

Научная статья
УДК 621.01.896
doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-29-37

Оценка коэффициента трения и нагрузочной способности модифицированной конструкции радиального подшипника в турбулентном режиме трения

Екатерина Александровна Болгова¹, аспирант
Мурман Александрович Мукутадзе², д.т.н.
Павел Викторович Харламов³, д.т.н.

^{1, 2, 3} Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

¹ bolgova_katya6@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0737-1846>

² murman1963@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2910-3047>

³ pvharlamov@rgups.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5100-4894>

Аннотация. Исследовано влияние истинно-вязкого смазочного материала в радиальном подшипнике скольжения, оборудованного полимерным покрытием и специализированной канавкой на поверхности вала. Разработанная расчетная модель, основанная на уравнениях движения жидкости и уравнении неразрывности, позволяет глубже понять динамику смазочного слоя и его взаимодействие с рабочими поверхностями. Особое внимание уделяется геометрическим особенностям канавки, которые влияют на распределение давления внутри подшипника. Комплексное использование полимерного покрытия и канавки обеспечивает равномерное распределение нагрузок, что повышает нагрузочную способность системы. Численные расчеты показывают, что применение полимерного покрытия снижает коэффициент трения и способствует эффективной работе смазочного материала в условиях турбулентного режима. Экспериментальная валидация модели проводилась при различных условиях нагрузки и скоростей вращения, что позволило достоверно сопоставить теоретические расчеты с экспериментальными результатами. Анализ показал высокую степень согласия между расчетами и экспериментом, подтверждая надежность предложенной модели. Полученные результаты подчеркивают значимость конструктивных решений, таких как сочетание полимерных покрытий и канавок, для повышения эксплуатационных характеристик подшипников.

Ключевые слова: радиальный подшипник, оценка износостойкости, антифрикционное полимерное покрытие, канавка, гидродинамический режим, верификация

Для цитирования: Болгова Е.А., Мукутадзе М.А., Харламов П.В. Оценка коэффициента трения и нагрузочной способности модифицированной конструкции радиального подшипника в турбулентном режиме трения // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 3 (165). С. 29–37. doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-29-37

Estimated friction and load capacity coefficients for a modified radial bearing design under a turbulent condition friction

Ekaterina A. Bolgova¹, PhD student
Murman A. Mukutadze², D. Eng.
Pavel V. Kharlamov³, D.Eng.

^{1, 2, 3} Rostov State University of Railway Transport, Rostov-on-Don, Russia

¹ bolgova_katya6@mail.ru

² murman1963@yandex.ru

³ pvharlamov@rgups.ru

Abstract. The effect of a true viscous lubricant in a radial sliding bearing coated by polymer having a specialized groove on the shaft surface is studied. The developed computational model based on the equations of fluid motion and the equation of continuity allows for a deeper understanding of the dynamics of the lubricating layer and its interaction with the working surfaces. Special attention is paid to the geometric features of the groove, which affect the pressure distribution inside the bearing. The integrated use of a polymer coating and a groove ensures uniform load distribution, which increases the load capacity of the system. Numerical calculations show that the use of a polymer coating reduces friction coefficient and contributes to the efficient operation of the lubricant in turbulent conditions. Experimental validation of the model was carried out under various load conditions and rotational speeds, which made it possible to compare theoretical calculations with experimental results in a high-quality way. The analysis showed a high degree of agreement between calculations and experiment, confirming the reliability of the proposed model. The results obtained prove the necessity of design solutions, such as a combination of polymer coatings and grooves for improved bearing performance.

Keywords: radial bearing, wear resistance evaluation, antifriction polymer coating, groove, hydrodynamic mode, verification

For citation: Bolgova E.A., Mukutadze M.A., Kharlamov P.V. Estimated friction and load capacity coefficients for a modified radial bearing design under a turbulent condition friction / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 3 (165). P. 29–37. doi: 10.30987/2223-4608-2025-3-29-37

Введение

Исследования, направленные на разработку новых конструкционных материалов для трибоузлов, основываются на многократных экспериментах и теоретических моделях. Важной задачей является нахождение оптимального сочетания материалов, которые способны выдерживать различные виды нагрузок и воздействия внешней среды, а также минимизировать износ и трение. Ученые и инженеры стремятся улучшить механические свойства материалов, увеличивая их твердость, прочность и износостойкость, а также снижая коэффициент трения [1 – 4].

В последние годы методы машинного обучения и искусственного интеллекта стали неотъемлемой частью процесса проектирования и исследования трибосопряжений [5 – 9]. Применение этих инновационных технологий позволяет системно анализировать большие объемы данных, выявлять скрытые закономерности и формировать предсказательные модели с высокой точностью.

Особое внимание уделяется междисциплинарному подходу, объединяющему знания из области материаловедения, механики деформируемого твердого тела, химии и физики поверхностей. Это сотрудничество способствует разработке новых, более эффективных

материалов и покрытий, повышающих срок службы и надежность узлов трения.

Также следует уделить внимание разработке новых рецептов на основе предпочтительных материалов, таких как фторопласты, полиамиды и полиуретаны. Эффективная комбинация этих компонентов может привести к значительному снижению коэффициента трения и, следовательно, к уменьшению износа и повышению ресурсосберегающей эксплуатации оборудования [10 – 13].

Экспериментальные данные [14 – 20] свидетельствуют о том, что переменные величины, такие как концентрация наполнителя и температура отверждения, оказывают значительное влияние на эксплуатационные характеристики конечного материала. Авторы отмечают, что дальнейшие исследования металлоплакирования рабочих поверхностей трения «колесо – рельс» могут расширить возможности использования таких покрытий в системе «железнодорожный путь – подвижной состав» в тяжелонагруженных узлах трения.

Однако важно отметить, что для успешного применения этих материалов в трибосопряжениях технологических машин необходимо учитывать специфические особенности каждой трибосистемы. Игнорирование этих особенностей может привести к недостоверным результатам или снижению эффективности подходов, разработанных в исследованиях.

Таким образом, разработка и улучшение гидродинамических моделей трибосистем оказывают непосредственное влияние на промышленное производство и технику. Более точные модели позволяют создавать более оптимальные конструкции, продлевать срок службы агрегатов. Это, в свою очередь, снижает эксплуатационные издержки, улучшает энергоэффективность и повышает общую надежность машин и механизмов.

Материалы и методы решения

Для оценки износостойкости по коэффициенту трения и нагрузочной способности рассматривается радиальный подшипник модифицированной конструкции. Предполагается, что течение сжимаемой жидкости турбулентное, при этом скорость вращения втулки равна нулю, а вала Ω [21].

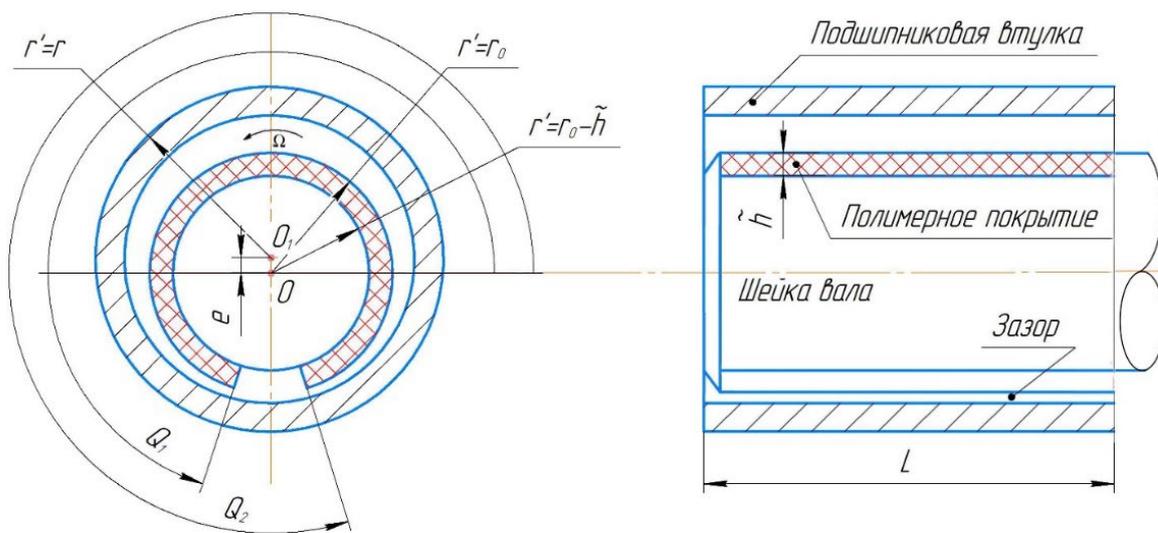


Рис. 1. Расчетная схема трибоконтакта

Fig. 1. Calculation scheme of tribocontact

Координатная система r', θ с полюсом в центре вала уравнения контуров вала с полимерным покрытием, вала с канавкой, подшипниковой втулки запишутся в виде:

$$r' = r_0, \quad r' = r_0 - \tilde{h}, \quad r' = r_1(1+H), \quad (1)$$

где r_0 – радиус вала; r_1 – радиус подшипниковой втулки; \tilde{h} – высота канавки; H – толщина смазочного слоя.

Зависимость вязкостных характеристик:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha' p' - \beta' T'} \quad (2)$$

где μ' – коэффициент динамической вязкости смазочного материала; μ_0 – характерная вязкость смазочного материала; p' – гидродинамическое давление в смазочном слое; α' и β' – экспериментальные постоянные; T' – параметр температуры.

Для разработки расчетной модели с учетом (2) используем следующие исходные уравнения. Первым уравнением является уравнение, которое описывает турбулентное движение жидкости, в дополнение к этому используем уравнение неразрывности и уравнение состояния:

$$\frac{\partial p'_i}{\partial r'} = 0; \quad j\mu' \frac{\partial^2 v_{\theta i}}{\partial r'^2} = \frac{dp'_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial(\rho' v'_{r'_i})}{\partial r'} + \frac{\rho' v'_{r'_i}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial(\rho' v'_{\theta i})}{\partial \theta} = 0,$$

$$p' = \frac{\lambda \Omega r}{2} \rho' \quad (3)$$

где v – вертикальная компонента скорости;
 θ – угловая координата; ρ' – плотность
(безразмерная величина); λ – коэффициент потерь
на трение (определяется экспериментально);

Ω – угловая скорость вала.

Поведение скорости жидкости на
границах:

$$v_\theta = 0, \quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1(1+H) = h'(\theta);$$

$$\begin{aligned} v_{r'} = 0 \quad v_\theta = \Omega r_0 \quad \text{при} \quad r' = r_0; \\ v_{r'} = 0 \quad v_\theta = \Omega(r_0 - \tilde{h}) \quad \text{при} \quad r' = r_0 - \tilde{h}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$p'(0) = p'(\theta) = p_g, \quad r_0 - \tilde{h} = h_0^* \quad \text{при} \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2.$$

Соотношение безразмерных и размерных величин:

$$v_\theta = \Omega v(r_0 - \tilde{h}), \quad v_{r'} = \Omega \delta u, \quad p' = p^* p,$$

$$p^* = \frac{\mu_0 \Omega (r_0 - \tilde{h})^2}{\delta^2}, \quad \mu' = \mu_0 \mu, \quad \alpha' = \frac{\alpha}{p^*},$$

$$r' = (r_0 - \tilde{h}) + \delta r, \quad \delta = r_1 - (r_0 - \tilde{h}), \quad \rho^* = \frac{2p}{\lambda \Omega r}, \quad \rho' = \rho^* \rho,$$

$$T^* = \frac{\mu \Omega (r - h)}{J \lambda}, \quad \beta = T^* \beta', \quad T' = T^* T. \quad (5)$$

где δ – зазор; p^* – гидродинамическое давлени-
е; ρ^* – плотность (размерная величина).

Выполняя подстановку (5) в систему
дифференциальных уравнений (3) с учетом
граничных условий (4), получим:

$$\frac{\partial p_i}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = \frac{1}{\Lambda} \frac{1}{j e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp_i}{d\theta}, \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial \theta} = 0 \quad (6)$$

$$u = 0, \quad v = 1 \quad \text{при} \quad r = r_0 - \tilde{h}, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

$$u = 0, \quad v = 1 \quad \text{при} \quad r = r_0, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$u = 0, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 + \eta \cos \theta = h(\theta);$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{P_g}{p^*}, \quad Q = \text{const} \quad (7)$$

где $\Lambda = \frac{\mu\Omega r_0^2}{p\delta^2}$ – параметр сжимаемости;

$\eta = \frac{e}{\delta}$ – конструктивный параметр; θ_1 и θ_2 – соответственно угловые координаты канавки; Q – расход смазочного материала в единицу времени; $h(\theta)$ – толщина масляной пленки.

Автомодельное решение ищем по известному методу [21 – 22]:

$$\begin{aligned} \rho v &= \frac{\partial \Psi}{\partial r} + V(r, \theta), \quad \rho u = -\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} + U(r, \theta), \\ \Psi(r, \theta) &= \tilde{\Psi}(\xi), \quad U(r, \theta) = -p\tilde{u}(\xi)h'(\theta), \\ V(r, \theta) &= p\tilde{v}(\xi), \\ \xi &= \frac{r}{h(\theta)} \quad \text{при } \theta \leq \theta \leq \theta \quad \text{и } \theta \leq \theta \leq 2\pi, \\ \xi &= \frac{r + \tilde{h}}{h(\theta) + \tilde{h}} \quad \text{при } \theta \leq \theta \leq \theta, \end{aligned} \quad (8)$$

где Ψ – функция, зависящая от ξ . V – вертикальная составляющая скорости. U – горизонтальная составляющая скорости. ξ – автомодельная переменная.

Выполнив подстановку (8) в (6), получим:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}_i''' &= a_i, \quad \tilde{v}_i'' = b_i, \quad \tilde{u}'(\xi_i) + \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) = 0, \\ \frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp_i}{d\theta} &= \left[\frac{b_i}{h^2(\theta)} + \frac{a_i}{h^3(\theta)} \right], \quad (i=1,3), \quad (9) \\ h(\theta) &= 1 + \eta \cos \theta, \end{aligned}$$

$$\frac{p_2}{\Lambda} \frac{1}{j e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp_2}{d\theta} = \left(\frac{b_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{a_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} \right).$$

Гидродинамическое давление можно определить из аналитических уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j \mu_i(\theta)} \frac{dp_i}{d\theta} &= \frac{b_i}{h^2(\theta)} + \frac{a_i}{h^3(\theta)}, \quad i=1,3; \\ \frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j \mu_2(\theta)} \frac{dp_2}{d\theta} &= \frac{b_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{a_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^3}. \end{aligned} \quad (10)$$

С учетом закономерности изменений скорости диссипации механической энергии из (10) определяется функция $\mu(\theta)$:

$$\begin{aligned} \frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j \mu_i^2(\theta)} \frac{d\mu_i}{d\theta} &= \frac{\alpha b_i}{h^2(\theta)} + \frac{\alpha a_i}{h^3(\theta)} + \\ &+ \frac{24\mu_0\beta\Omega r_0 h(\theta)}{T^* C_p \delta^2 a_i} \cdot \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\Psi}''(\xi_i)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}'(\xi_i)}{h^3(\theta)} \right)^2 d\xi, \quad i=1,3; \\ \frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j \mu_2^2(\theta)} \frac{d\mu_2}{d\theta} &= \frac{\alpha b_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{\alpha a_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} + \\ &+ \frac{24\mu_0\beta\Omega r_0 (h(\theta) + \tilde{h})}{T^* C_p \delta^2 a_2} \times \\ &\times \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\Psi}''(\xi_i)}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{\tilde{v}'(\xi_i)}{(h(\theta) + \tilde{h})} \right)^2 d\xi. \end{aligned} \quad (11)$$

Аналитические выражения для давления:

$$p_i = \Lambda \mu_i(\theta) \left(b_i I_2(\theta) + \frac{a_i}{p} I_3(\theta) \right) + \frac{p_g}{p^*}. \quad (12)$$

Результаты численных проверок на основе предложенной теоретической модели представлены на рис. 2, 3. Были протестированы значения параметра сжимаемости $\Lambda = 0,1 \dots 0,9$, напряжения σ в диапазоне 4,7...14,1 МПа.

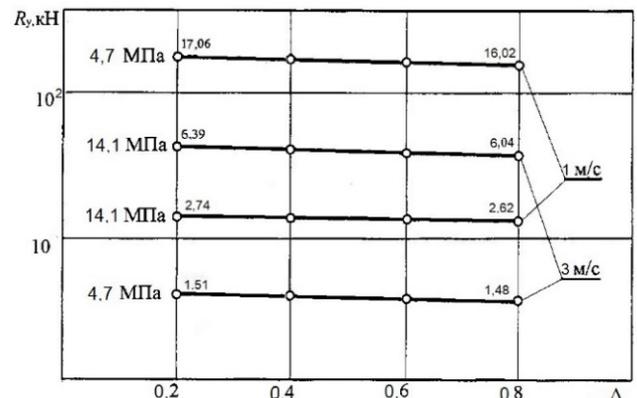


Рис. 2. Изменение вертикальной составляющей

Fig. 2. Change in the vertical component

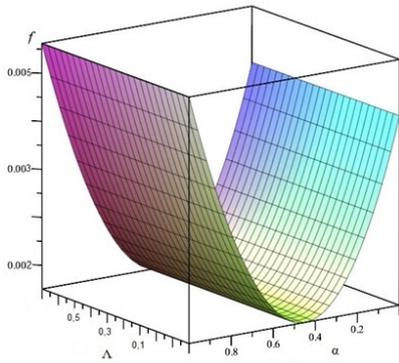


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от параметра сжимаемости и вязкости

Fig. 3. Dependence of friction coefficient on the parameters of compressibility and viscosity

При постоянной температуре сжимаемость минимально влияет на режим эксплуатации показывает рис. 2. Влияние температуры подчеркивает важность контроля для стабильной и эффективной работы системы.

Проведенные проверки подтвердили надежность предложенной теоретической модели в указанных диапазонах параметров. В частности, значения параметра сжимаемости $\Lambda = 0,1 \dots 0,5$, напряжения σ в диапазоне $5,9 \dots 29,5$ МПа были тщательно протестированы, чтобы убедиться в точности и применимости модели в широком диапазоне сценариев (табл. 1).

1. Зависимость коэффициента трения

1. Dependence of the coefficient of friction

σ , МПа	Параметр сжимаемости Λ				
	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
	Коэффициент трения				
5,90	0,008990	0,0113130	0,009800	0,0061000	0,0034300
11,8	0,005790	0,0056910	0,005853	0,0041850	0,0027965
17,7	0,002493	0,0024920	0,002406	0,0022705	0,0021570
23,6	0,002395	0,0023613	0,002304	0,0021136	0,0021379
29,5	0,002197	0,0021307	0,002202	0,0021570	0,0021188

На основе полученных данных был проведен анализ, позволяющий оценить точность расчетной модели. Результаты экспериментов показали, что расчетная модель демонстрирует высокую точность в поведении

конструкции (табл. 1). Все выявленные отклонения находятся в допустимых пределах, что подтверждает надежность и работоспособность модели в различных рабочих условиях.

2. Сравнительный анализ результатов исследования

2. Comparative analysis of the research results

Режим		Теоретический результат	Экспериментальное исследование
σ , МПа	v , м/с	Коэффициент трения	
5,9	0,3	0,0125	0,0132
11,8	0,3	0,0070	0,0071
17,7	0,3	0,0050	0,0048
23,6	0,3	0,0065	0,0071
29,5	0,3	0,0098	0,0104

Заклучение

В соответствии с ранее заданными параметрами канавок, была разработана модель для расчета, которая подробно описывает поведение подшипника в условиях гидродинамического режима. Особое внимание было уделено сжимаемости истинно-вязкого смазочного материала, чей коэффициент вязкости варьируется в зависимости от давления и температуры, а также течению в турбулентном режиме.

В результате проведенного исследования появилась возможность определять основные эксплуатационные характеристики подшипника еще на стадии проектирования. Это значительно улучшает его надежность и срок службы, что является важным шагом в области технологий подшипников и смазочных материалов.

Исследования радиальных подшипников скольжения, проводимые с учетом изменения вязкости при различных давлениях и температурах, а также сжимаемости, привели к уточнению их рабочих характеристик.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хасьянова Д.У., Мукутадзе М.А. Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения, смазываемого микрополярными смазочными материалами и расплавами металлического покрытия // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 4. С. 46–53. DOI 10.31857/S0235711922040101.
2. Хасьянова Д.У., Мукутадзе М.А. Исследование износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем с учетом зависимости вязкости от давления и температуры // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2023. № 3. С. 42–49.
3. Василенко В.В., Кирищцева В.И., Мукутадзе М.А., Шведова В.Е. Исследование износостойкости подшипника скольжения с полимерным покрытием опорного кольца, имеющего канавку // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2022. Т. 22, № 4. С. 365–372.
4. Абдулрахман Х.Н., Кирищцева В.И., Мукутадзе М.А., Шведова В.Е. Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала с учетом зависимости вязкости от давления // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 4. С. 9–17.
5. Polyakov R., Savin L. The method of long-life calculation for a friction couple «rotor-hybrid bearing» // Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in

Science and Engineering, COUPLED PROBLEMS 2017, Rhodes Island, June 12-14, 2017. P. 433–440.

6. Polyakov R., Majorov S., Kudryavcev I., Krupenin N. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability // Vibroengineering Procedia: 44, Vibration and Acoustics in Civil Engineering and Fault Diagnostics, Dubai, 2020. P. 61–67. <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21379>.

7. Kornaeva E.P., Kornaev A.V., Kazakov Yu.N., Polyakov R.N. Application of Artificial Neural Networks to Diagnostics of Fluid-Film Bearing Lubrication // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 734. P. 012154. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012154>

8. Shutin D.V., Polyakov R.N. Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 862, no. 032098.

9. Поляков Р.Н., Савин Л.А., Внуков А.В. Математическая модель бесконтактного пальчикового уплотнения с активным управлением зазором // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2018, № 1(327), С. 66–71.

10. Негматов С.С., Абед Н.С., Саидахмедов Р.Х., Ульмасов Т.У., Григорьев А.Я., Сергиенко В.П., Негматова К.С. и др. Исследование вязкоупругих и адгезионно-прочностных свойств и разработка эффективных вибропоглощающих композиционных полимерных материалов и покрытий машиностроительного назначения // Пластические массы. 2020. № 7–8. С. 32–36. DOI 10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36.

11. Сайфуллаева Г.И., Негматов С.С., Абед Н.С., Камалова Д.И. Исследование электропроводящих композиционных терморезистивных полимерных материалов и покрытий на их основе для триботехнического назначения // Universum: технические науки. Электронный научный журнал. 2020. № 12(81). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102>

12. Ерофеев В.Т. Смирнов И.В., Воронов П.В., Афонин В.В., Каблов Е.Н., Старцев О.В. Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья // Фундаментальные исследования. 2016. № 11-5. С. 911–924. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (20.08.2024).

13. Кочешков И. В. Анализ понятия и принципов создания композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 2 (56). С. 3–11.

14. Zinoviev V.E., Kharlamov P.V., Zinoviev N.V., Kornienko R.A. Analysis of Factors Affecting the Strength of Fixed Bonds Assembled Using Metal-Polymer Compositions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 900. P. 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012009>

15. Харламов П.В. Мониторинг изменений упруго-диссипативных характеристик для решения задач по исследованию трибологических процессов в системе «железнодорожный путь – подвижной состав» // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. №. 1. С. 122–129. DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_122.

16. Харламов П.В. Применение физико-химического подхода для изучения механизма образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности контртела // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3. С. 37–45. DOI 10.46973/0201-727X_2021_3_37.

17. Харламов П.В. Исследование образования вторичных структур фрикционного переноса на поверхности стальных образцов при реализации технологии металлоплакирования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2021. № 12. С. 556–560. DOI 10.36652/0202-3350-2021-22-12-556-560.

18. Шаповалов В.В., Щербак П.Н., Богданов В.М., Фейзов Э.Э., Харламов П.В., Фейзова В.А. Повышение эффективности фрикционной системы «колесо – рельс» // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2019. Т. 78, № 3. С. 177–182. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182>. EDN ZZGAOL.

19. Shapovalov V.V., Kolesnikov V.I., Kharlamov P.V., Kornienko R.A., Petrik A.M. Improving the efficiency of the path – rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 900 (1). P. 012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012011>

20. Шаповалов В.В., Мигаль Ю.Ф., Озябкин А.Л., Колесников И.В., Корниенко Р.А., Новиков Е.С. Металлоплакирование рабочих поверхностей трения пары «колесо – рельс» // Трение и износ. 2020. Т. 41, № 4. С. 464–474. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2020-41-4-464-474>. EDN WPTWDK.

21. Мукутадзе М.А., Абдулрахман Х.Н., Шведова В.Е., Бадахов Г.А., Зиновьев Н.В. Исследования на износостойкость конструкции радиального подшипника с учетом реологических свойств микрополярного смазочного материала // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 5–14. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2023-187-5-14>. EDN IKFMSX

22. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Improved wear resistance of a metal-coated radial slider bearing // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2022. V. 51. № 2. P. 128–133.

REFERENCES

1. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Increasing the wear resistance of a radial sliding bearing lubricated with micropolar lubricants and metal coating melts // Problems of mechanical engineering and machine reliability, 2022, no. 4. pp. 46–53. DOI 10.31857/S0235711922040101.

2. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. A study on the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile, taking into account the dependence of viscosity on pressure and temperature // Problems of mechanical engineering and automation, 2023, no. 3, pp. 42–49.

3. Vasilenko V.V., Kirishieva V.I., Mukutadze M.A., Shvedova V.E. Investigation of the wear resistance of a journal bearing with polymer-coated grooved support ring // Advanced

Engineering Research (Rostov-on-Don), 2022, vol. 22, no. 4, pp. 365–372.

4. Abdulrahman Kh.N., Kirishieva V.I., Mukutadze M.A., Shvedova V.E. Increasing the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile and a polymer coating on the shaft surface, taking into account the dependence of viscosity on pressure // Frontier Materials & Technologies, 2022, no. 4, pp. 9–17.

5. Polyakov R., Savin L. The method of long-life calculation for a friction couple «rotor-hybrid bearing» // Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, COUPLED PROBLEMS 2017, Rhodes Island, June 12-14, 2017. P. 433–440.

6. Polyakov R., Majorov S., Kudryavcev I., Krupenin N. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability // Vibroengineering Procedia : 44, Vibration and Acoustics in Civil Engineering and Fault Diagnostics, Dubai, 2020. P. 61–67. <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21379>.

7. Kornaeva E.P., Kornaev A.V., Kazakov Yu.N., Polyakov R.N. Application of Artificial Neural Networks to Diagnostics of Fluid-Film Bearing Lubrication // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 734. P. 012154. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/734/1/012154>

8. Shutin D.V., Polyakov R.N. Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 862, no. 032098.

9. Polyakov R.N., Savin L.A., Vnukov A.V. Mathematical model of the inflammatory pullic seal with active management of the clearance // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology, 2018, no. 1(327), pp. 66–71.

10. Negmatov S.S., Obed N.S., Saidakhmedov R.H., Ulmasov T.U., Grigoriev A.Ya., Sergienko V.P., Negmatova K.S. et al. Research of viscoelastic and adhesion-strength property and development of effective vibration absorbing composite polymeric materials and coatings of mechanical engineering purpose // Plastic Masses, 2020, no. 7-8, pp. 32–36. DOI 10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36.

11. Saifullayeva G.I., Negmatov S., Abed N.S., Kamalova D.I. Research of electrically conductive composite thermoreactive polymer materials and coatings on their basis for tribotechnical purpose // Universum: technical sciences. Electronic scientific journal, 2020, no. 12(81). URL: <https://7univer-sum.com/ru/tech/archive/item/11102>

12. Yerofeev V.T., Smirnov I.V., Voronov P.V., Afonin V.V., Kablov E.N., Startsev O.V. Investigation of the resistance of polymer coatings under the influence of climatic factors of the Black Sea coast // Fundamental Research, 2016, no. 11-5, pp. 911–924. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (08/20/2024).

13. Kocheshkov I. V. Analysis of definition and principles of composite materials development. // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2016, no. 2 (56), pp. 3–11.

14. Zinoviev V.E., Kharlamov P.V., Zinoviev N.V., Kornienko R.A. Analysis of Factors Affecting the Strength of Fixed Bonds Assembled Using Metal-Polymer Compositions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 900. P. 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012009>

15. Kharlamov P.V. Monitoring measurements in elastic-dissipative characteristics for solving tasks on studying tribological processes in the «Railway - rolling stock» system // Bulletin of the Rostov State University of Railway Communications, 2021, no. 1, pp. 122–129. DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_122.

16. Kharlamov P.V. Application of the physico-chemical approach to study the mechanism of formation of secondary frictional transfer structures on the control surface // Bulletin of the Rostov State University of Railway Transport, 2021, no. 3, pp. 37–45. DOI 10.46973/0201-727X_2021_3_37.

17. Kharlamov P.V. Investigation of the formation of secondary frictional transfer structures on the surface of steel samples during the implementation of metal plating technology // Assembly in mechanical engineering, instrument engineering, 2021, no. 12, pp. 556–560. DOI 10.36652/02-3350-2021-22-12-556-560.

18. Shapovalov V.V., Shcherbak P.N., Bogdanov V.M., Feizov E.E., Kharlamov P.V., Feizova V.A. Improving the efficiency of the wheel–rail friction system // Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport, 2019, vol. 78, no. 3. pp. 177–182. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182>. EDN ZZGAOL.

19. Shapovalov V.V., Kolesnikov V.I., Kharlamov P.V., Kornienko R.A., Petrik A.M. Improving the efficiency of the path – rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 900 (1). P. 012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/900/1/012011>

20. Shapovalov V.V., Migal Yu.F., Ozyabkin A.L., Kolesnikov I.V., Kornienko R.A., Novikov Ye.S. Metal plating of the friction working surfaces of the wheel–rail pair // Friction and wear, 2020, vol. 41, no. 4, pp. 464–474. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2020-41-4-464-474>. EDN WPTWDK.

21. Mukutadze M.A., Abdulrahman Kh.N., Shvedova V.E., Badakhov G.A., Zinoviev N.V. Studies on wear resistance of the radial bearing design taking into account rheological properties of micropolar lubricant // Omsk Scientific Bulletin, 2023, no. 3 (187), pp. 5–14.

22. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Improved wear resistance of a metal-coated radial slider bearing // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2022. V. 51. № 2. P. 128–133.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.10.2024; одобрена после рецензирования 02.12.2024; принята к публикации 06.12.2024

The article was submitted 14.10.2024; approved after reviewing 02.12.2024; accepted for publication 06.12.2024