

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ
ЛОКАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ КОМПОЗИТАХ**

Максименюк Я.А., к.т.н., доцент,
yakovmaksimenuk@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2434-9904

Загинайло И.В., к.ф.-м.н., доцент,
ORCID: 0000-0002-4022-9120

Щеткина А.С., студент,

Козаченко К.А., студент,

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Аннотация. Исследованы многомодовые статистические распределения плотности локальных тепловых потоков, полученные путем численного моделирования процесса теплопереноса в двухкомпонентных композитных материалах с теплопроводящей матрицей и случайно расположенными теплоизолирующими включениями. Произведена привязка мод распределения плотности локальных тепловых потоков к характерным областям внутри композитного материала. Определены зависимости характеристик статистического распределения плотности локальных тепловых потоков от параметров размещения включений: концентрации, размеров и минимальной дистанции между ними.

Ключевые слова: численное моделирование, статистическое распределение, композитный материал, локальный тепловой поток, эффективная теплопроводность.

Введение. Для описания теплоизолирующих свойств композиционных материалов (КМ) традиционно используется теория обобщенной проводимости (ТОП) Максвелла [1] и ее многочисленные модификации, использующие концепцию эффективной теплопроводности [2]. В рамках данной концепции реальный структурно-неоднородный материал заменяется эквивалентным по теплопередаче структурно-однородным материалом. Такой подход, будучи в первом приближении вполне приемлемым для вычисления переносимого через КМ интегрального теплового протока при разных концентрациях теплоизолирующей компоненты, не учитывает влияние других параметров размещения включений в матрице на эффективную теплопроводность КМ. Кроме того, в случае отсутствия пространственной упорядоченности в расположении фазы наполнителя, что характерно для широкого класса КМ, при аналитическом описании их теплофизических свойств возникают дополнительные трудности. Действительно, эффективная теплопроводность в этом случае должна быть представлена в виде тензора второго ранга [3]. Компоненты этого тензора зависят от ряда параметров, которые входят в математические модели теплового взаимодействия включений и матрицы в композите. Однако большинство упомянутых моделей [2] учитывают лишь объемное содержание и форму добавок в композите и не рассматривают размеров включений и их возможное взаимное расположение.

Для упрощения аналитического описания случайно-неоднородных КМ прибегают к рассмотрению фрагмента объема композита с одним или несколькими включениями, который называют представительной ячейкой (Representative Volume Element, RVE). При вычислении сопротивления теплопередаче RVE обычно исходят из определенных допущений об изотермических и адиабатических условиях на различных границах RVE и о направлениях линий тока тепла внутри RVE [4]. В [5] выполнены расчеты эффективной теплопроводности и распределения температуры в КМ, полученном двумерной трансляцией RVE квадратной формы с пятью случайно расположенными включениями, при этом не использовались предварительных допущений о линиях тока тепла, а локальные тепловые потоки (ЛТП) в RVE были рассчитаны аналитически.

Альтернативой аналитического рассмотрения теплопроводности КМ с хаотическим размещением включений является имитационное моделирование с использованием метода

Монте-Карло. Традиционно применение данного метода обусловлено аналогией между численными решениями уравнения теплопереноса и задачи о случайном блуждании частицы [6]. Решение последней задачи требует меньших вычислительных ресурсов, а результаты решения могут быть проинтерпретированы в терминах эффективной теплопроводности. Примеры численного моделирования теплофизических характеристик композитов приведены в [7-11]. Однако такой подход не дает информации о ЛТП, изучение которых представляет интерес для анализа процессов старения и деградации КМ. Нужно также отметить, что авторы [10, 11] не обнаружили существенных отличий полученных величин эффективной теплопроводности моделируемого КМ от значений, предсказываемых ТОП Максвелла.

В нашем случае Монте-Карло используется для случайного размещения большого числа включений в матрице КМ, а вычисление температурного поля и плотности ЛТП выполняется путем непосредственного решения уравнения теплопереноса. Данный подход позволяет рассчитать не только эффективную теплопроводность КМ и ее статистический разброс вследствие случайного размещения включений [10], но и анализировать ЛТП. В [11] при моделировании RVE с 10 – 30 включениями было обнаружено, что статистическое распределение плотности ЛТП имеет 3 характерные моды. В [12] было показано, что в более крупных RVE, содержащих 100 – 400 включений, трехмодовый характер статистического распределения плотности ЛТП сохраняется, было также установлено, в каких областях КМ формируются ЛТП, принадлежащие различным модам их распределения.

Цель настоящей работы – исследование характеристик многомодовых статистических распределений плотности ЛТП в широком диапазоне параметров размещения включений.

Метод исследования. Вектор плотности ЛТП \mathbf{f}_Ω в малой области Ω , т.е. количество теплоты, переносимое за единицу времени через единичную изотермическую площадку, принадлежащую области Ω , вдоль нормали к этой площадке, пропорционален градиенту температуры в окрестности этой площадки:

$$\mathbf{f}_\Omega = -\lambda_\Omega \nabla T, \quad (1)$$

где λ_Ω – теплопроводность материала в области Ω . Стационарное уравнение теплопроводности Фурье для области Ω , не содержащей источников тепловыделения или стоков тепла, может быть выражено через вектор плотности ЛТП:

$$\nabla \mathbf{f}_\Omega = 0. \quad (2)$$

В настоящей работе моделировался двухкомпонентный КМ, состоящий из теплопроводящей матрицы с теплопроводностью λ_m и случайно размещенных в ней теплоизолирующих включений с теплопроводностью $\lambda_i \ll \lambda_m$. Таким образом, теплопроводность λ_Ω может принимать значения λ_i или λ_m в зависимости от пространственных координат.

В работе анализировались квазидвумерные модели КМ, когда теплоперенос осуществляется только по двум координатам, а вдоль третьей – отсутствует, и теплопроводность вдоль третьей координаты не меняется. Уравнение (2) для квазидвумерного случая принимает вид:

$$\nabla \lambda(x, y) \nabla T(x, y) = 0. \quad (3)$$

Численное решение уравнения (3) при заданных граничных условиях позволяет рассчитать поле температур $T(x, y)$, и затем по формуле (1) – компоненты вектора плотности ЛТП вдоль координатных осей x и y – $f_{\Omega, X}$ и $f_{\Omega, Y}$ соответственно. Модуль вектора плотности ЛТП легко определить по его компонентам:

$$|\mathbf{f}_\Omega| = \sqrt{f_{\Omega, X}^2 + f_{\Omega, Y}^2}. \quad (4)$$

Для формирования расчетной области генерировалась RVE квадратной формы со стороной квадрата $a = 128$ шагов прямоугольной сетки h . Под ЛТП в RVE мы понимаем тепловой поток через область, представляющую собой окрестность узла счетной сетки величиной $\pm h/2$ по координатам x и y . В RVE с помощью генератора случайных чисел с

равновероятным законом распределения размещались одинаковые включения квадратной формы со стороной квадрата b (минимальное значение b составляло $4h$, максимальное – $20h$). Для всех численных экспериментов было выбрано отношение теплопроводностей матрицы и включений $\frac{\lambda_m}{\lambda_i} = 21$, (примерно равно отношению теплопроводностей цементно-песочного

камня и пенополистирола). В алгоритме размещения включений кроме размеров включений и их количества N в шаблоне было предусмотрено задание минимальной дистанции d , на которую разрешалось сближаться включениям; d задавалась в диапазоне от 0 (включениям разрешено соприкасаться) до $b - 1$ шагов сетки.

Концентрация включений в RVE представляет собой отношение площади всех включений к общей площади RVE: $c = \frac{Nb^2}{a^2}$.

С целью минимизации расчетных погрешностей, связанных с теплопереносом на границах, счетная область моделируемого композита составлялась из 3 идентичных RVE: центрального (представительского) и двух прилегающих. Центры этих RVE располагались вдоль оси y . По периметру расчетной области добавлялось по одному слою ячеек размером h , которым приписывалась теплопроводность матрицы. Таким образом, размер расчетной области по оси x составлял $(a + 2)h$, по оси y составлял $(3a + 2)h$, и на внешних границах расчетной области включений не оказывалось.

На расчетную область накладывались краевые условия первого рода. Для левого и правого пограничных слоев задавались постоянные температуры T_L и T_R соответственно. При этом $T_L > T_R$. Таким образом, градиент температуры прикладывался вдоль оси x . Для верхнего и нижнего пограничных слоев задавалось линейное изменение температуры от T_L до T_R вдоль координаты x . Все величины локальных тепловых потоков в данной работе представлены в условных единицах, т.к. для представления их в системных единицах необходимо задаться определенной величиной h .

Процедуру генерации RVE со случайным размещением включений при определенных значениях параметров размещения a , b , c и d мы называем испытанием. Для каждого испытания нами сохранялась карта размещения включений. Далее методом конечных разностей решалось уравнение (3); решение считалось полученным, когда для каждого узла расчетной сетки соотношение (2) выполнялось с точностью не хуже 10^{-5} . Серией испытаний мы называем испытания с одинаковыми параметрами размещения включений. В каждой серии испытаний их число составляло 400.

Результаты исследований. На рис. 1 показано распределение плотности ЛТП в RVE со случайно расположенными включениями размера $b = 5h$ в количестве $N = 160$ ($c \approx 0,24$) при минимальной дистанции $d = h$. Общее число учтенных ЛТП в каждой серии испытаний составляет немногим более $6,5 \times 10^6$. Как было нами показано в [13], такого рода полимодальное распределение может быть представлено в виде суммы трех одномодовых логарифмически-нормальных распределений. Выделение отдельных мод мы осуществляли с помощью программы PeakFit™ v4. При этом в программе используется репараметризованная форма логнормального распределения:

$$y(x) = A \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \ln Mo}{\sigma} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где Mo – мода распределения (положение вершины пика), A – амплитуда моды, σ – параметр распределения, который связан с шириной пика. На рис. 1 также показан результат разделения исходного распределения на отдельные моды.

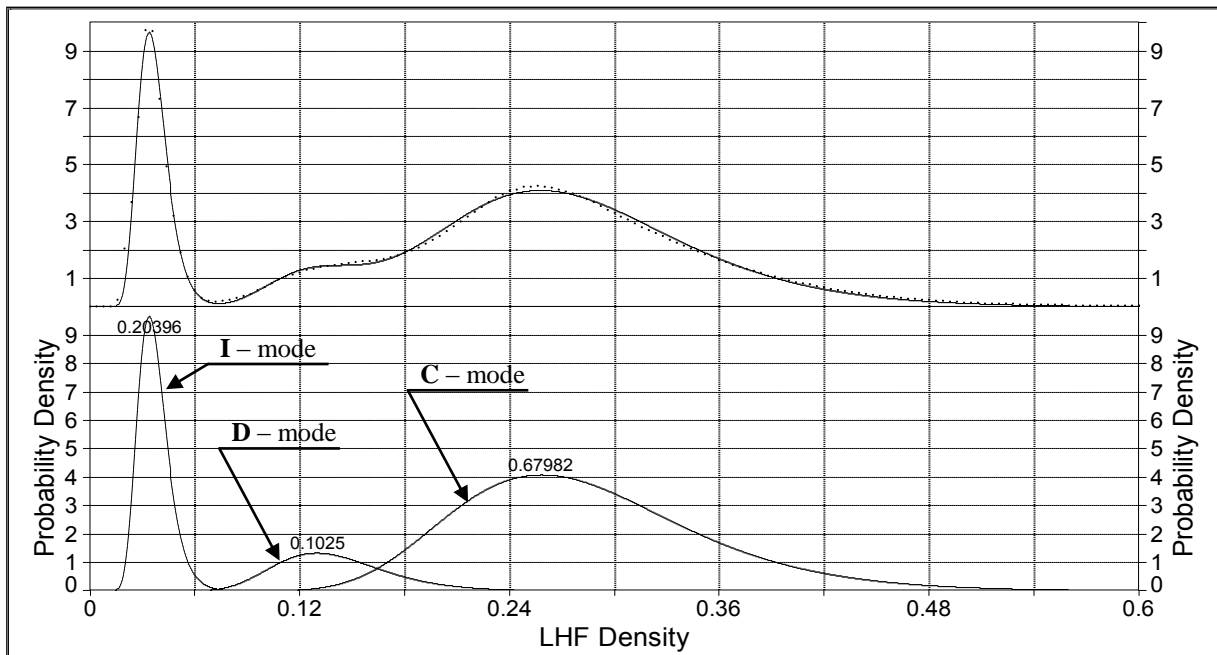


Рис. 1. Распределение плотности ЛТП в RVE с $a = 128h$, $b = 5h$, $c \approx 0,24$, $d = h$.

В верхней части точками показано исходное полимодальное распределение плотности ЛТП; в нижней части показаны выделенные логнормальные моды с указанием площади под пиком; в верхней части линией показан результат сложения отдельных мод

Как было показано нами ранее [13, 14], мода «I» формируется ЛТП, проходящими через теплоизолирующие включения. Мода «C» формируется ЛТП в тех областях КМ, где включения не препятствуют теплопереносу (невозмущенная матрица) и где формируются индуцированные теплопроводящие каналы. Мода «D» связана с участками теплопроводящей матрицы, которые слабо участвуют в теплопереносе, т.к. ЛТП вынуждены огибать теплоизолирующие включения, и появляются области матрицы, в которые ЛТП не заходят. В противоположность индуцированным каналам, эти области теплопроводящей матрицы мы назвали «темной матрицей». Таким образом, в двухкомпонентном композитном материале формируются 3 характерных области теплопереноса, поэтому распределение плотности ЛТП оказывается трехмодовым.

Распределение плотности ЛТП в каждом испытании анализировалось нами во взаимосвязи с картой плотности ЛТП. Площадь под каждым пиком плотности распределения показывает долю ЛТП, составляющих определенную моду. Как показало изучение карт плотности ЛТП (пример такой карты показан на рис. 2), отличие площади моды «I» от величины концентрации включений объясняется тем, что ЛТП, проходящие через углы квадратных включений, обладают более высокими значениями плотности и не участвуют в формировании этой моды.

В ходе настоящего исследования нами обнаружено, что при определенных параметрах размещения включений статистическое распределение плотности ЛТП может иметь и более сложный вид. На рис. 3 приведено распределение плотности ЛТП в RVE со случайно расположенными включениями размера $b = 6h$ в количестве $N = 89$ ($c \approx 0,20$) при минимальной дистанции $d = 3h$. Распределение плотности ЛТП в случаях невысокой концентрации включений ($c < 0,25$) и отношении $d/b \sim 0,5$ имеет выраженные 4 моды.

Для идентификации мод в этом случае также потребовался их анализ во взаимосвязи с картой плотности ЛТП. На рис. 4 приведен фрагмент карты плотности ЛТП для одного испытания из обсуждаемой серии. Области с ЛТП различной плотности закрашены разными цветами. Карта показывает, что произошло расщепление моды темной матрицы на 2 моды: «ближняя» по отношению к включению темная матрица (за ней сохранено обозначение моды «D») и «дальняя» темная матрица, обозначенная как мода «G» – «серая».

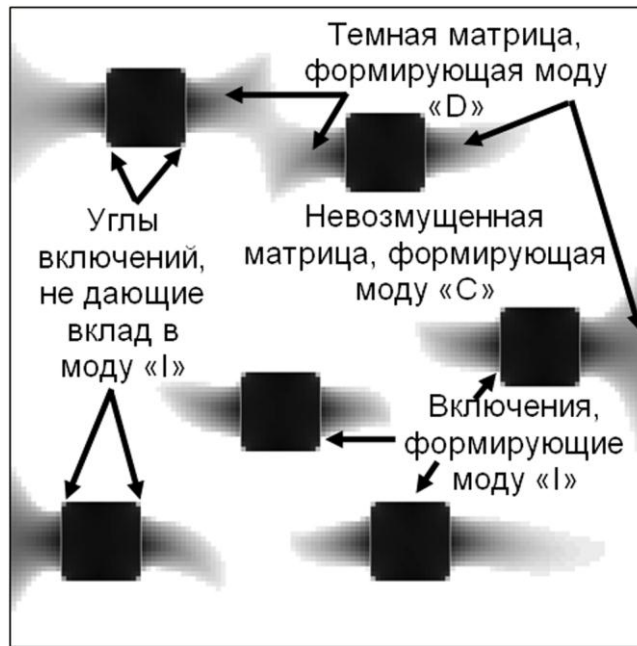


Рис. 2. Фрагмент карты плотности ЛТП в RVE; на карте обозначены области КМ, дающие вклад в различные моды распределения плотности ЛТП

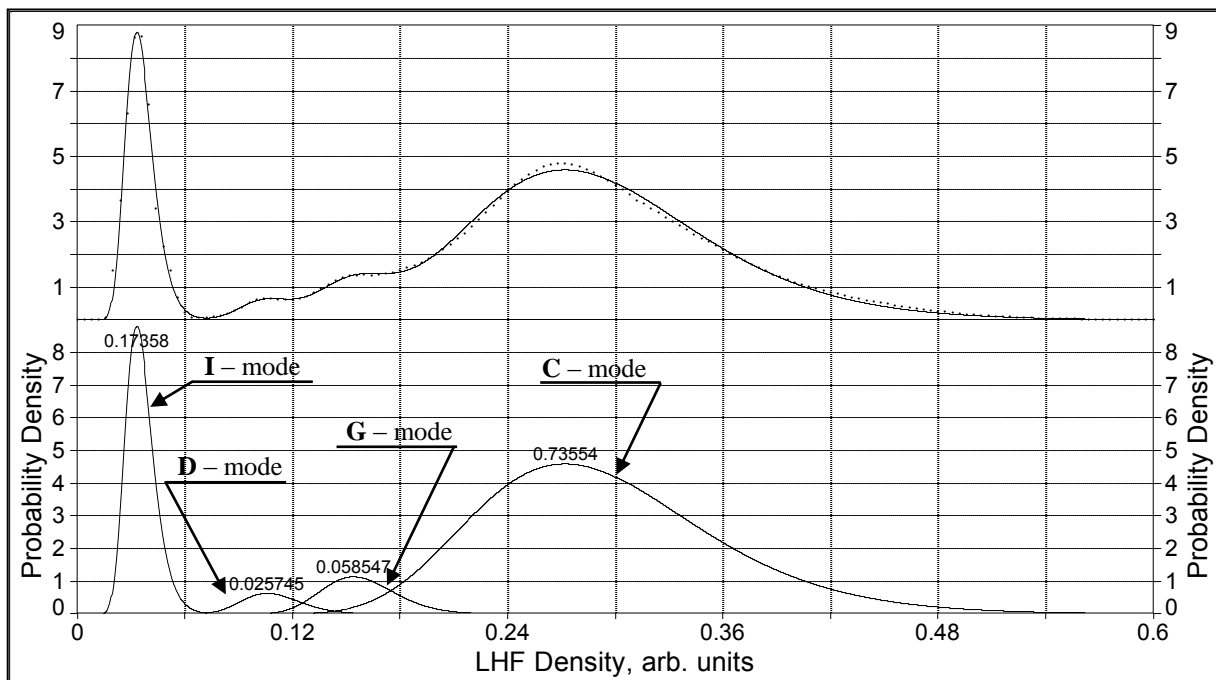


Рис. 3. Распределение плотности ЛТП в RVE с $a = 128h$, $b = 6h$, $c \approx 0,20$, $d = 3h$.

В верхней части точками показано исходное полимодальное распределение плотности ЛТП; в нижней части показаны выделенные логнормальные моды с указанием площади под пиком; в верхней части линией показан результат сложения отдельных мод

Интересно отметить, что расщепление «D»-моды распределения происходит одновременно с изменением характера концентрационной зависимости положения пика «C»-моды. На рис. 5 показаны зависимости положения пика «C»-моды от концентрации включений для различных минимальных дистанций между включениями размером $6h$. Видно, что при $d = 3$ характер концентрационной зависимости положения пика этой моды становится возрастающим.

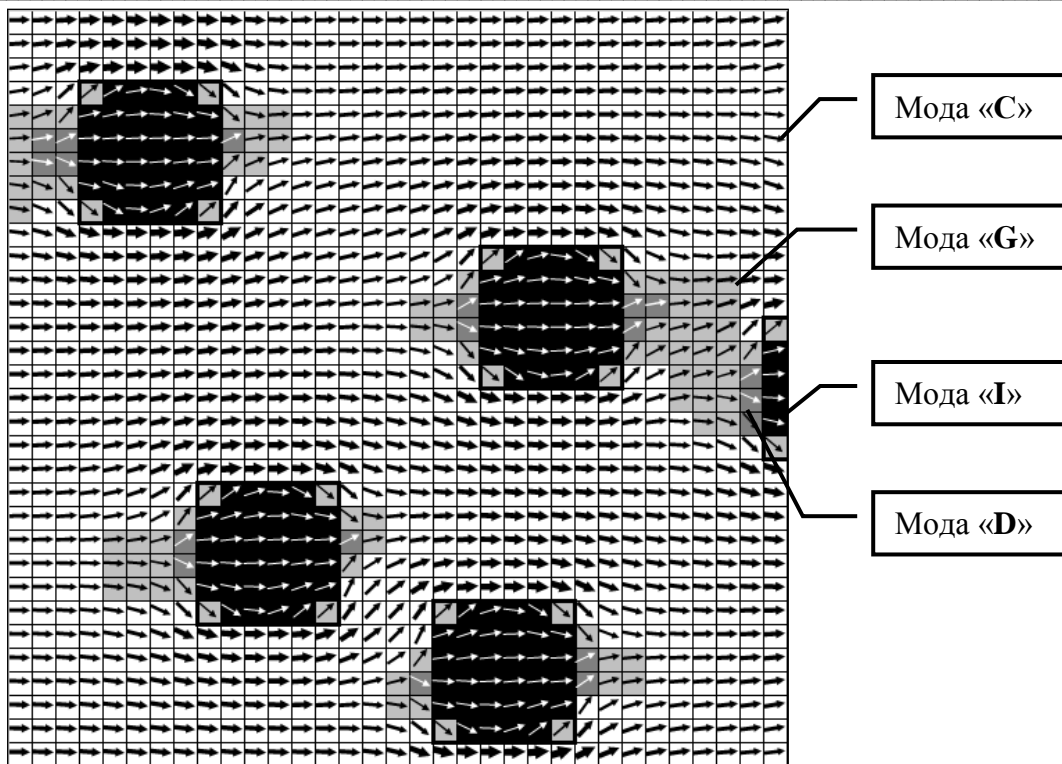


Рис.4. Фрагмент каты ЛТП в RVE с $a = 128h$, $b = 6h$, $c \approx 0,20$, $d = 3h$;
на карте цветами обозначены: черный – область с ЛТП моды «I»,
серый – область с ЛТП моды «D», светло-серый – область с ЛТП моды «G»,
белый – область с ЛТП моды «C»; стрелками показаны направления ЛТП

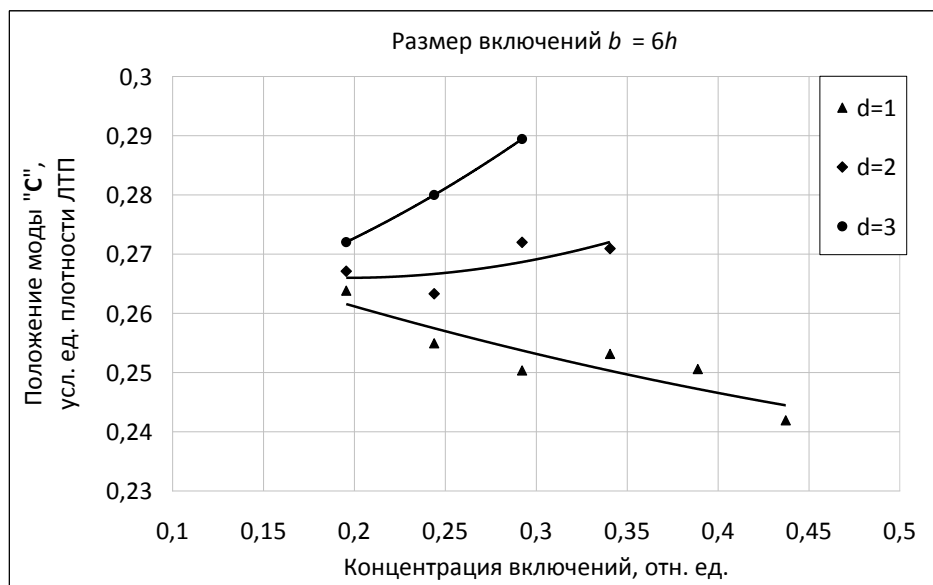


Рис. 5. Зависимости положения пика «С»-моды распределения плотности ЛТП в RVE с $a = 128h$, $b = 6h$ при различных d от концентрации включений c .

На рис. 6 приведено распределение плотности ЛТП в RVE со случайно расположенными включениями размера $b = 20h$ в количестве $N = 8$ ($c \approx 0,20$) при минимальной дистанции $d = 16h$. Распределение плотности ЛТП в случаях больших размеров включений ($b/a \sim 0,2$) и отношении $d/b \sim 0,75$ также имеет 4 визуально определяемые моды. Однако анализ с помощью программы разделения мод показывает, что данное распределение составлено из пяти логнормальных мод. Анализ карт плотности ЛТП показывает, что в данном случае имеет место расщепление и «С»-моды: на собственно моду «С», в которой

сосредоточены наиболее интенсивные ЛТП, проходящие по индуцированным каналам между теплоизолирующими включениями, и на моду «U», формируемую областями КМ с невозмущенной матрицей, которая сохраняется ввиду большого минимального расстояния между включениями.

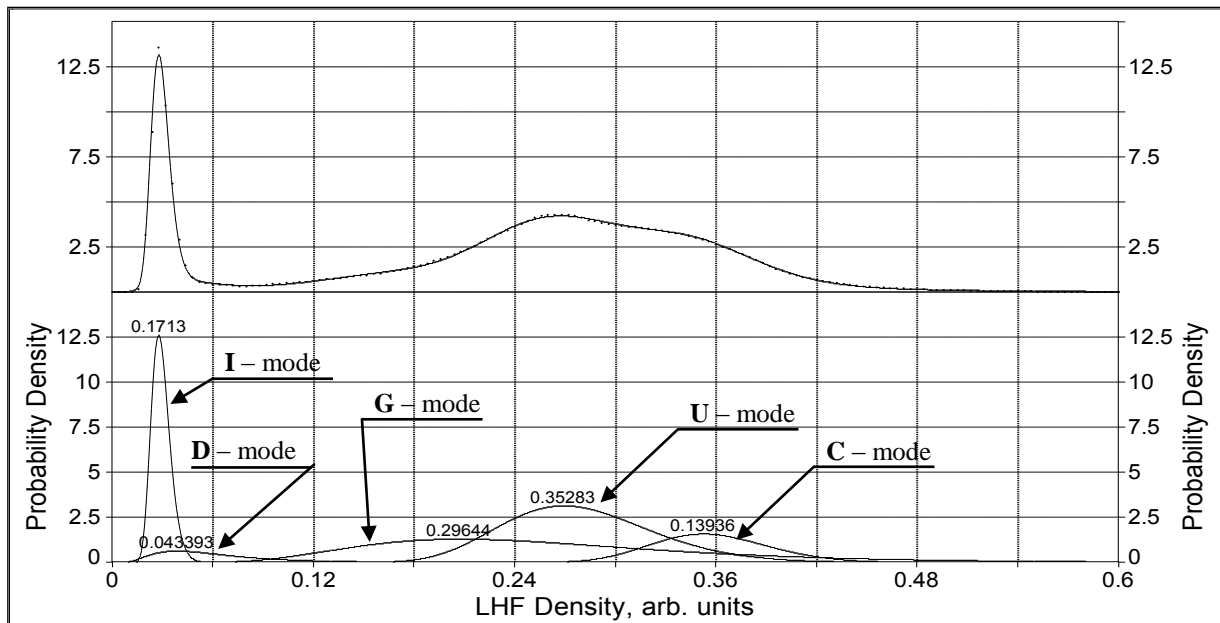


Рис. 6. Распределение плотности ЛТП в RVE с $a = 128h$, $b = 20h$, $c \approx 0,20$, $d = 16h$.

В верхней части точками показано исходное полимодальное распределение плотности ЛТП; в нижней части показаны выделенные логнормальные моды с указанием площади под пиком; в верхней части линией показан результат сложения отдельных мод

Выводы.

1. В двухкомпонентном композитном материале с теплопроводящей матрицей и теплоизолирующими включениями при протекании теплового потока формируется от 3 до 5 характерных областей, в которых приходят локальные тепловые потоки с различными статистическими характеристиками. Число этих областей определяется числом теплоизолирующих включений, их размерами и взаимным расположением.
2. Полученные результаты важны для развития статистической теории теплопроводности композитных материалов и в перспективе должны быть дополнены исследованиями статистического распределения направлений локальных тепловых потоков.
3. Формирование в матрице композитного материала слоев с различным расположением включений, в которых будут преобладать различные моды локальных тепловых потоков, дает в перспективе возможность создавать слоистые теплопроводящие и теплоизолирующие композитные материалы. В таких материалах тепловые потоки, идущие параллельно границам разделов в различных слоях, могут направляться от источников к стокам по заданным путям, обеспечивая необходимые свойства конструкции.

Литература

1. Maxwell J.C. Treatise on Electricity and Magnetism / J.C. Maxwell, Clarendon press, Oxford, vol. 1, Third edition, 1904, 506 p.
2. Karol Pietrak. A review of models for effective thermal conductivity of composite materials / Karol Pietrak, Tomasz S. Wiśniewski // Journal of Power Technologies, 2015. – Vol. 95, no.1. – P. 14–24.
3. Zarubin V.S. Two-sided estimates for thermal resistance of an inhomogeneous solid body / V.S. Zarubin, G.N. Kuvyrkin // High Temperature, 2013. – Vol. 51, no. 4. – P. 519–525.

4. Gori F. Effective thermal conductivity of composites / F. Gori, S. Corasaniti // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014. – Vol. 77. – P. 653-661.
5. D. Kapanadze. Improved algorithm for analytical solution of the heat conduction problem in doubly periodic 2D composite materials / D. Kapanadze, G. Mishuris, E. Pesetskaya // *Complex Variables and Elliptic Equations*, 2015. – Vol. 60, no. 1. – P. 1–23.
6. Пугачев О.В. Исследование теплопроводности волокнистых композитов методом Монте-Карло / О.В. Пугачев, К.Н. Яцуненко // *Наука и образование. МГТУ им Н.Э. Баумана. Электронный журнал*, 2012. – № 12. – С. 226 – 239. DOI: 10.7463/1215.0828601
7. Gusev A.A. Representative volume element size for elastic composites: a numerical study / A.A. Gusev // *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 1997. – Vol. 45. – P. 1449-1459.
8. Hui P.M. Thermal conductivity of graded composites: Numerical simulations and an effective medium approximation / P.M. Hui, X. Zhang, A.J. Markworth, D. Stroud // *Journal of Materials Science*, 1999. – Vol. 34. – P. 5497-5503.
9. Graham S. Numerical analysis of the transverse thermal conductivity of composites with imperfect interfaces / S. Graham, D. McDowell // *Journal of Heat Transfer*, 2003. – Vol. 125. – P. 389-393.
10. Fiedler T. Calculations of the Thermal Conductivity of Porous Materials / T. Fiedler, E. Pesetskaya, A. Ochsner and J. Gracio // *Materials Science Forum*, 2006. – Vol. 514-516. – P. 754–758.
11. Fiedler T. Calculation of the Effective Thermal Conductivity in Composites Using Finite Element and Monte Carlo Methods / T. Fiedler, A. Öchsner, N. Muthubandara, I.V. Belova, G.E. Murch // *Materials Science Forum*, 2007. – Vol. 553. – P. 51–56.
12. Igor Zaginaylo. Two-dimensional numerical simulation study of the effective thermal conductivity statistics for binary composite materials / Igor Zaginaylo, Yakov Maksimeniuk, Alexander Pysarenko // *International Journal of Heat and Technology*, 2017. – Vol. 35, no. 2. – P. 364-370.
13. Загинайло И.В. Статистика локальных тепловых потоков в двумерных моделях двухфазных композиционных материалов / И.В. Загинайло, А.Н. Писаренко, А.А. Брошеван // *Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов ПГАСА. – Днепр*, 2017. – Вып. 100. – С. 81-89.
- 14 Загинайло И.В. Роль индуцированных теплопроводящих каналов в формировании теплоизолирующих свойств двухкомпонентных композиционных материалов / И.В. Загинайло, Я.А. Максименюк, А.Н. Писаренко // *Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов ПГАСА. – Днепр*, 2016. – Вып. 92. – С. 56-61.

References

1. J.C. Maxwell. *Treatise on Electricity and Magnetism*. Clarendon press, Oxford, vol. 1, Third edition, 1904, 506 p.
2. Karol Pietrak and Tomasz S. Wiśniewski. A review of models for effective thermal conductivity of composite materials. *Journal of Power Technologies*, Vol. 95, no.1, pp.14–24, 2015.
3. V.S. Zarubin and G.N. Kuvyrkin. Two-sided estimates for thermal resistance of an inhomogeneous solid body. *High Temperature*, Vol. 51, no. 4, pp. 519–525, 2013.
4. F. Gori and S. Corasaniti. Effective thermal conductivity of composites. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 77, pp. 653-661, 2014.
5. D. Kapanadze, G. Mishuris and E. Pesetskaya. Improved algorithm for analytical solution of the heat conduction problem in doubly periodic 2D composite materials. *Complex Variables and Elliptic Equations*, Vol. 60, no. 1, pp. 1–23, 2015. DOI:10.1080/17476933.2013.876418.
6. Pugachev O.V. and Yatsunencko K. N. Issledovanie teploprovodnosti voloknistyh kompozitov metodom Monte-Karlo [Research of Fiber Composite Heat Conductivity by Monte-Carlo Method]. *Science and Education of the Bauman MSTU*, no. 12, pp. 226–239, 2012. DOI: 10.7463/1215.0828601.

7. Gusev A.A. Representative volume element size for elastic composites: a numerical study. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 45, pp. 1449–1459, 1997.
8. P.M. Hui, X. Zhang, A.J. Markworth and D. Stroud. Thermal conductivity of graded composites: Numerical simulations and an effective medium approximation. *Journal of Materials Science*, Vol. 34, pp. 5497–5503, 1999.
9. S. Graham D and McDowell. Numerical analysis of the transverse thermal conductivity of composites with imperfect interfaces. *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 389–393, 2003.
10. Fiedler T., Pesetskaya E., Ochsner A. and Gracio J. Calculations of the Thermal Conductivity of Porous Materials. *Materials Science Forum*, Vol. 514 – 516, pp. 754–758, 2006.
11. Fiedler T., Öchsner A., Muthubandara N., Belova I.V. and Murch G.E. Calculation of the Effective Thermal Conductivity in Composites Using Finite Element and Monte Carlo Methods. *Materials Science Forum*, Vol. 553, pp. 51–56, 2007.
12. Igor Zaginaylo, Yakov Maksimeniuk and Alexander Pysarenko. Two-dimensional numerical simulation study of the effective thermal conductivity statistics for binary composite materials. *International Journal of Heat and Technology*, Vol. 35, No. 2, pp. 364–370, 2017.
13. Zaginaylo I.V., Maksimeniuk Ya.A., Pysarenko A.N. Rol indutsirovannyh teploprovodyashchih kanalov v formirovanii teploizoliruyushchih svoistv dvuhkomponentnyh kompozitsionnyh materialov [Induced thermally conductive channel influence on the formation of the insulating properties of binary composite materials]. *Construction, Material Science, Mechanical Engineering. Scientific works collection, Issue 92, Series: Energy, ecology, computer technologies in building*, pp. 56-61, 2016.
14. Zaginaylo I.V., Pysarenko A.N., Broshevan A.A. Statistika lokalnyh teplovyh potokov v dvumernykh modelyakh dvuhfaznykh kompozitsionnykh materialov [Local heat fluxes statistics in two-dimensional models of two-phase composite materials]. *Construction, Material Science, Mechanical Engineering. Scientific works collection, Issue 100, Series: Energy, ecology, computer technologies in building*, pp. 81-89, 2017.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЩІЛЬНОСТІ ЛОКАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ В ДВОКОМПОНЕНТНИХ КОМПОЗИТАХ

Максименюк Я.О., к.т.н., доцент,
yakovmaksimenuk@gmail.com; ORCID: 0000-0003-2434-9904

Загинайло І.В., к.ф.-м.н., доцент,
ORCID: 0000-0002-4022-9120

Щеткина Г.С., студент,
Козаченко К.О., студент,

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація. Досліджувалися статистичні розподіли щільності локальних теплових потоків, отримані в результаті численного моделювання процесу теплопереносу в двовимірних моделях двокомпонентних композитних матеріалів з випадковим розміщенням теплоізолюючих включень. Параметри розміщення включень впливають на шляхи протікання локальних теплових потоків в композитному матеріалі і, як наслідок, на його ефективну теплопровідність. Предметом вивчення був вплив розмірів включень і щільності їх упаковки, представленої мінімальною дистанцією між ними, на характеристики мод розподілу щільності локальних теплових потоків.

Для формування двовимірних моделей композитного матеріалу використовувався метод Монте-Карло. Розрахунок щільності локальних теплових потоків було виконано шляхом численного рішення рівняння теплопереносу методом кінцевих різниць. Отримані розподіли щільності локальних теплових потоків аналізувалися у взаємозв'язку з картами розміщення включень.

Виявлено, що в залежності від концентрації включень, їх розмірів і щільності упаковки

в статистичному розподілі щільності локальних теплових потоків може визначатися від 3 до 5 мод, пов'язаних з проходженням теплових потоків різними характерними областями двокомпонентного композиту. Ідентифіковано області матеріалу, в яких протікають локальні теплові потоки, що належать різним модам розподілу. Показано, що число мод статистичного розподілу щільності локальних теплових потоків для різних значень параметрів розміщення включень обумовлено впливом одних включень на умови проходження локальних теплових потоків поблизу інших включень при певній щільності їх упаковки.

Отримані результати важливі для розвитку статистичної теорії теплопровідності композитних матеріалів і в перспективі повинні бути доповнені дослідженням статистичного розподілу напрямків локальних теплових потоків.

Ключові слова: численне моделювання, статистичне розподілення, композиційний матеріал; локальні теплові потоки; ефективна теплопровідність;

LOCAL HEAT FLOWS DENSITY NUMERICAL SIMULATION IN TWO-PHASE COMPOSITE MATERIALS

Maksimeniuk Ya.A., PhD., Associate Professor,
yakovmaksimenuk@gmail.com; ORCID: 0000-0003-2434-9904

Zaginaylo I.V., PhD., Associated Professor,
ORCID: 0000-0002-4022-9120

Shchyotkina A.S., student,

Kozachenko K.A., student,

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The local heat flows density statistical distributions obtained as a result of heat transfer process numerical modeling in two-dimensional models of two-component composite materials with occasional placement of heat-insulating inclusions were studied. The inclusions placement parameters influence the way of local heat flows in the composite material and, as a consequence, its effective thermal conductivity. The subject of the study was the influence of the inclusions size and the packing density represented by the minimum distance between them on the local heat flows density distribution modes characteristics.

To form two-dimensional models of a composite material, the Monte Carlo method was used. Calculation of local heat flows density was carried out by numerical solution of the heat transfer equation by the finite difference method. The obtained local heat flows density distributions were analyzed in connection with inclusions placement maps.

It was found that depending on the concentration of inclusions, their dimensions and packing density, in local heat flows density statistical distributions from 3 to 5 modes associated with the passage of heat flows through different characteristic areas of a two-component composite can be determined. Material areas in which local heat flows occur, belonging to different distribution modes, were identified. It is shown that modes number of the local heat flows density statistical distribution for different values of inclusions placement parameters is conditioned by the influence of some inclusions on the conditions for the passage of local heat flows nearby other inclusions at certain packing densities.

The obtained results are important for the development of the statistical theory of composite materials thermal conductivity and should be supplemented by a study of local heat flows directions statistical distribution in the future.

Keywords: numerical simulation, statistical distribution, composite material, local heat flow, effective thermal conductivity.

Стаття надійшла 20.07.2018