

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Мелентьев Р. Ю.

В работе рассматривается возможность исследования теплопроводности в двухкомпонентных системах типа полимерные композиционные материалы с непрерывным волокнистым наполнителем. Автором предложен метод исследования тепловых процессов в сложных анизотропных телах. Создана и поэтапно описана компьютерная модель теплового поля структурных фаз ПКМ в элементарном объеме. Путем изотермического анализа установлена температурная градация двухкомпонентного тела. В процессе моделирования выявлены факторы, влияющие на теплопроводность и формирование теплового поля. Полученные результаты сопоставлены с известными аналитическими решениями рассматриваемого предмета.

У роботі розглядається можливість дослідження теплопровідності в двокомпонентних системах типу полімерні композиційні матеріали з безперервним волокнистим наповнювачем. Автором запропоновано метод дослідження теплових процесів в складних анізотропних тілах. Створена і поетапно описано комп'ютерна модель теплового поля структурних фаз ПКМ в елементарному обсязі. Шляхом ізотермічного аналізу встановлена температурна градация двокомпонентного тіла. У процесі моделювання виявлено фактори, що впливають на теплопровідність і формування теплового поля. Отримані результати зіставлені з відомими аналітичними рішеннями розглянутого предмета.

The paper considers the possibility of investigation of thermal conductivity in two-component systems of the type of polymeric composite materials with continuous fibrous filler. The author suggests a method of investigation of thermal processes in complex anisotropic bodies. Created and step-described computer model of the thermal field of structural phases of polymer composite material in an elementary volume. By isothermal analysis of temperature gradation of a two-part body. In the modeling process, factors that influence on the thermal conductivity and the formation of the thermal field. The obtained results are compared with the known analytical solutions of the subject matter.

Мелентьев Р. Ю.

аспирант ОНПУ
15KGrant@mail.ru

ОНПУ – Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса.

УДК 53.053:004.383.4

Мелентьев Р. Ю.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

На сегодняшний день полимерные композиционные материалы (ПКМ) способны удовлетворять нуждам почти любой промышленности, чем и объясняется множество их разновидностей. Широкое применение в машино- и авиастроении приобрели ПКМ с волокнистым армирующим наполнителем, например углепластики, стеклопластики и др. Отличительной чертой материалов с волокнистым наполнителем является значительная вытянутость длины армирующего элемента (волокна, нити, пряди) к его поперечному сечению.

По отношению к традиционным конструкционным материалам ПКМ являются новыми и процесс их механической обработки изучен весьма поверхностно. Так, например, в отличие от металлов ПКМ обладают низкой теплостойкостью и не однозначной теплопроводностью своих компонентов. Теплопроводность полимерной матрицы составляет 0,14–0,50 Вт/(м·К) и порой в сотню раз ниже теплопроводности наполнителя, например коэффициент теплопроводности углеволокна может изменяться в пределах 75–120 Вт/(м·К) [1]. При температурах выше 570–620°К начинается интенсивная термодеструкция и разложение полимерного связующего, а при обработке таких материалов как органопластики – и полимерного наполнителя. В результате этих процессов образуется деструктивно-диспергированный слой, который ухудшает эксплуатационные характеристики деталей из ПКМ.

Не смотря на широкое применение волокнистых материалов с упорядоченной структурой, нам известно небольшое число работ [2, 3 и др.], посвященных аналитическому исследованию их эффективной теплопроводности. Существуют так же зависимости [4, 5, 8] позволяющие с высокой достоверностью определять теплопроводность изотропных материалов. Однако их применение для определения теплопереноса в сложных анизотропных телах с граничными условиями четвертого рода (теплоперенос между сопряженными телами) затруднено многими допущениями, снижающими точность этих решений.

Цель работы состоит в определении анизотропии теплофизических свойств и эффективной теплопроводности ПКМ с армирующим волокнистым наполнителем.

ПКМ с волокнистой структурой состоят из двух фаз: полимерной матрицы и собственно волокна. Между тем в процессе получения структуры между указанными фазами можно отметить появление третьей, смешанной. Она представляет дефектный слой раздела двух фаз толщиной до 20 мкм, состоящий на 5–10 % из газовых пор и малого диффузионного взаимодействия связующего и волокна. Некоторая пористость присутствует между уложенными слоями материала, а иногда и в свободной полимерной матрице.

В работе [2] предложена формула для определения теплопроводности волокнистых материалов с упорядоченной структурой окруженных воздушной средой, например шерстяная ткань:

$$\lambda = \lambda_1 \left[m_2^2 v + (1 - m)^2 + \frac{4vm_2(1 - m_2)}{1 + v} \right], \quad (1)$$

где λ_1 – теплопроводность волокон,

m_2 – объемная пористость ткани,

$v = \lambda_1/\lambda_2$, а λ_2 – теплопроводность вещества пор.

Если вместо пористой составляющей (газового или воздушного пространства вокруг волокон) принять значения полимерной матрицы, то формула будет приблизительно отображать общую теплопроводность ПКМ. Для определения теплопроводности в направлении перпендикулярно к оси волокон, автор указанной работы, предлагает следующие соотношения:

$$\lambda_{y(x)} = \frac{\lambda_1 \left(1 + V_2 + \frac{V_1 \lambda_1}{\lambda_2}\right)}{\left(V_1 + \frac{(1 + V_1) \lambda_1}{\lambda_2}\right)}, \quad (2)$$

где λ_i – теплопроводность компонента ПКМ,

V_i – объемная доля компонента ПКМ, оси Y и X направлены поперек оси волокна.

Близкой к структуре реального материала была бы модель, каждый структурный элемент, которой имел бы свою пористость, отличную от общей расчетной пористости ПКМ. Однако подобная детализация структуры неизбежно связана с усложнением модели. Поэтому вначале целесообразно остановиться на более упрощенной модели с минимальным числом известных и наиболее влияющих факторов.

При выборе модели примем следующие допущения и ограничения: весь материал имеет упорядоченную структуру, состоящую из единичных волокон окруженных полимерным связующим (матрицей), волокна пересекаются только под прямыми углами и лежат в плоскости перпендикулярной поверхности изделия.

Модель ПКМ с учетом принятых допущений представляет собой набор определенным образом расположенных брусьев (рис. 1, а).

Если геометрические и физические свойства гетерогенной системы периодически повторяются в пространстве, то система обладает дальним порядком. Заметим при этом, что периодичность повторения свойств системы в разных направлениях может быть различной. В любой системе с дальним порядком можно выделить элементарную ячейку – элемент объема, повторяя который определенным образом, можно получить весь объем исходной структуры.

Элементарная ячейка такой модели изображена на рис. 1, б.

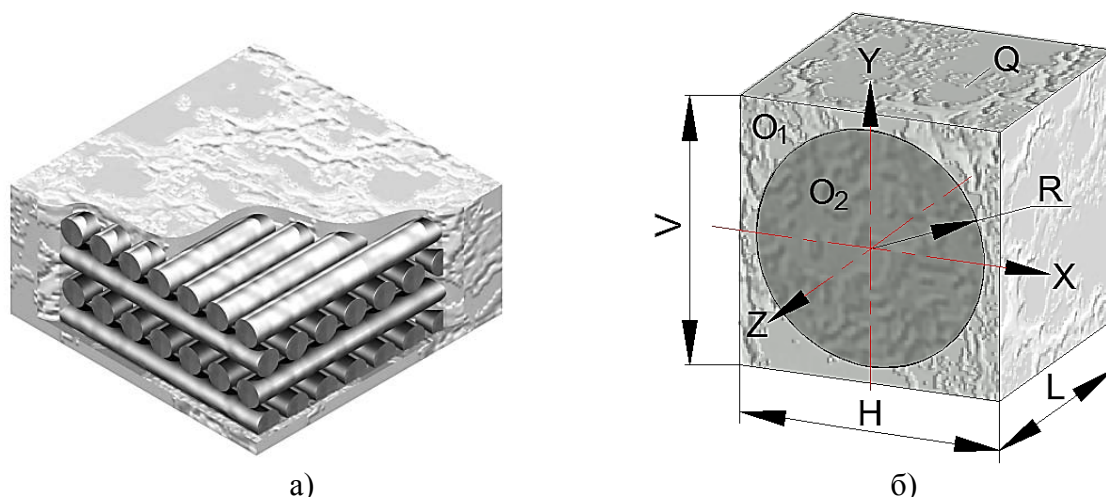


Рис. 1. Моделируемые системы:

а – многослойный волокнистый ПКМ с ортотропной схемой армирования; б – элементарная ячейка ПКМ

Для моделирования теплового поля были приняты допущения. Волокно рассматривается как идеально цилиндрическое однородное тело, а матрица – окружающий волокно, правильный четырехугольник. Такое допущение использовано в [3] при определении коэффициента

теплопроводности ПКМ и в [6] при исследованиях прочности ПКМ. В элементарной ячейке полимерной матрицы (термореактивной смолы или другой связки) O_1 с размерами $H \times V \times L$ размещается углеродное волокно (область O_2) радиусом R и длиной L . Соотношение размеров R, H, V выбирают на основе данных об объемной доле волокна и матрицы в ПКМ. Величина L относится и к O_1 и к O_2 , это обеспечивает постоянство объемного содержания структурных фаз вне зависимости от ее значения. Считается, что на границе раздела волокна и матрицы имеет место идеальный тепловой контакт. На поверхность Q действует тепловой источник, все остальные поверхности полагаются теплоизолированными. Теплофизические свойства (ТФС) не зависят от температуры.

В работе [3] предложена математическая модель процесса теплообмена в подобной ячейке:

$$C_i \frac{\partial T(x, y)}{\partial \tau} = \lambda_i \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \lambda_i \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2}; \quad (3)$$

$$i = 1, 2, (x, y) \in O_1 \cup O_2,$$

где x, y – координаты, м, C_i – объемная теплоемкость, Дж/(м³·К), i – номер компонента ПКМ (1 – матрица, 2 – волокно), λ_i – теплопроводность i -того компонента, Вт/(м·К).

Согласно (2), теплопроводность в направлении оси Y

$$\lambda_Y = -V \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \lambda_1 \frac{\partial T(x, \frac{V}{2})}{\partial y} dx \frac{1}{H(T_Q - T_w)}, \quad (4)$$

где T_Q и T_w – температура нагреваемой тепловым источником поверхности Q и противоположной ей поверхности W .

Для вычисления теплопроводности и создания наглядного отражения процесса распределения температуры в элементарной ячейке, моделирование проводилось в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Для использования программы COMSOL (FemLab) нет необходимости получать аналитическое решение (которое, например, необходимо для работы в программе MathCAD). Для моделирования конкретной задачи достаточно иметь исходное дифференциальное уравнение и граничные условия.

Встроенный в программный комплекс математический аппарат для решения тепловых задач представлен в виде:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \quad (5)$$

где ρ – плотность; C_p – удельная теплоемкость; T – начальная температура; t – время нагрева; k – коэффициент теплопроводности; Q – плотность теплового источника.

В более известном виде уравнение теплопроводности имеет вид [5]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + V \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (6)$$

где T – температура; τ – время действия теплового источника; a – температуропроводность материала; x, y, z – координаты; V – скорость перемещения теплового источника.

В работе [7] приводится доказательство равенства формул (6) и (7).

Для модели были приняты значения: радиус $R = 50$ мкм, соотношение $O_2 / (O_1 + O_2) = 6 / 10$ (объемное содержание волокна в ПКМ 60%), ширина, высота и длина $H = V = L = 114$ мкм. Начальная температура принималась комнатной, $T = 293,15^\circ\text{K}$. Время нагрева $t = 0,01$ с и плотность теплового источника $Q = 40 \times 10^6$ Вт/м² приняты сопоставимыми значениями, возникающим в процессе шлифования и сверления. В качестве моделируемого материала рассматривался углепластик. Свойствам углеродных волокон и матрицы (термореактивной смолы) были присвоены усредненные значения (табл. 1).

Таблица 1

Свойства материалов

| Материал | Плотность, ρ , кг/м ³ | Удельная теплоемкость, C_p , Дж/(кг × К) | Коэффициент теплопроводности, k , Вт/(м × К) |
|-----------------------|---------------------------------------|--|--|
| Углеродное волокно | 1800 | 1100 | 100 |
| Термореактивная смола | 1400 | 900 | 0,2 |

Результаты моделирования распределения температуры в элементарной ячейке представлены на рис. 2.

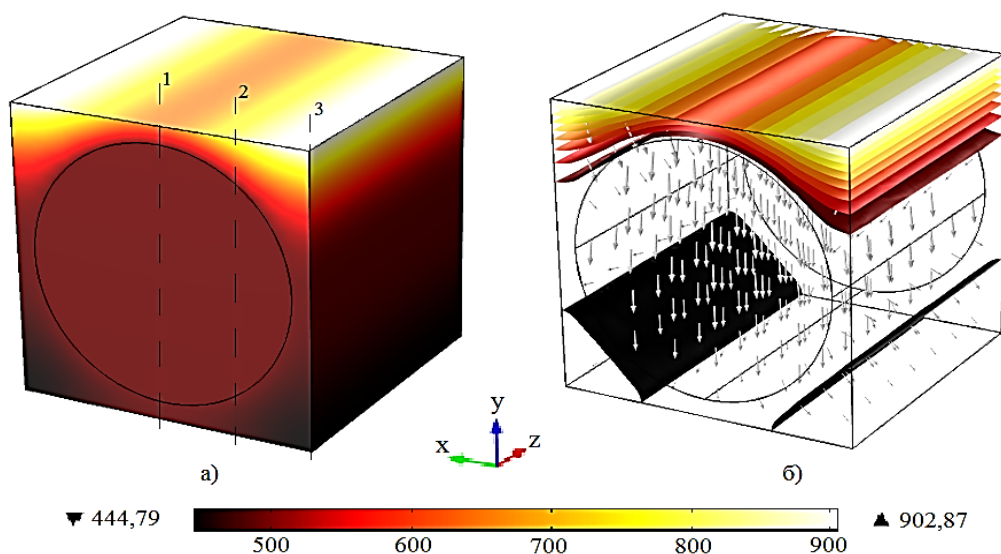


Рис. 2. Модель теплового поля в элементарной ячейке ПКМ (а) и ее изотермический анализ (б)

Как видно из рис. 2, а, максимальная температура $902,87^\circ\text{K}$ возникает на боковых краях нагреваемой поверхности. Полимерная матрица, имея коэффициент теплопроводности значительно (для данной модели в 500 раз) меньше коэффициента теплопроводности волокна, концентрирует тепло на поверхности, а приближаясь к середине нагреваемой поверхности, толщина связующего уменьшается и поверхность начинает испытывать теплоотводящее свойства волокна. Такое взаимодействие компонентов приводит к разности температур уже на поверхности ячейки.

Для детального исследования распространения температуры по глубине ячейки проведен изотермический анализ. Анализ заключается в нахождении изотермических поверхностей в теплопроводящем теле. Изотермические поверхности отделяют более горячие части тела

от более холодных и условно разделяют твердое тело на тонкие слои (рис. 2, б). Тепло течет от одного слоя к другому (от светлого к темному). Тепловой поток имеет направление, нормальное к изотермам, потому, что перенос тепла вдоль поверхности одинаковой температуры невозможен [8].

С отдаление от поверхности температура снижается не равномерно. Чем ближе рассматриваемая точка к поверхности волокна, тем ее температура меньше. Такой вид имеет теплоперенос в верхней части ячейки. В нижней части наблюдается обратный процесс, тепло двигается от тела волокна к матрице, так как волокно по всему своему объему сохраняет практически (в данных габаритах ячейки) одинаковую температуру. В результате самыми холодными ($444,79^{\circ}\text{K}$) участками стали нижние боковые кромки.

На рис. 3 изображены кривые охлаждения по центру ячейки, со сдвигом от центра на четверть ширины и на периферии ячейки (по прямой 1, 2 и 3 на рис. 2, а).

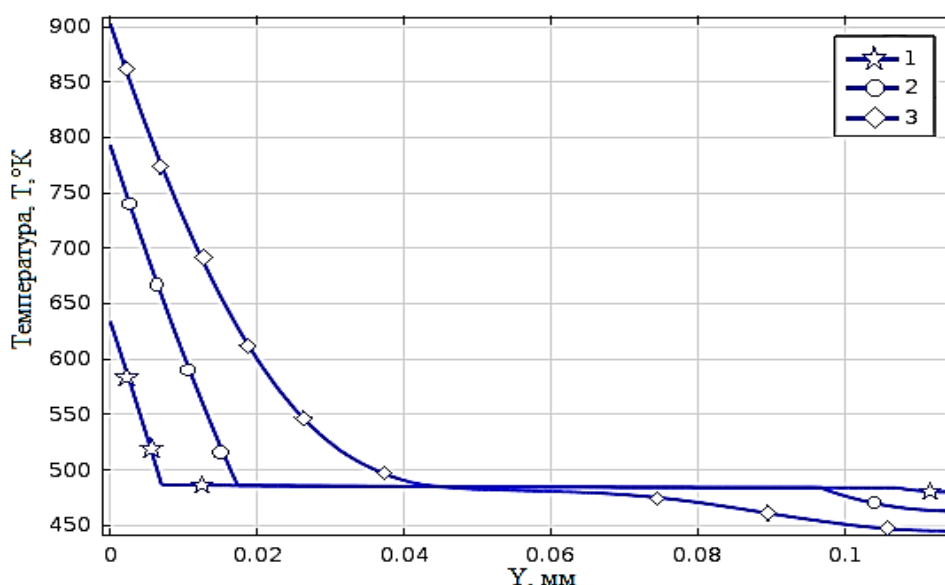


Рис. 3. Кривые охлаждения по глубине ячейки: 1) посередине ($1/2H$); 2) со сдвигом от центра ($3/4H$); 3) по краю (H)

Температура на середине поверхности ячейки составляет 634°K и непрерывно снижается отдалаясь от поверхности на 7 мкм, затем резкий перелом кривой (рис. 3, кривая 1) свидетельствует о переходе в другую фазу и изменении теплопроводящих условий. Отдалаясь от поверхности на следующие 100 мкм (диаметр волокна) температура понизилась всего на $3,6^{\circ}\text{K}$. На последних 7 мкм (всего 114 мкм) наблюдается малый перелом кривой вследствие возврата к первому компоненту ячейки.

Охлаждения ячейки по прямой 2 (рис. 2, а) происходит подобным образом, с тем различием, что вследствие цилиндрической формы волокна, переломы температурной кривой происходят на другой глубине от нагреваемой поверхности (рис. 3, кривая 2).

Охлаждение по краю ячейки происходит без переломов и относительно плавно (рис. 3, кривая 3).

Для определения теплопроводности двухкомпонентной ячейки требуется определить температуру нагреваемой источником тепла Q и противоположной ей поверхности W , после чего с теми же габаритами $H \times V \times L$ создается аморфное тело с усредненными, в зависимости от объемного содержания компонентов, значениями плотности и теплоемкости. Коэффициент теплопроводности находится методом подборки и считается найденным в том случае, когда температуры указанных поверхностей анизотропной модели совпадут с теми же поверхностями изотропной (аморфной) модели.

Как было видно из рис. 2, а ни одна поверхность ячейки не имеет однозначной температуры. Средняя температура поверхности определялась методом интегрирования измерительным аппаратом программы COMSOL Multiphysics с учетом градиентов температуры по площади поверхности. Трехмерную модель градиции температуры на поверхностях Q и W можно увидеть на рис. 4.

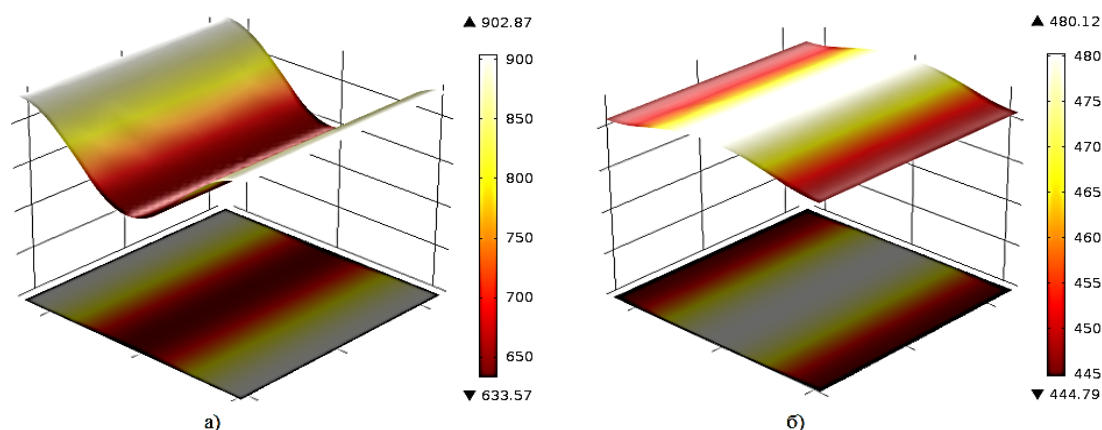


Рис. 4. Геометрическая, цветная модель градиции температуры по поверхности: а) Q; б) W

Средняя температура поверхностей Q и W составила 633,5°K и 463,8°K соответственно.

Что бы заменить анизотропную ячейку на изотропную, необходимо вычислить для нее значения плотности ρ_{iz} и теплоемкости C_{iz} .

$$\rho_{iz} = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2; \quad C_{iz} = C_1 V_1 + C_2 V_2, \quad (7)$$

где V_i – объемное содержание компонента в ячейке, %.

Для изотропной ячейки $\rho_{iz} = 1640 \text{ кг/м}^3$ и $C_{iz} = 1020 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$.

При указанных выше параметрах и ранее использованных H, V, L, t, Q, T была смоделирована изотропная ячейка. Методом подбора значений был установлен коэффициент теплопроводности $\lambda = 1,16 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, при котором температура поверхностей Q и W составила 633,7°K и 437,4°K соответственно.

Для проверки достоверности найденных теплофизических свойств было проведено сопоставление средних объемных температур изотропной и анизотропной ячеек накопленных в течение времени нагрева (табл. 2).

Таблица 2

Расхождение средних объемных температур ячеек

| Время, t , мс | Анизотропная ячейка, T, °K | Изотропная ячейка, T, °K | Расхождение, T, °K | Расхождение, % |
|--------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------|
| 0 | 293,17 | 293,17 | 0 | 0 |
| 1 | 317,39 | 314,17 | 3,22 | 1,01 |
| 2 | 339,23 | 335,14 | 4,09 | 1,20 |
| 3 | 360,37 | 356,12 | 4,25 | 1,17 |
| 4 | 381,25 | 377,09 | 4,16 | 1,09 |
| 5 | 402,01 | 398,05 | 3,96 | 0,98 |
| 6 | 422,72 | 419,04 | 3,68 | 0,87 |
| 7 | 443,42 | 440,02 | 3,40 | 0,76 |
| 8 | 464,11 | 460,99 | 3,13 | 0,67 |
| 9 | 484,81 | 481,97 | 2,84 | 0,58 |
| 10 | 505,51 | 502,94 | 2,57 | 0,51 |

Из таблицы 2 видно, что средняя объемная температура изотропной ячейки поднимается аналогично температуре в анизотропной ячейке с расхождением не более чем на 1,2 %, а значит, их теплофизические свойства подобны 98,8 %.

Полученная моделированием теплопроводность сравнивалась с расчетами по формулам (2) и (4). Результаты вычислений сведены в табл. 3.

Таблица 3

Кoeffициент теплопроводности ПКМ поперек оси волокна

| Используемым методом | По формуле (2) | По формуле (4) |
|----------------------|----------------|----------------|
| 1,16 Вт/(м·К) | 0,794 Вт/(м·К) | 0,93 Вт/(м·К) |

Из сравнения результатов вычисления λ_y видно, что значение, полученное предлагаемым методом сопоставимо с результатами известных методов с некоторым отклонением в большую сторону.

ВЫВОДЫ

Найден коэффициент теплопроводности для двухкомпонентной элементарной ячейки ПКМ. Определены максимальная, минимальная и средняя температура поверхностей и всего тела ячейки. Установлен характер распределения температуры вглубь от нагреваемой поверхности в двухкомпонентном теле с учетом граничных условий четвертого рода. Проведен изотермический анализ двухкомпонентной элементарной ячейки. Предложен метод моделирования теплового поля в элементарной ячейке ПКМ, позволяющий последовательно определять значение теплопроводности для монослоев и пакетов ПКМ. Показана возможность исследования теплового распределения в системах, состоящих из двух, трех и более компонентов, что представляет большой интерес для исследователей тепловых процессов в анизотропных телах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование теплопроводности углепластиков в широком диапазоне эксплуатационных температур с использованием элементов натуральных конструкций / С. В. Резник [и др.] // *Машиностроение. – Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана.* – 2012. – 6 с.
2. Дульнев Г. Н., Теплопроводность смесей и композиционных материалов [Текст] / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк // *Справ. книга.* – Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1974. – 264 с.
3. Михайловский К. В. Разработка высокотеплопроводных полимерных композиционных материалов для космических конструкций [Текст] / К. В. Михайловский, П. В. Просунцов, С. В. Резник // *Машиностроение. – Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана.* – 2012. – 6 с.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности [Текст] / А. В. Лыков // *Технико-теоритическая литература.* – М. – 1952. – 392 с.
5. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управлении качеством поверхности [Текст] / В. А. Сипайлов // *Машиностроение.* – М. : 1978 – 167с., ил.
6. Ван Фо Фы Г. А. Конструкции из армированных пластмасс [Текст] / Г. А. Ван Фо Фы // *Техника.* – К. : 1971. – 220 с.
7. Ларшин В. П. Компьютерное моделирование процесса шлифования для определения температуры в зоне резания [Текст] / В. П. Ларшин, Н. В. Лищенко // *Сборник «Инженерная механика»* – 2008. – Вып. 21.
8. *Introduction to the mathematical theory of the conduction of heat in solids.* Edited by H. S. Carslaw, Sc. D. (Cambridge), D. Sc. (Glasgow), F. R. S. E. – Second edition. – N. Y. : Dover publication, 1945. – 36 p.