

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

AGROENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES

Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

Technologies, Machines and Equipment for the Agro-industrial Complex

Научная статья

УДК 620.178

doi: 10.55196/2411-3492-2023-4-42-103-109

**Исследование процессов трения и износа конструкционных
материалов сельскохозяйственного назначения****Владимир Закиевич Алоев¹, Заира Муссавна Жирикова²,
Кантемир Владимирович Алоев³**^{1,2}Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030³Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, ул. Миклухо-Маклая, 6,
Москва, Россия, 117198¹aloev56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133>²zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>³kantemir.aloev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0765-9790>

Аннотация. В связи с широким применением полимеров в качестве конструкционных материалов проблема повышения надежности и долговечности конструкции является актуальной. Эта проблема может быть решена использованием полимерных композитов, наполненных короткими углеродными волокнами. Наполнение полимеров твердыми волокнами обеспечивает стабильную работу узлов трения. Исследованы структурные особенности фрикционного износа углепластиков на основе фенилона, наполненного углеродным волокном. Показано, что трибологические свойства полимерных композитов фенилон/углеродное волокно, а именно коэффициент трения и фрикционный износ, полностью определяются тремя факторами: фрикционными характеристиками матричного полимера (фенилона), его структурой и режимом испытаний. Отмечено, что структура аморфного состояния матричного полимера представляет собой области локального порядка (кластеры), состоящие из нескольких коллинеарных плотноупакованных сегментов разных макромолекул. Обнаружена взаимосвязь кластерной структуры аморфного состояния полимеров с температурой в зоне трения, увеличение которого приведет к их частичному распаду, и, как следствие, повышению относительной доли рыхлоупакованной матрицы. Получены корреляционные зависимости между коэффициентом трения, линейным износом и относительной доли рыхлоупакованной матрицы. Результаты работы позволяют предложить методику прогнозирования параметров процессов трения и износа, а также выбора материала для использования в узлах трения сельскохозяйственных машин. Предложенная методика прогнозирования позволяет целенаправленно изменять трибологические характеристики рассматриваемых полимерных композитов.

Ключевые слова: углепластик, фенилон, углеродное волокно, интенсивность износа, коэффициент трения, температура контакта, кластерная модель, температура стеклования

Для цитирования. Алоев В. З., Жирикова З. М., Алоев К. В. Исследование процессов трения и износа конструкционных материалов сельскохозяйственного назначения // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2023. № 4(42). С. 103–109.
doi: 10.55196/2411-3492-2023-4-42-103-109

Original article

Investigation of the processes of friction and wear of structural materials for agricultural purposes

Vladimir Z. Alov¹, Zaira M. Zhirikova^{✉2}, Kantemir V. Alov³

^{1,2}Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue, Nalchik, Russia, 360030

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

¹alov56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133>

^{✉2}zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>

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

Abstract. Due to the widespread use of polymers as structural materials, the problem of increasing the reliability and durability of the structure is relevant. This problem can be solved by using polymer composites filled with short carbon fibers. Filling polymers with hard fibers ensures stable operation of friction units. Structural features of frictional wear of carbon fiber-based phenylene filled carbon fiber are investigated. It is shown that the tribological characteristics of phenylon/carbon fiber polymer composites, namely the coefficient of friction and friction wear, are completely determined by three factors: tribological characteristics of the matrix polymer (phenylon), its structure and test mode. It is noted that the structure of the amorphous state of the matrix polymer is a region of local order (clusters) consisting of several collinear densely packed segments of different macromolecules. The relationship of the cluster structure of the amorphous state of polymers with the temperature in the friction zone, an increase in which will lead to their partial decay, and as a consequence, an increase in the relative proportion of the loosely packed matrix, is found. Correlations between the coefficient of friction, linear wear and the relative fraction of the loosely packed matrix are obtained. The results obtained allow us to propose a methodology for predicting the parameters of friction and wear processes, as well as the choice of material for use in friction units of agricultural machines. The proposed forecasting technique makes it possible to change purposefully the tribological characteristics of the polymer composites under consideration.

Keywords: composites, ultimate strength, ultrahigh molecular weight polyethylene, degree of extraction, interfacial strength, Leidner-Woodhams equation, microplasticity

For citation. Alov V.Z., Zhirikova Z.M., Alov K.V. Investigation of the processes of friction and wear of structural materials for agricultural purposes. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2023;4(42):103–109. (In Russ.). doi: 10.55196/2411-3492-2023-4-42-103-109

Введение. В настоящее время одной из актуальных проблем сельскохозяйственного машиностроения является повышение надежности и долговечности конструкций. Эффективный способ решения этой проблемы – использование полимерных материалов для замены традиционных конструкционных и антифрикционных [1]. Перспективными материалами для этих целей

являются полимерные композиты, наполненные короткими волокнами. Наполнение полимеров твердыми волокнами придает этим материалам ряд желательных свойств: повышает жесткость, сопротивляемость текучести, прочность, огнестойкость, вязкость разрушению, трибологическую износостойкость, снижает коэффициент теплового расширения и трения [2].

Однако отсутствие качественной структурной модели для полимерных композитов до недавнего времени являлось препятствием для аналитического описания трения и фрикционного износа этих материалов. Имеющиеся экспериментальные данные [3] однозначно указывают на важную роль полимерной матрицы в указанных процессах. Эта роль заметно повышается при более жёстких режимах (удельной нагрузки P и скорости скольжения v) трения из-за повышения температуры в зоне контакта. Появление кластерной модели структуры аморфного состояния полимеров [4, 5] позволило выявить основные структурные аспекты процессов трения и фрикционного износа. Авторы [6] рассмотрели этот вопрос на примере углепластиков на основе фенилона.

Рассмотрим имеющиеся основания взаимосвязи структуры полимерной матрицы композита и основных параметров трения и фрикционного износа. Во-первых, как показали результаты работы [2], при повышении температуры в зоне контакта T_k от 327 до 452К, т. е. на 125К, наблюдается резкое увеличение интенсивности линейного износа I – примерно в 4,5 раза. Такое поведение характерно для полимеров при приближении температуры испытаний к температуре стеклования T_c , но не для углеродных волокон, чья термостойкость существенно выше. Во-вторых, с увеличением жёсткости условий испытания, в частности при повышении удельной нагрузки P наблюдается ориентация волокон по направлению трения, происходит нарушение их равномерного распределения, на испытываемом материале появляются в большом количестве длинные волокна, не изломанные в процессе изнашивания, а выдернутые из матрицы, что служит доказательством её размягчения на пятнах контакта [3]. Наличие продуктов износа указывает на износ именно полимерной матрицы композита.

Цель исследования – выяснение структурных особенностей в полимерных композитах, наполненных короткими волокнами, определяющими величину массового фрикционного износа и коэффициента трения.

Материалы, методы и объекты исследования. В качестве матричного полимера 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 [7].

В качестве наполнителя использовали высокомолекулярное углеродное волокно (УВ) марки «Урал 15», имеющий диаметр 7-9 мкм, длину 3 мм, плотность 1320 кг/м³. 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 мм. 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 сепарацией [6].

Трибологические свойства композитов С-2/УВ изучали на дисковой машине трения по методике, описанной в работе [8]. В качестве материала контртела использовали сталь 45 (ГОСТ 1050-74), термообработанную до твердости 45-48 HRC, которая имеет шероховатость поверхности $Ra = 0,16-0,32$ мкм. Точность измерения силы трения и линейного износа образца составляет $\pm 5\%$ [8]. Перед испытаниями проводилась приработка диска трением по образцу в течение 20 секунд, после чего диск промывался бензином. Износ образцов определяли весовым методом на аналитических весах ВЛР-200 (ГОСТ 21104-80) с точностью $\pm 0,1$ мг. Интенсивность линейного изнашивания рассчитывали согласно методике, описанной в работе [8].

Результаты исследования. На рисунке 1 приведена зависимость температуры в зоне контакта T_k от величины $(P \cdot v)$ для углепластика на основе фенилона. Как можно видеть, наблюдается монотонное увеличение T_k по мере роста $(P \cdot v)$. Характерно снижение

скорости повышения T_k при увеличении $(P \cdot v)$, что является типичным признаком протекания процесса с участием фрактального объекта [9]. Этому следовало ожидать, поскольку структура полимерной матрицы является фракталом [10]. Важно отметить эквивалентность параметров P и v в интенсификации нагрева поверхности композита. Линеаризировать зависимость $T_k(P \cdot v)$ можно использованием корня квадратного для аргумента и тогда приведенную на рисунке 1 зависимость аналитически можно записать так [6]:

$$T_k = 293 + 72(P \cdot v)^{1/2}, \text{ К}, \quad (1)$$

где:

P дается в МПа, а v – в м/с.

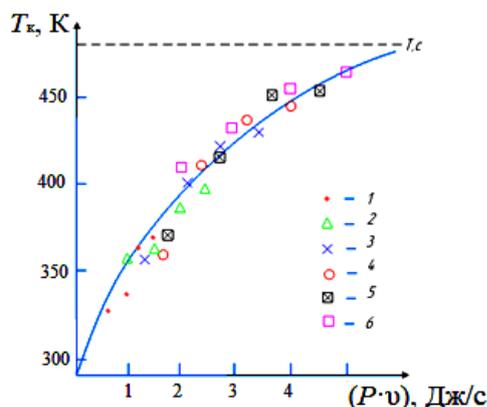


Рисунок 1. Зависимость температуры в зоне контакта T_k от величины $(P \cdot v)$ для углепластика на основе фенилона при удельных нагрузках P : 0,6(1), 1,0(2), 1,4(3), 1,6(4), 1,8(5) и 2,0(6) МПа

Figure 1. Dependence of the temperature in the T_k contact zone on the value $(P \cdot v)$ for carbon fiber based on phenylene at specific loads P : 0,6(1), 1,0(2), 1,4(3), 1,6(4), 1,8(5) and 2.0(6) MPa

Кластерная модель [4, 5] предполагает, что структура аморфного состояния полимеров представляет собой области локального порядка (кластеры), состоящие из нескольких коллинеарных плотноупакованных сегментов разных макромолекул (аморфный аналог кристаллита с вытянутыми цепями) и окруженные упакованной матрицей. Поскольку кластеры имеют термофлуктуационную природу, то увеличение T_k в зоне трения должно вызвать их частичный распад и, как следствие, снижение их относительной доли $\varphi_{кл}$ при соответствующем повышении относительной доли рыхлоупакованной мат-

рицы $\varphi_{р.м.}$, поскольку величины $\varphi_{кл}$ и $\varphi_{р.м.}$ связаны между собой соотношением [4]:

$$\varphi_{р.м.} = 1 - \varphi_{кл}. \quad (2)$$

Величину $\varphi_{кл}$ как функцию температуры T_k в поверхностном слое композита можно определить согласно перколлекционному соотношению [11]:

$$\varphi_{кл} \approx 0,03(T_c - T)^{0,55}, \quad (3)$$

где:

$T = T_k$ – температура испытаний.

Полагая, что для фенилона $T_c = 523\text{К}$ [6], можно из уравнения (3) определить величину $\varphi_{кл}$, а затем из уравнения (2) рассчитать $\varphi_{р.м.}$. Ранее было показано [1], что увеличение $(P \cdot v)$ и, следовательно, T_k приводит к уменьшению коэффициента трения f от 0,17 до 0,07. Это предполагает возможную взаимосвязь структурных характеристик, например, $\varphi_{р.м.}$ и f . На рисунке 2 показана зависимость f от обратной величины $\varphi_{р.м.}$. Как следует из данных этого рисунка, несмотря на существенный разброс, наблюдается тенденция линейного увеличения f по мере роста $\varphi_{р.м.}^{-1}$ или уменьшения $\varphi_{р.м.}$. Аналитически эта корреляция может быть описана так [6]:

$$f = 0,05 + 0,138(\varphi_{р.м.}^{-1} - 1) \quad (4)$$

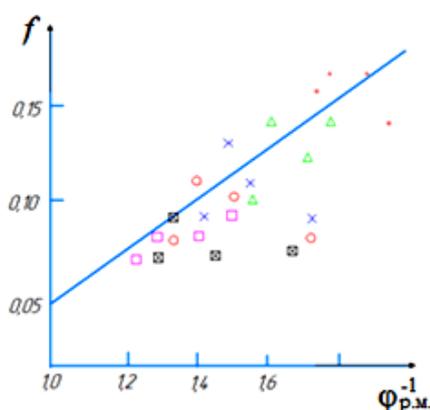


Рисунок 2. Зависимость коэффициента трения f от обратной величины относительной доли рыхлоупакованной матрицы $\varphi_{р.м.}$ для углепластиков на основе фенилона.

Figure 2. The dependence of the coefficient of friction f on the inverse value of the relative fraction of the loosely packed matrix $\varphi_{р.м.}$ for carbon fiber based on phenylene. The designations are the same as in Figure 1

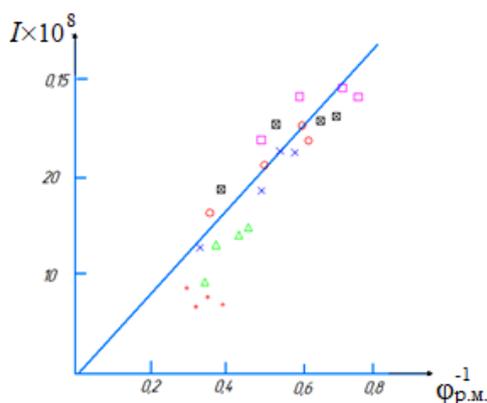


Рисунок 3. Зависимость интенсивности линейного износа I от квадрата относительной доли рыхлоупакованной матрицы $\varphi_{p.m.}$ для углепластиков на основе фенилона. Обозначения те же, что и на рисунке 1

Figure 3. The dependence of the intensity of linear wear I on the square of the relative fraction of the loosely packed matrix $\varphi_{p.m.}$ for carbon fiber based on phenylene. The designations are the same as in Figure 1

Как показали данные работы [2], увеличение температуры в зоне контакта приводит к повышению линейного износа I образцов композитов. Поскольку повышение T_k также определяет рост $\varphi_{p.m.}$, то следует ожидать корреляции между I и $\varphi_{p.m.}$. Как показали данные рисунка 3, такая корреляция действительно существует и аналитически выражается следующим образом [6]:

$$I = 10^{-6} \cdot \varphi_{p.m.}^2, \text{ м} \quad (5)$$

Квадратичная форма корреляции между I и $\varphi_{p.m.}$ подтверждает сильное влияние последнего параметра и линейный износ композитов.

Выводы. Таким образом, полученные в настоящей работе результаты предполагают, что основные трибологические характеристики углепластиков фенилон/углеродное волокно, а именно коэффициент трения и фрикционный износ, полностью определена тремя факторами: трибологическими характеристиками матричного полимера (фенилона), его структурой и режимом испытаний. С практической точки зрения полученные результаты позволяют предположить следующую методику прогнозирования параметров процессов трения и износа, а также выбора материала для использования в узлах трения. Эта методика заключается в использовании в качестве исходного параметра произведение $(p \cdot v)$, по которому согласно уравнению (1) рассчитывается температура в зоне контакта, далее по уравнениям (2) и (3) оценивается относительная доля рыхлоупакованной матрицы $\varphi_{p.m.}$, и наконец согласно аналитическим соотношениям (4) и (5) определяются эксплуатационные характеристики (коэффициент трения f и фрикционный износ I) композитного материала. Предложенная методика позволяет целенаправленно изменять трибологические характеристики рассматриваемых полимерных композитов.

Список литературы

1. Ричардсон М. (Ред.). Промышленные полимерные композиционные материалы / Пер. с англ.; под ред. П. Г. Бабаевского. Москва: Химия, 1980. 472 с.
2. Буря А. И., Леви А. Г., Бедин А. С., Левин Р. М., Райкин В. Г. Влияние модуля упругости углеродных волокон на трение и износ углепластиков на основе ароматического полиамида // Трение и износ. 1984. Т. 5. № 5. С. 932–935.
3. Буря А. И., Молчанов Б. И. Трение и износ полиамида-6 и углепластиков на его основе // Трение и износ. 1992. Т. 13. № 5. С. 900–904.
4. Козлов Г. В., Новиков В. У. Кластерная модель аморфного состояния полимеров // Успехи физических наук. 2001. Т. 171. № 7. С. 717–764.
5. Kozlov G.V., Zaikov G.E. Structure of the polymer amorphous. Leiden-Boston, Brill Academic Publishers, 2004. 465 p.
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. Соколов Л. Б., Кузнецов Г. А., Герасимов В. Д. Фенилон – термостойкий ароматический полиамид // Пластические массы. 1967. № 9. С. 21–23.

8. Методика расчетной оценки износостойкости поверхностей трения деталей машин / ВНИИ по нормализации в машиностроении; [Исполн. А. В. Блюмен, М. В. Семенова, А. О. Шейвехман, Д. Г. Эфрос]. Москва: Изд-во стандартов, 1979. 100 с.
9. Мейланов Р. П., Свешникова Д. А., Шабанов О. М. Кинетика сорбции в системах с фрактальной структурой // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2001. № 1. С. 63–66.
10. Козлов Г. В., Новиков В. У. Синергетика и фрактальный анализ сетчатых полимеров. Москва: Классика, 1998. 112 с.
11. Козлов Г. В., Газаев М. А., Новиков В. У., Микитаев А. К. Моделирование структуры аморфных полимеров как перколяционного кластера // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. № 6. С. 31–38.

References

1. Richardson M.O. W., ed. *Promyshlennyye polimernyye kompozitsionnyye materialy. Per. s angl.; pod red. P.G. Babayevskogo* [Polymer engineering composites. Per. from English edited by P.G. Babaevsky]. Moscow: Khimiya, 1980. 472 p. (In Russ.)
2. Burya A.I., Levi A.G., Bedin A.S., Levin R.M., Raikin V.G. Influence of the modulus of elasticity of carbon fibers on friction and wear of carbon fiber based on aromatic polyamide. *Friction and wear*. 1984;5(5):932-935. (In Russ.)
3. Burya A.I., Molchanov B.I. Friction and wear of polyamide-6 and carbon fiber plastics based on it. *Friction and wear*. 1992;13(5):900-904. (In Russ.)
4. Kozlov G.V., Novikov V.U. A cluster model for the polymer amorphous state. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2001;171(7):717-764. (In Russ.)
5. Kozlov G.V., Zaikov G.E. Structure of the polymer amorphous. Leiden-Boston, Brill Academic Publishers, 2004. 465 p.
6. Kozlov G.V., Burya A.I., Alov 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
7. Sokolov L.B., Kuznetsov G.A., Gerasimov V.D. Phenylon – heat-resistant aromatic polyamide. *Plasticheskiye massy*. 1967;(9):21–23. (In Russ.)
8. *Metodika raschetnoy otsenki iznosostoykosti poverkhnostey treniya detaley mashin. VNIИ po normalizatsii v mashinostroyenii. Ispoln. A. V. Blyumen, M. V. Semenova, A. O. Sheyvekman, D. G. Efros* [Methodology for calculating the wear resistance of friction surfaces of machine parts. All-Russian research institute for normalization in mechanical engineering. Executive. A.V. Blumen, M.V. Semenova, A.O. Sheivehman, D.G. Efros]. Moscow: Izd-vo standartov, 1979. 100 p. (In Russ.)
9. Meilanov R.P., Sveshnikova D.A., Shabanov O.M. Sorption kinetics in systems with fractal structure. *University News. North-Caucasian region. Technical sciences* [Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii region. Technical science]. 2001;(1):63–66. (In Russ.)
10. Kozlov G.V., Novikov V.U. *Sinergetika i fraktal'nyy analiz setchatykh polimerov* [Synergetics and fractal analysis of network polymers]. Moscow: Classika, 1998. 112 p. (In Russ.)
11. Kozlov G.V., Gazaev M.A., Novikov V.U., Mikitaev A.K. Modeling of the structure of amorphous polymers as a percolation cluster. *Technical Physics Letters*. 1996;22(6):31–38. (In Russ.)

Сведения об авторах

Алов 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

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

Алов 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

Vladimir Z. Alov – Doctor of Chemical Sciences, professor in 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

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

Kantemir V. Alov – postgraduate student of the Department of Theory of Law and State, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia», SPIN-code: 6392-4344, Researcher ID: JNS-4428-2023

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 09.11.2023;
одобрена после рецензирования 22.11.2023;
принята к публикации 01.12.2023.*

*The article was submitted 09.11.2023;
approved after reviewing 22.11.2023;
accepted for publication 01.12.2023.*