

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.61>**ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА ПРИ УЧЕТЕ СЖИМАЕМОСТИ И ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ**

Научная статья

Мукутадзе М.А.^{1,*}, Болгова Е.А.², Приходько В.М.³, Шведова В.Е.⁴¹ ORCID : 0000-0003-2810-3047;² ORCID : 0000-0002-0737-1846;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

Антифрикционное полимерное покрытие на поверхности трибосистемы с канавкой выполняет несколько ключевых функций. Во-первых, канавка способствует более равномерному распределению смазочного вещества по поверхности подшипника, что минимизирует риск образования сухого трения. Во-вторых, наличие канавки способствует более эффективному отводу тепла, что предотвращает перегрев рабочей зоны и уменьшает износ подшипника.

Рассматривая сжимаемость смазочного материала, учитывают влияние высокого давления на вязкость и плотность смазочного вещества. В условиях типичных для радиальных подшипников значительные нагрузки могут вызывать изменения в свойствах смазочного материала. Поэтому введение параметра сжимаемости в модель позволяет более точно предсказать поведение смазочного вещества и эффективность смазки в различных режимах работы подшипника.

Результаты исследования показали, что модифицированная конструкция подшипника с нанесенным полимерным покрытием и канавкой значительно улучшает его эксплуатационные характеристики. Было отмечено уменьшение коэффициента трения и увеличение несущей способности подшипника в сравнении с традиционными конструкциями. В результате удалось добиться увеличения срока службы подшипника, что имеет большое значение для его промышленного применения.

Ключевые слова: сжимаемость, модифицированная конструкция, покрытие, турбулентный режим, оценка износостойкости, точное решение.

ASSESSMENT OF WEAR RESISTANCE OF MODIFIED DESIGN OF RADIAL THRUST BEARING TAKING INTO ACCOUNT COMPRESSIBILITY AND VISCOSITY DEPENDENCE ON PRESSURE AND TEMPERATURE

Research article

Mukutadze M.A.^{1,*}, Bolgova E.A.², Prikhodko V.M.³, Shvedova V.Y.⁴¹ ORCID : 0000-0003-2810-3047;² ORCID : 0000-0002-0737-1846;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 antifriction polymer coating on the grooved tribosystem surface fulfils several key functions. Firstly, the groove facilitates a more even distribution of lubricant over the bearing surface, minimizing the risk of dry friction. Secondly, the groove helps to dissipate heat more efficiently, which prevents overheating of the working area and reduces bearing wear.

When examining the compressibility of a lubricant, the effect of high pressure on the viscosity and density of the lubricant is taken into account. Under conditions typical of radial thrust bearings, significant loads can cause changes in lubricant properties. Therefore, the inclusion of a compressibility parameter in the model allows a more accurate prediction of lubricant behaviour and its efficiency in different bearing operating conditions.

The results of the study showed that the modified design of the bearing with polymer coating and groove significantly improves its performance characteristics. A reduction in the coefficient of friction and an increase in the bearing's load carrying capacity were observed compared to conventional designs. As a result, an increase in bearing service life has been achieved, which is of great importance for industrial application.

Keywords: compressibility, modified design, coating, turbulent regime, wear resistance assessment, precise solution.

Введение

Негативное влияние сжимаемости смазочного материала на энергетические и динамические характеристики трибоузлов требует особого внимания, так как игнорирование этого фактора может привести к серьезным последствиям, таким как снижение подачи масла, уменьшение коэффициента полезного действия, ухудшение быстродействия двигателя и возникновение неустойчивости в работе механизмов.

С учетом возрастания требований к производительности и надежности машин, проведение таких исследований становится особенно актуальным. Теоретическое и экспериментальное изучение сжимаемости смазочных материалов позволит разработать более точные модели и методы расчета, что, в свою очередь, поспособствует созданию более устойчивых и эффективных трибоузлов.

Исследования [1], [2], [3], [4], посвященные подшипникам скольжения с полимерным покрытием, представляют собой важный вклад в машиностроительную и авиакосмическую индустрию. Высокая несущая способность таких покрытий позволяет им надежно функционировать при значительных нагрузках и относительно низких скоростях скольжения. Это делает их незаменимыми в условиях граничного трения при запуске и гидродинамическом режиме смазывания во время работы. Применение полимерных покрытий на опорных поверхностях подшипников значительно улучшает их эксплуатационные характеристики и продлевает срок службы.

Использование надежной техники в промышленности, с высокой производительностью, требует создания новых и совершенствование действующих узлов и механизмов, в том числе подшипников скольжения [5], [6], [7], [8].

Анализ работ [9], [10], [11], [12], [13], посвященных гидродинамическому режиму движения вязкого смазочного материала, показывает, что для расширения и конкретизации исследований применительно к трибоузлам машин и механизмов, работающим в разных условиях, необходимо проводить исследования новых моделей течения, позволяющих раскрыть закономерности сложных тепловых и гидродинамических процессов, протекающих в смазываемых парах трения радиальных подшипников скольжения.

Эффективность использования металлоплакирования в железнодорожной инфраструктуре подтверждается многочисленными исследованиями [14], [15], [16], [17] и [18], [19], [20]. Покрытия, созданные с использованием металлоплакирования, обладают высокой стойкостью к абразивному износу, что позволяет значительно продлить срок их службы. Уменьшение трения не только снижает износ, но и способствует более плавному и стабильному движению, что существенно сокращает вибрационные нагрузки.

Анализ проведенных исследований подчеркивает важность разработки расчетных моделей подшипников – одного из самых распространенных типов трибосопряжений.

Условные обозначения

r_0 – радиус вала;

r_1 – радиус подшипниковой втулки;

\tilde{h} – высота канавки;

e – эксцентриситет;

e – относительный эксцентриситет;

μ_0 – характерная вязкость;

μ' – коэффициент динамической вязкости смазочного материала;

p' – гидродинамическое давление в смазочном слое;

α', β' – постоянная экспериментальная величина;

T – температура;

где $\eta = \frac{e}{\delta}$ – конструктивный параметр;

$\eta_2 = \frac{\tilde{h}}{\delta}$ – конструктивный параметр, характеризующий канавку;

θ_1 и θ_2 – соответственно угловые координаты канавки;

$u^*(\theta)$ и $v^*(\theta)$ – известные функции, обусловленные наличием полимерного покрытия на поверхности подшипниковой втулки;

Q – расход смазочного материала в единицу времени;

C_p – теплоемкость при постоянном давлении;

$h(\theta)$ – толщина масляной пленки.

Постановка задачи

Проводится оценка износостойкости модифицированной конструкции радиального подшипника при турбулентном режиме течения.

Скорость движения подшипниковой втулки равна нулю, а скорость движения вала задается параметром Ω [21].

Решение задачи, как и в задаче [21], проведено в полярной системе координат r', θ с началом в центре подшипниковой втулки и углом θ (рис. 1). Уравнения контура вала, подшипниковой втулки, осевой канавки записано так же, как в [21]

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

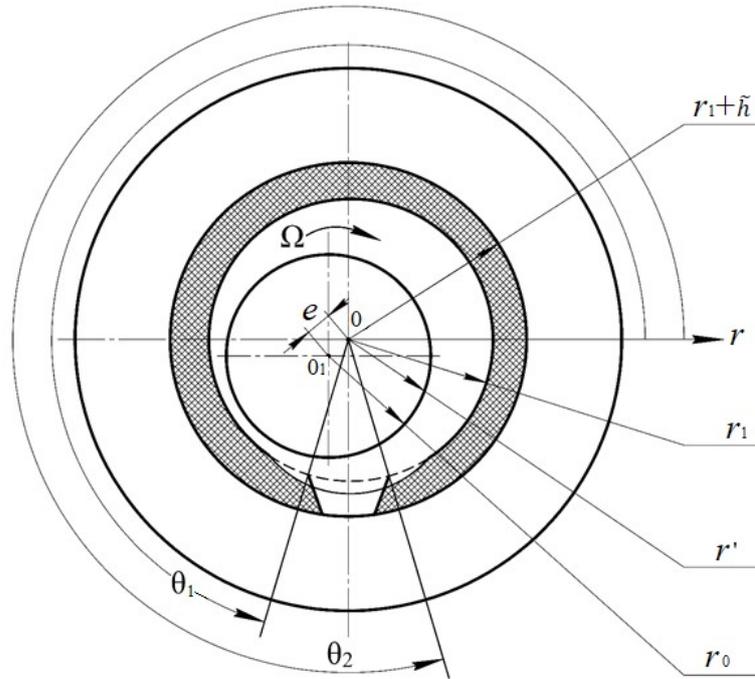


Рисунок 1 - Расчетная схема
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.61.1>

Влияние вязкости масла на давление и температуры в гидродинамическом слое выражается следующей формулой:

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

Для разработки расчетной модели используем следующие исходные уравнения. Первым уравнением является уравнение, которое описывает движение смазочной жидкости. Эта жидкость обладает вязкостью и сжимаемостью и находится в условиях «тонкого слоя». В дополнение к этому используется уравнение неразрывности, как в источнике [21], а также уравнение состояния:

$$\frac{\partial p_i}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = \frac{1}{\Lambda} \frac{1}{e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp_i}{d\theta}, \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial \theta} = 0, \quad p = \rho \quad (3)$$

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

$$v = 0, \quad u = 0 \quad \text{при } r = 0; \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$$

$$v = v^*(\theta), \quad u = u^*(\theta) \quad \text{при } r = \eta_2, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1, \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi, \quad (4)$$

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

$$Q = \text{const}, \quad p_3(\theta_2) = p_2(\theta_2), \quad p_1(\theta_1) = p_2(\theta_1)$$

$$\text{где } \eta = \frac{e}{\delta}, \quad \eta_2 = \frac{\tilde{h}}{\delta}, \quad \Lambda = \frac{\mu \Omega r_0^2}{p \delta^2}, \quad v^*(\theta) = \frac{1}{h(\theta) - \eta_2}, \quad u^*(\theta) = \frac{\eta \sin \theta}{h(\theta) - \eta_2}.$$

Автомодельное решение задачи (3) ищем по известному методу [22]:

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

$$\psi_i(r, \theta) = \tilde{\psi}(\xi_i); \quad \xi_i = \frac{r}{1 - \eta \cos \theta} \quad \text{при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

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

$$\xi_i = \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \quad \text{при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi. \quad (5)$$

Выполнив подстановку (5) в (3), получим:

$$\tilde{\Psi}_i''' = a_i, \quad \tilde{v}_i'' = b_i, \quad \tilde{u}_i'(\xi_i) + \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) = 0,$$

$$\frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp_i}{d\theta} = \left[\frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right], \quad (i = 1, 3), \quad h(\theta) = 1 - \eta \cos \theta, \quad (6)$$

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

Гидродинамическое давление можно определить из аналитических уравнений:

$$\frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j \mu_i(\theta)} \frac{dp_i}{d\theta} = \frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3}, \quad i = 1, 3;$$

$$\frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j \mu_2(\theta)} \frac{dp_2}{d\theta} = \frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)} \quad (7)$$

С учетом закономерности изменений скорости диссипации механической энергии из (7) определяется функция $\mu(\theta)$:

$$\begin{aligned} \frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j\mu_i^2(\theta)} \frac{d\mu_i}{d\theta} &= \frac{\alpha b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{\alpha a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3} + \\ &+ \frac{24\mu_0\beta\Omega r_0(h(\theta) - \eta_2)}{T^* C_p \delta^2 a_i} \cdot \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}''(\xi_i)}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{\tilde{\nu}'(\xi_i)}{(h(\theta) - \eta_2)} \right)^2 d\xi, \quad i = 1, 3; \\ \frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j\mu_2^2(\theta)} \frac{d\mu_2}{d\theta} &= \frac{\alpha b_2}{h^2(\theta)} + \frac{\alpha a_i}{h^3(\theta)} + \frac{24\mu_0\beta\Omega r_0 h(\theta)}{T^* C_p \delta^2 a_2} \cdot \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}''(\xi_i)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{\nu}'(\xi_i)}{h(\theta)} \right)^2 d\xi. \end{aligned} \quad (8)$$

Аналитическое выражение для давления:

$$p_i = \Lambda \mu_i(\theta) \left(b_i I_2(\theta) + \frac{a_i}{p} I_3(\theta) \right) + 1 \quad (9)$$

Для гидродинамического давления p_i , были произведены вычисления с использованием различных численных значений рассматриваемых параметров. В результате вычисления построены графики, демонстрирующие зависимость давления от ряда факторов. На рис. 2 и 3 приведены эти графики, иллюстрирующие изменения в давлении при изменении входных параметров.

На рис. 2 показано, как вертикальная составляющая давления изменяется в зависимости от нагрузки, скоростных режимов и параметра сжимаемости.

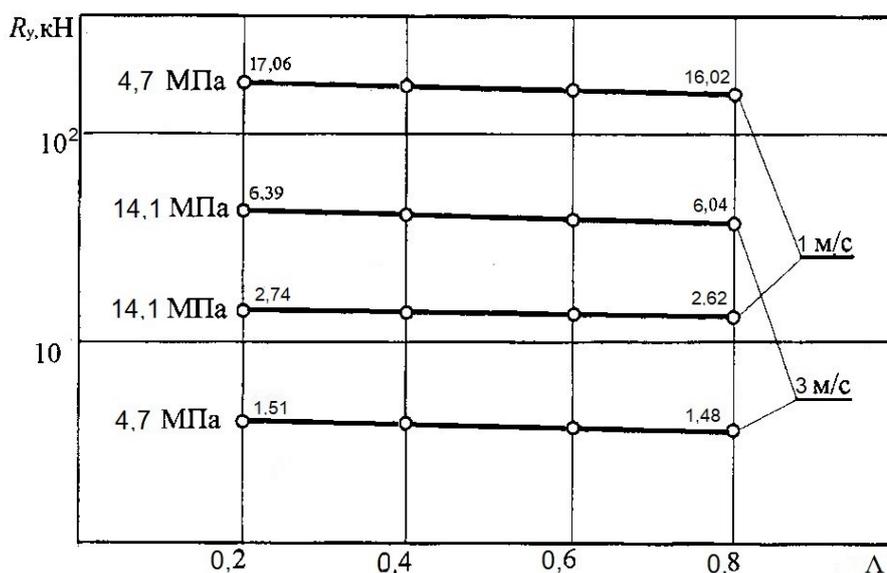


Рисунок 2 - Изменение вертикальной составляющей
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.61.2>

Анализ рис. 2 показывает, что при постоянной температуре сжимаемость оказывает незначительное влияние на гидродинамический режим работы.

Однако температура радиального подшипника скольжения существенно влияет на работу трибосистемы. Влияние температуры подшипника подтверждает важность контроля и поддержания оптимальных тепловых условий для обеспечения стабильной и эффективной работы системы.

Анализ числовых данных, полученных из теоретических исследований, позволил определить несущую способность и коэффициент трения. Табл. 1 иллюстрирует, как нагрузка и сжимаемость влияют на коэффициент трения, которым определяется эффективность работы системы.

Таблица 1 - Зависимость коэффициента трения
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.61.3>

Коэффициент трения	Нагрузка σ , МПа	Сжимаемость Λ				
		0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
f	0,2	0,01412	0,01495	0,01398	0,01391	0,01385
	4,7	0,000696	0,000694	0,000991	0,000588	0,00595
	14,1	0,0002987	0,0002979	0,0002969	0,0002959	0,000295

Зависимость коэффициента трения от нагрузки в исследуемом диапазоне остается в пределах характерных для гидродинамического режима работы. Этот важный вывод указывает на то, что трибоконтакт функционирует в

условиях полноценной масляной пленки, обеспечивающей надежное смазывание и минимизирующей износ рабочих поверхностей.

Кроме того, численный анализ выявил, что величина коэффициента трения зависит от параметра сжимаемости. Высокая сжимаемость может приводить к изменению толщины масляной пленки и, соответственно, к вариациям в коэффициенте трения. Для обеспечения долговечности и стабильности работы трибоконтакта необходимо регулирование параметра сжимаемости.

Результаты численного анализа, представленные в графиках на рис. 3, иллюстрируют эти зависимости.

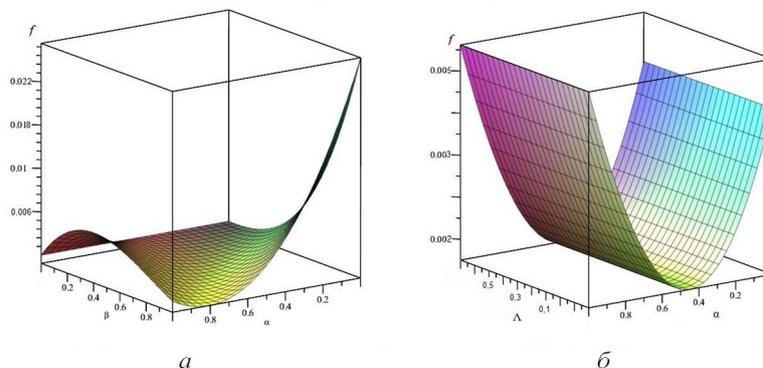


Рисунок 3 - Влияние на коэффициент трения:
а – параметра вязкости и температуры; б – параметра сжимаемости и вязкости
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.61.4>

Проведение экспериментов

Теоретические выводы были подтверждены с помощью ряда экспериментальных проверок. Основной акцент был сделан на триботехнические свойства нового типа.

Результаты исследований

Исследования показали увеличение вертикальной составляющей на 8–9%, и снижение коэффициента трения на 6–7%. (табл. 2), что является значительным показателем для улучшения качества.

Таблица 2 - Теоретические исследования
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.61.5>

№	σ, МПа	Параметр сжимаемости Λ				
		0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
		Коэффициент трения				
1	5,9	0,008990	0,0113130	0,009800	0,0061000	0,0034300
2	11,8	0,005790	0,0056910	0,005853	0,0041850	0,0027965
3	17,7	0,002493	0,0024920	0,002406	0,0022705	0,0021570
4	23,6	0,002395	0,0023613	0,002304	0,0021136	0,0021379
5	29,5	0,002197	0,0021307	0,002202	0,0021570	0,0021188

Проведение сравнения результатов теоретического и практического исследований, представленных в табл. 3, дают возможность для следующих выводов:

- учет сжимаемости смазочного материала влияет на точность моделей, увеличивая их соответствие реальным условиям эксплуатации;
- результаты анализа указали на области эффективного использования созданных моделей, теоретические расчетные модели трибоконтакта, учитывающие сжимаемость, продемонстрировали высокую надежность в прогнозировании поведения смазочного материала при различных нагрузках и температурах;
- практические исследования подтвердили, что модели, не учитывающие сжимаемость, хотя и проще в реализации, однако не обладают достаточной точностью.

Таблица 3 - Сравнительный анализ результатов исследования
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.61.6>

№ п/п	Режим	Теоретический результат	Экспериментальное исследование

	σ , МПа	V , м/с	с учетом сжимаемости	без учета сжимаемости	с учетом сжимаемости	без учета сжимаемости
1	5,9	0,3	0,0125	0,0091	0,0132	0,0111
2	11,8	0,3	0,0070	0,0039	0,0071	0,0038
3	17,7	0,3	0,0050	0,0018	0,0048	0,0029
4	23,6	0,3	0,0065	0,0029	0,0071	0,0042
5	29,5	0,3	0,0098	0,0054	0,0104	0,0068

Заключение

1. В результате исследований, учитывающих реологические свойства, сжимаемость, а также изменение вязкости в зависимости от давления и температуры в турбулентном трении, были разработаны новые методы прогнозирования работы трибоконтакта, обеспечивающие их гидродинамическую стабильность.

2. Разработанные гидродинамические модели учитывают сжимаемость и одновременно связь реологических свойств с давлением и температурой, а также канавку за счет покрытия на опорной поверхности втулки в качестве дополнительных факторов смазки.

3. В процессе исследования установлено увеличение вертикальной составляющей давления на 8–9% и снижение коэффициента трения на 6–7%.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.61.7>

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.61.7>

Список литературы / References

- Хасьянова Д. У. Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения, смазываемого микрополярными смазочными материалами и расплавами металлического покрытия / Д. У. Хасьянова, М. А. Мукутадзе // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2022. — № 4. — С. 46–53. DOI: 10.31857/S0235711922040101
- 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.
- Василенко В. В. Исследование износостойкости подшипника скольжения с полимерным покрытием опорного кольца, имеющего канавку / В. В. Василенко, В. И. Кирищикова, М. А. Мукутадзе [и др.] // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). — 2022. — Т. 22. — № 4. — С. 365–372.
- 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. Кирищикова, М. А. Мукутадзе [и др.] // Frontier Materials & Technologies. — 2022. — № 4. — С. 9–17.
- 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. — P. 433–440.
- 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
- 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. — № 012154. DOI: 10.1088/1757-899/734/012154
- 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. — № 032098. DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032098
- 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.
- 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.
- 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. — 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). — № 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). 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. Мукутадзе М. А. Разработка расчетной модели модифицированного металлополимерного радиального подшипника с учетом зависимости вязкости от давления и температуры / М. А. Мукутадзе, В. М. Приходько, Г. А. Бадахов [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — № 9(135). DOI: 10.23670/IRJ.2023.135.57

22. 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

Список литературы на английском языке / References in English

1. Khasyanova D. U. Povyshenie iznosostojkosti radial'nogo podshipnika skol'zhenija, smazyvaemogo mikropoljarnymi smazochnymi materialami i rasplavami metallichesкого pokrytija [Increasing the wear resistance of a radial sliding bearing lubricated with micropolar lubricants and melts of a metal coating] / D. U. Khasyanova, M. A. Mukutadze // Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin [Problems of mechanical engineering and machine reliability]. — 2022. — № 4. — P. 46–53. DOI: 10.31857/S0235711922040101 [in Russian]

2. Khasyanova D. U. Issledovanie na iznosostojkost' radial'nogo podshipnika s nestandartnym opornym profilom s uchetom zavisimosti vjazkosti ot davlenija i temperatury [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] / D. U. Khasyanova, M. A. Mukutadze // Problemy mashinostroenija i avtomatizacii [Problems of mechanical engineering and automation]. — 2023. — № 3. — P. 42–49. [in Russian]

3. Vasilenko V. V. Issledovanie iznosostojkosti podshipnika skol'zhenija s polimernym pokrytiem opornogo kol'ca, imejushhego kanavku [Investigation of the wear resistance of a sliding bearing with a polymer coating of a support ring having a groove] / V. V. Vasilenko, V. I. Kirishchieva, M. A. Mukutadze [et al.] // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). — 2022. — Vol. 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 vjazkosti ot davlenija [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] / 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. — 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. — № 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. — № 032098. DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032098
9. Polyakov R. N. Matematicheskaja model' beskontaktnogo pal'chikovogo uplotnenija s aktivnym upravleniem zazorom [Mathematical model of contactless finger seal with active gap control] / R. N. Polyakov, L. A. Savin, A.V. Vnukov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii [Fundamental and applied problems of engineering and technology]. — 2018. — № 1(327). — P. 66–71. [in Russian]
10. Negmatov C. C. Issledovanie vjaskouprugih i adgezionno-prochnostnyh svojstv i razrabotka jeffektivnyh vibropogloshhajushhih kompozicionnyh polimernyh materialov i pokrytij mashinostroitel'nogo naznachenija [Investigation of viscoelastic and adhesive strength properties and development of effective vibration-absorbing composite polymer materials and coatings for machine-building purposes] / S. S. Negmatov [et al.] // Plasticheskie massy [Plastic masses]. — 2020. — № 7-8. — P. 32–36. [in Russian]
11. Sayfullayeva G. I. Issledovanie jelektroprovodjashhih kompozicionnyh termoreaktivnyh polimernyh materialov i pokrytij na ih osnove dlja tribotehnicheskogo naznachenija [Investigation of electrically conductive composite thermosetting polymer materials and coatings based on them for tribotechnical purposes] / G. I. Sayfullayeva [et al.] // Universum: tehnicheckie nauki [Universum: Technical Sciences]. — 2020. — № 12(81). — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102> (accessed: 05.05.2024). [in Russian]
12. Yerofeev V. T. Issledovanie stojkosti polimernyh pokrytij v uslovijah vozdejstvija klimaticheskikh faktorov chernomorskogo poberezh'ja [Investigation of the durability of polymer coatings under the influence of climatic factors of the Black Sea coast] / V. T. Yerofeev [et al.] // Fundamental'nye issledovanija [Fundamental research]. — 2016. — № 11-5. — P. 911–924. — URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (accessed: 05.05.2024). [in Russian]
13. Ikramov N. A. Ob#ekty i metodiki issledovanija kompozicionnyh polimernyh materialov [Objects and methods of research of composite polymer materials] / N. A. Ikromov, D. N. Rasulov // Sovremennye nauchnye issledovanija i innovacii [Modern scientific research and innovations]. — 2020. — № 10. — URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/10/93640> (дата обращения: 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). — № 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012009
15. Kharlamov P. V. Monitoring izmenenij uprugo-dissipativnyh harakteristik dlja reshenija zadach po issledovaniju tribologicheskikh processov v sisteme «zheleznodorozhnyj put' – podvizhnoj sostav» [Monitoring of changes in elastic-dissipative characteristics for solving problems of studying tribological processes in the railway track – rolling stock system] / P. V. Kharlamov // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija [Bulletin of the Rostov State University of Railway Communications]. — 2021. — № 1. — P. 122–129. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_1_122 [in Russian]
16. Kharlamov P. V. Primenenie fiziko-himicheskogo podhoda dlja izuchenija mehanizma obrazovanija vtorichnyh struktur frikcionnogo perenosa na poverhnosti kontrtela [Application of a physico-chemical approach to study the mechanism of formation of secondary structures of frictional transport on the surface of a counterbody] / P. V. Kharlamov // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija [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. Kharlamov P. V. Issledovanie obrazovanija vtorichnyh struktur frikcionnogo perenosa na poverhnosti stal'nyh obrazcov pri realizacii tehnologii metalloplakirovanija [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. Kharlamov // 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 jeffektivnosti frikcionnoj sistemy «koleso – rel's» [Improving the efficiency of the friction system "wheel – rail"] / V. V. Shapovalov [et al.] // Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport]. — 2019. — Vol. 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). DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012011
20. Shapovalov V. V. Metalloplakirovanie rabochih poverhnostej trenija pary «koleso – rel's» [Metalloplakirovanie of working surfaces of friction of the wheel–rail pair] / V. V. Shapovalov [et al.] // Trenie i iznos [Friction and wear]. — 2020. — Vol. 41. — № 4. — P. 464–474. DOI: 10.3103/S1068366620040121 [in Russian]
21. Mukutadze M. A. Razrabotka raschetnoj modeli modificirovannogo metallopolimernogo radial'nogo podshipnika s uchetom zavisimosti vjaskosti ot davlenija i temperatury [Development of a computational model of a modified metal-polymer radial bearing taking into account the dependence of viscosity on pressure and temperature] / M. A. Mukutadze, V. M. Prikhodko, G. A. Badakhov [et al.] // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2023. — № 9(135). DOI: 10.23670/IRJ.2023.135.57 [in Russian]
22. Badakhov G. A. Razrabotka metodiki povyshenija 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 bearing with a non-standard support profile and a polymer coating

on the shaft surface while taking into account the rheological properties of a lubricant] / G. A. Badakhov, V. N. Bagrova, A.V. Morozova [et al.] // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* [International Research Journal]. — 2022. — № 12(126). DOI: 10.23670/IRJ.2022.126.54 [in Russian]