

---

---

# ФИЗИКА

---

---

Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, N 1. С. 5–9.  
Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University. 2026. Vol. 16, no. 1. P. 5–9.

## ФИЗИКА

Научная статья  
УДК 620.22

### Исследование теплопроводности полимерных композитов на основе фенилона в рамках фрактального анализа

Владимир Закиевич Алоев<sup>1</sup>, Заира Муссавна Жирикова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, Нальчик, Россия

<sup>1</sup> aloev56@list.ru

<sup>2</sup> zaira.dumaeva@mail.ru

**Аннотация.** Показано, что коэффициент теплопроводности углепластиков на основе фенилона может быть описан в рамках фрактального анализа. В зависимости от размерности каркаса (системы) волокон наполнителя, такое описание можно получить применением двух предельных случаев: случайной сетки резисторов (ССР) и случайной сверхпроводящей сетки (ССС). Получено, что в случае сверхпроводящей сетки коэффициент теплопроводности контролируется фрактальной размерностью блуждания или числом доступных для этого процесса мест каркаса волокон наполнителя.

**Ключевые слова:** теплопроводность, композит, фрактальный анализ, углепластик, фрактальная размерность, коэффициент теплопроводности, фактор ориентации, случайная сетка резисторов, случайная сверхпроводящая сетка

**Для цитирования:** Алоев В.З., Жирикова З.М. Исследование теплопроводности полимерных композитов на основе фенилона в рамках фрактального анализа // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 5–9.

## PHYSICS

Original article

### Study of thermal conductivity of phenylone-based polymer composites within the framework of fractal analysis

Vladimir Z. Aloev<sup>1</sup>, Zaira M. Zhirikova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Kabardino-Balkarian State Agricultural University, Nal'chik, Russia

<sup>1</sup> aloev56@list.ru

<sup>2</sup> zaira.dumaeva@mail.ru

**Abstract.** It has been shown that the thermal conductivity of phenylone-based carbon fiber can be described within the framework of fractal analysis. Depending on the size of the core (system) of filler fibers, such a description can be obtained by applying two limiting cases: a case-specific network of resistors and a random superconducting network. It is obtained that in the case of a superconducting network, the thermal conductivity coefficient is controlled by the fractal dimension of the walk or the number of available places for this process of the core of the filler fibers.

**Keywords:** thermal conductivity, composite, fractal analysis, ug-leplastic, fractal dimension, thermal conductivity coefficient, orientation factor, random resistor grid, random superconducting grid

**For citation:** Alov V.Z., Zhirikova Z.M. Study of the thermal conductivity of phenylon-based polymer composites using fractal analysis // Proceedings the Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):5–9.

### **Введение**

Для описания теплопроводности полимерных композитов часто используется подход, основанный на допущении, что эти материалы можно рассматривать как систему сопротивлений. Такой подход является универсальным для любого явления проводимости [1]. При теоретическом анализе явлений проводимости в композиционных твердых средах общим и неизбежным является допущение полного геометрического порядка в распределении фаз. Предполагается, что волокна распределены в полимерной матрице равномерно на одинаковом расстоянии и параллельно друг другу. Однако реальные композитные материалы, полученные в результате выполнения целого комплекса технологических операций, имеют структуру, значительно отличающуюся от идеальной модели. Кроме того, недостаточные знания свойств самих волокнистых наполнителей и матрицы, в свою очередь, накладывают дополнительные ограничения на возможности применения теоретических уравнений для прогнозирования теплофизических свойств композиционных материалов [1]. Поэтому для описания теплопроводности композитов часто используют коэффициент объемной проводимости системы волокон, который учитывает не только физические свойства, но и геометрические особенности композиционного материала. Авторы [2] использовали рассмотренный подход для описания теплопроводности углепластиков на основе фенилона. Однако, рассмотренный выше метод описания теплопроводности композитов не является единственным.

В связи с этим, цель данной работы – применение фрактального анализа для описания теплопроводности полимерных композитов на основе фенилона.

### **Методы и объекты исследования**

В качестве полимерного связующего использован ароматический полиамид-фенилон С-2 (ТУ 6-05-226-72), имеющий температуру стеклования 553 К, в виде мелкодисперсного порошка с насыпной плотностью 330 кг/м<sup>3</sup> [3]. В качестве наполнителя использовалось высокомодульное углеродное волокно (УВ) марки «Урал 15» (диаметр 7–9 мкм, длина 3 мм, плотность 1320 кг/м<sup>3</sup>). Массовое содержание УВ в исследуемых образцах составляло 15 %, что соответствует объемному наполнению  $\varphi_n \approx 0,115$ .

Образцы для испытаний готовили «сухим» способом, включающим смешение компонентов во вращающемся электромагнитном поле. Для этого в реактор загружали порошкообразный полимер, УВ и неравновесные ферромагнитные частицы длиной 40 мкм. Далее реактор помещали в расточку генератора электромагнитного аппарата. Под воздействием вращающегося электромагнитного поля ферромагнитные частицы начинают вращаться, сталкиваясь между собой, в результате чего УВ равномерно (хаотически) распределяются в полимерной матрице. В результате соударений частицы истираются, и продукты износа попадают в композицию. Для удаления ферромагнитных частиц после смешивания использовали два метода: магнитной и механической сепарации [4].

Определение коэффициента теплопроводности композитов производилось на измерителе ИТ-λ-400 в соответствии с ГОСТ 23630.2-79. Для измерений использовались образцы в форме диска диаметром 15±0,3 мм, высотой 3±0,1 мм. Контактная поверхность исследуемого образца была ровной, гладкой, без раковин, трещин и других дефектов. Торцевые поверхности были перпендикулярны его продольной оси.

### **Результаты исследования**

В рамках фрактального анализа для описания системы частиц (агрегатов частиц) наполнителя используется фрактальная размерность каркаса частиц наполнителя  $D_k$ , которая характеризует плотность заполнения пространства полимерной матрицы частицами или волокнами наполнителя [4, 5]. Фрактальная модель полимерных композитов представляется в виде случайной смеси компонентов **A** и **B**, в которой имеются хорошо и плохо проводящие участки [6]. Эта модель полностью соответствует полимерным композитам, у которых коэффициенты теплопроводности углеродных волокон и полимерной матрицы могут различаться на три порядка [1]. Особого внимания заслуживают два предельных случая этой задачи [5]:

1. Случайная сетка резисторов (ССР) или предел «муравья». В этом случае предполагается, что участки, занятые хорошим проводником **A**, имеют проводимость, равную единице, а занятые плохим проводником **B** – нулевую проводимость. Коэффициент теплопроводности  $\lambda_T$  для этого случая определяется соотношением [6]

$$\lambda_T \gg L^{d_u}, \quad (1)$$

где  $L$  – размер кластера,  $d_u$  – фрактальная размерность неэкранированного периметра кластера.

2. Случайная сверхпроводящая сетка (ССС) или предел «термита». В этом случае проводимость хорошего проводника **A** равна бесконечности, плохого проводника **B** – единице. Коэффициент теплопроводности  $\lambda_T$  для этого случая определяется соотношением [6]

$$\lambda_T \gg L^{d_u - D_k}, \quad (2)$$

где  $D_k$  – фрактальная размерность каркаса волокон наполнителя.

Величина фрактальной размерности  $d_u$  неэкранированного периметра кластера определяется из уравнения [7]

$$d_u = (D_k - 1) + \frac{\alpha l - D_k \ddot{\circ}}{c \frac{d_w}{\ddot{\circ}}}, \quad (3)$$

где  $d$  – размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал (очевидно, в нашем случае  $d = 3$ ),  $d_w$  – размерность блуждения на фрактале, которую можно оценить согласно правилу Александра – Орбаха [8]:

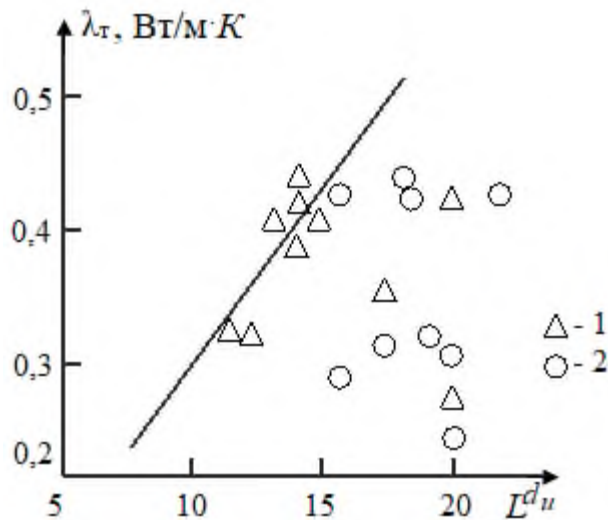
$$d_w = \frac{3}{2} D_k. \quad (4)$$

Размерность  $D_k$  каркаса частиц наполнителя для исследуемых углепластиков можно рассчитать с помощью уравнения [8]:

$$j_{\text{мф}} = \frac{1,20(D_k - 2)}{d_n}, \quad (5)$$

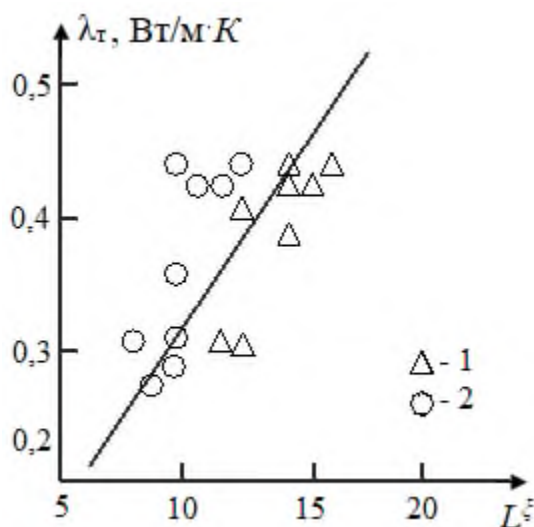
где  $\varphi_{\text{мф}}$  – относительная доля межфазных областей,  $d_n$  – фрактальная размерность поверхностных частиц (агрегатов частиц).

На *рисунке 1* приведена зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda_T$  от параметра  $L^{d_u}$ , где величина  $L$  произвольно принята равной 5 относительных единиц.



*Рисунок 1* – Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda_T$  от параметра  $L^{d_u}$  для углепластиков на основе фенилона, полученных с применением магнитной (1) и механической (2) сепараций

Как видно из *рисунка 1*, при моделировании композита с помощью случайной сверхпроводящей сетки (ССС) половина точек данных ложится на прямую, проходящую через начало координат (на *рисунке 1* не показано начало координат), т.е. согласуется с указанной моделью, а половина точек обнаруживает значительный разброс и не согласуется с моделью ССС. Это обстоятельство позволяет предположить, что вторая группа точек может быть описана с помощью случайной сетки резисторов (ССР). Действительно, приведенная на *рисунке 2* зависимость  $\lambda_T(L^\xi)$ , где  $\xi$  – показатель проводимости, равный  $d_u$  в случае ССС и  $(d_w - D_k)$  в случае ССР, подтверждает это предположение. Полученные результаты аппроксимируются одной прямой для обеих указанных моделей, которая проходит через начало координат. Определенный разброс данных для зависимости  $\lambda_T(L^\xi)$  может быть обусловлен, как минимум, двумя причинами: произвольным выбором размера кластера  $L$  и условием  $L=\text{const}$ , а также приближенной оценкой  $d_w$  согласно правилу Александра – Орбаха. Еще одной возможной причиной указанного разброса могут быть вариации теплопроводности полимерной матрицы.



*Рисунок 2* – Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda_T$  от параметра  $L^\xi$  при  $\xi = d_u$  и  $\xi = (d_w - D_k)$  для углепластиков на основе фенилона, полученных с применением магнитной (1) и механической (2) сепараций

Переход от одной модели теплопроводности композитов к другой происходит при  $D_k \approx 2,62$ : при  $D_k < 2,62$  корректна модель ССС, а при  $D_k > 2,62$  – модель ССР. Отметим, что величина  $D_k$  связана с управляющим параметром синергетической структуры углепластиков – фактором ориентации волокон  $\eta$  соотношением [9]

$$h = 0,506(D_k - 2). \quad (6)$$

Таким образом, из соотношения (6) следует, что модель ССС корректна для значений фактора ориентации волокон  $\eta < 0,313$ , а модель ССР – для  $\eta > 0,313$  [10].

Рассмотрим физические предпосылки наблюдаемого перехода от модели ССС к ССР. В предельном случае теплоперенос, обусловленной ССС не имеет геометрических ограничений и может быть реализован как в полимерной матрице, так и в каркасе (системе) волокон. Поэтому в этом случае величина коэффициента теплопроводности  $\lambda_T$  контролируется фрактальной размерностью блуждений  $d_u$  или числом доступных для этого процесса мест каркаса волокон наполнителя [7]. В случае ССР теплоперенос в областях с нулевой проводимостью, т. е. в полимерной матрице, невозможен и величина  $\lambda_T$  контролируется размерностью  $D_k$ , т. е. размерностью каркаса волокон. На *рисунке 3* приведена зависимость  $\lambda_T(D_k)$ , которая распадается на два линейных участка, границей которых является размерность  $D_k \approx 2,62$  (вертикальная штриховая линия на *рисунке 3*). Для  $D_k < 2,62$  (предел ССС) зависимость  $\lambda_T(D_k)$  аппроксимируется соотношением [10]

$$l_T = 0,90(D_k - 2), \quad (7)$$

а для  $D_k > 2,62$  (предел ССР) аппроксимация зависимости  $\lambda_T(D_k)$  имеет вид [10]

$$l_T = 0,51(D_k - 2) \quad (8)$$

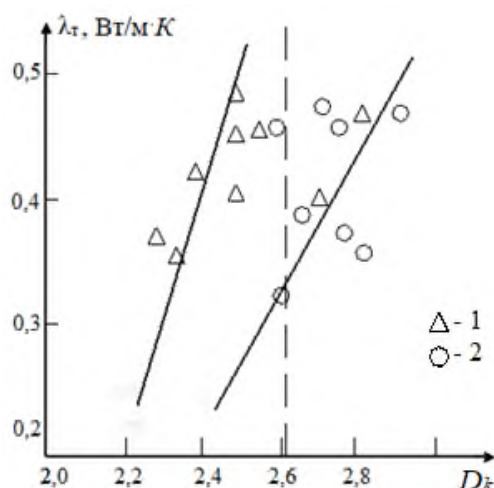


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda_t$  от фрактальной размерности каркаса (системы) волокон наполнителя  $D_k$  для углепластиков на основе фенилона, полученных с применением магнитной (1) и механической (2) сепарации. Вертикальная штриховая линия указывает величину  $D_k$ , разграничивающую предельные случаи ССС и ССР

Следовательно, в пределе ССС наблюдается более быстрый рост по мере увеличения  $D_k$  чем в пределе ССР. Такой вывод непосредственно следует из сравнения соотношений (1) и (2), поскольку для рассматриваемых углепластиков  $d_u > (d_w - D_k)$  [10].

### Выводы

Таким образом, результаты работы показали, что теплопроводность углепластиков на основе фенилона может быть описана в рамках фрактального анализа. Получено, что в зависимости от размерности каркаса (системы) волокон наполнителя описание модели может быть осуществлено в рамках двух предельных случаев: случайной сетки резисторов (ССР) и случайной сверхпроводящей сетки (ССС).

### Библиография

1. Зиблэнд Х. Тепло- и электропроводность полимерных композиционных материалов // Промышленные полимерные композиционные материалы / ред. М. Ричардсон. М.: Химия, 1980. С. 284–319.
2. Козлов Г.В., Буря А.И., Овчаренко Е.Н. Теплопроводность углепластиков на основе фенилона // Известия КБНЦ РАН. 2006. № 1. С. 137–141.
3. Kozlov G.V., Zaikov G.E., Burya A.I., Dolbin I.V. Fractal model of the heat conductivity for carbon fiber-reinforced aromatic polyamide // Journal Of Applied Polymer Science. 2006. V. 100, N 5. P. 3828–3831.
4. Козлов Г.В., Микитаев А.К. Новый подход к фрактальным размерностям структуры полимерных дисперсно-наполненных композитов // Механика композиционных материалов и конструкций. 1996. Т. 2, № 3-4. С. 144–154.
5. Новиков В.У., Козлов Г.В. Фрактальная параметризация структуры наполненных полимеров // Механика композитных материалов. 1999. Т. 35, № 3. С. 269–290.
6. Стенли Х.В. Динамические свойства фрактальных структур // Фракталы в физике / ред. Л. Пьетронеро, Э. Тозатти. М.: Мир. 1988. С. 463–477.
7. Meakin P., Coniglio A., Stanley H.E., Witten T.A. Scaling properties for the surfaces of fractal and nonfractal objects: an infinite hierarchy of critical exponents // Phys. Rev. A. 1986. V. 34, N 4. P. 3325–3340.
8. Alexander S., Orbach R. J. Density of states on fractals: «fractons» // Journal de Physique Lettres. Paris. 1982. V. 43, N 17. P. L625–L631
9. Буря А.И., Козлов Г.В., Рула И.В. Обобщенная методика оценки содержания межфазных областей в полимерных композитах // Новости науки Приднепровья. 2004. № 3. С. 8–11.