

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МИКРОНАПОЛНИТЕЛЯ НА ТЕПЛОПРОВОДНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

В.Ф. Каблов, С.В. Лапшина, А.Н. Гайдадин, Л.М. Гуревич

Виктор Федорович Каблов (ORCID 0000-0002-2970-6109)

Кафедра химической технологии полимеров и промышленной экологии, Волжский политехнический институт, пр. Ленина, 72, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, 404121
E-mail: vkablov5@gmail.com

Светлана Владимировна Лапшина (ORCID 0009-0006-9314-3079)*

Кафедра химии, технологии и оборудования химических производств, Волжский политехнический институт, пр. Ленина, 72, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, 404121
E-mail: tt134t@gmail.com*

Алексей Николаевич Гайдадин (ORCID 0000-0002-2192-5913)

Кафедра химии и технологии переработки эластомеров, Волгоградский государственный технический университет, пр. им. Ленина, 28, Волгоград, Российская Федерация, 400005
E-mail: lit@vstu.ru

Леонид Моисеевич Гуревич (ORCID 0000-0003-3805-6977)

Кафедра материаловедения и композиционных материалов, Волгоградский государственный технический университет, пр. им. Ленина, 28, Волгоград, Российская Федерация, 400005
E-mail: leongur@mail.ru

Композиционные материалы с полимерной матрицей, модифицированные дисперсными включениями, являются перспективными конструкционными и функциональными материалами. Ключевым параметром, определяющим их эксплуатационные характеристики, является эффективный коэффициент теплопроводности, который зависит от морфологии наполнителя. Одной из центральных задач при проектировании таких материалов является определение зависимостей эффективного коэффициента теплопроводности от формы, размеров, пространственного распределения и концентрации стеклянных микросфер. В настоящем исследовании методом численного моделирования решается задача теплопереноса в гетерогенном материале. Выбор данного типа наполнителя обусловлен значительной разницей в коэффициентах теплопроводности между микросферами и полимерной матрицей. Использовались модели с одной и десятью частицами, хаотически распределенными в полимерной матрице. Предполагается идеальный тепловой контакт матрицы и включений, имеющих одинаковый размер без учета разрушений частиц. Смоделирован процесс стационарной теплопроводности в слое композита в условиях одностороннего нагрева. Численное моделирование проводилось с использованием метода конечных элементов. Представлены результаты расчета эффективной теплопроводности полимерных материалов, наполненных полыми стеклянными микросферами. Проведено сравнение результатов расчета моделей с одиночной частицей и с множеством частиц. Показано влияние концентрации наполнителя на теплофизические свойства наполненного полимера, а также выявлено влияние геометрических размеров, толщины стенки и диаметра, стеклянных микросфер на изменение эффективной теплопроводности материала. Уменьшение толщины стеклянной полой микросферы приводит к уменьшению эффективного коэффициента теплопроводности. Результаты моделирования могут быть использованы для прогноза эффективного коэффициента теплопроводности полимерного материала, модифицированного различными частицами, что в свою очередь позволит создавать функциональные материалы с заданными свойствами.

Ключевые слова: эффективная теплопроводность, представительный элемент структуры, численное моделирование, гетерогенный материал, наполненный полимер, композит

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF MICROFILLER ON THE THERMAL CONDUCTIVE PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITIONS

V.F. Kablov, S.V. Lapshina, A.N. Gaidadin, L.M. Gurevich

Viktor F. Kablov (ORCID 0000-0002-2970-6109)

Department of Chemical Technology of Polymers and Industrial Ecology, Volzhsky Polytechnic Institute, Lenin ave., 72, Volzhsky, Volgograd reg., 404121, Russia

E-mail: vkablov5@gmail.com

Svetlana V. Lapshina (ORCID 0009-0006-9314-3079)*

Department of Chemistry, Technology, and Equipment for Chemical Production, Volzhsky Polytechnic Institute, Lenin ave., 72, Volzhsky, Volgograd reg., 404121, Russia

E-mail: tt134t@gmail.com

Alexey N. Gaidadin (ORCID 0000-0002-2192-5913)

Department of Chemistry and Technology of Elastomer Processing, Volgograd State Technical University, Lenin ave., 28, Volgograd, 400005, Russia

E-mail: lit@vstu.ru

Leonid M. Gurevich (ORCID 0000-0003-3805-6977)

Department Materials Science and Composites, Volgograd State Technical University, Lenin ave., 28, Volgograd, 400005, Russia

E-mail: leongur@mail.ru

Polymer-matrix composite materials modified with dispersed inclusions are promising structural and functional materials. A key parameter determining their performance characteristics is the effective thermal conductivity, which depends on the filler morphology. One of the central challenges in designing such materials is determining the dependence of the effective thermal conductivity on the shape, size, spatial distribution, and concentration of glass microspheres. In this study, numerical modeling is used to solve the problem of heat transfer in a heterogeneous material. This type of filler was chosen due to the significant difference in thermal conductivity between the microspheres and the polymer matrix. Models with one and ten particles randomly distributed within the polymer matrix were used. Ideal thermal contact between the matrix and inclusions of the same size is assumed, ignoring particle destruction. Steady-state thermal conductivity in a composite layer under unilateral heating conditions is simulated. Numerical modeling was performed using the finite element method. The article presents the calculated effective thermal conductivity of polymeric materials filled with hollow glass microspheres. The results of calculations for models with single and multiple particles are compared. The effect of filler concentration on the thermophysical properties of the filled polymer is demonstrated, and the influence of the geometric dimensions, wall thickness, and diameter of the glass microspheres on changes in the effective thermal conductivity of the material is revealed. Reducing the thickness of the hollow glass microsphere leads to a decrease in the effective thermal conductivity. The modeling results can be used to predict the effective thermal conductivity of a polymeric material modified with various particles, which in turn will allow the creation of functional materials with desired properties.

Keywords: effective thermal conductivity, representative element of the structure, numerical modeling, heterogeneous material, filled polymer, composite

Для цитирования:

Каблов В.Ф., Лапшина С.В., Гайдадин А.Н., Гуревич Л.М. Исследования влияния микронаполнителя на теплопроводные свойства полимерных композиций. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2026. Т. 69. Вып. 9. С. 145–153. DOI: 10.6060/ivkkt.20266909.6988.

For citation:

Kablov V.F., Lapshina S.V., Gaidadin A.N., Gurevich L.M. Research of the influence of microfiller on the thermal conductive properties of polymer compositions. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2026. V. 69. N 9. P. 145–153. DOI: 10.6060/ivkkt.20266909.6988.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества и снижение материалоемкости изделий – важнейшая задача, стоящая перед технологией производства полимерных материалов. Одним из направлений решения этой задачи является создание новых композиционных материалов и внедрение этих материалов в производство. Перспективными и нашедшими широкое применение материалами являются наполненные полимерные композиции с волокнистыми или дисперсными включениями. Такие дисперсные включения, как поликапроамидные и стеклянные волокна, стальная проволока или стеклянные микросферы, варьирующиеся по форме, размерам и структуре, целенаправленно модифицируют полимерную матрицу. Присутствие наполнителя в полимерной матрице не просто улучшает, а формирует принципиально новые свойства композиции, что является ключевой причиной стремительного роста доли композиционных материалов в общем объеме полимеров. Таким образом, правильный подбор и комбинирование полимера с наполнителем открывают возможность целенаправленного проектирования материалов с высокими потребительскими показателями для самых различных областей применения [1-3].

Перспективным наполнителем, широко применяемым в последние годы, являются полые стеклянные микросферы, которые могут изменять теплофизические и механические свойства полимерных композитов. Так их добавка в высокомолекулярный полиэтилен приводит к комплексному улучшению механических и эксплуатационных характеристик: росту прочности и износостойкости при одновременном снижении теплопроводности. В случае полиамидов диспергирование микросфер приводит к значительному росту прочности на растяжение, ударной вязкости и твердости. Более того, микросферы выполняют функцию стабилизатора: они существенно замедляют старение материала под воздействием света и повышают его термостойкость. Данный набор модифицированных характеристик определяет востребованность композитов в производстве высоконагруженных узлов (подшипники, элементы промышленного оборудования) [3].

Полые стеклянные микросферы демонстрируют высокую эффективность в качестве универсального модификатора для широкого спектра полимерных матриц, целенаправленно улучшая их технологические и эксплуатационные свойства. В термопластах, таких как жесткий ПВХ, их добавление позволяет получать профили, трубы и плиты с повышенной жесткостью, термостойкостью и превосходной размерной стабильностью. Для ABS-пластика микросферы обеспечивают снижение усадки, повышение стабильности размеров изделий, а также увеличение прочности на сжатие и модуля упругости при изгибе, что обуславливает их применение в производстве высокоточной и ответственной продукции (детали автомобилей и бытовой техники). Добавление микросфер в эпоксидные компаунды уменьшает вязкость материала и улучшает механические свойства композита. Следовательно, использование стеклянных микросфер трансформирует стандартные полимеры в специализированные инженерные материалы, решающие задачи конкретных отраслей – от строительства и машиностроения до судостроения [4-6].

Полые стеклянные микросферы широко применяются в качестве наполнителя для различных функциональных материалов и покрытий. Характерные области их использования: нефтегазовая отрасль (буровые растворы и тампонажные цементы), лакокрасочная промышленность (наполнители и добавки), строительная отрасль (звуко- и теплоизоляция), судо- и авиастроение (облегченные конструктивные материалы). Диаметр используемых в качестве наполнителей микросфер определяется конкретными требованиями к полимерной композиции и обычно составляет от 10 до 300 мкм при толщине стенки оболочки от 0,1 до 10 мкм, их насыпная плотность варьируется от 80 до 700 кг/м³. Применение микросфер обусловлено уникальным сочетанием их физических параметров: сферическая форма, малая толщина стенок, низкая плотность, относительно высокая прочность при всестороннем сжатии, хорошие тепло- и звукоизоляционные, а также высокие диэлектрические свойства [7].

Существенное влияние микросферы оказывают на теплофизические показатели наполненных

композиций. Возможность достижения эффективной теплопроводности в полимерных композитных материалах определяется правильно подобранными свойствами, гранулометрическим составом и концентрацией микросфер в полимерной матрице. Для аналитического решения задачи оптимизации конструкции композита наиболее часто используют модели приближенного расчета эффективной теплопроводности, приведенные в работах [8-13]. Исследованию теплопроводности композитов посвящено большое количество работ. Расчетные формулы в работах [14-16] получены, как правило, обработкой экспериментальных данных применительно к конкретным материалам либо априорным заданием распределения температур и тепловых потоков в моделях. В работах [12, 16, 17] рассматриваются математические модели переноса тепловой энергии в многофазном композите с дисперсными включениями шаровой формы, на основании которых найдены эффективные коэффициенты теплопроводности композита. При этом в рассматриваемых моделях расположение включений, как правило, строго задано, что не всегда соответствует экспериментальным данным. В ряде случаев трудно добиться равномерного распределения частиц включения в объеме полимера. В тех случаях, когда требуется выполнения расчетов с возможностью варьирования концентрации, размеров, форм и расположения микросфер, аналитические модели не всегда могут обеспечить должной точности в связи с тем, что аналитические модели получены при допущениях, которые не учитывают хаотическое расположение частиц, поэтому для выполнения расчетов удобнее определять теплофизические свойства с применением компьютерного (цифрового) моделирования. Применение компьютерного моделирования позволяет использовать полное уравнение теплопроводности без упрощений с более сложными граничными условиями и с учетом особенностей геометрии тела.

Современные вычислительные средства позволяют проводить прямое моделирование теплопроводности сред со сложной структурой. При этом используют как широко известные коммерческие программные пакеты (ANSYS FLUENT, ABAQUS, Fidesis) [18, 19, 20], так и не коммерческие программные продукты, например, Calculix [21]. Calculix – открытый, свободный программный пакет, предназначенный для решения линейных и нелинейных трехмерных задач механики твердого деформируемого тела и механики жидкости и газа с помощью метода конечных элементов. Наряду с другими в

списке видов проводимого анализа с использованием этого программного продукта присутствует теплопередача и теплопроводность.

Целью работы является определение теплофизических свойств полимерных композитов, наполненных стеклянными микросферами, с помощью пакета программ Calculix.

Задачей исследования является подбор параметров микросфер для снижения эффективного коэффициента теплопроводности наполненного полимерного материала. В работе используется метод численной оценки эффективных тепловых характеристик, основанный на проведении теплофизических расчетов методом конечных элементов для представительного объема.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На первом этапе моделирования в программе Calculix использовался представительный объем – минимальный объем гетерогенной среды, включающий в себя одну стеклянную микросферу, заполненную газом. Подобный подход ранее рассматривался в работах [21-23].

При проведении расчетов были приняты следующие допущения:

1. Задача рассматривается как стационарная.
2. Материалы, составляющие полимерный композит, считаются изотропными, а их теплопроводность не зависит от температуры.
3. Размеры частиц наполнителя одинаковы, а контакты между ними отсутствуют.
4. Микродефекты (разрушение) частиц не учитываются.

Представительный объем имеет форму куба. Размер стороны куба (a) рассчитывался исходя из ниже приведенных зависимостей:

$$a = \sqrt[3]{V_M} \quad (1)$$

Объем материала V_M определяется по уравнению

$$V_M = V_{\text{полимер}} + V_{\text{чп}}$$

$$\text{или} \quad V_M = V_{\text{чп}} n + \frac{m_{\text{чп}} n}{\rho_{\text{полимер}}} \frac{(1 - \bar{x}_{\text{чп}})}{\bar{x}_{\text{чп}}} \quad (2)$$

где $V_{\text{чп}}$ – объем стеклянной микросферы, м^3 , $\rho_{\text{полимер}}$ – плотность полимера, $\text{кг}/\text{м}^3$, n – количество частиц, шт., $\bar{x}_{\text{чп}}$ – массовая доля частиц, $m_{\text{чп}}$ – масса частиц, кг ,

$$m_{\text{чп}} = m_{\text{с}} + m_{\text{г}}, \quad (3)$$

где $m_{\text{с}} = \frac{4}{3} \pi \left(\left(\frac{D}{2} \right)^3 - \left(\frac{D-2\delta}{2} \right)^3 \right) \rho_{\text{с}}$ – масса стеклянной оболочки микросферы, кг , $m_{\text{г}} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D-2\delta}{2} \right)^3 \rho_{\text{г}}$ – масса газа внутри микросферы, кг , D – диаметр

стеклянной микросферы, m , δ – толщина стеклянной оболочки, m , ρ_c – плотность стекла (2650 кг/м^3), ρ_g – плотность газа внутри микросферы (1 кг/м^3), $\rho_{\text{полимер}}$ – плотность полимера (130 кг/м^3).

Таким образом, размер представительного объема определяется по формуле

$$a = \sqrt[3]{V_q n + \frac{m_q n}{\rho_{\text{полимер}}} \frac{(1 - \bar{x}_q)}{\bar{x}_q}} \quad (4)$$

В общем случае размер стороны представительного объема можно представить функцией: $a = f(n, D, \delta, \rho_{\text{полимер}}, \rho_c, \rho_g, \bar{x}_q)$.

Для расчета распределения температур использовалось основное уравнение теплопроводности, реализованное в расчетной программе

$$\nabla(-\lambda \nabla T) + \rho c \dot{T} = 0 \quad (5)$$

где λ , ρ , c – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/(м} \cdot \text{град)}$; плотность материала кг/м^3 ; удельная теплоемкость, $\text{Дж/(кг} \cdot \text{град)}$ (полимер, стекло, газ); T – температура, град .

Уравнение решалось в программе Calculix методом Ньютона - Рафсона при следующих начальных и граничных условиях. Начальное распределение температур по всему объему 20°C . Граничные условия: на левой грани куба температура 21°C , на правой 20°C , на остальных гранях тепловой поток равен нулю.

Эффективная теплопроводность при условии стационарного теплового потока рассчитывается по формуле

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{Q_t}{\Delta T a} \quad (6)$$

где Q_t – полный тепловой поток, Вт ; a – толщина (размер грани куба, м ; ΔT – разность температур, $^\circ\text{C}$.

Для построения геометрии и генерации расчетной сетки использовалась программа Gmsh (бесплатное программное обеспечение). Для этого на внутреннем языке программы Gmsh был создан скрипт, описывающий геометрию расчетной области как набор точек, линий, поверхностей, объединенных в объемные элементы без использования стандартных геометрических элементов (куб, сфера). В начале скрипта задаются исходные данные, такие как размер представительного объема, диаметр частиц и толщина стенки в виде переменных. Такой подход позволяет получить структурированную расчетную сетку, состоящую из гексаэдров. Гексаэдральная сетка отличается большей точностью и лучшей сходимостью по сравнению с тетрагональной сеткой. При определении оптимального (достаточного) количества элементов, на которые проводилось разбиение модели, выполнялась проверка на сеточную сходимость.

На втором этапе моделирования использовался представительный объем, включающий в себя десять хаотично расположенных стеклянных микросфер. Случайное распределение частиц в объеме полимера подтверждается результатами исследования методом электронной микроскопии, представленными на рис. 1.

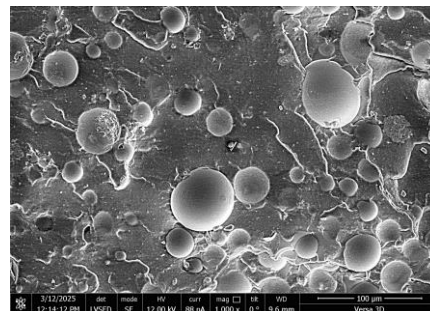


Рис. 1. Расположение микросфер в наполненном полимерном композите (изображение получено с использованием электронно-ионного микроскопа Versa 3D LowVac)

Fig. 1. The arrangement of microspheres in a filled polymer composite (image obtained using a Versa 3D LowVac electron ion microscope)

Как и на первом этапе, для построения геометрии и генерации расчетной сетки использовалась программа Gmsh. Для упрощения при создании скрипта, описывающего геометрию расчетной области, использовались стандартные геометрические элементы (куб, сфера). В набор исходных данных добавляется количество и координаты частиц. Координаты генерируются случайным образом. Примененный подход позволяет получить расчетную сетку, состоящую из тетраэдров, а не гексаэдров, как на первом этапе.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В расчетах диаметр микросфер варьировался в интервале от 10 до 60 $\mu\text{м}$, а толщина стенок макросфер в интервале от 0,5 до 5 $\mu\text{м}$. Эффективная теплопроводность определялась для материала, состоящего из полимера с теплопроводностью 0,19 $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$ и полый стеклянной микросферы (коэффициент теплопроводности стенки 0,7 $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$, наполненной газом с коэффициентом теплопроводности 0,007 $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Для выполнения расчета в программе PrePoMax импортируем полученную сетку Gmsh, задаем теплофизические свойства материалов, составляющих композит, начальные и граничные условия, а также выбираем тип решаемой задачи. Производим расчет в программе Calculix. Результаты расчета представлены в виде полей температур (рис. 2 а, б).

Расчет в программе позволяет определить полный тепловой поток через представительный объем. При заданной разности температур и известном размере грани представительного объема по формуле (6) определяем эффективный коэффициент теплопроводности композита.

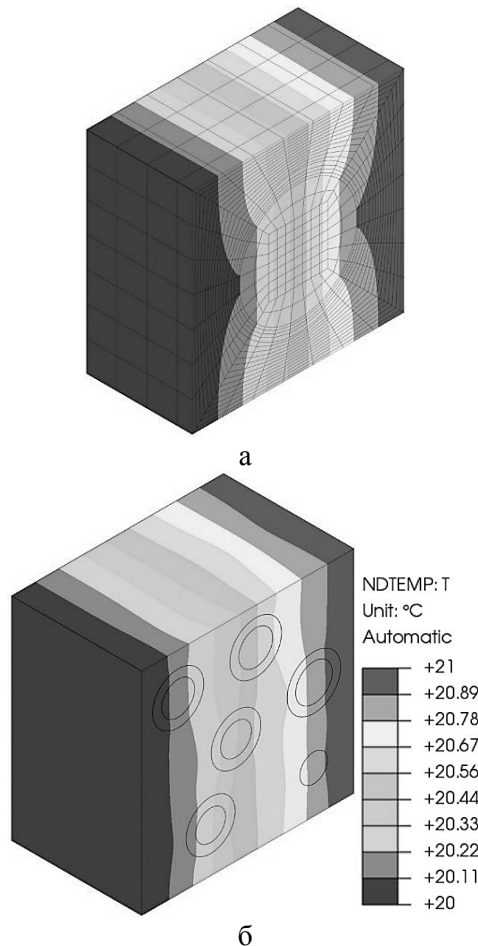


Рис. 2. Поле температур для композита: а) с одной частицей, б) десятью частицами
Fig. 2. Temperature field for a composite: а) with one particle, б) ten particles

Для представительного объема, содержащего одну микросферу, проанализируем зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от концентрации стеклянных микросфер разного диаметра и постоянной толщины стенки (5 мкм), результаты расчетов представлены в табл. 1. Изменение диаметра микросфер и концентрации в пределах от 5 до 50% слабо влияет на эффективный коэффициент теплопроводности. При дальнейшем увеличении концентрации наблюдается рост эффективного коэффициента теплопроводности вследствие увеличения доли стекла с большим коэффициентом

теплопроводности в представительном объеме. Вследствие этого тепловая энергия распространяется по стеклянной оболочке микросферы, минуя газ, находящийся внутри, в связи с тем, что термическое сопротивление оболочки меньше, и она играет роль «тепловых мостиков». Однако на практике наполненные полимеры содержат не более 30% микросфер, а основной задачей исследования является нахождение оптимальных методов снижения эффективного коэффициента теплопроводности. Варьирование диаметра сферы без изменения толщины стенок не приводит к уменьшению эффективного коэффициента теплопроводности.

Таблица 1
Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от массового содержания сфер разного диаметра и толщиной стенки 5 мкм

Table 1. Dependence of the effective thermal conductivity coefficient on the mass content of spheres of different diameters and a wall thickness of 5 μm

Массовая концентрация, $\bar{x}_c$, %	Диаметр частиц, мкм				
	20	30	40	50	60
5	0,1907	0,1907	0,1906	0,1905	0,1904
10	0,1915	0,1914	0,1913	0,1910	0,1908
20	0,1934	0,1932	0,1928	0,1923	0,1917
30	0,1958	0,1954	0,1948	0,1939	0,1928
40	0,1990	0,1984	0,1973	0,1959	0,1943
50	0,2034	0,2024	0,2007	0,1986	0,1962
60	0,2097	0,2081	0,2055	0,2024	0,1989
70	0,2199	0,2171	0,2129	0,2080	0,2028

На втором этапе моделирования рассматривался представительный объем, содержащий десять частиц со случайным распределением. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от диаметра стеклянных полых микросфер с постоянной толщиной стенки (5 мкм) при наличии 10 частиц с хаотичным расположением в объеме материала представлена в табл. 2.

Уменьшение диаметра стеклянной микросферы при постоянной толщине (5 мкм) приводит к увеличению коэффициента теплопроводности из-за роста доли стекла с высоким коэффициентом теплопроводности и уменьшением доли газа. Следовательно, увеличение диаметра микросферы будет приводить к уменьшению коэффициента теплопроводности.

С учетом вышеприведенных результатов для решения поставленной задачи необходимо уменьшать содержание материала с высоким коэффициентом теплопроводности (стекло) за счет уменьшения толщины стенки микросферы.

Таблица 2

Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от массового содержания сфер разного диаметра и толщины стенки 5 мкм (при расчете матрицы с 10-ю частицами)

Table 2. Dependence of the effective thermal conductivity coefficient on the mass content of spheres of different diameters and a wall thickness of 5 μm , (when calculating a matrix with 10 particles)

Массовая концентрация, $\bar{x}_c$, %	Диаметр частиц, мкм				
	20	30	40	50	60
5	0,1907	0,1907	0,1906	0,1905	0,1904
10	0,1915	0,1914	0,1913	0,1910	0,1908
20	0,1934	0,1933	0,1928	0,1923	0,1917
30	0,1958	0,1954	0,1948	0,1939	0,1928
40	0,1989	0,1983	0,1973	0,1958	0,1943
50	0,2033	0,2023	0,2006	0,1987	0,1962
60	0,2099	0,2080	0,2054	0,2024	0,1989
70	0,2196	0,2171	0,2132	0,2082	0,2028

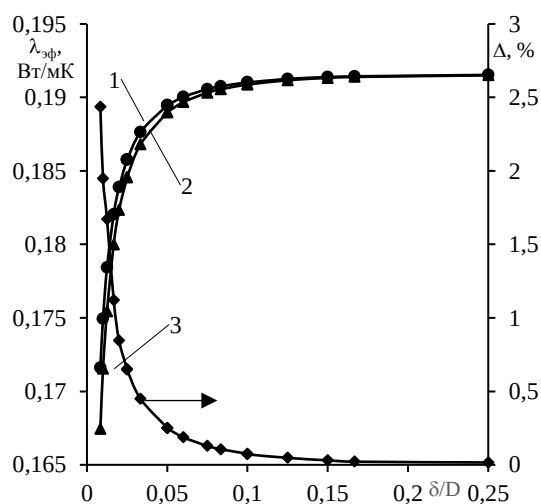


Рис. 3. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности для моделей с одной (1) и 10-ю частицами (2) и процент взаимного отклонения (3) от соотношения толщины стенки δ и диаметра сферы D

Fig. 3 Dependence of the effective thermal conductivity coefficient for models with one (1) and 10 particles (2) and the percentage of mutual deviation (3) on the ratio of the wall thickness δ and the diameter of the sphere D

Получена зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от геометрического симплекса (отношения толщины к диаметру сферы) для одной и десяти частиц, рис. 3.

Из рисунка следует, что для уменьшения коэффициента теплопроводности необходимо уменьшать соотношения δ/D (уменьшать толщину и (или) увеличивать диаметр сфер). Также из него видно, что при увеличении этого соотношения значения коэффициента теплопроводности для модели с одной и десятью частицами практически совпадают.

Уменьшение соотношения δ/D ниже 0,1 приводит к расхождению результатов, что может свидетельствовать о зависимости результатов расчета от количества частиц, а возможно, и от взаимного их расположения.

Наименьшее значение эффективного коэффициента теплопроводности достигается при использовании в расчетах максимального диаметра микросфер с минимальной толщиной стенок, что связано с увеличением доли объема (массы) газа, имеющего минимальный коэффициент теплопроводности. Следует отметить, что уменьшение толщины стенок стеклянной микросферы, в свою очередь, может привести к ряду негативных последствий: к повышенной хрупкости микросферы и увеличению возможности их разрушения при переработке наполненного полимерного материала. Поэтому немаловажным является подбор оптимальных размеров микросферы, в первую очередь ее толщины, позволяющей получить заданные тепловые свойства материала при сохранении целостности микросферы при смешении и переработке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов показывает, что изменений теплопроводности полимерного композитного материала можно достигнуть, добавляя в него стеклянные микросферы разного диаметра и толщины стенки. Подбирая материал и размеры наполнителя, возможно управлять свойствами полимерных композитов и создавать новые материалы с заданными свойствами. В качестве материала наполнителя возможно использовать полимер, металл и т.д.

Численное моделирование с использованием метода конечных элементов позволяет анализировать модели с различным распределением частиц.

Работа выполнена в рамках проекта № 3.26 «Компьютерное материаловедение многокомпонентных наноструктурных эластомерных материалов с заданными свойствами для экстремальных условий эксплуатации» мероприятия по обеспечению технологического суверенитета Российской Федерации Центра НТИ по направлению «Технологии моделирования и разработки новых функциональных материалов с заданными свойствами».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was carried out within the framework of project No. 3.26 "Computer materials science of multicomponent nanostructured elastomeric materials with specified properties for extreme operating

conditions” of the event to ensure the technological sovereignty of the Russian Federation of the NTI Center in the direction of “Technologies for modeling and

developing new functional materials with specified properties”.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Победря Б.Е.** Механика композиционных материалов. М.: Изд-во Моск. Ун-та. 1984. 335 с.
2. **Кербер М.Л.** Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. М.: Изд-во ЦОП Профессия. 2014. 592 с.
3. **Кристensen Р.** Введение в механику композитов. М.: Мир. 1982. 336 с.
4. **Липин А.Г., Липин А.А.** Энерго- и ресурсосберегающие процессы с участием полимерной фазы. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 203–213. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6836j.
5. **Саморядов А.В., Калугина Е.В., Усенко Е.С., Паршиков Ю.Г., Битт В.В.** Исследование композиционных материалов на основе высокотермостойких термопластов. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 1. С. 80–87. DOI: 10.6060/rcj.2025691.15.
6. **Hong He, Renli Fu, Yanchun Han.** Thermal conductivity of ceramic particle filled polymer composites and theoretical predictions. *J. Mater. Sci.* 2007. V. 42. N 16. P. 6749–6754. DOI: 10.1007/s10853-006-1480-y.
7. **Гринчук П., Акулич А., Шевцов В., Чернухо Е., Стетюкевич Н., Хилько М.** Покрyтия с добавлением полых стеклянных микросфер. *Наука и инновации*. 2017. № 11. С. 16–20.
8. **Mishra D., Satapathy A.** A study on thermal and dielectric characteristics of solid glass microsphere filled epoxy composites. In: Polymer Science Book Series. N 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects. Ed. by A. Méndez-Vilas, A. Solano. Badajoz, Spain: Formatex Research Center. 2016. P. 13–28.
9. **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. P. 1–9.
10. **Kochetov R.** Modeling of the thermal conductivity in polymer nanocomposites and the impact of the interface between filler and matrix. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011. V. 44. N 39. P. 1–12. DOI: 10.1088/0022-3727/44/39/395401.
11. **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. 2011. P. 133–135.
12. **Пугачев О.В., Хан Зо Тун.** Нахождение эффективной теплопроводности композита методом моментов. *Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естество. науки*. 2016. № 4. С. 28–39. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-4-28-39.
13. **Волков Д.П., Успенская М.В.** Теплопроводность наполненных полимеров. *Изв. вузов. Приборостроение*. 2010. Т. 53. № 4. С. 49–51.
14. **Миснар А.** Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. М.: Мир. 1968. 464 с.
15. **Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П.** Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия. 1974. 264 с.
16. **Шермергор Т.Д.** Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука. 1977. 400 с.

REFERENCES

1. **Pobedrya B.E.** Mechanics of Composite Materials. M.: Izd. Mosk. Univ. 1984. 335 p. (in Russian).
2. **Kerber M.L.** Polymer Composite Materials: Structure, Properties, Technology. M.: Izd. TsOP Professiya. 2014. 592 p. (in Russian).
3. **Christensen R.** Introduction to Composite Mechanics. M.: Mir. 1982. 336 p. (in Russian).
4. **Lipin A.G., Lipin A.A.** Energy- and resource-saving processes involving the polymer phase. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 203–213 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6836j.
5. **Samoryadov A.V., Kalugina E.V., Usenko E.S., Parshikov Yu.G., Bitt V.V.** Research the properties of composite materials based on high temperature thermoplastics. *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 1. P. 80–87. DOI: 10.6060/rcj.2025691.15.
6. **Hong He, Renli Fu, Yanchun Han.** Thermal conductivity of ceramic particle filled polymer composites and theoretical predictions. *J. Mater. Sci.* 2007. V. 42. N 16. P. 6749–6754. DOI: 10.1007/s10853-006-1480-y.
7. **Grinchuk P., Akulich A., Shevtsov V., Chernukho E., Stetyukevich N., Khilko M.** Coatings with the Addition of Hollow Glass Microspheres. *Nauka Innovatsii*. 2017. N 11. P. 16–20 (in Russian).
8. **Mishra D., Satapathy A.** A study on thermal and dielectric characteristics of solid glass microsphere filled epoxy composites. In: Polymer Science Book Series. N 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects. Ed. by A. Méndez-Vilas, A. Solano. Badajoz, Spain: Formatex Research Center. 2016. P. 13–28.
9. **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. P. 1–9.
10. **Kochetov R.** Modeling of the thermal conductivity in polymer nanocomposites and the impact of the interface between filler and matrix. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011. V. 44. N 39. P. 1–12. DOI: 10.1088/0022-3727/44/39/395401.
11. **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. 2011. P. 133–135.
12. **Pugachev O.V., Khan Zo Tun.** Finding the effective thermal conductivity of a composite by the method of moments. *Vestn. MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Estestv. Nauki*. 2016. N 4. P. 28–39 (in Russian). DOI: 10.18698/1812-3368-2016-4-28-39.
13. **Volkov D.P., Uspenskaya M.V.** Thermal conductivity of filled polymers. *Izv. Vuzov. Priborostroenie*. 2010. V. 53. N 4. P. 49–51.
14. **Misnar A.** Thermal conductivity of solids, liquids, gases, and their compositions. M.: Mir. 1968. 464 p. (in Russian).
15. **Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P.** Thermal Conductivity of Mixtures and Composite Materials. L.: Energiya. 1974. 264 p. (in Russian).

17. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. Эффективный коэффициент теплопроводности композита с шаровыми включениями. *Тепловые процессы в технике*. 2012. № 10. С. 470–474.
18. ANSYS FLUENT, <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>.
19. ABAQUS, <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus/>.
20. Яковлев М.Я., Елфимов Н.С., Левин В.А. Моделирование нелинейной эффективной теплопроводности с использованием программного комплекса «Фидесис». *Чебышев. Сб.* 2024. Т. 25. Вып. 4. С. 2–22. DOI: 10.22405/2226-8383-2024-25-4-308-328.
21. Calculix, <https://calculix.de/>.
22. Соловьев С.А., Соловьева О.В., Ахметова И.Г., Ваньков Ю.В., Шакурова Р.З. Численное исследование теплопроводности композитного теплоизоляционного материала с микрогранулами. *Изв. вузов. Проблемы энергетики*. 2022. Т. 24. № 1. С. 86–98. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-1-86-98.
23. 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. *Науч.-техн. вестн. СПбГПУ. Физ.-мат. науки*. 2018. Т. 11. № 4. С. 85–94. DOI: 10.18721/JPM.11408.
16. Shermergor T.D. Theory of Elasticity of Microheterogeneous Media. M.: Nauka. 1977. 400 p. (in Russian).
17. Zarubin, V.S., Kuvyrkin, G.N., Savelyeva, I.Yu. Effective Thermal Conductivity of a Composite with Spherical Inclusions. *Teplovyte Protsessy Tekhnike*. 2012. N 10. P. 470–474 (in Russian).
18. ANSYS FLUENT, <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>.
19. ABAQUS, <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus/>.
20. Yakovlev M.Ya., Elfimov N.S., Levin V.A. Modeling of Nonlinear Effective Thermal Conductivity Using the Fidesis Software Package. *Chebyshev. Sb.* 2024. V. 25. N 4. P. 2–22 (in Russian). DOI: 10.22405/2226-8383-2024-25-4-308-328.
21. Calculix, <https://calculix.de/>.
22. Soloviev S.A., Solovieva O.V., Akhmetova I.G., Vankov Yu.V., Shakurova R.Z. Numerical study of thermal conductivity of composite thermal insulation material with microgranules. *Izv. Vuzov. Problemy Energetiki*. 2022. V. 24. N 1. P. 86–98 (in Russian). DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-1-86-98.
23. Stepanov V.V., Petrenya Yu.K., Andreev A.M., Kostelov A.M., Mannanov E.R., Talalov V.A. Influence of Component Properties on the Effective Thermal Conductivity of Polymer Composite Materials. *Nauch.-Tekhn. Vedom. SPbGPU. Fiz-mat. Nauki*. 2018. V. 11. N 4. P. 85–94 (in Russian). DOI: 10.18721/JPM.11408.

Поступила в редакцию 29.12.2025

Принята к опубликованию 13.03.2026

Received 29.12.2025

Accepted 13.03.2026