



MSC 82D60, 74E30

МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ТЕПЛОПЕРЕНОСЕ В ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТАХ

А.В. Никитин, В.А. Лиопо, С.В. Авдейчик, В.А. Струк

Гродненский государственный университет, Гродно, Белоруссия

Аннотация. Предложены модели теплопереноса в композиционных полимерных материалах, содержащих дисперсные наполнители. Приведены варианты расположения частиц наполнителя в объеме композита. Разработан алгоритм расчета теплофизических характеристик композитов в зависимости от состава и структуры.

Ключевые слова: композит, теплоперенос, полимерные материалы, фрактал.

Введение. Расчет теплопроводности композиционных систем базируется на принципе обобщенной проводимости. В этом методе композиционная система заменяется однородной системой с проводимостью, обеспечивающей одинаковый тепловой поток. Для композиционных микронеоднородных материалов выделяется масштабно-значимый (представительный) элемент, размеры которого много больше характерного размера включения, но намного меньше характерного размера образца композита [1]. Эффективный коэффициент теплопроводности такого элемента может приниматься, как коэффициент теплопроводности композиционной системы.

Структура композиционной системы моделируется на решетках различного типа. Затем, для данной геометрии системы решается задача теплопроводности. В работе [2] предлагается метод численного расчета эффективной теплопроводности и времени установления квазиоднородности для дисперсных материалов, реализуемой в рамках нестационарной тепловой задачи, рассматривается применение метода для расчета характеристик слоистых систем. Стохастическая модель структуры дисперсной системы и ее влияние на процессы переноса предложена в работе [3].

Результаты и обсуждение. Известны модели теплопроводности композиционных систем, которые обеспечивают определение эффективного коэффициента теплопроводности композиционной системы. В основном они сводятся к определению эффективного коэффициента теплопроводности композита по известным значениям этого параметра для отдельных компонентов и с учетом структуры распределения наполнителя. Для определения влияния на эффективный коэффициент теплопроводности теплофизических параметров матрицы и компонентов наполнителя, а также структуры композиционной системы, рассматривается масштабно значимый элемент. В общем случае выбор этого элемента зависит от концентрации компонентов наполнителя, соотношения коэффициентов теплопроводности матрицы и наполнителя, распределения компонентов наполнителя в матрице. Для этого элемента определяется эффективный коэффициент теплопроводности по значениям коэффициентов теплопроводности отдельных компонентов композита. Рассматривается несколько моделей бинарного композита. Модель Максвелла [4]:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_1 \left(\frac{\lambda_2 + 2\lambda_1 - 2\rho_2(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_2 + 2\lambda_1 + \rho_2(\lambda_1 - \lambda_2)} \right), \quad (1)$$

статистическая модель:

$$\lambda_{\text{eff}} = \left(\frac{(3\rho_1 - 1)\lambda_1 + (3\rho_2 - 1)\lambda_2}{4} \right) + \left[\left(\frac{(3\rho_1 - 1)\lambda_1 + (3\rho_2 - 1)\lambda_2}{4} \right)^2 + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2} \right]^{0.5}, \quad (2)$$

матричная модель:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_1 \left(1 + \frac{\rho_2}{(1 - \rho_2)/3 + \lambda_1/(\lambda_2 - \lambda_1)} \right), \quad (3)$$

модель Максвелла-Бюргера-Эйкена:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_1 \left(1 + \frac{1 - (1 - \lambda_2/\lambda_1)L\rho_2}{1 + (L - 1)\rho_1} \right), \quad (4)$$

перколяционная модель:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_1 \left(\frac{\rho_1 - \rho_A}{1 - \rho_A} \right)^k, \quad (5)$$

где: λ_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности композиционной системы, λ_1 – коэффициент теплопроводности матрицы, λ_2 – коэффициент теплопроводности наполнителя, ρ_1 – объемная концентрация матрицы, ρ_2 – объемная концентрация наполнителя, ρ_A – порог протекания, k – критический коэффициент, принимаемый равным 1,6. Параметр L в (4) определяет форму частиц наполнителя и равен: $L = (5\lambda_1 + \lambda_2)/[3(\lambda_1 + \lambda_2)]$ – для цилиндрической формы частиц наполнителя, $L = 3\lambda_1/(2\lambda_1 + \lambda_2)$ – для шаровой формы частиц наполнителя; $L = (\lambda_1 + 2\lambda_2)/3\lambda_1$ – для пластинчатой формы частиц наполнителя.

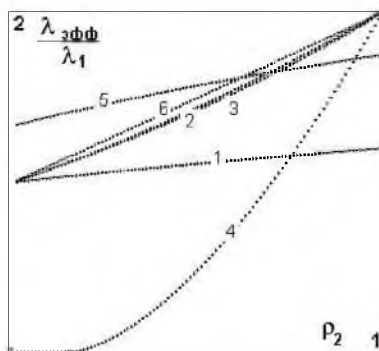


Рис. 1. Относительные значения эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{eff}}/\lambda_1$ при $\lambda_2/\lambda_1 = 2$ для моделей теплопроводности: 1 – Максвелла, 2 – статистическая, 3 – матричная, 4 – Максвелла-Бюргера-Эйкена, 5 – перколяционная.

Были рассчитаны значения относительного эффективного коэффициента теплопроводности композита в зависимости от концентрации наполнителя с использованием различных моделей осреднения: $\lambda_2/\lambda_1 = 2$ (рис. 1), $\lambda_2/\lambda_1 = 20$ (рис. 2), $\lambda_2/\lambda_1 = 200$ (рис. 3).



Для сравнения на рисунках представлена также кривая, соответствующая пропорциональной модели осреднения (6). Сравнение этих результатов с экспериментальными данными и значениями, полученными прямыми численными методами решения задачи теплопроводности, показывают, что наиболее приемлемыми моделями являются 2-4.

Наиболее надежным методом (помимо экспериментального) определения эффективной теплопроводности является метод прямого моделирования. Рассматривается модельная задача определения эффективного коэффициента теплопроводности композиционной системы [5,6]. Теплопроводность композита при одной и той же концентрации наполнителя может изменяться в больших пределах. Это связано с особенностями распределения наполнителя в матрице. Особенно эта зависимость проявляется при большой разнице коэффициентов теплопроводности матрицы и наполнителя.

Композит представляется в виде кубической решетки $N \times N \times N$, ячейки которой могут быть заполнены либо веществом матрицы, либо веществом наполнителя. Пусть концентрация наполнителя ρ_n , тогда число ячеек, приходящихся на наполнитель $N_n = N^3 \cdot \rho_n$. С помощью генератора случайных чисел определяем координаты ячеек наполнителя x_n, y_n, z_n , и формируем бинарный композит рис. 1 (а, б, в).

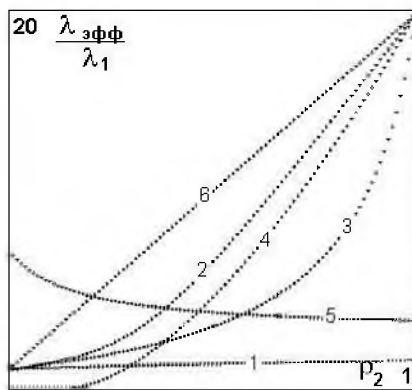


Рис. 2. Относительные значения эффективного коэффициента теплопроводности при $\lambda_2/\lambda_1 = 20$.

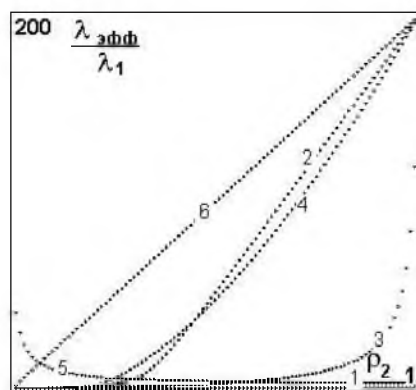


Рис. 3. Относительные значения эффективного коэффициента теплопроводности при $\lambda_2/\lambda_1 = 200$.

Дальнейшее рассмотрение структуры наполнителя будем описывать, опираясь на положения и термины теории перколяции. Каждая ячейка решетки может принадлежать либо матрице, либо наполнителю. На рис. 4 показаны конфигурации частиц наполнителя для концентраций наполнителя 0,005 (а), 0,1 (б), 0,4 (в). Отображается центральное сечение куба. Две или более ячеек, принадлежащие наполнителю и имеющие общие стороны являются связанными. Совокупность связанных ячеек образует кластер. Если концентрация наполнителя мала, то кластеры вообще могут не образовываться (рис. 4 а.) При больших концентрациях наполнителя могут появляться кластеры, простирающиеся от одной стороны решетки до другой (рис. 4 в.).

Такие кластеры называют протекающими. Минимальная концентрация наполнителя, при которой образуется перколяционный кластер является пороговой концентрацией.



цией p_c . Для квадратной и кубической бесконечных решеток эти значения пороговой концентрации составляют соответственно 0,59 и 0,31 [6]. Пороговая вероятность p_c для решеток малого размера имеет большой разброс в значениях и изменяется в пределах от 0,4 до 0,9

Количественной характеристикой структуры кластера является длина связности ξ . Она может определяться разными способами. Один из них – через радиус циркуляции ξ_q :

$$\xi_q = \langle r^2 \rangle^{0.5} = \left[\frac{1}{S} \sum_{q=1}^S (x_q - x_m)^2 + (y_q - y_m)^2 + (z_q - z_m)^2 \right]^{1/2}, \quad (6)$$

где

$$x_m = \frac{1}{S} \sum_{q=1}^S x_q, \quad y_m = \frac{1}{S} \sum_{q=1}^S y_q, \quad z_m = \frac{1}{S} \sum_{q=1}^S z_q,$$

где S – число частиц в кластере.

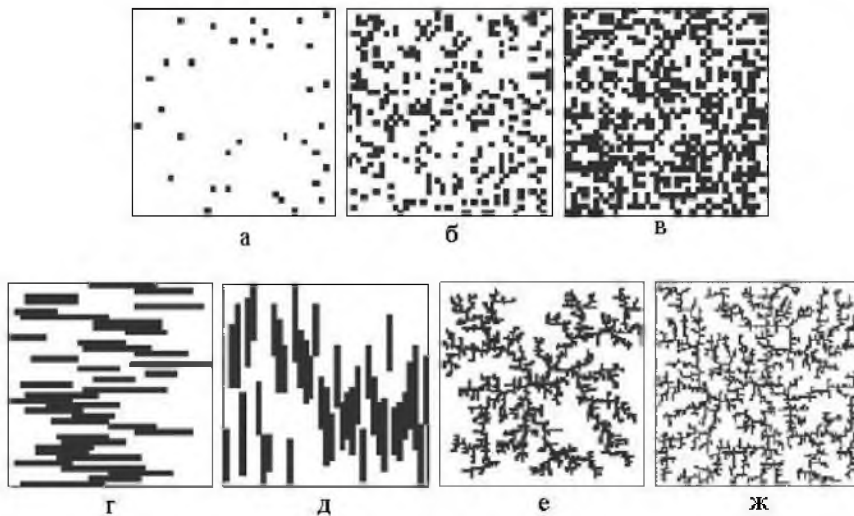


Рис. 4. Варианты конфигурации наполнителя: а, б, в – случайный, концентрация наполнителя 0,005, 0,1, 0,4; г-с – продольными волокнами, концентрации наполнителя 0,3; д-с – поперечными волокнами, 0,3; е – кластерный, 0,3; ж – кластерный из раствора, 0,3.

Как видно из рис. 4, длина связности имеет порядок размера частицы (а), с увеличением концентрации наполнителя она увеличивается (б) и, наконец, при пороговой концентрации имеет размер порядка решетки (в). В этом случае появляется перколяционный кластер. Для генерации кластерной структуры с заданной концентрацией наполнителя, можно использовать следующий алгоритм. Положение ячейки решетки однозначно определяется индексами l, m, n , соответствующими осям x, y, z .

Индексы меняются от 1 до N . Число N – размер решетки, или число ячеек в направлении какой либо из осей координат. Задается значение концентрации наполнителя p_n ,



например, равное 0,2. Далее, последовательно перебираются все ячейки решетки. Для каждой из них генерируется случайное число p_ε в пределах от 0 до 1. Если для ячейки выполняется условие, такое что $p_\varepsilon < p_n$, то эта ячейка становится наполнителем. При описанном выше методе генерации кластеров задаваемое значение концентрации наполнителя p_n не совпадает точно с отношением числа ячеек, принадлежащих наполнителю к полному числу ячеек. Однако это несоответствие устраняется выбором большего числа ячеек. Пусть N_p – полное число ячеек решетки. Тогда погрешность отношения N_n/N_p в зависимости от размера решетки N уже при размерах решетки более 30 не превышает 1%. Используя этот метод можно определить порог протекания. Пороговая вероятность p_c для решеток малого размера имеет большой разброс в значениях и изменяется в пределах от 0,4 до 0,9. Для различных типов бесконечных решеток характерные значения p_c приведены в [6]. Так для квадратной и кубической решеток эти значения составляют соответственно 0,59 и 0,31. При генерировании структуры наполнителя по варианту «1-случайный» была использована выше приведенная методика.

В случае генерирования структуры наполнителя в виде волокон на кубической решетке формируется конфигурация наполнителя, как и в варианте со случайным расположением частиц наполнителя. Затем все ячейки в направлении оси X, в которых содержится наполнитель, объединяются в одну нить, состоящую из N_f ячеек. Положение начала нити L (значение индекса l) выбирается случайным образом в диапазоне от 1 до N . Если длина нити $N_f > N - L + 1$, то, начиная с позиции L , размещаются только $N - L + 1$ ячеек нити. Остальные $N_f - (N - L + 1)$ ячеек нити размещаются в этом же ряду с позиции 1. На рис. 4 г и 4 д представлены результаты реализации этого алгоритма для формирования структуры наполнителя в виде волокон.

В случае формирования структуры наполнителя в виде кластеров на кубической решетке генерируется конфигурация наполнителя по методу Виттена-Сандера [7]. В результате, создается структура, представленная на рис. 4 е. Этот метод позволяет формировать модельные объекты с фрактальной структурой. На этом же рисунке представлен кластер (рис. 4 ж), полученный методом кластер-кластерной агрегации.

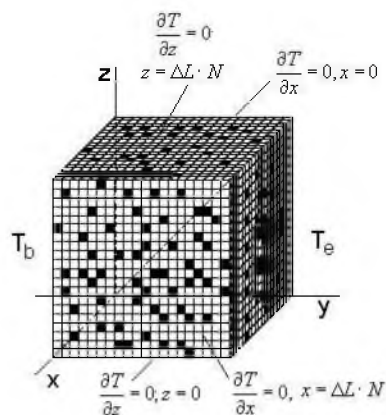


Рис. 5. К постановке задачи теплопроводности.

Рассмотрим расчет эффективного коэффициента теплопроводности бинарной композиционной системы. Состав композиционной системы в общем случае может характе-



ризоваться объемными концентрациями компонентов ρ_i . Введем понятие относительного коэффициента теплопроводности, приняв за 1 коэффициент теплопроводности матрицы:

$$\lambda'_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_m}, \quad (7)$$

где λ'_i – относительный коэффициент теплопроводности i -го компонента; λ_m – коэффициент теплопроводности матрицы.

Опишем алгоритм расчета эффективного коэффициента теплопроводности бинарной композиционной системы. Примем следующие обозначения: ρ_n – концентрация наполнителя; N – линейный размер решетки; N_n – число ячеек, приходящихся на наполнитель; x_n, y_n, z_n – координаты ячеек наполнителя; p_c – пороговая концентрация; ξ – длина связности; ξ_q – радиус циркуляции; S – число частиц в кластере; l, m, n – индексы ячеек, соответствующие осям x, y, z ; λ – коэффициент теплопроводности i -го компонента; λ'_i – относительный коэффициент теплопроводности i -го компонента; λ_m – коэффициент теплопроводности матрицы; S_t – период решетки; $\Delta x = \Delta y = \Delta z = S$ шаг сетки разбиения для численного расчета температурного поля; N_x, N_y, N_z – число узлов сетки по направлениям осей x, y, z ; T_e, T_b – температуры соответственно на плоскостях $x = S_t \cdot N$ и $x = 0$; T'_e, T'_b – относительные температуры соответственно на плоскостях $x = S_t \cdot N$ и $x = 0$; λ'_m, λ'_n – относительные коэффициенты теплопроводности матрицы и наполнителя; $T'_{i,j,k}$ – относительная температура в узлах сетки; λ'_{ijk} – относительный коэффициент теплопроводности в узлах сетки; q_i, q'_i – средний тепловой поток и относительный средний тепловой поток через поверхность, перпендикулярную оси; $q_{cp,i}, q'_{cp,i}$ – средний тепловой поток и относительный тепловой поток в направлении оси; λ_c, λ'_c – эффективный коэффициент теплопроводности композита, соответственно размерный и относительный. Структура алгоритма следующая:

1. Задается концентрация наполнителя ρ_n .

2. Задается размер решетки N и ее период S_t .

3. На N -размерной кубической решетке генерируется структура наполнителя с помощью одного из выше описанных методов. Определяются ячейки, принадлежащие наполнителю. Соответствующие маркеры присваиваются элементам трехмерного массива. Маркер наполнителя – 1, матрицы – 0.

4. Задается шаг сетки разбиения для численного расчета температурного поля $\Delta x = \Delta y = \Delta z = S$. Этот шаг либо равен, либо меньше периода решетки S_t . В частном случае, когда $S = S_t$, узлы сетки разбиения размещаются в центрах ячеек.

5. Вычисляется число узлов сетки по направлениям осей: $N_x = N_y = N_z = S_t N / S + 1$.

6. В трехмерный массив температур заносим температуры, в соответствии с граничными условиями.

$$T'_{i,j,k} = T'_b = 1, i = 1; N_y \geq j \geq 1, N_z \geq k \geq 1;$$

$$T'_{i,j,k} = T'_e, i = N_x; N_y \geq j \geq 1, N_z \geq k \geq 1;$$

где $T'_e = T_e / T_b; T'_b = T_b / T_b$.



7. В трехмерный массив температур T_1 заносится начальная температура во внутренних узлах сетки T'_0 .

$$T'_{i,j,k} = T'_0, N_x > i > 1; N_y + 1 \geq j \geq 0, N_z + 1 \geq k \geq 0.$$

Начальная температура выбирается произвольно.

8. В трехмерный массив коэффициентов теплопроводностей заносятся коэффициенты теплопроводности $\lambda_{i,j,k}$ в узлах сетки для всех комбинаций индексов i, j, k . По значениям индексов сетки i, j, k вычисляются индексы решетки l, m, n .

$$l = \text{Int}[\Delta x \cdot (i - 1)/S] + 1, \quad m = \text{Int}[\Delta y \cdot (j - 1)/S] + 1, \quad n = \text{Int}[\Delta z \cdot (k - 1)/S] + 1;$$

$$N_x \geq i \geq 1, \quad N_y \geq j \geq 1, \quad N_z \geq k \geq 1;$$

$$\lambda'_m = \lambda_m / \lambda_m = 1, \quad \lambda'_n = \lambda_n / \lambda_m.$$

9. Заносятся значения начальной температуры во внутренние узлы сетки T'_0 .

10. Вычисляется температура во внутренних узлах сетки и заносим в трехмерный массив T_2 .

$$T'_{ijk} = \left\{ \left[T'_{i-1,jk} \frac{\lambda'_{ijk} - \lambda'_{i-1,jk}}{\Delta x^2} + T'_{i,j-1,k} \frac{\lambda'_{ijk} - \lambda'_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} + T'_{i,j,k-1} \frac{\lambda'_{ijk} - \lambda'_{i,j,k-1}}{\Delta z^2} \right] - \right. \\ \left. - \lambda'_{ijk} \left[\frac{T'_{i-1,jk} - T'_{i+1,jk}}{\Delta x^2} + \frac{T'_{i,j-1,k} + T'_{i,j+1,k}}{\Delta y^2} + \frac{T'_{i,j,k-1} + T'_{i,j,k+1}}{\Delta z^2} \right] \right\} \times \\ \times \left\{ \left[\frac{\lambda'_{ijk} - \lambda'_{i-1,jk}}{\Delta x^2} + \frac{\lambda'_{ijk} - \lambda'_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} + \frac{\lambda'_{ijk} - \lambda'_{i,j,k-1}}{\Delta z^2} \right] - 2\lambda'_{ijk} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right] \right\}^{-1}$$

для $N_x > i > 1, N_y \geq j \geq 1, N_z \geq k \geq 1$,

11. Вычисляется температура на границах решетки и заносится в трехмерный массив T_2 .

$$T'_{i,0,k} = T'_{i,2,k}; \quad N_x > i > 1, N_z > k > 1;$$

$$T'_{i,N_y+1,k} = T'_{i,N_y-1,k}; \quad N_x > i > 1, N_z > k > 1;$$

$$T'_{i,j,0} = T'_{i,j,2}; \quad N_x > i > 1, N_y > j > 1;$$

$$T'_{i,j,N_z+1} = T'_{i,j,N_z-1}; \quad N_x > i > 1, N_y > j > 1;$$

12. Значения температуры в каждом узле сравниваются на предыдущем и последующем шагах.

Если хотя бы для одного узла выполняется условие:

$$| T'_{i,j,k}(\text{массив } T_1) - T'_{i,j,k}(\text{массив } T_2) | > \delta,$$

то значения элементов массива T_2 присваиваются элементам массива T_1 и осуществляется переход к пункту 10. Если для всех узлов сетки выполняется условие:

$$| T'_{i,j,k}(\text{массив } T_1) - T'_{i,j,k}(\text{массив } T_2) | \leq \delta,$$



то следует переход к следующему пункту.

13. Рассчитывается средний тепловой поток через плоскости $i = 1, 2 \dots Nx - 1$

$$q_i = \frac{1}{N_y \cdot N_z} \sum_j^{N_y} \sum_k^{N_z} \frac{(\lambda'_{i,j,k} + \lambda'_{i+1,j,k}) \lambda_m (T'_{i+1,j,k} - T'_{i,j,k}) T_b}{2 \Delta x}$$

или в безразмерном виде:

$$q'_i = q_i \frac{\Delta x}{\lambda_m T_b} = \frac{1}{N_y \cdot N_z} \sum_j^{N_y} \sum_k^{N_z} \frac{(\lambda'_{i,j,k} + \lambda'_{i+1,j,k})}{2} (T'_{i+1,j,k} - T'_{i,j,k}).$$

14. Рассчитывается средний тепловой поток в направлении оси x

$$\bar{q}_i = \frac{1}{N_x - 1} \sum_{i=1}^{Nx-1} q_i$$

или в безразмерном виде

$$\bar{q}'_i = \frac{1}{(N_G - 1)} \frac{1}{N_y \cdot N_z} \sum_{i=1}^{Nx-1} \sum_j^{N_y} \sum_k^{N_z} \frac{(\lambda'_{i,j,k} + \lambda'_{i+1,j,k})}{2} (T'_{i+1,j,k} - T'_{i,j,k}).$$

15. Рассчитывается эффективный коэффициент теплопроводности композита

$$\lambda_c = \frac{\bar{q}_i \cdot L_x}{T_e - T_b}$$

Предлагаемый метод расчета был реализован в виде компьютерной программы и использован для определения эффективного коэффициента теплопроводности масштабного элемента композиционной системы (МЗЭ).

Рассматривается несколько вариантов конфигурации наполнителя в матрице: со случайным распределением; с наполнителем в форме продольных волокон; с поперечным расположением волокон; кластерный; кластер-кластерный; блочный, фрактальный. Для всех этих вариантов выполнены численные расчеты относительного эффективного коэффициента теплопроводности бинарного композита $\lambda_{\text{eff}}/\lambda_1$ при различных концентрациях наполнителя ($0.3 \leq \rho_2 \leq 0.55$) и относительных коэффициентах теплопроводности наполнителя ($10 \leq \lambda_2/\lambda_1 \leq 410$).

Были рассчитаны значения относительного эффективного коэффициента теплопроводности композита в зависимости от концентрации наполнителя для различных вариантов расположения наполнителя в матрице: продольное (рис. 6), поперечное (рис. 7) и случайное (рис. 8).

Были также выполнены расчеты по определению зависимости коэффициента теплопроводности масштабного элемента от фрактальной размерности наполнителя. Предварительно генерировали модельный элемент с заданной фрактальной размерностью. В этом случае элемент представляет собой матрицу с наполнителем, имеющим



структуру перколяционного кластера. Во всех случаях коэффициент теплопроводности для матрицы принимался равным 2, а для наполнителя 200. Вычисления выполнялись на матрицах размером 100×100 , 150×150 . Результат исследований представлен на рис. 9, 10 соответственно.

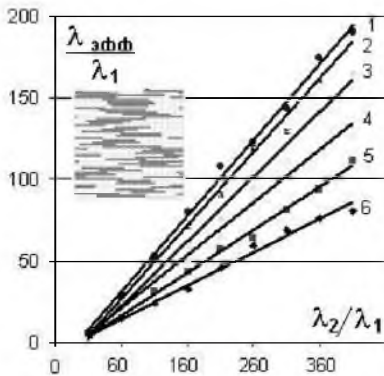


Рис. 6. Относительные значения эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{eff}}/\lambda_1$ бинарного композита при продольной ориентации наполнителя: 1 – $\rho_2 = 0,55$; 2 – $0,50$; 3 – $0,45$; 4 – $0,40$; 5 – $0,35$; 6 – $0,3$. Решетка $50 \times 50 \times 4$.

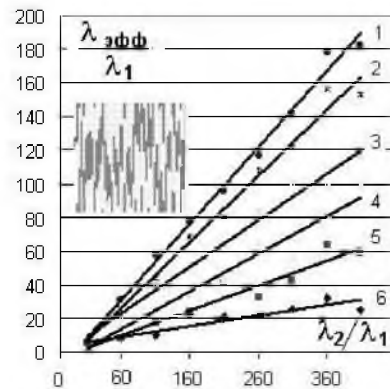


Рис. 7. Относительные значения эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{eff}}/\lambda_1$ бинарного композита при поперечной ориентации наполнителя: 1 – $\rho_2 = 0,55$; 2 – $0,50$; 3 – $0,45$; 4 – $0,40$; 5 – $0,35$; 6 – $0,3$. Решетка $50 \times 50 \times 4$.

Из графиков видно, что с ростом фрактальной размерности возрастает также и коэффициент теплопроводности. Чем больше фрактальная размерность, тем плотнее перколяционный кластер, образуемый наполнителем. Теплопроводность наполнителя на два порядка выше теплопроводности матрицы, поэтому с ростом доли наполнителя в композите возрастает и коэффициент теплопроводности всей системы.

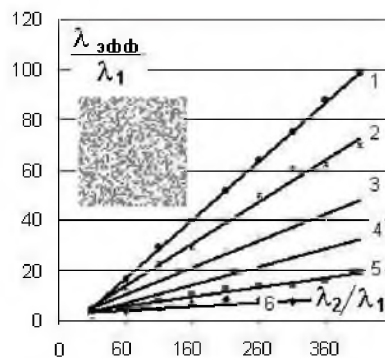


Рис. 8. Относительные значения эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{eff}}/\lambda_1$ бинарного композита при случайном распределении наполнителя: 1 – $\rho_2 = 0,55$, 2 – $0,50$, 3 – $0,45$, 4 – $0,40$, 5 – $0,35$, 6 – $0,3$. Решетка $50 \times 50 \times 4$.



Рост такого коэффициента носит степенной характер, причем с увеличением области генерации возрастает также показатель степени. Это можно объяснить тем, что фрактальная размерность перколяционного кластера зависит от размеров области генерации. У матриц, размеры которых меньше 150, фрактальная размерность с ростом области генерации возрастает.

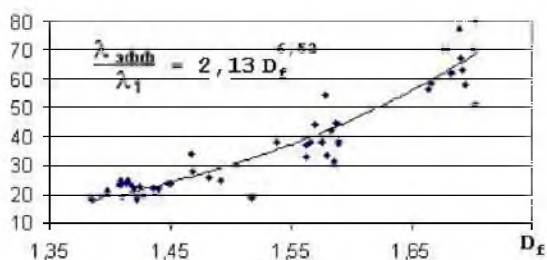


Рис. 9. Зависимость коэффициента теплопроводности от фрактальной размерности D у матрицы 100/100.

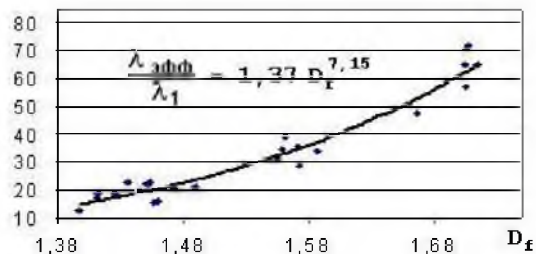


Рис. 10. Зависимость коэффициента теплопроводности от фрактальной размерности D у матрицы 150/150.

Заключение. Предложен алгоритм расчета эффективного коэффициента теплопроводности бинарной композиционной системы с различным характером пространственного расположения наполнителя. Рассчитаны значения относительного эффективного коэффициента теплопроводности композита в зависимости от концентрации наполнителя для различных вариантов расположения наполнителя в матрице: продольного, поперечного и случайного.

Литература

1. Барздокас Д.И., Зобнин А.И. Математическое моделирование физических процессов в композиционных материалах периодической структуры / М.: Едиториал УРСС, 2003. – 376 с.
2. Спирин Г.Г. и др. Теплопроводность и критерий квазиоднородности дисперсных материалов // Инженерно-физический журнал. – 1998. – 71, №3. – С.441-446.
3. Маврин С.В. и др. Стохастическая модель дисперсных систем // Инженерно-физический журнал. – 1999. – 72, №2. – С.445-450.
4. Барановский и др. Прогнозирование теплофизических свойств полимерных композиционных материалов с учетом модельных представлений // Пластические массы. – 2004. – №4. – С. 13-18.
5. Никитин Д.А. Моделирование структуры композиционных систем и расчет их коэффициента теплопроводности // Материалы, технологии, инструменты. – 2004. – 9, №2. – С.11-15.
6. Никитин Д.А. и др. Компьютерные модели теплопроводности композиционных систем // Тезисы докладов и сообщений: V Минский международный форум по тепло- и массообмену, Минск, 24-28 мая 2004 / Минск: ИТМО НАН. – 2. – С.270-271.
7. Фракталы в физике.: Пер.с англ. / Под ред. Л. Пьетронеро, Э. Тозатти / М.: Мир, 1988. – 672 с.



**MODEL REPRESENTATIONS OF THERMAL CONDUCTANCE
IN POLYMER NANOCOMPOSITES**

A.V. Nikitin, V.A. Liopo, S.V. Avdeychik, V.A. Struk

Grodno State University, Grodno, Belarus

Abstract. Some models of thermal conductance in composite polymer materials which contains dispersive packings are proposed. It is analyzed some location variants of packing particles in the composite volume. The calculation algorithm of thermal characteristics of composites is developed.

Key words: composite, thermal conductance, polymer materials, fractal.