

МОДИФИКАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРОВ ВВЕДЕНИЕМ МИКРОНАПОЛНИТЕЛЕЙ*

Гришаева Н.Ю.^{1,2}, Люкшин П.А.¹, Люкшин Б.А.^{1,2,3},
Панин С.В.^{1,4}, Бочкарева С.А.^{1,2}, Реутов Ю.А.¹, Матолыгина Н.Ю.¹

¹ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск,
Россия

²Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

³Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

⁴Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия

АННОТАЦИЯ

В работе исследуются возможности создания теплопроводящих композиций на полимерной основе, что достигается структурной модификацией полимеров путем наполнения их армирующими частицами, теплофизические характеристики которых значительно отличаются от соответствующих свойств матрицы.

Описаны способы расчета коэффициента теплопроводности многофазных материалов разными методами, в том числе основанными на решении задачи теплопроводности методом конечных элементов.

В работе проведен сравнительный анализ результатов определения коэффициента теплопроводности наполненных материалов, полученных экспериментальными и расчетными методами. Это позволяет оценить достоверность получаемых значений коэффициентов и границы применимости предлагаемых моделей и реализующих их методов.

На примере ряда композиций показана возможность направленного изменения их функциональных свойств, как за счет использования в качестве включений материалов с различными теплофизическими характеристиками, в частности, коэффициентом теплопроводности, так и путем изменения степени наполнения.

Приведенные результаты получены для материалов на основе разных полимерных матриц с различными теплофизическими свойствами. Описанный способ определения эффективных характеристик наполненных композиций показывает, что получаемые с его помощью значения эффективного коэффициента теплопроводности не только качественно, но и количественно согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности; дисперсно-наполненные композиции; стационарная и нестационарная задачи теплопроводности; метод конечных элементов

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований государственных академий наук (ПФИ ГАН) на 2013-2020 годы по направлению фундаментальных исследований 23 "Механика деформирования и разрушения материалов, сред, изделий, конструкций, сооружений и триботехнических систем при механических нагрузках, воздействии физических полей и химически активных сред" тема 23.1.3.

MODIFICATION OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF POLYMER DUE TO THE FILLING BY MICROFILLERS

Grishaeva N.Yu.^{1,2}, Lyukshin P.A.¹, Lyukshin B.A.^{1,2,3},
Panin S.V.^{1,4}, Bochkareva S.A.^{1,2}, Reutov Y.A.¹, Matolygina N.Yu.¹

¹*Institute of strength physics and materials science, SB RAS, Tomsk, Russia*

²*Tomsk state University of control systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia*

³*National research Tomsk state University, Tomsk, Russia*

⁴*National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

ABSTRACT

In the paper the possibilities of design of the heat-conducting compositions on the polymeric basis are investigated. These possibilities realize by the structural modification of polymers due to the filling with their reinforcing particles, whose thermophysical characteristics considerably are differed from the appropriate properties of matrix.

The methods of calculating the coefficient of the thermal conductivity of polyphase materials by different methods are described, including based on the solution of the problem of thermal conductivity by the finite element method.

In the paper the comparative analysis of the results of determining the coefficient of the thermal conductivity of the filled materials, obtained by experimental and calculated methods, is carried out. This makes it possible to estimate the authenticity of the obtained values and limit of the applicability of the proposed models and their realizing methods.

It is shown, as with the use as the filling of materials with different thermophysical characteristics, in particular, with the different coefficients of thermal conductivity, and also by changing the degree of filling, it is possible to change the appropriate properties of compositions in the necessary direction.

The given results are obtained for the materials on the basis of different polymeric matrices with different thermophysical properties. The described method of determining the effective characteristics of the filled compositions shows that the obtained with its aid of the value of effective coefficient thermal conductivities not only it is qualitative, but also quantitatively they will agree with the experimental data.

Keywords: coefficient of thermal conductivity; dispersed-filled compositions; stationary and no stationary problem of thermal conductivity; finite element method

ВВЕДЕНИЕ

Полимеры являются материалами, которым присущи высокие тепло- и электроизоляционные свойства. Теплоизолирующие либо теплопроводящие свойства материала в целом характеризуются коэффициентом теплопроводности.

Задача регулирования теплофизических свойств конструкционных полимерных материалов может решаться путем структурной модификации, реализуемой применением добавок, что позволяет создавать композиционные полимерные материалы со свойствами, отличающимися от свойств исходных полимеров в десятки и даже сотни раз.

Теплопроводность полимеров может быть резко уменьшена путем создания ячеистой структуры полимера, т.е. создания газонаполненных материалов. Широко известны и применяются при создании теплоизоляционных материалов в машиностроении и строительстве пенопласты на основе полистирола, поливинилхлорида, полиэтилена, полиуретана и других полимеров.

В случае, когда необходимо повысить теплопроводность материала (для обеспечения отвода избыточного тепла, увеличения диапазона рабочих температур), в композиции используются металлические наполнители (порошкообразные или волокнистые), графит, углеродные ткани и другие материалы с высокой теплопроводностью.

Полимеры обладают низкой теплопроводностью по причине их достаточно низкой атомной плотности, низкой химической активности, сложной молекулярной и надмолекулярной структуры, высокой степени неоднородности колебаний молекул [1]. В последние годы активно исследуются методы и пути создания электро- и теплопроводящих композиций на полимерной основе. Это связано с тем, что обрабатываемость и стоимость таких композиций относительно невысока, а электро- и теплофизические свойства могут быть сопоставимы с характеристиками металлических аналогов.

В твердых телах принято выделять два основных механизма теплопроводности: колебания решетки (фононы), которые связаны с тепловой энергией, и движение свободных электронов [2]. Для полимеров преобладающим является первый механизм [3].

Описание теплопроводности полимерных композитов проводится с помощью различных моделей, в частности, это последовательная, параллельная и модель геометрического среднего. Первый подход предназначен для оценки верхнего, а второй нижнего пределов эффективного коэффициента теплопроводности. При этом в первой (последовательной) модели предполагается, что частицы наполнителя являются контактирующими, образуя связную структуру (эффект перколяции). В рамках параллельной модели каждая частица наполнителя, наоборот, считается изолированной. Модель геометрического среднего [4] является менее физической, сочетая оба описанных подхода, и определяется отношением содержания материалов матрицы и наполнителя в составе композита.

Теоретическая модель Максвелла основана на теории потенциала и позволяет оценить проводимость разупорядочно расположенных и не взаимодействующих однородных сферических частиц в однородной среде. Данный подход был адаптирован для анализа теплопроводности Эйкенем (Eucken) [5]; при этом более точные оценки получаются для случаев малого содержания не контактирующих частиц наполнителя.

Помимо модели Максвелла, которая хорошо зарекомендовала себя для случаев малого содержания наполнителя [6], известна модель Брагмена [7], предназначенная для оценки эффективной теплопроводности, в основе которой лежит учет различной проницаемости и напряженности поля. В работах Hamilton and Crosser [8] развита модель Максвелла на случай учета формы частиц, в частности сферических и цилиндрических. Liang and Liu [9] провели исследования с целью разработки модели, позволяющей рассчитать эффективную теплопроводность композитов с неорганическими наполнителями. В работах Nielson [10], Cheng and Vachon [11] and Agari et al. [12] получили развитие исследования по разработке моделей механизмов теплопередачи в полимерных композитах. Еще одна модель теплопередачи в случае полимерных композитов, наполненных полыми микросферами, описана в работе Liang and Lia [13]. Полутеоретическая модель Льюиса-Нильсона считается достаточно удачной для описания твердофазных композитов и была получена на основании уравнения

Халпина-Цай [14] путем учета влияния формы, ориентации и характера взаимного расположения частиц в композите.

При разработке неоднородных теплопроводящих материалов считается, что ключевыми параметрами, влияющими на теплопроводность, являются собственно коэффициенты теплопроводности фаз, содержание и характер распределения компонентов композита. Позднее было показано, что возникающие на внутренних границах раздела несовершенства структуры, в том числе вызванные различием линейных коэффициентов температурного расширения (ЛКТР) его компонентов, способны снизить межфазное термическое сопротивление и способствовать повышению теплопроводности [15]. По мере повышения температуры этот эффект может усиливаться.

При анализе композитов, наполненных компактными включениями, рассматривают сферические, цилиндрические и плоские (чешуйчатые) включения. В случае первых двух типов наполнителей влияние межфазного термического сопротивления на эффективную теплопроводность может быть учтено в модели путем некоторого модифицирования подходов Рэля и Максвелла. В случае наполнителя чешуйчатой формы может быть применен последовательно-кольцевой подход, который позволяет учесть наличие теплового потока, ориентированного перпендикулярно границе раздела с частицей [15].

Известен метод асимптотического усреднения уравнений с быстроосциллирующими коэффициентами, который основан на идее сформулированной Н.С. Бахваловым [16] и развитой в работах других авторов, в том числе применительно к нелинейным уравнениям [17,18].

Использование метода асимптотического усреднения позволяет рассчитывать эффективные характеристики многофазных систем, учитывая взаимное расположение включений, их форму и межфазное взаимодействие.

Асимптотические методы дают возможность единого подхода к различным задачам. Особенности асимптотических методов в том, что точность получаемого решения зависит от заданной погрешности, определяемой порядком последнего отброшенного члена ряда. Когда первое приближение не обеспечивает нужную точность, построение последующих представляет трудоемкую задачу. Эти методы основаны на допущении о регулярности структуры, поэтому возникают трудности при учёте случайных структур, возникает необходимость больших вычислительных ресурсов для непосредственного моделирования каждого включения. Данных о достоверности результатов, полученных с применением метода асимптотического усреднения (имеется в виду сравнение с экспериментальными значениями для разных материалов) и о пределах его применимости в литературе недостаточно.

Существующие методы расчета коэффициента теплопроводности композиционных полимерных материалов [19-23] для некоторых типов материалов дают заметное расхождение с экспериментальными данными, от 10% и более [24,25]. Это также относится к пористым композициям [19,22]. Для композитов с включениями круглой формы, расположенными в непрерывной среде, чаще используется уравнения Максвелла или формула, предложенная Г.Н.Дульневым [19-21]. Точность результатов, полученных при использовании аналитических формул, зависит от соотношения коэффициентов теплопроводности фаз и от степени наполнения композиций [22-24]. Для большинства полимерных композитов расхождение экспериментальных и аналитических данных возрастает с ростом степени наполнения [19-22]. Обычно

это объясняется тем, что в моделях не учитывается расположение включений (точнее, их взаимодействие), как отмечено ранее в [23,25], и в целом подобрать правильную модель, учитывающую различные факторы, влияющие на эффективные свойства, не всегда удается.

В настоящей работе коэффициент теплопроводности дисперсно-наполненных материалов определяется на основе решения задачи теплопроводности [26-28]. Распределение температуры в неоднородном материале для модели, учитывающей расположение, геометрию и свойства включений и/или пор, определяется с применением метода конечных элементов [29].

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Подход к расчету коэффициента теплопроводности для дисперсно-наполненного композитного материала во многом аналогичен способу определения эффективных деформационно-прочностных характеристик [26]. Суть его заключается в анализе параметров состояния среды относительно небольшого объема материала (т.н. представительного объема) с явным учетом структуры при силовых или температурных воздействиях. Эффективные теплофизические характеристики этого объема находятся на основе решения задачи о распределении [26-28] температуры с дальнейшим использованием процедур осреднения.

Коэффициент теплопроводности вспененного полиэтилена рассчитывали тремя следующими способами: 1) способом, предложенным авторами для расчета эффективного коэффициента теплопроводности неоднородных полимерных материалов в работах [26-28], который основан на последовательном решении стационарной и нестационарной задач теплопроводности; 2) способом, основанном на пошаговом численном решении нестационарной задачи теплопроводности; 3) способом, основанным на решении стационарной задачи теплопроводности в случае заданного потока тепла на границе.

Задачи решались в плоской постановке применительно к представительному объему материала. Предварительные исследования показали, что результаты, полученные при плоской и объемной постановках задач, согласуются между собой с точностью до 10%. Размеры расчетной области выбраны так, чтобы она включала достаточное количество включений для однозначного определения эффективных характеристик.

В случае решения *первым способом* (рис.1) решалась *стационарная задача* теплопроводности в плоской постановке для определения температурного поля в расчетной области. На рис.1 представлена схема расчетной области.

На сторонах AD и BC задавались условия теплоизоляции

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{AD} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{BC} = 0,$$

На сторонах AB и DC задавались условия Дирихле (граничные условия 1 рода), постоянная температура равная

$$T|_{AB} = 0, \quad T|_{DC} = const$$

Количество теплоты, передаваемой в область ABCD через сторону DC, определялось по формуле

$$Q = \sum_{i=1}^{n_1} c_1 V_i \rho_1 \Delta T_i + \sum_{j=1}^{n_2} c_2 V_j \rho_2 \Delta T_j; \quad (1)$$

где n_1, n_2 – число конечных элементов первой и второй фазы соответственно; $\Delta T_i, \Delta T_j$ – изменение температуры в i -том или j -том конечном элементе.

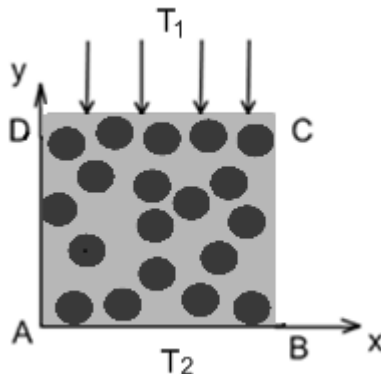


Рис.1. Схема расчетной области при использовании граничных условий Дирихле.

Такое же количество теплоты можно получить, решая *нестационарную задачу* теплопроводности при тех же граничных условиях.

Начальное условие определяется заданием закона распределения температуры внутри тела в начальный момент времени, в данном случае равномерное распределение температуры в начальный момент времени, начальная температура в области ABCD принималась равной нулю: $T(x, y, 0) = 0$.

$$Q = \frac{\lambda S t \Delta T}{l_{AB}} \quad (2)$$

где Q – количество теплоты, суммарное по всем конечным элементам рассматриваемого представительного объема; λ – осредненное по области значение коэффициента теплопроводности (эффективный коэффициент теплопроводности), S – площадь (длина) стороны DC; t – время, в течение которого передается количество теплоты Q . ΔT – разность между температурой на стороне DC и начальной температурой; l_{AD} – расстояние, на которое распространилось тепло за время t .

Из (2) коэффициент теплопроводности определяется соотношением

$$\lambda = \frac{Q l_{AD}}{S t \Delta T} \quad (3)$$

Задача решается с определенным шагом по времени и на каждом шаге определяется полученное материалом количество тепла. Время, за которое количество тепла в нестационарной задаче станет равно количеству тепла, полученному в стационарной задаче, используется при расчете эффективного коэффициента теплопроводности по формуле 3. Это время, соответствуют установившемуся режиму.

Трудность такого подхода связана с точностью определения этого времени, так как количество тепла будет асимптотически приближаться к решению, найденному в стационарной задаче; при этом время будет увеличиваться в соответствие с выбранным расчетным шагом. Для более точного определения времени авторами использовался следующий способ. Решение стационарной и нестационарной задач первоначально проводилось для однородного материала. Точность соответствия количества тепла в нестационарной задаче количеству

тепла в стационарной задаче варьировалась в десятых долях процента (0.1–0.6) и выбиралась на основе равенства расчетного и экспериментального (справочного) значений коэффициентов теплопроводности для однородного (ненаполненного) материала. Эту же точность использовали далее и для наполненного материала.

Второй способ, использованный для определения коэффициента теплопроводности неоднородного дисперсно-наполненного материала, основан на решении только *нестационарной задачи*. Момент времени в формуле (3) и количество теплоты были определены, исходя из условия равенства на двух последующих шагах средней температуры области с точностью, которая варьировалась в десятых долях процента (0.1–0.6). Как и в предыдущем методе, точность определялась из условия равенства расчетного и экспериментального (справочного) значений коэффициентов теплопроводности для однородного материала и при наполнении принималась неизменной.

Третий способ основан на решении стационарной задачи теплопроводности, когда на одной из границ задается плотность теплового потока (граничные условия 2 рода). Используем простейший случай граничного условия второго рода, которое состоит в постоянстве плотности теплового потока

$$q|_{DC} = const.$$

На противоположной границе задается температура (граничные условия 1 рода). Соответствующие граничные условия записываются в виде

$$T|_{AB} = 0.$$

Так как плотность теплового потока q задана, распределение температуры по расчетной области определяется из решения стационарной задачи теплопроводности, то коэффициент теплопроводности равен

$$\lambda = \frac{ql_{AB}}{\Delta T} \quad (4)$$

Температура на стороне, где задается тепловой поток, находится как среднее значение по границе. Таким образом, этот способ определения эффективного коэффициента теплопроводности является наименее трудоемким.

2. ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для определения эффективного коэффициента теплопроводности вспененного полиэтилена задача теплопроводности решается в плоской постановке. Для расчета эффективных значений коэффициента теплопроводности вспененного полиэтилена наполненная композиция, представляющая собой полиэтиленовую матрицу (ПЭ-100) с порами воздуха, рассматривается как прямоугольная область, содержащая включения (поры). Коэффициент теплопроводности для полиэтилена (ПЭ-100) принимался 0.38 Вт/м·К, воздуха 0.0244 Вт/м·К. Степень наполнения вспененного полиэтилена достигает 90%.

Расположение пор воздуха задается случайным образом с помощью датчика случайных чисел как без контакта включений (рис.2,а), так и с учетом возможностью контакта (рис.2,б). Из 20 вариантов различного распределения пор среднее значение коэффициента теплопроводности трактуется как эффективное на данном уровне.

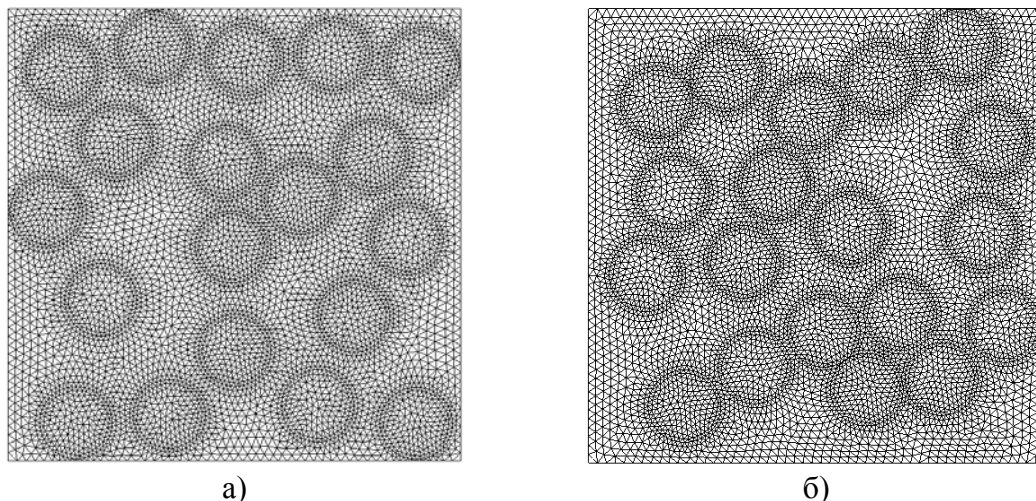


Рис.2. Распределение пор (включений) по расчетной области.

Если считать, что поры имеют одинаковые размеры, то в представительном объеме достижима максимальная степень наполнения около 43,7%. Чтобы получить композиции с большей пористостью, требуется ввести поры меньших размеров, которые будут заполнять пространство между крупными порами [29,30]. В свою очередь, для достижения большей степени наполнения, между уже имеющимися порами можно добавить поры еще более мелкого размера. Таким образом, «наполнение» порами проводится «сверху вниз», начиная с введения в матрицу наиболее крупных пор, а далее – все более и более мелких. Для достижения степени пористости 90% описанная процедура повторялась четыре раза, каждый раз во все более мелком масштабе.

Анализ эффективных характеристик проводится в обратном порядке: сначала рассматривается участок композиции, содержащий самые мелкие поры, и для него определяются эффективные характеристики. На следующем шаге эти характеристики используются как свойства матрицы, содержащей включения более крупные, и т. д.

Удельная теплоемкость уже наполненного композиционного материала для расчетов на последующих уровнях вычислялась по соотношению теории смесей

$$C_k = \frac{c_1 m_1 + c_2 m_2}{m_1 + m_2}, \quad (4)$$

где c_1, c_2 – удельная теплоемкость первой и второй фазы; m_1, m_2 – масса первой и второй фазы, которые соответственно вычисляются по формуле

$$m_i = V_i \cdot \rho_i$$

где V_i – объем первой и второй фазы; ρ_i – плотность материалов фаз. Плотность наполненного композиционного материала вычислялась по аналогичной формуле

$$\rho_k = \frac{V_1 \rho_1 + V_2 \rho_2}{V_1 + V_2} \quad (5)$$

Результаты, полученные разными способами с помощью авторского пакета программ, приведены в таблице 1.

Результаты были получены для моделей с изолированными герметичными порами [19]. Результаты представлены графически на рис.3.

Таблица 1.

Зависимость коэффициента теплопроводности вспененного полиэтилена от степени наполнения при разных способах расчета.

Уровень наполнения	Итоговая степень наполнения, %	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К		
		Способ 1	Способ 2	Способ 3
–	0.0	0.375	0.379	0.385
–	10.0	0.315	0.330	0.325
–	25.0	0.239	0.245	0.247
У _I	43.7	0.165	0.168	0.171
У _{II}	68.3	0.085	0.088	0.088
У _{III}	82.2	0.051	0.054	0.054
У _{IV}	90.0	0.036	0.039	0.039

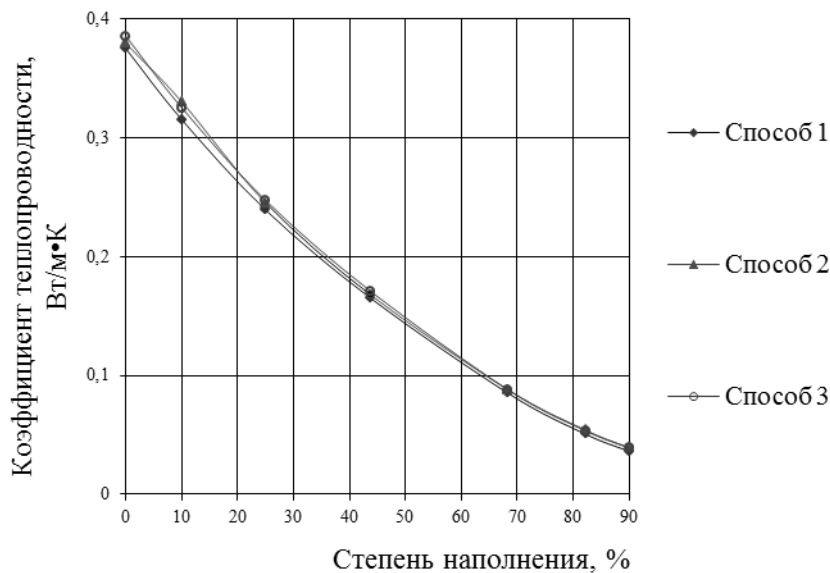


Рис.3. Зависимость коэффициента теплопроводности, полученного разными способами, от степени наполнения (табл.1).

Видно, что полученные результаты для ненаполненного материала различаются в пределах 2.5% при использовании разных способов расчета, а для наполненных композиций отличаются в пределах 10%, что может быть связано с одной стороны с плоской постановкой задачи, а с другой с точностью используемых методов. Отклонения результатов от исходного значения коэффициента теплопроводности полиэтилена 0.38 Вт/м·К не превышают 1.3%, что связано с размерами конечных элементов.

3. КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ БУТАДИЕН-СТИРОЛЬНОГО КАУЧУКА, ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И ПЕНТЭЛАСТА

Для оценки адекватности представленных выше способов (методов) проводили сравнение расчетных значений с экспериментальными данными для полимерных теплопроводящих композиций, изготовленных на основе

бутадиен-стирольного каучука (БСК), политетрафторэтилена (ПТФЭ), пентэласта с добавлением микропорошка меди.

Так как коэффициент теплопроводности меди намного выше, чем у полимеров, то наполнение частицами меди позволяет значительно повысить теплопроводность полимерных композиций.

Экспериментальные значения коэффициентов теплопроводности получены на измерительной системе LFA 467 HyperFlash методом световой вспышки. Этот метод относится к нестационарным методам и основан на динамике изменения температурного поля образца при воздействии на него тепловым импульсом.

3.1. Композиция на основе бутадиен-стирольного каучука.

Для расчета коэффициента теплопроводности композиции на основе бутадиен-стирольного каучука, наполненного медью, принимались следующие свойства.

– Бутадиен-стирольный каучук: плотность 900 кг/м^3 , удельная теплоемкость $1800 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, коэффициент теплопроводности $0,45 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

– Медь: плотность 8930 кг/м^3 , удельная теплоемкость $385 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, коэффициент теплопроводности $370 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, средний диаметр частиц 50 мкм .

Для вычисления коэффициента теплопроводности композиционного материала необходимо найти распределение температуры в неоднородном материале. Включения по расчетной области располагались случайным образом и принимались изолированными (без контакта) [19]. На рис.4 показано распределение температуры в неоднородном материале в виде поверхности и изолиний в расчетной области при степени наполнения 30%.

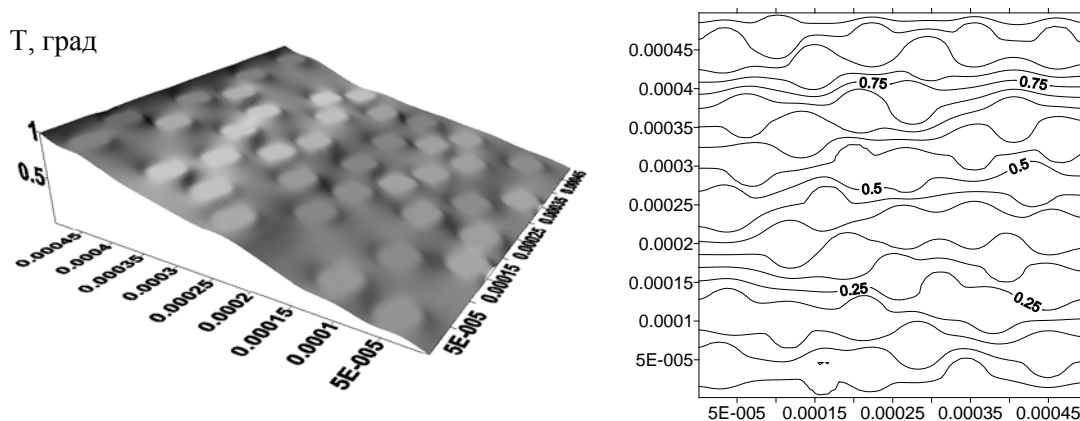


Рис.4. Распределение температуры в неоднородной расчетной области в виде поверхности и соответствующих изолиний.

В таблице 2 представлены результаты расчетов эффективных коэффициентов теплопроводности и экспериментально полученные значения.

Для каждого способа в скобках приведена точность в процентах по приведенному параметру, например по количеству теплоты (Q 0.05%) и т.д. На рис.5 представлены расчетные и экспериментальные зависимости коэффициента теплопроводности от степени наполнения.

Таблица 2.

Коэффициенты теплопроводности композиции на основе бутадиен-стирольного каучука, с разной степенью наполнения медью.

Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К)	Степень наполнения φ , % об.					
	0	10	20	30	40	50
Эксперимент	0.450	0.680	–	1.000	–	1.510
Способ 1 (Q 0.05%)	0.445	0.815	0.985	1.180	1.417	1.667
Способ 2 (T 0.1%)	0.653	0.766	0.901	1.059	–	1.510
Способ 2 (T 0.02%)	0.451	0.538	–	0.750	–	1.080
Способ 3 (q)	0.448	0.657	0.835	1.033	1.280	1.570

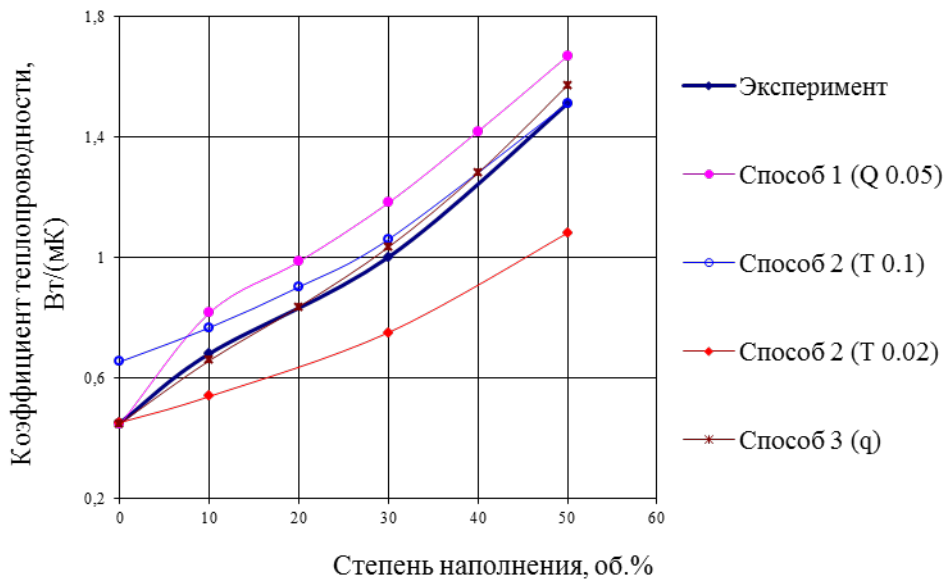


Рис.5. Зависимость коэффициента теплопроводности композиции на основе БСК от степени наполнения.

Расчетные результаты, полученные первым способом, превышают экспериментальные примерно на 10%, хотя качественно эти зависимости идентичны (рис.5). Результаты, полученные способом 2, при точности 0.1% выше экспериментальных значений, в то время как при точности 0.02% — ниже. Качественно и количественно зависимости значительно отличаются от экспериментальных результатов. Как и в случае вспененного полиэтилена, способ 3 показал очень хорошее совпадение с экспериментом, погрешность составила менее 3%, поэтому далее этот 3 способ применяется для расчетов как наиболее точный.

Аналитически эффективная теплопроводность $\lambda_{эфф}$ гетерогенной системы, состоящей из изотропной среды и не контактирующих между собой сферических частиц, рассчитывается по уравнению Максвелла, являющемуся классическим решением теории обобщенной проводимости [23]

$$\lambda_{эфф} = \lambda_1 \left(\frac{\lambda_2 + 2\lambda_1 - 2\nu(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_2 + 2\lambda_1 + \nu(\lambda_1 - \lambda_2)} \right),$$

где λ_1 — теплопроводность непрерывной фазы; λ_2 — теплопроводность диспергированной фазы; ν — объемная концентрация диспергированной фазы.

Коэффициент теплопроводности по формуле Максвелла при степени наполнения 10% – 0.6 Вт/(м·К), 30% – 1.026 Вт/(м·К), 50% – 1.79 Вт/(м·К).

Формула Максвелла дает неплохое согласование с экспериментом вплоть до степени наполнения 30% (см. табл.2). Однако при больших степенях наполнения погрешность резко возрастает.

3.2. Композиция на основе политетрафторэтилена.

Для улучшения теплопроводности политетрафторэтилена изготовлены композиции с разной степенью наполнения медью (радиус частиц порошка меди до 50 мкм). Для экспериментальных измерений коэффициента теплопроводности изготавливались образцы квадратного сечения, фотография которых приведена на рис.6. Задача по определению коэффициента теплопроводности решалась для неоднородного материала, в котором в качестве матрицы использовался ПТФЭ, а в качестве наполнителя – дисперсные частицы меди.

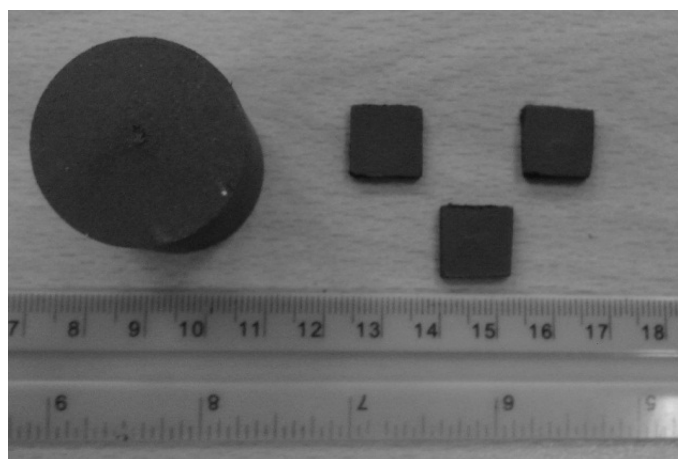


Рис.6. Образцы композита на основе политетрафторэтилена, наполненного частицами меди.

Для расчета использовались следующие свойства ПТФЭ: плотность 2200 кг/м³, удельная теплоемкость 1040 Дж/кг·К, коэффициент теплопроводности 0.25 Вт/м·К.

В таблице 3 представлены экспериментальные и расчетные значения коэффициента теплопроводности при разной степени наполнения.

Таблица 3.

Коэффициенты теплопроводности композиций на основе ПТФЭ, наполненного медью.

Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Степень наполнения φ , % объемн.						
	7	10	13	15	20	26	33
Расчет (способ 3)	0.30	0.34	0.37	0.39	0.45	0.55	0.71
Эксперимент	0.30	–	0.38	0.39	–	0.57	–

На рис.7 приведены расчетные и экспериментальные зависимости коэффициента теплопроводности от объемной степени наполнения. Приведенные результаты показывают, что в пределах степени наполнения до 25% результаты отличаются не более чем на 2%.

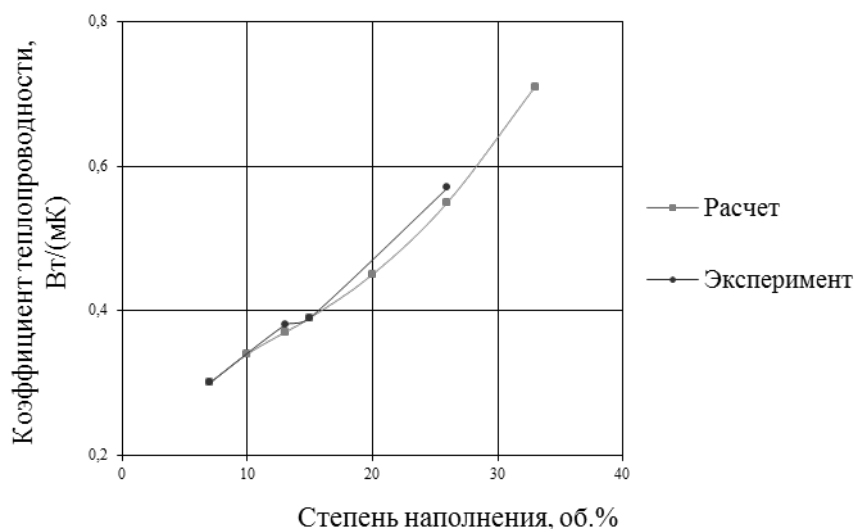


Рис.7. Зависимость коэффициента теплопроводности от степени наполнения.

3.3. Композиция на основе пентэласта.

Наполнение пентэласта медным порошком позволяет получать эластичные теплопроводящие материалы (рис.8) с теплопроводностью, отличающейся от соответствующей характеристике матрицы более чем на порядок.

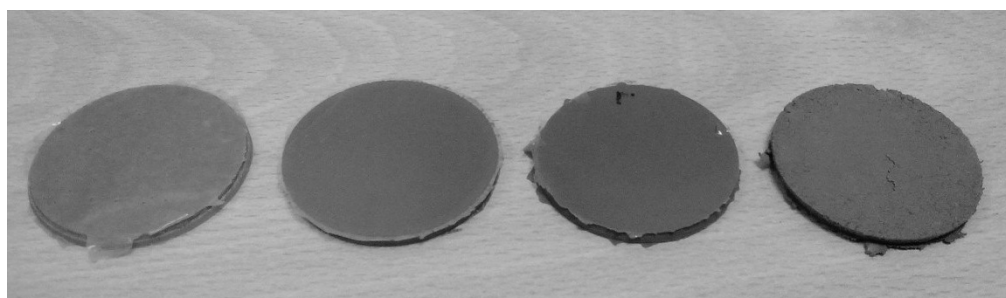


Рис.8. Фото образцов композиций на основе силикона, наполненных порошком меди с объемным содержанием 0,10,20,30% соответственно (слева направо).

В таблице 4 приведены зависимости экспериментальных значений теплофизических характеристик композиций на основе пентэласта с разной степенью наполнения.

Таблица 4.

Экспериментальные значения теплофизических характеристик композиций на основе пентэласта, наполненного медью.

Степень наполнения, % об.	Коэффициент теплопроводности, Вт/м*К	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/кг*К
0	0.21	556.5	1326
10	0.618	2113	1096
20	1.156	2868	865
30	2.610	3372	798

Из приведенных данных видно, что если образец «чистого» пентэласта имеет коэффициент теплопроводности 0.21 Вт/м·К, то при содержании в нем меди 30% он увеличивается до 2.61 Вт/м·К.

Для расчета коэффициента теплопроводности композиций на основе пентэласта использовались характеристики фаз, приведенные в таблице 5.

Таблица 5.
Характеристики фаз композиций на основе пентэласта (справочные данные).

Свойства Материал	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/кг*К	Коэффициент теплопроводности, Вт/м*К
Пентэласт-9131	1080	1400	–
Воздух	1.20	1005	0.0244
Медь	8930	385	390

При изготовлении «чистого» образца без применения вакуумной технологии в материале образуется большое количество пор. Экспериментальное значение плотности «чистого» пентэласта (табл.4) и (согласно паспортным значениям – табл.5) также значительно отличаются, что свидетельствует о наличии пор.

Значения коэффициента теплопроводности пентэласта, наполненного медью, без учета пористости значительно ниже экспериментальных, что тоже свидетельствует о наличии пористости.

Таблица 6.
Свойства пентэласта, наполненного медью, без учета пористости.

Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К (способ 3)	Степень наполнения медью, % об.					
	0%	10%	15%	20%	25%	30%
	0.23	0.42	0.50	0.59	0.67	0.78

В таблице 7 приведены расчетные значения свойств «чистого» пентэласта с учетом пористости.

Таблица 7.
Коэффициент теплопроводности пентэласта с учетом пористости.

Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К (способ 3)	Степень пористости, % об.						
	0	10	15	20	25	30	40
	0.890	0.662	0.577	0.495	0.420	0.357	0.228

Расчет плотности и удельной теплоемкости вычислялся по формуле смесей (табл.8). Расчетные и экспериментальные данные для «чистого» материала приведены в таблице 8.

Таблица 8.
Свойства «чистого» пентэласта.

Чистый материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/м*К	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/кг*К
Расчет (способ 3)	0,22	556.0	1399
Эксперимент	0,21	556.5	1326

Приведенные данные показывают, что при величине пористости 40% коэффициент теплопроводности соответствует экспериментальному значению

(табл.4), поэтому данное значение коэффициента теплопроводности принимается далее для расчета как эффективное для матрицы, состоящей из «чистого» пентэласта, имеющего такую степень пористости.

Наличие пор в полимерной матрице учитывается введением дополнительной фазы в виде включений воздуха. В итоге композит становится как минимум трехфазным: полимерная матрица (пентэласт), медный порошок (средний размер 50 мкм), вводимый для повышения теплопроводности, и воздушные поры.

В таблице 9 приведены расчетные зависимости коэффициента теплопроводности пентэласта от степени наполнения медью.

Таблица 9.

Коэффициенты теплопроводности композиций на основе пентэласта, наполненного медью.

Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Степень наполнения медью, % об.					
	0%	10%	15%	20%	25%	30%
Эксперимент	0.21	0.62	–	1.156	–	2.61
Расчет с учетом изменения пористости (способ 3)	Степень пористости, % об.					
	40%	30%	25%	20%	15%	0%
	0.23	0.61	0.83	1.1	1.66	2.58

На рис.9 представлены расчетные и экспериментальные зависимости коэффициента теплопроводности пентэласта от степени наполнения.

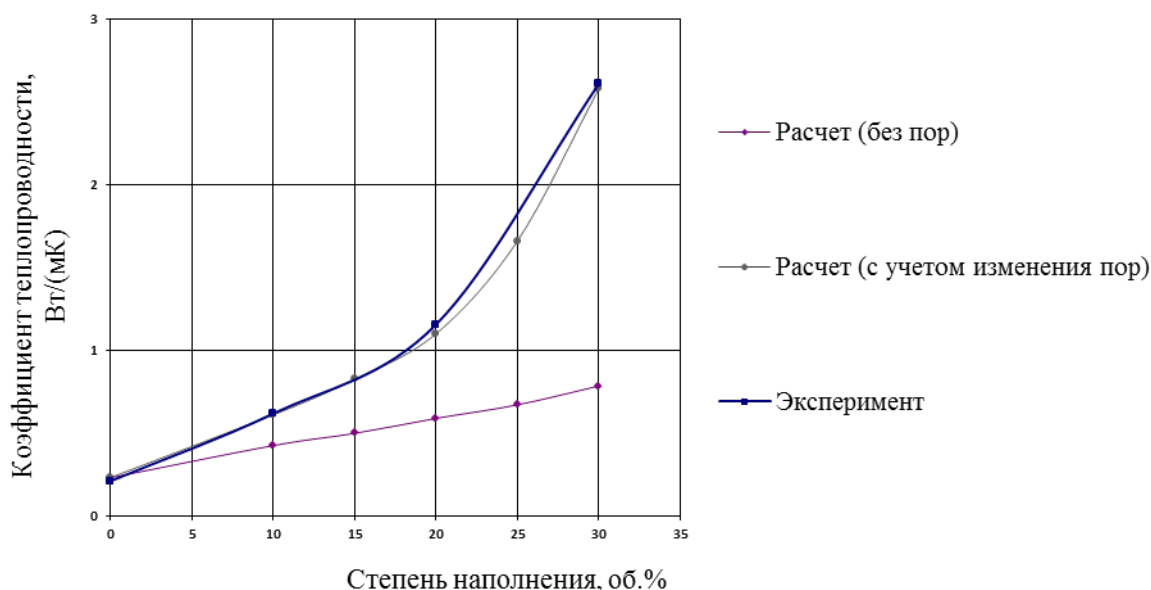


Рис.9. Зависимость коэффициента теплопроводности композиции на основе пентэласта от степени наполнения.

Наблюдаемое на рис.9 расхождение расчетных и экспериментальных данных можно объяснить наличием пористости, которую можно оценить лишь по косвенным данным, в отличие от содержания меди. При большей степени наполнения пентэласта порошком меди плотность материала растет, а количество пор уменьшается, что и приводит к росту коэффициента теплопроводности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известные аналитические оценки теплофизических свойств наполненных полимерных композиций, в частности, коэффициента теплопроводности, не всегда применимы, особенно когда степень наполнения и теплофизические свойства фаз меняются в широких пределах.

Анализ приведенных в работе методов расчета эффективного коэффициента теплопроводности наполненных полимерных материалов показывает, что более точным является метод, основанный на численном решении стационарной задачи теплопроводности при заданной плотности потока тепла на границе расчетной области.

Результаты получены для материалов на основе разных полимерных матриц с различными теплофизическими свойствами. Описанный способ определения эффективных характеристик наполненных композиций показывает, что получаемые с его помощью значения эффективного коэффициента теплопроводности не только качественно, но и количественно согласуются с экспериментальными данными. Для композиций на основе бутадиен-стирольного каучука погрешность расчета не превышает 5%; на основе ПТФЭ – 10%, на основе пентэласта с учетом пористости в пределах 1%.

Расчет эффективного значения коэффициента теплопроводности наполненных полимеров позволяет значительно сократить число экспериментов при отработке рецептур для получения новых материалов с заданными значениями коэффициента теплопроводности.

Показана возможность направленно менять теплопроводность наполненных полимеров, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения соответствующей характеристики за счет использования микронаполнителей. Это можно использовать на этапах проектирования новых конструкций с заданными теплофизическими свойствами используемых материалов.

Алгоритм управления теплофизическими свойствами может (и должен) применяться совместно с моделированием деформационно-прочностных свойств композиций. Последнее обстоятельство важно в том отношении, что введение микронаполнителей в больших объемах для повышения теплопроводности может привести к ухудшению деформационно-прочностных свойств, и требуется оценить этот эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Callister W.D. *Fundamentals of materials science and engineering: An Integrated Approach*. – NJ: Springer, 2005. – 882 p.
2. Xu Y., Chung D.D.L., Mroz C. *Thermally Conducting Aluminum Nitride Polymer-Matrix Composites* // *Composites: Part A*. – 2011. – Vol.32. – Pp.1749-1757.
3. Progelhof R.C., Throne J.L., Ruetsch R.R. *Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: A review* // *Polymer Engineering and Science*. – 1976. – Vol.16. – Iss.9. – Pp.615-625.
4. Weber E.H. *Development and modeling of thermally conductive polymer/carbon composite* / PhD dissertation, Michigan Technological University, 2001.
5. Maxwell J.C. *A treatise on electricity and magnetism*. – New York: Dover, 1954.
6. Bruggeman G. *Calculation of various physics constants in heterogeneous substances i dielectricity constants and conductivity of mixed bodies from isotropic substances* // *Annalen der Physik*. – 1935. – Vol.416. – No.7. – Pp.636-664.

7. Hamilton R.L., Crosser O.K. *Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems* // *Industrials and Engineering Chemistry Fundamentals*. – 1962. – Vol.1. – No.3. – Pp.187-191.
8. Liang J.Z., Liu G.S. *A new heat transfer model of inorganic particulate-filled polymercomposites* // *J. of Material Science*. – 2009. – Vol.44. – No.17. – Pp.4715-4720.
9. Nielson L.E. *Thermal conductivity of particulate-filled polymers* // *J. of Applied Polymer Science*. – 1973. – Vol.17. – No.12. – Pp.3819-3820.
10. Cheng S., Vachon R. *A technique for predicting the thermal conductivity of suspensions. emulsions and porous materials* // *Intern. J. of Heat Mass Transfer*. – 1970. – Vol.13. – No.3. – Pp.537-546.
11. Agari Y., Ueda A., Nagai S. *Thermal conductivity of a polymer composite* // *J. of Applied Polymer Science*. – 1993. – Vol.49. – No.9. – Pp.1625-1634.
12. Liang J.Z., Li F.H. *Simulation of heat transfer in hollow glass- bead-filled polypropylene composites by finite element method* // *Polymer Testing*. – 2007. – Vol.26. – No.3. – Pp.419-424.
13. Lawn B.R., Evans A.G., Marshall D.B. *Elastic/plastic indentation damage in ceramics: the median/radial crack system* // *J. of the American Ceramic Society*. – 1980. – Vol.63. – Iss.9-10. – Pp.574-581.
14. Lewis L.T., Nielsen L.E. *Dynamic mechanical properties of particulate-filled composites* // *J. of Applied Polymer Science*. – 1970. – Vol.14. – Iss.6. – Pp.1449-1471.
15. Hasselman D.P.H., Johnson L.F. *Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance* // *J. of Composite materials*. – 1987. – Vol.21. – No.6. – Pp.508-515.
16. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. *Осреднение процессов в периодических средах*. – М.: Наука, 1984. – 352 с.
17. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. *Усреднение нелинейного уравнения теплопроводности при моделировании распространения тепла в композитных материалах периодической структуры* // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2013. – Т.19. – №2. – С.163-180.
18. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б. *Параметрический метод асимптотического усреднения для нелинейных уравнений термоупругости* // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2014. – Т.20. – №4. – С.491-505.
19. Васильев Л.Л., Танаева С.А. *Теплофизические свойства пористых материалов*. – Минск: Наука и техника, 1971. – 265 с.
20. Миснар А. *Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций*. – М.: Энергия, 1968. – 464 с.
21. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. *Теплопроводность смесей и композиционных материалов*. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
22. Грахов Д.В., Ягупов А.И., Бекетов А.Р., Баранов М.В. *Теплопроводность полимерного композита Aln – лак КО-916К* // *Современные проблемы науки и образования (электронный журнал)*. – 2011. – №5. – <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=4954>.
23. Флеминг И.В., Ким В.С. *Применение метода расчета теплофизических свойств композиционных материалов к кабельным резинам* // *Известия Томского политехнического университета*. – 2010. – Т.317. – №4. – С.62-65.

24. Шевченко В.Г. *Основы физики полимерных композиционных материалов / Учебное пособие.* – Москва, 2010. – 99 с.
25. Михеев В.А., Сулаберидзе В.Ш., Мушенко В.Д. *Исследование теплопроводности композиционных материалов на основе силикона с наполнителями // Изв. вузов. Приборостроение.* – 2015. – Т.58. – №7. – С.571-575.
26. Люкшин Б.А., Панин С.В., Бочкарева С.А., Корниенко Л.А., Гришаева Н.Ю., Люкшин П.А., Матолыгина Н.Ю., Реутов А.И. *Компьютерное моделирование и конструирование наполненных композиций.* – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015. – 264 с.
27. Bochkareva S.A., Grishaeva N.Yu., Ljukchin B.A., Ljukchin P.A. *Determination of the thermal conductivity coefficient of inhomogeneous media // AIP Conference Proceedings.* – 2014. – Vol.1623(1). – Pp.71-74. doi: 10.1063/1.4898885.
28. Люкшин П.А., Люкшин Б.А., Матолыгина Н.Ю., Панин С.В. *Определение эффективных теплофизических характеристик композиционного материала // Физическая мезомеханика.* – 2008. – Т.11. – №5. – С.103-110.
29. Сегерлинд Л. *Применение метода конечных элементов.* – М.: Мир, 1979. – 392 с.
30. Zharkov A.S., Anisimov I.I., Litvinov A.V., Chashchikhin E.A., Desyatykh V.I., Ogorodnikov S.P., Lyukshin B.A., Bochkareva S.A. *Principles of generation of mechanical properties of high-energy filled polymer compositions // Composites: Mechanics, Computations, Applications.* – 2011. – Vol.2. – Iss.4. – Pp.313-326.

REFERENCES

1. Callister W.D. *Fundamentals of materials science and engineering: An Integrated Approach.* NJ: Springer, 2005, 882 p.
2. Xu Y., Chung D.D.L., Mroz C. *Thermally Conducting Aluminum Nitride Polymer-Matrix Composites.* Composites: Part A, 2011, Vol.32, Pp.1749-1757.
3. Progelhof R.C., Throne J.L., Ruetsch R.R. *Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: A review.* Polymer Engineering and Science, 1976, Vol.16, Iss.9, Pp.615-625.
4. Weber E.H. *Development and modeling of thermally conductive polymer/carbon composite.* PhD dissertation, Michigan Technological University, 2001.
5. Maxwell J.C. *A treatise on electricity and magnetism.* New York: Dover, 1954.
6. Bruggeman G. *Calculation of various physics constants in heterogeneous substances i dielectricity constants and conductivity of mixed bodies from isotropic substances.* Annalen der Physik, 1935, Vol.416, No.7, Pp.636-664.
7. Hamilton R.L., Crosser O.K. *Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems.* Industrials and Engineering Chemistry Fundamentals, 1962, Vol.1, No.3, Pp.187-191.
8. Liang J.Z., Liu G.S. *A new heat transfer model of inorganic particulate-filled polymercomposites.* J. of Material Science, 2009, Vol.44, No.17, Pp.4715-4720.
9. Nielson L.E. *Thermal conductivity of particulate-filled polymers.* J. of Applied Polymer Science, 1973, Vol.17, No.12, Pp.3819-3820.
10. Cheng S., Vachon R. *A technique for predicting the thermal conductivity of suspensions. emulsions and porous materials.* Intern. J. of Heat Mass Transfer, 1970, Vol.13, No.3, Pp.537-546.

11. Agari Y., Ueda A., Nagai S. *Thermal conductivity of a polymer composite*. J. of Applied Polymer Science, 1993, Vol.49, No.9, Pp.1625-1634.
12. Liang J.Z., Li F.H. *Simulation of heat transfer in hollow glass- bead-filled polypropylene composites by finite element method*. Polymer Testing, 2007, Vol.26, No.3, Pp.419-424.
13. Lawn B.R., Evans A.G., Marshall D.B. *Elastic/plastic indentation damage in ceramics: the median/radial crack system*. J. of the American Ceramic Society, 1980, Vol.63, Iss.9-10, Pp.574-581.
14. Lewis L.T., Nielsen L.E. *Dynamic mechanical properties of particulate-filled composites*. J. of Applied Polymer Science, 1970, Vol.14, Iss.6, Pp.1449-1471.
15. Hasselman D.P.H., Johnson L.F. *Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance*. J. of Composite materials, 1987, Vol.21, No.6, Pp.508-515.
16. Bakhvalov N.S., Panasenko G.P. *Osrednenie protsessov v periodicheskikh sredakh [Averaging of processes in periodic environment]*. Moskva: Nauka, 1984, 352 p.
17. Vlasov A.N., Volkov-Bogorodsky D.B. *Usrednenie nelineinogo uravneniia teploprovodnosti pri modelirovanii rasprostraneniia tepla v kompozitnykh materialakh periodicheskoi struktury [The averaging of the nonlinear heat conduction equation in simulation of heat distribution in composite materials with periodic structure]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktсии, 2013, Vol.19, No.2, Pp.63-180.
18. Vlasov A.N., Volkov-Bogorodskii D.B. *Parametricheskii metod asimptoticheskogo usredneniia dlia nelineinykh uravnenii termouprugosti [Parametric asymptotic method of averaging for nonlinear thermoelasticity equation]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktсии, 2014, Vol.20, No.4, Pp.491-505.
19. Vasil'ev L.L., Tanaeva S.A. *Teplofizicheskie svoystva poristykh materialov [Thermal properties of porous materials]*. Minsk: Nauka i tekhnika, 1971, 268 p.
20. Missenard A. *Conductivité thermique des solides, liquides, gaz et de leurs mélanges. Editions Eyrolles, Paris, 1965. [Russ. ed.: Missenard A. Teploprovodnost' tverdykh tel, zhidkostey, gazov i ikh kompozitsiy. Moskva: Energiia, 1968, 464 p.]*.
21. Dul'nev G.N., Zarichnyak Y.P. *Teploprovodnost' smesei i kompozitsionnykh materialov [Thermal Conductivity of mixtures and composite materials]*. Leningrad: Energiia, 1974, 264 p.
22. Grahov D.V., Yagupov A.I., Beketov A.R., Baranov M.V. *Teploprovodnost' polimernogo kompozita Aln – lak KO-916K [Heat conductivity of polymer composite Aln – lacquer KO-916K]*. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia. 2011, No.5, <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=4954>.
23. Fleming I.V., Kim V.S. *Primenenie metoda rascheta teplofizicheskikh svoystv kompozitsionnykh materialov k kabel'nykh rezinam. [Application of the method of calculation of thermophysical properties of composite materials to the cable rubbers]*. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2010, Vol.317, No.4, Pp.62-65.
24. Shevchenko V.G. *Osnovy fiziki polimernykh kompozitsionnykh materialov. Uchebnoe posobie. [Fundamentals of Physics of Polymer Composite Materials: Textbook]*. Moskva, 2010, 99 p.
25. Mikheev V.A., Elia V.S., Musienko V.D. *Issledovanie teploprovodnosti kompozitsionnykh materialov na osnove silikona s napolniteliami. [Investigation of thermal conductivity of composite materials based on silicone with fillers]*. Izvestiia Vuzov. Priborostroenie, 2015, Vol.58, No.7, P.571-575.

26. Lyukshin B.A., Panin S.V., Bochkarev S.A., Kornienko L.A., Grishaeva N.Yu., Lyukshin P.A., Mamalygin N.Yu., Reutov A.I. *Komp'uternoe modelirovanie i konstruirovaniye napolnennykh kompozitsii* [Computer modeling and design, filled compositions]. Novosibirsk: SO RAN, 2015, 264 p.
27. Bochkareva S.A., Grishaeva N.Yu., Ljukchin B.A., Ljukchin P.A. *Determination of the thermal conductivity coefficient of inhomogeneous media*. AIP Conference Proceedings, 2014, Pp.71-74.
28. Lyukshin P.A., Lyukshin B.A., Mamolygina N.Yu., Panin S.V. *Opredeleniye effektivnykh teplofizicheskikh kharakteristik kompozitsionnogo materiala*. [Determination of effective thermal properties of composite material]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2008, Vol.11, No.5, Pp.103-110.2008.
29. Segerlind L. *Primeneniye metoda konechnykh elementov* [Application of the finite element method]. Moskva: Mir, 1979, 392 p.
30. Zharkov A.S., Anisimov I.I., Litvinov A.V., Chashchikhin E.A., Desyatykh V.I., Ogorodnikov S.P., Lyukshin B.A., Bochkareva S.A. *Principles of generation of mechanical properties of high-energy filled polymer compositions*. *Composites: Mechanics, Computations, Applications*, 2011, Vol.2, Iss.4, Pp.313-326.

Поступила в редакцию 8 июля 2016 года.

Сведения об авторах:

Гришаева Наталья Юрьевна – к.ф.-м.н., доц., Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия; e-mail: anohina@mail2000.ru

Люкшин Петр Александрович – к.ф.-м.н., ст.н.с., ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия; e-mail: petrljuk@ispms.tsc.ru

Люкшин Борис Александрович – д.т.н., проф., зав. кафедрой, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия; e-mail: lba2008@yandex.ru

Панин Сергей Викторович – д.т.н., проф., зам. дир. по научной работе, ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия; e-mail: svp@ispms.tsc.ru

Бочкарева Светлана Алексеевна – к.ф.-м.н., н.с., ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия; e-mail: svetlanab7@yandex.ru

Реутов Юрий Анатольевич – асп., ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия; e-mail: yureutov@gmail.com

Матолыгина Наталья Юрьевна – к.ф.-м.н., н.с., ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия; e-mail: ksa@ispms.tsc.ru