

Научная статья

УДК 620.22

doi: 10.55196/2411-3492-2024-4-46-113-119

## Количественное описание модуля упругости полимерных композитов конструкционного назначения

Заира Муссавна Жирикова<sup>✉1</sup>, Владимир Закиевич Алоев<sup>2</sup>,  
Кантемир Владимирович Алоев<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова, проспект  
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030

<sup>3</sup>Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, улица Миклухо-Маклая, 6,  
Москва, Россия, 117198

<sup>✉1</sup>zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>

<sup>2</sup>aloev56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133>

<sup>3</sup>kantemir.aloev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0765-9790>

**Аннотация.** Интенсивное развитие современного сельскохозяйственного машиностроения требует разработки новых композиционных материалов на основе полимеров, обладающих высокими значениями эксплуатационных свойств. Улучшение эксплуатационных характеристик обеспечивается введением в полимерную матрицу упрочняющих добавок. Перспективными материалами для этих целей являются углеродные волокна. Введение углеродных волокон в полимер способствует созданию высокомолекулярного полимерного материала. В качестве матричного полимера использован фенилон, получаемый на основе ароматических полиамидов. Преимущество фенилона заключается в том, что материалы на его основе сочетают высокую тепло- и термостойкость с морозостойкостью, жесткость и прочность с хорошими антифрикционными свойствами, что обеспечивает возможность их широкого применения в сельскохозяйственном машиностроении. Исследованы механические свойства углепластиков на основе фенилона, наполненного углеродным волокном. В рамках фрактального анализа получены корреляционные зависимости между модулем упругости исследованных углепластиков и фрактальной размерностью областей локализации избыточной энергии, которая «закачивается» в полимерную матрицу. Показана возможность существенной вариации модуля упругости при постоянном содержании наполнителя за счет структурных изменений. Увеличение «закачиваемой» в полимерную матрицу энергии или степени ее «возмущения», характеризуемое повышением размерности областей локализации избыточной энергии, приводит к росту упругости, а усиление обратной связи в структуре углепластиков, означающее «перекачку» полимерного материала из одной плотноупакованной компоненты в другую, определяет снижение его величины.

**Ключевые слова:** углепластик, углеродное волокно, модуль упругости, наполнитель, фрактальная размерность, коэффициент Пуассона

**Для цитирования.** Жирикова З. М., Алоев В. З., Алоев К. В. Количественное описание модуля упругости полимерных композитов конструкционного назначения // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2024. № 4(46). С. 113–119.  
doi: 10.55196/2411-3492-2024-4-46-113-119

Original article

## Quantitative Description of the Modulus of Elasticity of Polymer Composites for Structural Purposes

Zaira M. Zhirikova<sup>✉1</sup>, Vladimir Z. Alov<sup>2</sup>, Kantemir V. Alov<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue, Nalchik,  
Russia, 360030

<sup>3</sup>Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, 6 Miklukho-Maklay Street, Moscow,  
Russia, 117198

<sup>✉1</sup>zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>

<sup>2</sup>aloev56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133>

<sup>3</sup>kantemir.aloev@mail.ru

**Abstract.** The intensive development of modern agricultural engineering requires the development of new composite materials based on polymers with high performance properties. Improved performance is provided by the introduction of strengthening additives into the polymer matrix. Carbon fibers are promising materials for these purposes. The introduction of carbon fibers into the polymer contributes to the creation of a high-molecular polymer material. Phenylene, obtained on the basis of aromatic polyamides, was used as a matrix polymer. The advantage of phenylene is that materials based on it combine high heat and heat resistance with frost resistance, rigidity and strength with good antifriction properties, which makes it possible for them to be widely used in agricultural engineering. The mechanical properties of carbon fiber reinforced plastics based on phenylene filled with carbon fiber have been studied. In the framework of fractal analysis, correlations were obtained between the modulus of elasticity of the studied carbon fiber plastics and the fractal dimension of the localization regions of excess energy, which is "pumped" into the polymer matrix. The possibility of a significant variation in the modulus of elasticity with a constant filler content due to structural changes is shown. An increase in the energy "pumped" into the polymer matrix or the degree of its "perturbation", characterized by an increase in the dimension of the areas of localization of excess energy, leads to an increase in elasticity, and an increase in feedback in the structure of carbon fiber plastics, meaning "pumping" of the polymer material from one packed component to another, determines a decrease in its magnitude.

**Keywords:** carbon fiber, carbon fiber, modulus of elasticity, filler, fractal dimension, Poisson's ratio

**For citation.** Zhirikova Z.M., Alov V.Z., Alov K.V. Quantitative Description of the Modulus of Elasticity of Polymer Composites for Structural Purposes. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2024;4(46):113–119. (In Russ.). doi: 10.55196/2411-3492-2024-4-46-113-119

**Введение.** В настоящее время наиболее перспективным для использования в качестве конструкционных материалов сельскохозяйственного назначения являются полимерные композитные материалы на основе высокопрочных углеродных волокнистых наполнителей с полимерной матрицей.

Улучшение эксплуатационных характеристик полимерных материалов обеспечивается введением в полимерную матрицу упрочняющих добавок. Перспективными материалами для этих целей являются углеродные волокна. Введение наполнителя в полимер определяется соображениями создания высокомодульного полимерного материала [1].

Стремление к совершенствованию существующих изделий машиностроения открывает широкие возможности для реализации перспективных конструктивных решений, технологических процессов и разработки эффективных методов прогнозирования свойств.

В этой связи, разработка новых прогнозных моделей, основанных на современных физических концепциях (кластерная модель аморфного состояния полимеров, фрактальный анализ, модели необратимой агрегации, синергетика деформируемого тела), позволит с высокой степенью точности установить количественное описание экс-

плуатационных характеристик (в частности модуля упругости) как функции характеристик полимерной матрицы и наполнителя и прогнозировать свойства вновь создаваемых материалов и изделий из них.

Эффективные модули (динамический модуль упругости, жёсткость), несомненно, являются наиболее важными эксплуатационными характеристиками полимерных композитов. Математическое описание этих показателей является основой расчёта напряжений, которое в конечном итоге обосновывает применение инженерных материалов в отечественных изделиях и конструкциях.

**Целью настоящей работы** является установление количественной взаимосвязи модуля упругости как функции характеристик полимерной матрицы и наполнителя.

**Материалы, методы и объекты исследования.** В качестве матричного полимера 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> [2].

В качестве наполнителя использовали высокомодульное углеродное волокно (УВ) марки «Урал 15», имеющее диаметр 7-9 мкм, длину 3 мм, плотность 1320 кг/м<sup>3</sup>. Массовое

содержание УВ в исследуемых образцах составляло 15%, что соответствует объемному наполнению  $\varphi_n \approx 0,115$ .

Композит готовили «сухим» способом, включающим смещение композитов 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: магнитную и механическую сепарацию [3].

Механические испытания на сжатие выполнены согласно ГОСТ 4651-81 на разрывной машине FP-100 при температуре 293 К и скорости деформации  $\sim 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . В этих испытаниях использованы образцы диаметром  $10 \pm 0,5$  мм и высотой  $15 \pm 0,5$  мм. Для определения модуля упругости при сжатии по диаграмме нагрузка-смещение определяли значения нагрузки, соответствующие величинам относительной деформации 0,1 и 0,3% согласно ГОСТ 9550-81. За результаты испытаний принимали среднее арифметическое пяти параллельных измерений.

**Результаты исследования.** Известно большое количество моделей, основанных на современных физических концепциях (фрактальный анализ, теория перколяции, теория необратимой агрегации и локального порядка, синергетика твердого тела), позволяющих с высокой точностью количественное описание эксплуатационных механических свойств как функции характеристик полимерной матрицы и наполнителя. Однако все эти модели разработаны для конкретных систем полимер-наполнитель [4] и поэтому не в состоянии установить общие закономерности структуры наполненных полимерных композитов: описать структуру межфазных границ полимер-наполнитель, распределение, размер и форму частиц наполнителя. Эффективным способом решения этой проблемы является использование современных физических концепций [5, 6]. Так, в рамках

фрактального анализа показано, что величина модуля упругости  $E_k$  полимерных композитов линейно увеличивается по мере повышения размерности областей локализации избыточной энергии  $D_f$ , которая «закачивается» в полимерную матрицу, что аналитически выражается формулой:

$$E_k = C(D_f - 3), \quad (1)$$

где:

$C$  – константа, равная  $\sim 0,67$ .

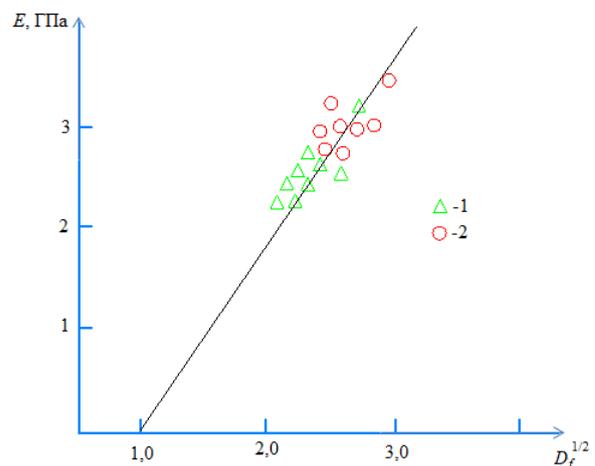
В рамках такого подхода постулируется, что величина  $E_k$  определяется только структурой полимерной матрицы, а роль наполнителя сводится к видоизменению («возмущению») этой структуры и ее последующей фиксации. В работе [7] выполнена проверка этого постулата и получено количественное описание модуля упругости для углепластиков на основе фенилона.

На рисунке 1 приведена зависимость модуля упругости  $E_k$  от корня квадратного из  $D_f$ , определенной согласно уравнению [8]:

$$D_f = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}, \quad (2)$$

где:

$\nu$  – коэффициент Пуассона, оцениваемый из уравнения [9]:



**Рисунок 1.** Зависимость модуля упругости  $E_k$  от размерности областей локализации избыточной энергии  $D_f$  для углепластиков на основе фенилона, полученных с применением магнитной (1) и механической сепараций (2)

**Figure 1.** Dependence of the modulus of elasticity  $E_k$  on the dimensionality of the regions of localization of excess energy  $D_f$  for phenylon-based carbon fiber based materials obtained using magnetic (1) and mechanical separations (2)

$$\frac{\sigma_m}{E} = \frac{1 - 2\nu}{6(1 + \nu)}, \quad (3)$$

где:

$\sigma_m$  – предел текучести;

$E$  – модуль упругости.

Как можно видеть, в этом случае действительно получена хорошая линейная корреляция, аналитически выражаемая формулой:

$$E_k = 3,70(D_f^{1/2} - 1) \quad (4)$$

Фрактальный анализ позволяет оценить предельное значение модуля упругости  $E_k$  для исследуемых углепластиков, используя предельные значения фрактальной размерности. Максимальная величина коэффициента Пуассона  $\nu$  для реальных твердых тел равна 0,475 [8], из уравнения (2) получим максимальную величину  $D_f=21$ , а из уравнения (4) предельное максимальное значение  $E_k=13,3$  ГПа. Следует отметить, что хотя для углепластиков зависимость  $E_k$  от  $D_f$  выражена слабее, чем для дисперсно-наполненных композитов (сравнение уравнений (1) и (4)), но различие постоянных коэффициентов в этих уравнениях приводит к более высокому максимальному значению  $E_k$  по сравнению с дисперсно-наполненными компонентами ( $E_k=13,3$  и 12,1 ГПа, соответственно. Для  $\nu=0$   $D_f=2,0$  и минимальная величина  $E_k=1,53$  ГПа для углепластиков, что примерно равно модулю упругости матричного полимера. И, наконец, для сильно пористых композитов  $\nu=-1,0$   $D_f=1,33$  и  $E=1,23$  ГПа.

Следует отметить, что для дисперсно-наполненных композитов нижнее предельное значение  $D_f=3$  или  $\nu=-0,25$ . Этот результат является условием достижения полной хрупкости материала [8], при условии  $E_k=0$  согласно уравнению (1). Характерно, что для углепластиков условие  $D_f=1$  и, следовательно,  $E_k=0$ , недостижимо, что следует из уравнения (2). Подобное различие предельных характеристик, т.е.  $D_f$  и  $E_k$ , для полимерных композитов, наполненных дисперсными частицами и короткими волокнами, требует детального изучения.

Как известно [9], структура углепластиков включает две плотноупакованные компоненты: области локального порядка (кластеры) в объемной полимерной матрице и межфазные области с относительными долями  $\varphi_{кл}$  и  $\varphi_{мф}$ , соответственно. Кроме того, эта структура является синергетической системой, обла-

дающей обратной связью, [10] в силу чего между параметрами  $\varphi_{кл}$  и  $\varphi_{мф}$  существует взаимосвязь, выражаемая аналитическим соотношением:

$$\varphi_{кл} = 0,74 - \varphi_{мф} \quad (5)$$

Поскольку это соотношение показывает, что физический смысл обратной связи для структуры углепластиков заключается в «перекачке» полимерного материала из одной плотноупакованной структурной компоненты в другую, то следует предположить, что максимально возможное равновесие структуры реализуется при доминировании одной из компонент или максимальной разности ( $\varphi_{кл}-\varphi_{мф}$ ). На рисунке 2 приведена зависимость  $D_f$  от абсолютной величины разности ( $\varphi_{кл}-\varphi_{мф}$ ). Можно видеть, что снижение  $D_f$  по мере роста указанной разности, т.е. уменьшение «закачиваемой» в полимерную матрицу энергии или снижение степени «возмущения» структуры полимерной матрицы. Согласно уравнению (2), это означает уменьшение  $E_k$  по мере роста ( $\varphi_{мф}-\varphi_{кл}$ ). Из данных рисунка 2 следует, что при максимальной доле плотноупакованных структурных компонент, равной 0,74 [9], величина  $D_f=2,25$  или из уравнения (4) получим нижнее предельное значение  $E_k$  для реальных углепластиков равное 1,85 ГПа [7].

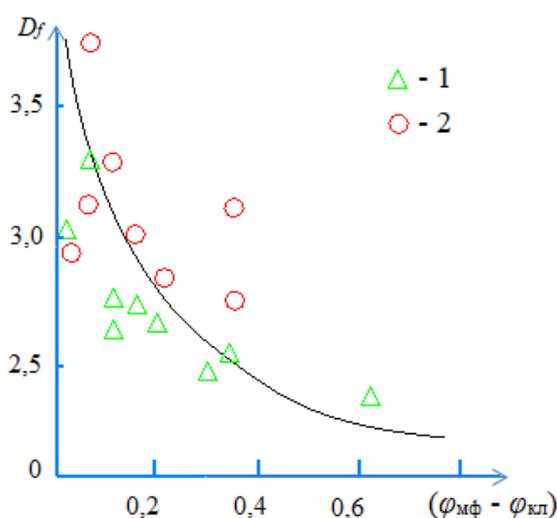
Приведённая на рисунке 2 зависимость предполагает определенную взаимосвязь  $E_k$  и параметра обратной связи структуры  $\lambda$ , который можно определить с помощью уравнения Пуанкаре, в котором уравнивающим параметром является фактор ориентации волокон  $\eta$  [11]:

$$\eta_{n+1} = \eta_n(1 - \eta_n)\lambda \quad (6)$$

где:

$\lambda$  – параметр обратной связи.

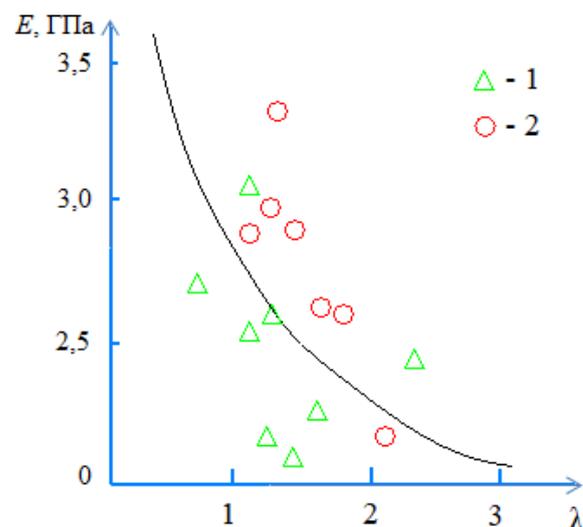
На рисунке 3 приведена зависимость  $E_k(\lambda)$ , которая имеет ожидаемый характер, хотя и с достаточно большим разбросом. Увеличение  $\lambda$  означает усиление «перекачки» полимерного материала в одну из плотноупакованных структурных компонент, уменьшение  $D_f$  (рис. 2) и, как следствие, снижение  $E_k$  ((рис. 1) и уравнение (2)). Следует отметить, что вся рассмотренная вариация  $E_k$  получена при постоянном содержании наполнителя, что подчёркивает роль структурных изменений в определении этого параметра.



**Рисунок 2.** Зависимость размерности областей локализации избыточной энергии  $D_f$  от абсолютной величины разности относительных долей плотноупакованных структурных компонентов для углепластиков на основе фенилона, полученных с применением магнитной (1) и механической сепараций (2)

**Figure 2.** Dependence of the dimensionality of the regions of localization of excess energy  $D_f$  on the absolute value of the difference in the relative fractions of tightly packed structural components for phenylon-based carbon fibers obtained using magnetic (1) and mechanical separations (2)

**Выводы.** Таким образом, полученные в настоящей работе результаты показали возможность существенной вариации модуля упругости при постоянном содержании наполнителя за счёт структурных изменений.



**Рисунок 3.** Зависимость модуля упругости  $E_k$  от параметра обратной связи  $\lambda$  для углепластиков на основе фенилона, полученных с применением магнитной (1) и механической сепараций (2)

**Figure 3.** Dependence of the modulus of elasticity  $E_k$  on the feedback parameter  $\lambda$  for carbon fiber based on phenylon obtained using magnetic (1) and mechanical separations (2)

Увеличение «закачиваемой» в полимерную матрицу энергии или степени её «возмущения», характеризуемое повышением размерности областей локализации избыточной энергии, приводит к росту модуля упругости, а усиление обратной связи в структуре углепластиков, означающее «перекачку» полимерного материала из одной плотноупакованной структурные компоненты в другую, определяет снижение его величины.

### Список литературы

1. Нильсон Л. Механические свойства полимеров и полимерных композитов. Москва: Химия, 1978. 310 с.
2. Соколов Л. Б., Кузнецов Г. А., Герасимов В. Д. Фенилон – термостойкий ароматический полиамид // Пластические массы. 1967. № 9. С.21–23.
3. Структурный аспект межфазной адгезии в углепластиках / Г. В. Козлов, А. И. Буря, В. З. Алоев, Ю. Г. Яновский // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 2. С. 35–38. EDN: ILFYCT
4. Ahmed S., Jones F.R. A review of particulate reinforcement theories for polymer composites // J. Mater. Sci. 1990. 25. № 12. Pp. 4933–4942.
5. Синергетика композитных материалов / А. Н. Бобрышев., В. Н. Козомазов, Л. О. Бабин, В. И. Соломитов. Липецк: НПО ОРИУС, 1994. 153 с.
6. Новиков В. У., Козлов Г. В. Фрактальная параметризация структуры наполненных полимеров // Механика композитных материалов. 1999. Т. 35. № 3. С. 269–290.
7. Буря А. И., Козлов Г. В., Ваньков А. Ю. Взаимосвязь структуры и модуля упругости для углепластиков на основе фенилона // Новости науки Приднестровья. 2004. № 3. С. 33–36.
8. Баланкин А. С. Синергетика деформируемого тела. Москва: Изд-во Министерства обороны СССР, 1991. 404 с.

9. Буря А. И., Козлов Г. В. Синергетика структуры полимерных композитов, формируемой во вращающемся электромагнитном поле // Наука, техника и высшее образование: проблемы и тенденции развития: материалы научно-практической конференции. Вып.1. Ростов-на-Дону, 2004. С. 56–58.

10. Kozlov G.V., Burya A.I., Zaikov G.E. Influence of feedback in the structure of carbon plastics on their properties // Journal of Applied Polymer Science. 2006. V. 100. Issue 4. Pp. 2817–2820.

11. Буря А. И., Козлов Г. В., Холодиллов О. В. Физический смысл управляющего параметра при формировании структуры углепластиков на основе фенилона // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В. Прикладные науки. 2005. № 6. С. 36–39. EDN: URHYMB

### References

1. Nilson L. *Mekhanicheskiye svoystva polimerov i polimernykh kompozitov*. [Mechanical properties of polymers and polymer composites]. Moscow: Khimiya, 1978. 310 p. (In Russ.)

2. Sokolov L.B., Kuznetsov G.A., Gerasimov V.D. Phenylon – heat-resistant aromatic polyamide. *Plasticheskiye massy*. 1967;(9):21–23. (In Russ.)

3. Kozlov G.V., Burya A.I., Aloe V.Z., Yanovsky Yu.G. The structural aspect of interfacial adhesion in carbon plastics. *Physical mesomechanics*. 2005;8(2):35–38. (In Russ.). EDN: ILFYCT

4. Ahmed S., Jones F.R. A review of particulate reinforcement theories for polymer composites. *J. Mater. Sci.* 1990;25(12):4933–4942.

5. Bobryshev A.N., Kozomazov V.N., Babin L.O., Solomitov V.I. *Sinergetika kompozitnykh materialov* [Synergetics of composite materials]. Lipetsk: NPO ORIUS, 1994. 153 p. (In Russ.)

6. Novikov V.U., Kozlov G.V. Fractal parametrization of the structure of filled polymers. *Mechanics of Composite Materials*. 1999;35(3):269–290. (In Russ.)

7. Burya A.I., Kozlov G.V., Vankov A.Yu. Relationship between structure and elastic modulus for carbon fiber reinforced plastics based on phenylone. *Novosti nauki Pridneprov'ya..* 2004;(3):33–36. (In Russ.)

8. Balankin A.S. *Sinergetika deformiruyemogo tela*. [Synergetics of a deformable body]. Moscow: Izd-vo Ministerstva obrony SSSR, 1991. 404 p. (In Russ.)

9. Burya A.I., Kozlov G.V. Synergetics of the structure of polymer composites formed in a rotating electromagnetic field. *Nauka, tekhnika i vyssheye obrazovaniye: problemy i tendentsii razvitiya: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Vyp.1* [Science, technology and higher education: problems and development trends. Proceedings of the scientific and practical conference. Issue 1]. Rostov-on-Don, 2004. Pp. 56–58. (In Russ.)

10. Kozlov G.V., Burya A.I., Zaikov G.E. Influence of feedback in the structure of carbon plastics on their properties. *Journal of Applied Polymer Science*. 2006;100(4):2817–2820.

11. Burya A.I., Kozlov G.V., Kholodilov O.V. Physical meaning of the control parameter in the formation of the structure of carbon fiber reinforced plastics based on phenylone. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. V. Prikladnyye nauki*. 2005;(6):36–39. (In Russ.). EDN: URHYMB

### 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

**Алоев Кантемир Владимирович** – аспирант кафедры теории права и государства, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», SPIN-код: 6392-4344, Researcher ID: JNS-4428-2023

---

**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 Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 4378-8131, Scopus ID: 55558043600 Researcher ID: AAF-3690-2022

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

**Kantemir V. Alov** – Postgraduate Student of the Department of Theory of Law and State, Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, SPIN-code: 6392-4344, Researcher ID: AAF-3822-2022

---

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

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

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

---

*Статья поступила в редакцию 30.09.2024;  
одобрена после рецензирования 22.10.2024;  
принята к публикации 01.11.2024.*

*The article was submitted 30.09.2024;  
approved after reviewing 22.10.2024;  
accepted for publication 01.11.2024.*