

Научная статья

УДК 620.22

DOI: 10.55196/2411-3492-2026-3-53-101-108

Перколяционные модели для описания теплопроводности полимерных конструкционных материалов

Заира Муссавна Жирикова^{✉1}, Владимир Закиевич Алоев²Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030^{✉1}zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>²aloev56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133>

Аннотация. Статья посвящена проблеме теплопроводности конструкционных полимерных материалов, используемых в узлах трения сельскохозяйственных машин. В процессе эксплуатации рабочие органы и подвижные соединения испытывают чрезмерный нагрев. В результате этого в их объеме могут развиваться деструкционные процессы, приводящие к выходу из строя механизмов и конструкций, поэтому без количественного описания теплопроводности полимерных композитов невозможно их практическое применение. В данной работе используется перколяционная модель. В рамках теории перколяции предложены модели случайной сверхпроводящей сетки (ССС) и случайной сетки резисторов (ССР). Показано, что первая модель применима к описанию теплопроводности углепластиков на основе фенилона ниже порога перколяции, а вторая – выше порога перколяции. В обоих случаях коэффициент теплопроводности достаточно хорошо согласуется с теоретической оценкой, т.е. наблюдается их линейная корреляция. Полученные результаты позволяют выяснить физическую природу механизмов, теплопереноса, соответствующих моделям СССР и ССР. В случае СССР теплоперенос через волокна реализуется мгновенно, и поэтому величина теплопроводности лимитируется теплопереносом через участки полимерной матрицы, разделяющие волокна. В модели ССР теплоперенос реализуется через места контакта волокон.

Ключевые слова: теплопроводность, теория перколяции, фенилон, углеродные волокна, модуль упругости, фрактальные размерность

Для цитирования: Жирикова З. М., Алоев В. З. Перколяционные модели для описания теплопроводности полимерных конструкционных материалов // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2026. № 3(53). С. 101–108. DOI: 10.55196/2411-3492-2026-3-53-101-108

Original article

Percolation models for describing the thermal conductivity of polymer structural materials

Zaira M. Zhirikova^{✉1}, Vladimir Z. Aloev²Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue,
Nalchik, Russia, 360030^{✉1}zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>²aloev56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133>

Abstract. The article is devoted to the problem of thermal conductivity of structural polymer materials used in friction units of agricultural machinery. During operation, the working bodies and movable joints experience excessive heat. As a result, destructive processes can develop in their volume, leading to the failure of mechanisms and structures. Therefore, without a quantitative description of the thermal conductivity of polymer composites, their practical application is impossible. For this purpose, the percolation model is used in this work. Within the framework of percolation theory, models of a random superconducting grid (RSG) and a random grid of resistors (RGR) are proposed. It is shown that the first model is applicable to the description of thermal conductivity of carbon fiber plastics based on phenylene below the percolation threshold, and the second above the percolation threshold. It turns out that in both cases the coefficient of thermal conductivity agrees fairly well with the theoretical estimate, i.e. their linear correlation is observed. The results obtained make it possible to clarify the physical nature of the heat transfer mechanisms corresponding to the RSG and RGR models. In the case of RSC, heat transfer through the fibers is realized instantly and therefore the amount of thermal conductivity is limited by heat transfer through the sections of the polymer matrix separating the fibers. In the RGR model, heat transfer is realized through the contact points of the fibers.

Keywords: thermal conductivity, percolation theory, phenylene, carbon fibers, modulus of elasticity, fractal dimension

For citation: Zhirikova ZM, Aloev VZ. Percolation models for describing the thermal conductivity of polymer structural materials. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2026;(3):101–108. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2026-3-53-101-108

Введение. Известно, что полимерные конструкционные материалы, используемые в узлах трения сельскохозяйственных машин, обладают низкой тепло- и температуропроводностью, что вызывает опасность чрезмерного нагрева рабочих органов и подвижных соединений под действием механических нагрузок [1]. В результате этого в их объеме могут развиваться деструктивные процессы, приводящие к ухудшению механических триботехнических характеристик материалов и выходу из строя механизмов и конструкций [2]. Поэтому без данных количественного описания теплопроводности полимерных композитов невозможно их практическое применение.

В настоящее время существует большое количество моделей для описания теплопроводности полимерных композитов. Наиболее часто для этих целей используются подход, основанный на допущении, что композитные материалы можно рассматривать как систему сопротивлений [3]. Подобный подход является универсальным для любого явления проводимости. В работах [4, 5] исследована теплопроводность полимерных композитов в рамках фрактального анализа, в которых для описания системы частиц (агрегатов частиц) наполнителя используется фрактальная размерность каркаса частиц наполнителя. Подобное описание можно получить приме-

нием двух предельных случаев: случайной сетки резисторов (ССР) и случайной сверхпроводящей сетки (ССС). Каждому из указанных предельных случаев соответствует определенная модель в рамках теории перколяции. В связи с этим **целью настоящей работы** является применение теории перколяции для количественного описания теплопроводности полимерных композитов на основе фенилона.

Материалы, методы и объекты исследования. В качестве полимерного связующего использован ароматический полиамид-фенилон С-2 (ТУ 6-05-226-72), имеющий температуру стеклования 553К, в виде мелкодисперсного порошка с насыпной плотностью 330 кг/м³. Наполнителем служит высокомолекулярное углеродное волокно (УВ) марки «Урал 15», имеющее диаметр 7–9 мкм, длину 3 мм, плотность 1320 кг/м³. Массовое содержание УВ в исследуемых образцах составляло 15%, что соответствует объемному наполнению $\phi_n \approx 0,115$.

Образцы для испытаний готовили «сухим» способом, включающим смешение компонентов во вращающем электромагнитном поле. Для этого в реактор загружали порошкообразный полимер, УВ и неравновесные ферромагнитные частицы длиной 40 мм. Далее реактор помещали в расточку генератора элек-

ромагнитного 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 [6].

Определение коэффициента теплопроводности композитов производилось на измерителе ИТ-λ-400 согласно ГОСТ 23630.2-79. Для измерений использовались образцы в форме диска диаметром $15 \pm 0,3$ мм, высотой $3 \pm 0,1$ мм. Контактная поверхность исследуемого образца была ровной, гладкой, не имеющей раковин, трещин и других дефектов, а торцы были перпендикулярны к продольной оси образца.

Результаты исследования. В рамках теории перколяции авторы [7] предложили уравнение для определения модуля упругости E_k углепластиков на основе фенилона:

$$\frac{E_k}{E_m} 1 + 11\varphi_n^{1,7}, \quad (1)$$

где

E_k и E_m – модули упругости полимерного композита и матричного полимера соответственно;

φ_n – объемное содержание наполнителя.

Уравнение (1) может быть использовано для расчета эффективной объемной степени наполнителя $\varphi_n^{\text{эф}}$, которая отражает структуру системы волокон наполнителя, определяющую макроскопические свойства полимерного композита (в данном случае E_k).

В рамках теории перколяции параметр $\varphi_n^{\text{эф}}$ эквивалентен эффективной доле твердотельной компоненты ρ в случайной смеси, т. е., $\varphi_n^{\text{эф}} = \rho$. Кроме того, представляет интерес сравнение этого параметра с фрактальной размерностью каркаса частиц наполнителя D_k , которую можно определить из уравнения [8]:

$$\varphi_n^{\text{эф}} = \frac{1,20(D_k - 2)}{d_n} \quad (2)$$

где

d_n – фрактальная размерность поверхности частиц (агрегатов) наполнителя.

Корреляция структурных характеристик системы (каркаса) волокон в углепластиках на основе фенилона ρ и D_k приведена на рис. 1.

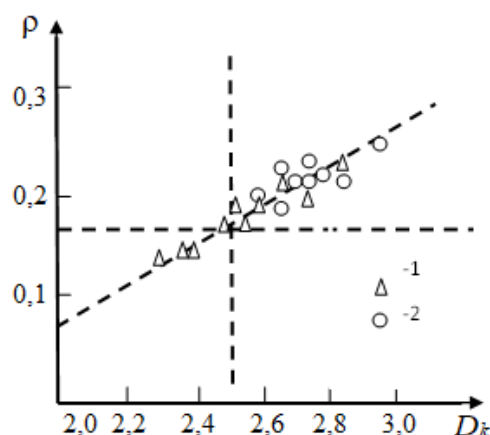


Рисунок 1. Зависимость концентрации твердотельной компоненты ρ от фрактальной размерности каркаса волокон D_k для углепластиков на основе фенилона, полученных различными способами сепарации (1 – магнитная, 2 – механическая). Горизонтальная штриховая линия указывает порог перколяции ρ_c , вертикальная – размерность кластера Виттена – Сандера

Figure 1. Dependence of the concentration of the solid-state component ρ on the fractal dimension of the D_k fiber frame for fenilon-based carbon plastics obtained by various separation methods (1 – magnetic, 2 – mechanical). The horizontal dashed line indicates the percolation threshold ρ_c , the vertical line is the dimension of the Witten – Sander cluster

Из рисунка 1 видно, что наблюдается линейный рост концентрации ρ твердотельной компоненты (наполнителя) по мере увеличения фрактальной размерности каркаса частиц наполнителя D_k . Поскольку величина D_k изменяется в пределах $2,0 \leq D_k \leq 3,0$ [4], это дает возможность оценить вариацию значений ρ в интервале $0,060 \div 0,264$. Аналитически корреляция между $\rho = \varphi_n^{\text{эф}}$ и D_k выражается уравнением [9]:

$$\varphi_n^{\text{эф}} = 0,06 + 0,204(D_k - 2). \quad (3)$$

Необходимо отметить, что порог перколяции ρ_c по схеме касающихся сфер, равный 0,16 [7], достигается при $D_k = 2,50$, т. е. когда размерность каркаса волокон становится равной размерности кластера Виттена – Сандера [10]. Значительная анизотропия волокон (среднее отношение длины волокна к ее диаметру примерно равно 300) приводит к тому,

что величина ρ в значительной степени определяется их ориентацией.

Авторы [11] рассматривали величину концентрации наполнителя ρ в направлении, параллельном оси образца. Увеличение фактора ориентации волокон η в этом направлении фактически означает повышение эффективной степени наполнения в этом направлении, а соответствующее снижение – в перпендикулярном. Подтверждение этому предположению дает график (рис. 2), где приведена зависимость $\rho(\eta)$.

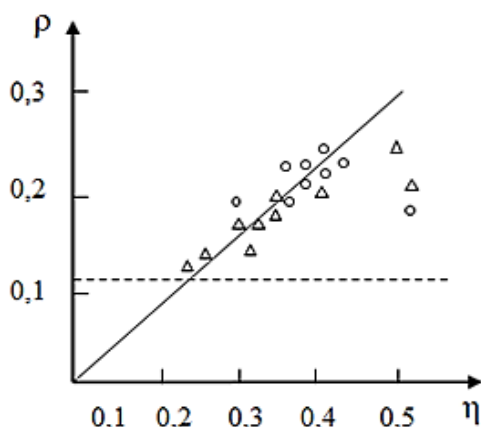


Рисунок 2. Зависимость плотности наполнителя от фактора ориентации для углепластиков на основе фенилона, полученных различными способами сепарации (1 – магнитная, 2 – механическая)

Figure 2. Dependence of filler density on orientation factor for fenilon-based carbon plastics obtained by various separation methods (1 – magnetic, 2 – mechanical)

Как можно видеть, получен линейный рост ρ по мере увеличения η . Кроме того, график (рис. 2) показывает, что при номинальном значении $\rho = \rho_n$ уже существует определенная ориентация волокон ($\eta \approx 0,15$).

В работе [12] показано, что теплопроводность λ_T в рамках предельного случая ССС можно описать следующим перколяционным соотношением:

$$\lambda_T \approx (\rho_c - \rho)^{-s} \quad (4)$$

для случая $\rho < \rho_c$, а в пределе ССР – соотношением:

$$\lambda_T \approx (\rho - \rho_c)^\mu \quad (5)$$

для случая $\rho > \rho_c$.

Показатели в соотношениях (4) и (5) определяются следующим образом. Величина S равна [12]:

$$S = [d_u - (d - 2)]v_n, \quad (6)$$

где

d_u – фрактальная размерность неэкранированного (доступного для теплопереноса) периметра каркаса волокон;

d – фрактальная размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал;

v_n – перколяционный индекс, равный 0,88.

Очевидно, в рассматриваемом случае $d=3$ размерность d_u определяется согласно уравнению [13]:

$$d_u = (D_k - 1) + \left(\frac{d - D_k}{d_w} \right), \quad (7)$$

где

d_w – размерность блуждания на фрактале, которую можно определить по правилу Александра – Орбаха согласно уравнению [13]:

$$d_w = \frac{3D_k}{2}. \quad (8)$$

Существует еще один вариант оценки d_w [12]:

$$d_w = d - d_u. \quad (9)$$

Показатель степени μ в уравнении (5) определяется согласно следующему уравнению [12]:

$$\mu = [(d_w - D_k) - (d - 2)]v_n. \quad (10)$$

Сравнение экспериментальных λ_T и теоретических значений коэффициента теплопроводности λ_T^T , рассчитанных по уравнениям (4) и (5) для моделей ССС и ССР, приведены на рисунке 3.

В обоих случаях величина λ_T достаточно хорошо согласуется с теоретической оценкой согласно указанным соотношениям, т.е., наблюдается линейная корреляция, проходящая через начало координат.

Чтобы рассчитать величины λ_T^T в тех же единицах, в которых были определены экспериментальные значения λ_T , были получены постоянные коэффициенты для соотношений (4) и (5), равные соответственно 0,25 и 3,42 Вт/м·К.

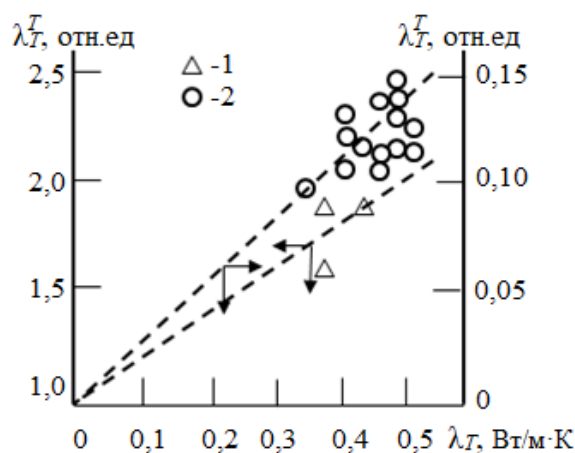


Рисунок 3. Сравнение экспериментальных λ_T и рассчитанных согласно соотношениям (4) и (5) λ_T^T величин коэффициента теплопроводности для углепластиков на основе фенолона, полученных различными способами сепарации (1 – магнитная, 2 – механическая)

Figure 3. Comparison of experimental λ_T and the values of the thermal conductivity coefficient calculated according to correlations (4) and (5) λ_T^T for carbon fiber plastics based on fenilon obtained by various separation methods (1 – magnetic, 2 – mechanical)

Приведенное на рисунке 4 сравнение рассчитанных таким образом величин λ_T^T и λ_T показало их хорошее соответствие – среднее

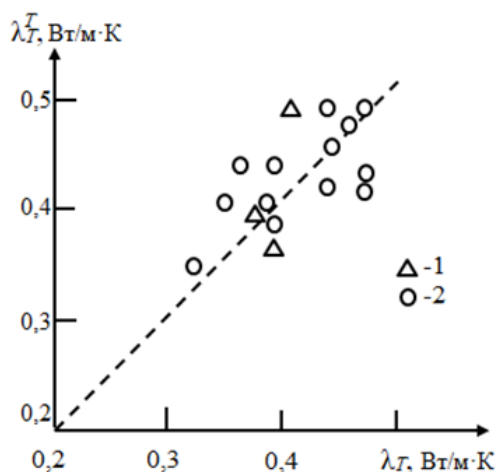


Рисунок 4. Зависимость коэффициента теплопроводности полимерного композита на основе фенолона, полученных теоретически и экспериментально различными способами сепарации (магнитная – 1 и механическая – 2)

Figure 4. Dependence of the coefficient of thermal conductivity of a polymer composite based on fenilon obtained theoretically and experimentally by various separation methods (magnetic – 1 and mechanical – 2)

расхождение менее 10%. Если учесть, что точность экспериментального определения λ_T составляет 4–8% [14], то предложенная методика может быть использована для прогнозирования коэффициента теплопроводности углепластиков.

Анализ полученных результатов позволяет выяснить физическую природу механизмов теплопереноса, соответствующих предельным случаям ССС и ССР. В случае ССС ($\rho < \rho_c$) теплоперенос через волокна наполнителя реализуется мгновенно, поскольку они полагаются сверхпроводниками, и поэтому величина λ_T лимитируется теплопереносом через участки полимерной матрицы, разделяющие волокна. Поскольку плотность заполнения полимерной матрицы волокнами определяется размерностью D_k , то чем выше D_k (и ρ), тем меньше эти участки и тем больше λ_T . В пределе ССР ($\rho > \rho_c$) теплоперенос реализуется через места контакта волокон и снова определяется величиной D_k , поскольку из уравнения (7) следует увеличение d_u по мере роста D_k . На рис. 5 приведена зависимость λ_T (ρ) для рассматриваемых углепластиков. Как можно видеть, в общем случае величина λ_T в модели ССР выше, чем в модели ССС, но у порога перколяции ($\rho = \rho_c = 0,16$) эти значения примерно одинаковы. Аналогичный вид будет иметь зависимость λ_T (D_k) в силу линейной корреляции между ρ и D_k (рис. 1).

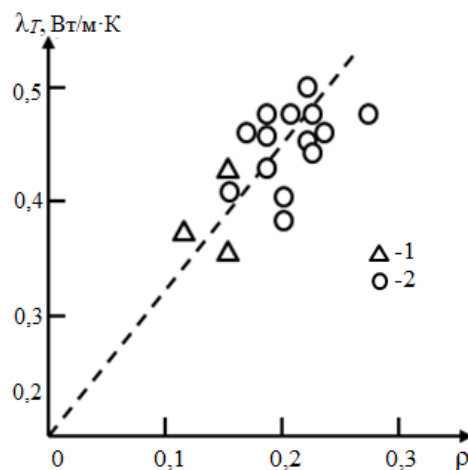


Рисунок 5. Влияние плотности наполнителя ρ на коэффициент теплопроводности λ_T полимерного композита на основе фенолона полученных различными способами смешения

Figure 5. Effect of filler density on the thermal conductivity coefficient of a polymer composite based on fenilon obtained by various displacement methods

Выводы. Полученные в работе результаты показали, что эффективная степень наполнения, эквивалентная концентрации твердой компоненты в теории перколяции, варьируется при одинаковом номинальном содержании наполнителя в зависимости от

условий приготовления композита. Перколяционная модель в обоих предельных случаях ССС и ССР может быть использована для описания и прогнозирования коэффициента теплопроводности углепластиков.

Список литературы

1. Фатхуллин А. О возможности применения полимерных композиционных материалов в сельскохозяйственном машиностроении // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2016. № 2. С. 21–32. EDN: VVILFX
2. Трибологические характеристики органопластиков на основе фенилона / А. И. Буря, О. А. Набережная, В. И. Теренин, А. М. В. Томина // Problems of friction and wear. 2015. № 3. С. 51–55.
3. Жирикова З. М., Алоев В. З. Влияние углеродных волокон на коэффициент теплопроводности полимерных композитов конструкционного назначения // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2025. № 3(49). С. 112–119. DOI: 10.55196/2411-3492-2025-3-49-112-118. EDN: UHNATQ
4. 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. EDN: CFEUOQ
5. Козлов Г. В., Яновский Ю. Г., Карнет Ю. Н. Структура и свойства дисперсно-наполненных композитов: фрактальный анализ. Москва: Альянстрасатом, 2008. 363 с. ISBN: 978-5-9900706-4-6. EDN: QJVOQN
6. Козлов Г. В., Буря А. И., Алоев В. З., Яновский Ю. Г. Структурный аспект межфазной адгезии в углепластиках // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 2. С. 35–38. EDN: ILFYCT
7. Козлов Г. В., Долбин И. В. Перколяционные модели для описания степени усиления модуля упругости высоконаполненных нанокомпозитов полиуретан/графен // Прикладная физика. 2017. № 3. С. 96–99. EDN: YTYNYZ
8. Буря А. И., Козлов Г. В., Рула И. В. Обобщенная методика оценки содержания межфазных областей в полимерных композитах // Новости науки Преднепровья. 2004. № 3. С. 8–11.
9. Kozlov G.V., Burya A.I., Zaikov G.E. An efficiency of polymer composites filling by short fibres. In book: Molecular and High Molecular Chemistry: Theory and Practice. 2006. Pp. 131–138.
10. Sander L.M. Diffusion-limited aggregation: A kinetic critical phenomenon? Contemporary Physics. 2010. Vol. 41. No. 4. Pp. 203–218. DOI: 10.1080/001075100409698
11. Исследование теплофизических характеристик углепластиков, приготовленных во вращающемся электромагнитном поле / А. И. Буря, Г. В. Козлов, Л. Р. Вишняков, И. В. Рула // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов. Корпоративные нано- и CALS-технологии в наукоемких отраслях промышленности (ТПКММ): труды 4-й Междунар. конф. (26–29 апр., 2005, Москва). Москва, 2005. С. 67–72.
12. Буря А. И., Козлов Г. В. Синергетика и фрактальный анализ полимерных композитов, наполненных короткими волокнами. Днепропетровск: Пороги, 2008. 258 с.
13. Козлов Г. В., Алоев В. З. Теория перколяции в физико-химии полимеров. Нальчик: Полиграфсервис и Т, 2005. 148 с. ISBN 5-93680-154-3:200
14. Исследование теплофизических свойств органопластиков на основе фенилона, армированного волокном лолы / А. И. Буря, А.-М. В. Томина, Е. Н. Волнянко, В. И. Теренин // Полимерные материалы и технологии. 2018. Т. 4. № 4. С. 72–77. DOI: 10.32864/polymmattech-2018-4-4-72-77. EDN: YTQVTN

References

1. Fathullin A. On the possibility of using polymer composite materials in agricultural engineering. *Sel'skohozyajstvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2016;(2):21–32. (In Russ.). EDN: VVILFX
2. Burya AI, Naberezhnaya OA, Terenin VI, Tomina AMV. Tribological characteristics of organoplastics based on fenilon. *Problems of friction and wear*. 2015;(3):51–55. (In Russ.)

3. Zhirikova ZM, Aloev VZ. The effect of carbon fibers on the thermal conductivity coefficient of polymer composites for structural purposes. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov* 2025;(3):112–119. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2025-3-49-112-118. EDN: UHNATQ
4. Aloev VZ, Zhirikova ZM. Study of thermal conductivity of fenilon-based polymer composites within the framework of fractal analysis. *Proceeding of the Kabardino-Balkarian state university*. 2026;16(1):5–9. (In Russ.). EDN: CFEUOQ
5. Kozlov GV, Yanovsky YuG, Karnet YuN. *Struktura i svoystva dispers-no-napolnennykh kompozitov: fraktal'nyj analiz* [Structure and properties of dispersed-filled composites: fractal analysis]. Moscow: Al'yanstransatom, 2008. 363 p. ISBN: 978-5-9900706-4-6. (In Russ.). EDN: QJVOQN
6. Kozlov GV, Burya AI, Aloev VZ, Yanovskiy YuG. The structural aspect of interfacial adhesion in carbon plastics. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2005;8(2):35–38. (In Russ.). EDN: ILFYCT
7. Kozlov GV, Dolbin IV. Percolation models for describing the degree of amplification of the elastic modulus of high-filled polyurethane-praphene nanocomposites. *Prikladnaya Fizika*. 2017;(3):96–99. (In Russ.). EDN: YTYNYZ
8. Burya AI, Kozlov GV, Rula IV. Obobshchennaya metodika ocenki sodержaniya mezhfaznykh oblastej v polimernykh kompozitah. *Novosti nauki Predneprov'ya*. 2004;(3):8–11. (In Russ.)
9. Kozlov GV, Burya AI, Zaikov GE. An efficiency of polymer composites filling by short fibres. In book: *Molecular and High Molecular Chemistry: Theory and Practice*. 2006. Pp. 131–138.
10. Sander LM. Diffusion-limited aggregation: A kinetic critical phenomenon? *Contemporary Physics*. 2010;41(4):203–218. DOI: 10.1080/001075100409698
11. Burya AI, Kozlov GV, Vishnyakov LR, Rula IV. Study of thermophysical characteristics of carbon fiber reinforced plastics prepared in a rotating electromagnetic field. *Teoriya i praktika tekhnologij proizvodstva izdelij iz kompozicionnykh materialov i novykh metallicheskih splavov. Korporativnye nano- i CALS-tekhnologii v naukoemkikh otraslyah promyshlennosti» (TPKMM) (26–29 apr., 2005, Moskva): trudy 4-j Mezhdunar. konf.* [Proceedings of the 4th Int. Conf. "Theory and Practice of Manufacturing Technologies for Products from Composite Materials and New Metal Alloys. Corporate Nano- and CALS-technologies in Science-Intensive Industries" (TPKMM), April 26–29, 2005, Moscow]. Moscow. 2005. Pp. 67–72. (In Russ.)
12. Burya AI, Kozlov GV. *Sinergetika i fraktal'nyj analiz polimernykh kompozitov, napolnennykh korotkimi voloknami* [Synergetics and fractal analysis of polymer composites filled with short fibers]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2008. 258 p. (In Russ.)
13. Kozlov GV, Aloev VZ. *Teoriya perkolyacii v fiziko-himii polimerov* [Percolation theory in the physical chemistry of polymers]. Nalchik: Poligrafservis i T, 2005. 148 p. ISBN 5-93680-154-3:200. (In Russ.)
14. Burya AI, Tomina A-MV, Volnyanko EN, Terenin VI. Investigation of the thermophysical properties of organoplastics based on fenilon reinforced by lola fiber. *Polimernye materialy i tekhnologii*. 2018;4(4):72–77. (In Russ.). DOI: 10.32864/polymmattech-2018-4-4-72-77. EDN: YTQVTN

Сведения об авторах

Жирикова Заира Муссавна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 4378-8131, Scopus ID: 55558043600, Researcher ID: AAF-3690-2022

Алоев Владимир Закиевич – доктор химических наук, профессор кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 4533-8035, Scopus ID: 6505993830, Researcher ID: AAF-3822-2022

Information about the authors

Zaira M. Zhirikova – Candidate of Physic-mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 4378-8131, Scopus ID: 55558043600, Researcher ID: AAF-3690-2022

Vladimir Z. Aloeв – Doctor of Chemical Sciences, Professor of the chair of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 4533-8035, Scopus ID: 6505993830, Researcher ID: AAF-3822-2022

Авторский вклад. Все авторы принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант статьи.

Author's contribution. All authors have directly participated in the planning, execution and analysis of this study. All authors have read and approved the final version of this article.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 22.04.2026;
одобрена после рецензирования 05.05.2026;
принята к публикации 11.06.2026.*

*The article was submitted 22.04.2026;
approved after reviewing 05.05.2026;
accepted for publication 11.06.2026.*