretical predictions // J. Mater. Sci. 2007. Vol. 42. No. 16. Pp. 6749–6754.
3. **Reine B., Di-Tomaso J., Dusserre G., Olivier P.A.** Study of thermal behavior of thermoset polymer matrix filled with micro and nanoparticles // Proc. of the 15th European Conference on Composite Materials. Venice, Italy, 24–28 June, 2012. Pp. 1–9.
4. **Kochetov R.** Modeling of the thermal conductivity in polymer nanocomposites and the impact of the interface between filler and matrix // Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. Vol. 44. No. 39 Pp. 1–12.
5. **Han Z., Wood J.W., Herman H., Zhang C., Stevens G.C.** Thermal properties of composites filled with different fillers // Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Vancouver, BC, Canada. 9–12 June, 2008. Pp. 499–501.
6. **Михеев В.А., Сулаберидзе В.Ш.** Расчетно-экспериментальные исследования эффективной теплопроводности композиционных материалов на основе полимеров // Мир измерений. 2017. № 3. С. 26–28.
7. **Choudhury M., Mohanty S., Nayak K., Aphale R.** Preparation and characterization of electrically and thermally conductive polymeric nanocomposites // Journal of Minerals and Materials. Characterization and Engineering. 2012. Vol. 11. No. 7. Pp. 744–756.
8. **Wang Z., Iizuka T.** Development of epoxy/bn composites with high thermal conductivity and sufficient dielectric breakdown strength. Part I. Sample preparations and thermal conductivity // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2011. Vol.18. No. 6. Pp. 1963–1972.
9. **Zhe Li.** The role of nano and micro particles on partial discharge and breakdown strength in epoxy composites // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2011. Vol. 18. No. 3. Pp. 675–681.
10. **Andreev A.M., Azizov A.Sh., Bezborodov A.A.** Influence of nano-modifiers on electrical properties of epoxy resins and impregnated insulating composites. Proc. 22 Nordis Insulation Symp. 13–15 June 2011. Tampere. Pp. 133–135.
11. **Безбородов А.А. Цобкалло Е.С., Ожегова Т.А.** Влияние степени наполнения и структурных особенностей на теплопроводность композиционного материала полипропилен – технический углерод // Матер. XII Междунар. конф. «Физика диэлектриков» (Диэлектрики-2011), 23–26 мая 2011 г. Т. 2. СПб: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2011. С. 135–138.
12. **Ngo I.L., Byon C.** Thermal conductivity of particle-filled polymers// Polymer Science Book Series. No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects. A. Míndez-Vilas, A. Solano (Eds.). Badajoz, Spain: Formatex Research Center, 2016. Pp. 554–565.
13. **Азизов А.Ш., Андреев А.М., Костельов А.М., Поликарпов Ю.И.** Теплопроводность системы изоляции статорной обмотки мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением // Электротехника. 2009. № 3. С. 26–28.
14. **Jae-Jun Park, Seong-Sik Shin, Chan-Young Yoon.** Electrical and mechanical properties of epoxy microsized alumina composite and the effect of nano-sized alumina on those properties // Transactions on Electrical and Electronic Materials. 2015. Vol. 16. No. 5. Pp. 260–262.
15. **Tari M., Yoshida K., Sekito S., Allison J., Brutsch R., Lutz A.** A high voltage insulating system with increased thermal conductivity for turbo generators // Proceedings of the Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference. Indianapolis, Indiana, USA, IEEE. 23–25 Sept. 2003. P. 2.

Статья поступила в редакцию 05.06.2018, принята к публикации 17.09.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СТЕПАНОВ Вячеслав Васильевич – кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация. 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vstepanov@phmf.spbstu.ru



ПЕТРЕНЯ Юрий Кириллович – доктор физико-математических наук, заместитель генерального директора – технический директор ПАО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195009, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А.
Petrenya_YK@power-m.ru

АНДРЕЕВ Александр Михайлович – доктор технических наук, начальник отдела ПАО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195009, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А.
Andreev_am@power-m.ru

КОСТЕЛОВ Андрей Михайлович – начальник отдела ПАО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195009, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А.
Kostelov_AM@power-m.ru

МАННАНОВ Эмиль Рамилевич – специалист ПАО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195009, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А.
Mannanov_ER@power-m.ru

ТАЛАЛОВ Виктор Алексеевич – кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
vtalalov@phmf.spbstu.ru

REFERENCES

- [1] **D. Mishra, A. Satapathy**, A study on thermal and dielectric characteristics of solid glass microsphere filled epoxy composites, Polymer Science Book Series, No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects, A. Méndez-Vilas, A. Solano (Eds.), Formatex Research Center, Badajoz, Spain (2016) 13–28.
- [2] **Hong He, Renli Fu, Yanchun Han, et al.**, Thermal conductivity of ceramic particle filled polymer composites and theoretical predictions, J. Mater. Sci. 42 (16) (2007) 6749–6754.
- [3] **B. Reine, J. Di-Tomaso, G. Dusserre, P.A. Olivier**, Study of thermal behavior of thermoset polymer matrix filled with micro and nanoparticles, Proc. of the 15th European Conference on Composite Materials. Venice, Italy, 24–28 June (2012) 1–9.
- [4] **R. Kochetov**, Modeling of the thermal conductivity in polymer nanocomposites and the impact of the interface between filler and matrix, Journal of Physics D: Applied Physics. 44 (39) (2011) 1–12.
- [5] **Z. Han, J.W. Wood, H. Herman, et al.**, Thermal properties of composites filled with different fillers, Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver, BC, Canada, 9–12 June (2008) 499–501.
- [6] **V.A. Mikheyev, V.Sh. Sulaberidze**, Raschetno-eksperimentalnyye issledovaniya effektivnoy teploprovodnosti kompozitsionnykh materialov na osnove polimerov [Experiment-calculated studies in efficient heat conduction of the polymer-based composite materials], The World of Measurement. (3) (2017) 26–28.
- [7] **M. Choudhury, S. Mohanty, K. Nayak, et al.**, Preparation and characterization of electrically and thermally conductive polymeric nanocomposites, Journal of Minerals and Materials, Characterization and Engineering. 11(7) (2012) 744–756.
- [8] **Z. Wang, T. Iizuka**, Development of epoxy/BN composites with high thermal conductivity and sufficient dielectric breakdown strength, Part I: Sample preparations and thermal conductivity, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 18 (6) (2011) 1963–1972.
- [9] **Zhe Li**, The role of nano and micro particles on partial discharge and breakdown strength in epoxy composites, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 18(3) (2011) 675–681.
- [10] **A.M. Andreev, A.Sh. Azizov, A.A. Bezborodov**, Influence of nano-modifiers on electrical properties of epoxy resins and impregnated insulating composites, Proc. 22 Nordis Insulation Symp. 13 –15 June 2011, Tampere. (2011) 133–135.
- [11] **A.A. Bezborodov, E.S. Tsobkallo, T.A. Ozhegova**, Vliyanie stepeni napolneniya i

strukturnykh osobennostey na teploprovodnost kompozitsionnogo materiala polipropilen – tekhnicheskii uglerod [The influence of degree of admision and structural features on the heat conductivity of polypropylene – technical carbon composite], Proceedings of the 12th International Conference on Dielectric Physics (“Dielectrics 2011”) May 23–26 2011, Vol. 2, Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg. (2011) 135–138.

[12] **I.L. Ngo, C. Byon**, Thermal conductivity of particle-filled polymers, Polymer Science Book Series, No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects, A. Mendez-Vilas, A. Solano (Eds.), Formatex Research Center, Badajoz, Spain, (2016) 554–565.

[13] **A.Sh. Azizov, A.M. Andreyev, A.M. Kostelov, Yu.I. Polikarpov**, Teploprovodnost sistemy izolyatsii

Received 05.06.2018, accepted 17.09.2018.

statornoy obmotki moshchnykh turbogeneratorov s vozdushnym okhlazhdeniyem [The insulating system’s heat conductivity of the stator winding of air-cooled powerful turbogenerators], Electrical Engineering. (3) (2009) 26–28.

[14] **Jae-Jun Park, Seong-Sik Shin, Chan-Young Yoon**, Electrical and mechanical properties of epoxy microsized alumina composite and the effect of nanosized alumina on those properties, Transactions on Electrical and Electronic Materials. 16 (5) (2015) 260–262.

[15] **M. Tari, K. Yoshida, S. Sekito, et al.**, A high-voltage insulating system with increased thermal conductivity for turbo generators, Proceedings of the Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference, IEEE, Indianapolis, Indiana, USA, 23–25 Sept. 2003. (2003) 2.

THE AUTHORS

STEPANOV Vyacheslav V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
vstepanov@phmf.spbstu.ru

PETRENYA Yuriy K.

PJSC “Power Machines”
3A Vatutina St., St. Petersburg, 195009, Russian Federation
Petrenya_YK@power-m.ru

ANDREEV Alexander M.

PJSC “Power Machines”
3A Vatutina St., St. Petersburg, 195009, Russian Federation
Andreev_am@power-m.ru

KOSTELOV Andrey M.

PJSC “Power Machines”
3A Vatutina St., St. Petersburg, 195009, Russian Federation
Kostelov_AM@power-m.ru

MANNANOV Emil R.

PJSC “Power Machines”
3A Vatutina St., St. Petersburg, 195009, Russian Federation
Mannanov_ER@power-m.ru

TALALOV Viktor A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
vtalalov@phmf.spbstu.ru