

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.47>**ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА ПРИ УЧЕТЕ СЖИМАЕМОСТИ И ЗАВИСИМОСТИ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИКРОПОЛЯРНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ОТ ДАВЛЕНИЯ**

Научная статья

Болгова Е.А.¹, Мукутадзе М.А.^{2,*}, Приходько В.М.³, Шведова В.Е.⁴¹ ORCID : 0000-0002-0737-1846;² ORCID : 0000-0003-2810-3047;³ ORCID : 0000-0002-0907-9320;⁴ ORCID : 0000-0002-8469-7671;^{1,2,3,4} Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (murman1963[at]yandex.ru)

Аннотация

Статья посвящена созданию математической модели, описывающей поведение микрополярного смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника, учитывая сжимаемость и изменение вязкости под воздействием давления. Новая математическая модель получена на основе известных уравнений движения микрополярного смазочного материала для случая «тонкого слоя» с использованием уравнений неразрывности и состояния. Она позволяет выполнить оценку величины гидродинамического давления, нагрузочной способности и силы трения при ламинарном режиме течения смазочного материала. Произведено сравнение численных результатов теоретических моделей с экспериментальными данными, учитывая новые факторы, ранее не рассматриваемые.

Новизна полученной модели заключается в разработке новой методики инженерных расчетов модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения с учетом сжимаемости микрополярного смазочного материала, которая позволяет определить величину основных триботехнических параметров.

По итогам исследования существенно расширена возможность применения на практике результатов теоретических моделей, подтвержденных экспериментальными исследованиями, которые позволяют произвести оценку эксплуатационных характеристик модифицированной конструкции радиального подшипника с учетом новых переменных факторов.

Ключевые слова: сжимаемость смазочного материала, модифицированная конструкция подшипника, ламинарный режим, оценка износостойкости, покрытие.

ASSESSMENT OF WEAR RESISTANCE OF MODIFIED RADIAL BEARING WITH REGARD TO COMPRESSIBILITY AND PRESSURE DEPENDENCE OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF MICROPOLAR LUBRICANT

Research article

Bolgova E.A.¹, Mukutadze M.A.^{2,*}, Prikhodko V.M.³, Shvedova V.Y.⁴¹ ORCID : 0000-0002-0737-1846;² ORCID : 0000-0003-2810-3047;³ ORCID : 0000-0002-0907-9320;⁴ ORCID : 0000-0002-8469-7671;^{1,2,3,4} Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

* Corresponding author (murman1963[at]yandex.ru)

Abstract

The article is dedicated to the creation of a mathematical model describing the behaviour of micropolar lubricant in the working gap of a radial bearing, taking into account compressibility and viscosity change under pressure. The new mathematical model is derived on the basis of the known equations of motion of micropolar lubricant for the case of "thin layer" using the continuity and state equations. It enables estimation of hydrodynamic pressure, loading capacity and friction force under laminar regime of lubricant flow. Numerical results of theoretical models are compared with experimental data, taking into account new factors not previously discussed.

The novelty of the obtained model consists in the development of a new technique of engineering calculations of the modified design of the radial sliding bearing taking into account the compressibility of micropolar lubricant, which allows to determine the value of the main tribotechnical parameters.

According to the results of the research the possibility of application in practice of the results of theoretical models, confirmed by experimental researches, which allow to make an estimation of operational characteristics of the modified design of a radial bearing taking into account new variable factors, is considerably expanded.

Keywords: lubricant compressibility, modified bearing design, laminar regime, wear resistance assessment, coating.

Введение

Установлено, что высокая сжимаемость смазочного материала негативно отражается на энергетических и динамических характеристиках трибоузлов. Это приводит к снижению подачи смазки, уменьшению объемного КПД,

замедлению реакции двигателя и даже к нестабильному движению. При оценке динамики сильно нагруженных конструкций игнорирование сжимаемости смазочного материала приводит к некорректным результатам. В связи с этим теоретическое исследование сжимаемости смазочного материала для трибоузлов машин и механизмов становится важным и актуальным вопросом.

Результаты исследований [1], [2], [3], [4], посвященных подшипникам скольжения с полимерным покрытием на опорной поверхности, нашли широкое применение в машиностроительной и авиакосмической технике. Такие подшипники обладают высокой несущей способностью и эффективно функционируют при относительно низких скоростях скольжения и значительных нагрузках. Они особенно эффективны в условиях граничного трения при пуске и гидродинамического режима смазывания во время работы.

Современные разработки подшипников скольжения [5], [6], [7], [8] направлены на использование инновационных материалов и технологий, которые могут повысить их устойчивость к износу, температурам и коррозии. Например, применение полимерных и композитных материалов позволяет создавать элементы с уникальными свойствами, такими как самосмазывание и улучшенная износостойкость. Металлографические исследования и компьютерное моделирование также играют немаловажную роль в оптимизации геометрии узлов для снижения трения и повышения общей эффективности механизмов.

Изучение работ [9], [10], [11], [12], которые посвящены гидродинамическому режиму смазки в подшипниках с использованием вязких смазочных материалов, показывает, что для более эффективного их применения в трибоузлах различных машин и механизмов необходимо проводить исследования новых моделей их течения. Эти модели должны раскрывать закономерности сложных тепловых и гидродинамических процессов, возникающих в смазываемых парах трения радиальных подшипников скольжения.

Исследования [14], [15], [16], [17], направленные на изучение формирования вторичных структур через металлоплакирование фрикционного переноса на железнодорожных путях, выявили уменьшение коэффициента трения и улучшение виброгасящих характеристик. Помимо этого, поперечная деформация снизилась на 1,5%, а износ колесных пар подвижного состава на прямых участках дорог уменьшился. Вдобавок тяговая мощность увеличилась, и продольная деформация твердого тела возросла примерно на 60,6%.

Создание новых и усовершенствование имеющихся расчетных моделей подшипников набирает все большие темпы, особенно в контексте их применения в трибосопряжениях.

В данной работе основное внимание уделяется разработке математических моделей, которые учитывают влияние сжимаемости и зависимости вязкости жидкого смазочного материала от давления для модифицированной конструкции радиального подшипника.

Цель данного исследования заключается в выявлении закономерностей устойчивого гидродинамического режима смазки путем учета ширины канавки на поверхности вала и сжимаемости используемого жидкого смазочного материала.

Постановка задачи

Рассматривается установившееся течение сжимаемой микрополярной жидкости в рабочем зазоре. Подшипник неподвижен, а вал с покрытием вращается со скоростью Ω .

В полярной системе координат (рис. 1) r', θ с полюсом в центре вала, уравнения контуров вала с покрытием C_1 , без покрытия C_0 , подшипниковой втулки с некруговым профилем C_2 запишутся в виде:

$$C_1 : r' = r_0, \quad C_0 : r' = r_0 - \tilde{h}, \quad C_2 : r' = r_1(1 + H) - a' \sin \omega \theta. \quad (1)$$

Полагаем, что вязкостные характеристики зависят от давления по закону:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha' p'}, \quad \kappa' = \kappa_0 e^{\alpha' p'}, \quad \gamma' = \gamma_0 e^{\alpha' p'}. \quad (2)$$

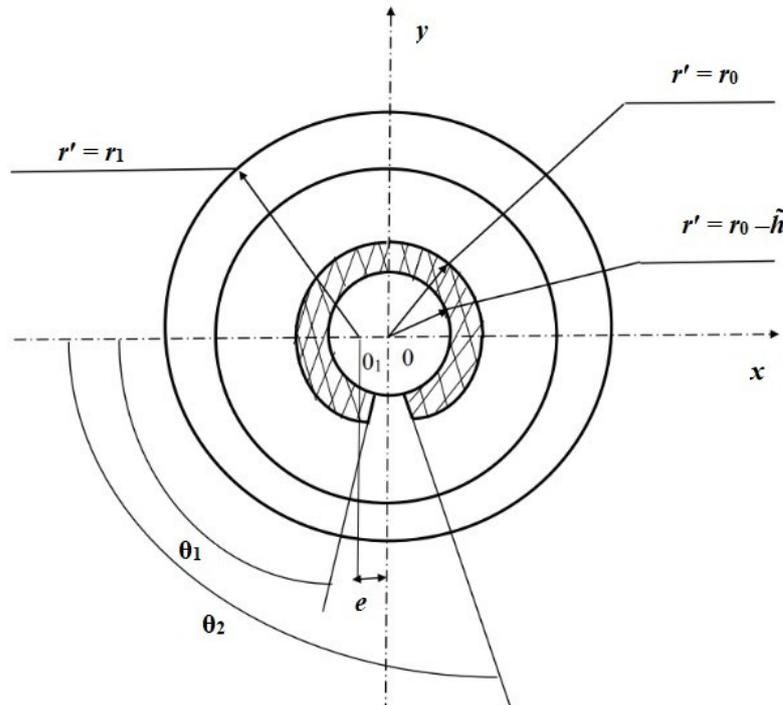


Рисунок 1 - Схема трибоконтакта
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.47.1>

Разработка математической модели

Для реализации поставленной цели воспользуемся общеизвестными безразмерными уравнениями движения микрополярного смазочного материала для «тонкого слоя» с учетом (2), уравнением неразрывности [21], а также уравнением состояния с граничными условиями (см. рис. 1).

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + N^2 \frac{\partial v_i}{\partial r} = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{e^{-\alpha p} dp_i}{d\theta}, \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} - \frac{v_i}{N_1} - \frac{1}{N_1} \cdot \frac{du_i}{dr} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0, p = \rho. \tag{3}$$

$$u = 0, \quad v = 0, \quad v = 0 \text{ при } r = 1 + \eta \cos \theta - \eta_1 \sin \omega \theta = h(\theta),$$

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

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

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}. \tag{4}$$

$$Q = \text{const}; p_3(\theta_2) = p_2(\theta_2); p_1(\theta_1) = p_2(\theta_1).$$

Полагаем, что функции $u^*(\theta)$ и $v^*(\theta)$ определяются соотношениями:

$$v^*(\theta) = \frac{1}{h(\theta) - \eta_2}, u^*(\theta) = \frac{\eta \sin \theta}{h(\theta) - \eta_2} \tag{5}$$

Для сжимаемого смазочного материала пренебрегаем $\frac{1}{N_1} \ll 1$, тогда уравнение (3) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2h} (2r - h) = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{e^{-\alpha p} dp_i}{d\theta}, v_i = \frac{1}{2h} (r^2 - rh), \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0, p = \rho. \tag{6}$$

Автомодельное решение (6) ищем по известному методу [22]

$$\rho v_i = \frac{\partial \Psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta), \quad \rho u_i = -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta),$$

$$\Psi_i(r, \theta) = \tilde{\Psi}_i(\xi_i), \quad V_i(r, \theta) = p \tilde{v}_i(\xi_i), \quad U_i(r, \theta) = -p \tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta),$$

$$\xi_i = \frac{r_i}{h(\theta)} \text{ при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi,$$

$$\xi_i = \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \text{ при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2. \tag{7}$$

В результате для гидродинамического давления получим:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= 1 + 6\Lambda \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left(\eta \sin \theta + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) - \frac{1}{p} \frac{\eta_1 \theta}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - 1) \right), \\
 p_2 &= 1 + \frac{6\Lambda}{(1+h)^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[(\theta - \theta_1) \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} + \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - \cos \omega \theta_1) - \right. \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \left. - \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_1 \right) \right) + \frac{1}{p} \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \left(\tilde{\eta} (\sin \theta - \sin \theta_1) + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega \theta - \cos \omega \theta_1) \right) \right] \\
 p_3 &= 1 + 6\Lambda \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[(\theta - \theta_2) \left(\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} + \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - \cos \omega \theta_2) - \right. \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \left. - \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) + \frac{1}{p} \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \left(\eta (\sin \theta - \sin \theta_2) + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - \cos \omega \theta_2) \right) \right]. \tag{8}
 \end{aligned}$$

Результаты, полученные на основе теоретических моделей и последующих расчетов, демонстрируют значительное улучшение несущей способности и снижение коэффициента трения при изменении параметров в указанных диапазонах.

С учетом вариаций параметров сжимаемости ($\Lambda = 0, 1 - 0, 9$), скорости ($v = 0, 3 - 3$ м/с), радиуса ($r = 20$ мм), нагрузочной способности ($\sigma = 14 - 70$ МПа) и вязкости ($\mu_0 = 0, 0707 - 0, 0076$), несущая способность увеличилась примерно на 15–17 % (табл. 1). Это свидетельствует о значительном улучшении способности материала выдерживать нагрузку при различных условиях эксплуатации. Одновременно с этим было зафиксировано заметное уменьшение коэффициента трения (на 6–8 %).

Таблица 1 - Результаты теоретического исследования

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.47.2>

№	σ , МПа	Параметр сжимаемости Λ				
		0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
		Коэффициент трения				
1	14	0,0085	0,0110	0,009	0,0058	0,0032
2	28	0,0053	0,0054	0,0055	0,0038	0,0024
3	42	0,0020	0,0022	0,0021	0,00197	0,00194
4	56	0,0019	0,0021	0,0020	0,00191	0,00192
5	70	0,00108	0,0020	0,0019	0,00195	0,00901

Для подтверждения эффективности теоретических моделей нами были проведены экспериментальные исследования влияния параметра сжимаемости на работу подшипников (табл. 2).

Таблица 2 - Сравнительный анализ результатов исследования

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.47.3>

№ п/п	Режим		Теоретический результат		Экспериментальное исследование		Погрешность, %	
	σ , МПа	V , м/с	без учета сжимаемости	с учетом сжимаемости	без учета сжимаемости	с учетом сжимаемости		
1	14	0,3	0,0150	0,0132	0,0174	0,0149	5–12	6–13
2	28	0,3	0,0095	0,0078	0,0099	0,0077		
3	42	0,3	0,0075	0,0056	0,0088	0,0068		
4	56	0,3	0,0090	0,0066	0,0098	0,0087		
5	70	0,3	0,0130	0,0099	0,0142	0,0099		

Используя специализированный комплекс экспериментального оборудования для исследования поведения подшипников скольжения в условиях гидродинамического смазывания, удалось детально изучить различные аспекты функционирования подшипников в определенном диапазоне нагрузочно-скоростных режимов, что позволяет значительно расширить представления об их работе и надежности.

Данные экспериментов показывают не только закономерности изменения трения и износа подшипников, но и выявляют особенности процесса образования смазочной пленки и её влияния на их эксплуатационные характеристики.

Заключение

Разработанные математические модели позволяют с высокой точностью рассчитывать основные триботехнические параметры подшипника, учитывая как сжимаемость, так и зависимость вязкости микрополярного смазочного материала от давления. Такой подход обеспечивает более точное понимание изменений эксплуатационных характеристик подшипников в различных условиях нагрузки и применения.

Отдельное внимание следует обратить на использование полимерного покрытия в качестве дополнительного смазывающего элемента. Включение этого параметра в модель позволяет существенным образом улучшить эксплуатационные характеристики подшипников. В частности, были отмечены значительное увеличение несущей способности подшипников – на 1517%, и снижение коэффициента трения на 68%. Это свидетельствует о перспективности применения данных модификаций в промышленности.

Итоги исследования показали, что радиальные подшипники скольжения с модифицированными параметрами и дополнительным полимерным покрытием могут найти широкое применение в высоконагруженных механизмах. Применение этих инновационных подшипников не только продлевает срок службы оборудования, но и существенно повышает его энергетическую эффективность.

Основные результаты

1. В результате проведенного исследования удалось значительно расширить область применения на практике расчетных моделей для радиального подшипника скольжения с полимерным покрытием и канавкой. Разработанные модели позволяют провести оценку его эксплуатационных характеристик, таких как гидродинамическое давление, нагрузочная способность и коэффициент трения.

2. Разработана новая методология формирования расчетных моделей радиальных подшипников, которая не только теоретически обоснована, но и подкреплена экспериментальными исследованиями. Особое внимание уделено гидродинамическому режиму смазывания, который играет ключевую роль в длительной и стабильной работе радиальных подшипников. Методология предполагает анализ распределения смазочного материала, его вязкостных свойств в условиях высокой нагрузки и скорости, а также учитывает влияние температурных колебаний на смазочные свойства. Это позволяет более точно предсказывать моменты, когда подшипник переходит в режим недостаточного смазывания, и принимать превентивные меры для предотвращения износа и поломок.

Условные обозначения

r_0 – радиус вала с полимерным покрытием; r_1 – радиус подшипниковой втулки; e – эксцентриситет; e – относительный эксцентриситет; h – высота канавки; a' и ω – амплитуда возмущения и параметр адаптированного профиля втулки соответственно; μ' – коэффициент динамической вязкости смазочного материала; κ' , γ' – коэффициенты вязкости микрополярного смазочного материала; μ_0 – характерная вязкость неньютоновского смазочного материала; p' – гидродинамическое давление в смазочном слое; α' – экспериментальная постоянная величина; κ_0 , γ_0 – характерная вязкость микрополярного смазочного материала.

Благодарности

Авторы выражают благодарность руководителю лаборатории кафедры «Теоретическая механика» академику Российской академии наук Колесникову Владимиру Ивановичу за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Acknowledgement

The authors express their gratitude to the head of the laboratory of the Department of Theoretical Mechanics, Academician of the Russian Academy of Sciences, Kolesnikov Vladimir Ivanovich, for his help in carrying out the experimental studies.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Хасьянова Д.У. Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения, смазываемого микрополярными смазочными материалами и сплавами металлического покрытия / Д.У. Хасьянова, М.А. Мукутадзе // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2022. — № 4. — С. 46—53. — DOI 10.31857/S0235711922040101.
2. Хасьянова Д.У. Исследование на износостойкость радиального подшипника с нестандартным опорным профилем с учетом зависимости вязкости от давления и температуры / Д.У. Хасьянова, М.А. Мукутадзе // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2023. — № 3. — С. 42—49.
3. Василенко В.В. Исследование износостойкости подшипника скольжения с полимерным покрытием опорного кольца, имеющего канавку / В.В. Василенко, В.И. Кирищева, М.А. Мукутадзе [и др.] // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 365—372.
4. Абдулрахман Х.Н. Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала с учетом зависимости вязкости от давления / Х.Н. Абдулрахман, В.И. Кирищева, М.А. Мукутадзе [и др.] // Frontier Materials & Technologies. — 2022. — № 4. — С. 9—17.

5. Polyakov R. The method of long-life calculation for a friction couple «rotor-hybrid bearing» / R. Polyakov, L. Savin // 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. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability / R. Polyakov // Vibroengineering Procedia. — 2020. — Vol. 30. — P. 61—67. — DOI 10.21595/vp. 2020.21379.
7. Kornaeva E.P. Application of artificial neural networks to diagnostics of fluid-film bearing lubrication / E.P. Kornaeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 734, No. 012154. — DOI 10.1088/1757-899/734/012154.
8. Shutin D.V. Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery / D.V. Shutin, R.N. Polyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 862, No. 032098. — DOI 10/1088/1757-899X/862/3/032098.
9. Поляков Р.Н. Математическая модель бесконтактного пальчикового уплотнения с активным управлением зазором / Р.Н. Поляков, Л.А. Савин, А.В. Внуков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2018. — № 1 (327). — С. 66—71.
10. Негматов С.С. Исследование вязкоупругих и адгезионно-прочностных свойств и разработка эффективных вибропоглощающих композиционных полимерных материалов и покрытий машиностроительного назначения / С.С. Негматов [и др.] // Пластические массы. — 2020. — № 7-8. — С. 32—36.
11. Сайфуллаева Г.И. Исследование электропроводящих композиционных терморезистивных полимерных материалов и покрытий на их основе для триботехнического назначения / Г.И. Сайфуллаева [и др.] // Universum: технические науки. Электронный научный журнал. — 2020. — № 12(81). — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102> (дата обращения: 05.05.2024).
12. Ерофеев В.Т. Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья / В.Т. Ерофеев [и др.] // Фундаментальные исследования. — 2016. — № 11-5. — С. 911—924. — URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (дата обращения: 05.05.2024).
13. Икромов Н.А. Объекты и методики исследования композиционных полимерных материалов / Н.А. Икромов, Д.Н. Расулов // Современные научные исследования и инновации. — 2020. — № 10. — URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/10/93640> (дата обращения: 05.05.2024).
14. Zinoviev V.E. Analysis of factor affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions / V.E. Zinoviev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 900 (1), No. 012009. — DOI 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» / П.В. Харламов // 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 / П.В. Харламов // 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 / П.В. Харламов // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2021. — № 12. — С. 556—560. — DOI 10.36652/0202-3350-2021-22-12-556-560.
18. Шаповалов В. В. Повышение эффективности фрикционной системы «колесо – рельс» / В. В. Шаповалов [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2019. — Т. 78, № 3. — С. 177—182.
19. Shapovalov V.V. Improving the efficiency of the path – rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds / V.V. Shapovalov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 900 (1), No. 012011. — DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012011.
20. Шаповалов В.В. Металлоплакирование рабочих поверхностей трения пары «колесо – рельс» / В.В. Шаповалов [и др.] // Трение и износ. — 2020. — Т. 41, № 4. — С. 464-474. — DOI 10.3103/S1068366620040121.
21. Бадахов Г.А. Разработка методики повышения износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала при учете реологических свойств смазочного материала / Г.А. Бадахов, В.Н. Багрова, А.В. Морозова [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. — 2022. — № 12 (126). — DOI 10.23670/IRJ.2022.126.54.
22. Khasyanova D.U. Improved wear resistance of a metal-coated radial slider bearing / D.U. Khasyanova, M.A. Mukutadze // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2022. — V. 51. № 2. — P. 128—133.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Has'yanova D.U. Povyshenie iznosostojkosti radial'nogo podshipnika skol'zheniya, smazyvaemogo mikropolyarnymi smazochnymi materialami i rasplavami metallicheseskogo pokrytiya [Increasing the wear resistance of a radial sliding bearing lubricated with micropolar lubricants and metal coating melts] / D.U. Has'yanova, M.A. Mukutadze // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin [Problems of mechanical engineering and machine reliability]. — 2022. — № 4. — P. 46—53. — DOI 10.31857/S0235711922040101 [in Russian].
2. Has'yanova D.U. Issledovanie na iznosostojkost' radial'nogo podshipnika s nestandartnym opornym profilem s uchedom zavisimosti vyazkosti ot davleniya i temperatury [A study on a wear-resistant basis of radiation exposure with a constant reference factor, taking into account the dependence of viscosity on pressure and temperature] / D.U. Has'yanova, M.A.

Mukutadze // Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii [Problems of mechanical engineering and automation]. — 2023. — № 3. — P. 42—49 [in Russian].

3. Vasilenko V.V. Issledovanie iznosostojkosti podshipnika skol'zheniya s polimernym pokrytiem opornogo kol'ca, imeyushchego kanavku [Investigation of the wear resistance of a sliding bearing with a polymer coating of a support ring having kanavku] / V.V. Vasilenko, V.I. Kirishchieva, M.A. Mukutadze [et al.] // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). — 2022. — V. 22, № 4. — P. 365—372 [in Russian].

4. Abdulrahman H.N. Povyshenie iznosostojkosti radial'nogo podshipnika s nestandartnym opornym profilom i polimernym pokrytiem na poverhnosti vala s uchetom zavisimosti vyazkosti ot davleniya [Approval of an isostable radionuclide analog with a foreign support profile and a polymer coating on the surface of the shaft, taking into account the dependence of viscosity on pressure] / H.N. Abdulrahman, V.I. Kirishchieva, M.A. Mukutadze [et al.] // Frontier Materials & Technologies. — 2022. — № 4. — P. 9—17 [in Russian].

5. Polyakov R. The method of long-life calculation for a friction couple «rotor-hybrid bearing» / R. Polyakov, L. Savin // 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. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability / R. Polyakov // Vibroengineering Procedia. — 2020. — Vol. 30. — P. 61—67. — DOI 10.21595/vp. 2020.21379.

7. Kornaeva E.P. Application of artificial neural networks to diagnostics of fluid-film bearing lubrication / E.P. Kornaeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 734, No. 012154. — DOI 10.1088/1757-899/734/012154.

8. Shutin D.V. Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery / D.V. Shutin, R.N. Polyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 862, No. 032098. — DOI 10/1088/1757-899X/862/3/032098.

9. Polyakov R.N. Matematicheskaya model' beskontaktnogo pal'chikovogo uplotneniya s aktivnym upravleniem zazorom [Mathematical model of a non-contact finger seal with active gap control] / R.N. Polyakov, L.A. Savin, A.V. Vnukov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii [Fundamental and applied problems of engineering and technology]. — 2018. — № 1 (327). — P. 66—71 [in Russian].

10. Negmatov S.S. Issledovanie vyazkoupругih i adgezionno-prochnostnyh svoystv i razrabotka effektivnyh vibropogloshchayushchih kompozicionnyh polimernykh materialov i pokrytij mashinostroitel'nogo naznacheniya [Investigation of viscoelastic and adhesive strength properties and development of effective vibration-absorbing composite polymer materials and coatings for engineering purposes] / S.S. Negmatov [et al.] // Plasticheskie massy [Plastic masses]. — 2020. — № 7-8. — P. 32—36 [in Russian].

11. Sajfullaeva G.I. Issledovanie elektroprovodyashchih kompozicionnyh termoreaktivnyh polimernykh materialov i pokrytij na ih osnove dlya tribotekhnicheskogo naznacheniya [Research of electrically conductive composite thermosetting polymer materials and coating based on them for tribotechnical purposes] / G.I. Sajfullaeva [et al.] // Universum: tekhnicheskie nauki. Elektronnyj nauchnyj zhurnal [Universum: Technical sciences. Electronic scientific journal]. — 2020. — № 12(81). — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102> (accessed: 05.05.2024) [in Russian].

12. Erofeev V.T. Issledovanie stojkosti polimernykh pokrytij v usloviyah vozdeystviya klimaticheskikh faktorov chernomorskogo poberezh'ya [Investigation of the durability of polymer coatings under the influence of climatic factors of the Black Sea coast] / V.T. Erofeev [et al.] // Fundamental'nye issledovaniya [Basic research]. — 2016. — № 11-5. — P. 911—924. — URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (accessed: 05.05.2024) [in Russian].

13. Ikromov N.A. Ob"ekty i metodiki issledovaniya kompozicionnyh polimernykh materialov [About "concepts and methods of research of composite polymer materials] / N.A. Ikromov, D.N. Rasulov // Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii [Modern scientific research and innovation]. — 2020. — № 10. — URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/10/93640> (accessed: 05.05.2024) [in Russian].

14. Zinoviev V.E. Analysis of factor affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions / V.E. Zinoviev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 900 (1), No. 012009. — DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012009.

15. Harlamov P.V. Monitoring izmenenij upругo-dissipativnyh harakteristik dlya resheniya zadach po issledovaniyu tribologicheskikh processov v sisteme «zhelezodorozhnyj put' – podvizhnoj sostav» [Monitoring of changes in elastic dissipative characteristics for solving problems of studying tribological processes in the Railway – Rolling stock system] / P.V. Harlamov // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya [Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering]. — 2021. — № 1. — P. 122—129. — DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_122 [in Russian].

16. Harlamov P.V. Primenenie fiziko-himicheskogo podhoda dlya izucheniya mekhanizma obrazovaniya vtorichnyh struktur frikcionnogo perenos na poverhnosti kontrtela [Application of a physico-chemical approach to study the mechanisms of formation of secondary structures of frictional transfer on the metal surface] / P.V. Harlamov // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya [Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering]. — 2021. — № 3. — P. 37—45. — DOI 10.46973/0201-727X_2021_3_37 [in Russian].

17. Harlamov P.V. Issledovanie obrazovaniya vtorichnyh struktur frikcionnogo perenos na poverhnosti stal'nyh obrazcov pri realizacii tekhnologii metalloplakirovaniya [Investigation of the formation of secondary structures of frictional transfer on the surface of steel samples during the implementation of metal plating technology] / P.V. Harlamov // Sborka v mashinostroenii, priborostroenii [Assembly in mechanical engineering, instrumentation]. — 2021. — № 12. — P. 556—560. — DOI 10.36652/0202-3350-2021-22-12-556-560 [in Russian].

18. SHapovalov V. V. Povyshenie effektivnosti frikcionnoj sistemy «koleso – rel's» [Improving the efficiency of the Koleso — rel friction system] / V. V. SHapovalov [et al.] // Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zhelezodorozhnogo

transporta [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport]. — 2019. — V. 78, № 3. — P. 177—182 [in Russian].

19. Shapovalov V.V. Improving the efficiency of the path – rolling stock system based on the implementation of anisotropicfrictional bonds / V.V. Shapovalov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 900 (1), No. 012011. — DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012011.

20. SHapovalov V.V. Metalloplakirovanie rabochnih poverhnostej treniya pary «koleso – rel's» [Metal plating of work surfaces for Koleso – rel pairs] / V.V. SHapovalov [et al.] // Trenie i iznos [Friction and wear]. — 2020. — V. 41, № 4. — P. 464-474. — DOI 10.3103/S1068366620040121 [in Russian].

21. Badahov G.A. Razrabotka metodiki povysheniya iznosostojkosti radial'nogo podshipnika s nestandardnym opornym profilem i polimernym pokrytiem na poverhnosti vala pri uchete reologicheskikh svojstv smazochnogo materiala [Development of a technique for increasing the wear resistance of a radial satellite with non-standard toponymic profiles and a polymer coating on the shaft surface, taking into account the rheological properties of the lubricant] / G.A. Badahov, V.N. Bagrova, A.V. Morozova [et al.] // International Scientific Research Journal. — 2022. — № 12 (126). — DOI 10.23670/IRJ.2022.126.54 [in Russian].

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