

УДК ((UDC) 621.822.17

ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ
РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА С УЧЕТОМ СЖИМАЕМОСТИ ПРИ
ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯASSESSMENT OF WEAR RESISTANCE OF MODIFIED DESIGN OF RADIAL
BEARING TAKING INTO ACCOUNT COMPRESSIBILITY IN TURBULENT
FLOW REGIMEБолгова Е.А., Мукутадзе М.А., Харламов П.В.
Bolgova E.A., Mukutadze M.A., Kharlamov P.V.Ростовский государственный университет путей сообщения, (Ростов-на-Дону, Россия)
Rostov State Transport University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Аннотация. В ходе проведения исследования была разработана усовершенствованная модель движения вязкого смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника скольжения с адаптированным опорным профилем. Основное внимание было уделено воздействию полимерного покрытия с канавкой на распределение давления и скорости смазочного материала. Для достижения поставленных целей, были использованы методы численного анализа, которые обеспечили создание детализированной картины распределения давления и скорости внутри рабочей зоны. Особый акцент был сделан на учет сжимаемости смазочного материала, что позволило значительно улучшить точность расчетов и повысить надежность полученных данных. Модель показала себя надежной и точной, что подтверждается согласованностью расчетных данных с экспериментальными измерениями. В результате моделирования были подробно изучены характеристики распределения давления и скорости смазки в системе. Исследование показало, что внедрение полимерного покрытия с канавкой заметно влияет на поведение смазочного материала, улучшая его распределение и уменьшая потенциальные зоны перегрева и износа. Таким образом, данная работа представляет собой попытку внести вклад в область исследования радиальных подшипников скольжения. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего совершенствования конструкций подшипников, что позволит увеличить их надежность и долговечность в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: подшипник, полимерное покрытие, осевая канавка, гидродинамический режим, сжимаемость смазочного материала.

Дата получения статьи: 09.10.2024
Дата принятия к публикации: 15.11.2024
Дата публикации: 25.12.2024

Сведения об авторах:

Болгова Екатерина Александровна – аспирант кафедры «Высшая математика», ФГБОУ ВО «Рос-

Abstract. In the course of the study, an improved model of the motion of a viscous lubricant in the working clearance of a radial plain bearing with a modified support profile was developed. The main attention was paid to the effect of a polymer coating with a groove on the distribution of pressure and velocity of the lubricant. To achieve the stated goals, numerical analysis methods were used, which provided the creation of a detailed picture of the distribution of pressure and velocity inside the working zone. Particular emphasis was placed on taking into account the compressibility of the lubricant, which made it possible to significantly improve the accuracy of calculations and increase the reliability of the obtained data. The model proved to be reliable and accurate, which is confirmed by the consistency of the calculated data with experimental measurements. As a result of the modeling, the characteristics of the distribution of pressure and velocity of the lubricant in the system were studied in detail. The study showed that the introduction of a polymer coating with a groove significantly affects the behavior of the lubricant, improving its distribution and reducing potential zones of overheating and wear. Thus, this work is an attempt to make a contribution to the field of radial plain bearing research. The results obtained can be used for further improvement of bearing designs, which will increase their reliability and durability in various industries.

Keywords: bearing, polymer coating, axial groove, hydrodynamic mode, compressibility of the lubricant.

Date of manuscript reception: 09.10.2024
Date of acceptance for publication: 15.11.2024
Date of publication: 25.12.2024

Authors' information:

Ekaterina A. Bolgova – Postgraduate of the Department of Higher Mathematics at Rostov State



товский государственный университет путей сообщения», *e-mail: bolgova_katya6@mail.ru.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0737-1846>

Мукутадзе Мурман Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика», ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», *e-mail: murman1963@yandex.ru.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2910-3047>

Харламов Павел Викторович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Проектирование и технология производства машин», ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», *e-mail: pvharlamov@rgups.ru.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5100-4894>

Transport University, *e-mail: bolgova_katya6@mail.ru*
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0737-1846>

Murman A. Mukutadze – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Higher Mathematics at Rostov State Transport University, *e-mail: murman1963@yandex.ru.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2910-3047>

Pavel V. Kharlamov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Vehicles and Tribotechnics at Rostov State Transport University, *e-mail: pvharlamov@rgups.ru.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5100-4894>

1. Введение

Ключевым аспектом повышения надежности является адаптация технологий производства к различным типам материалов. Это включает в себя как выбор подходящих сплавов и композитов, так и методы обработки поверхности, такие как анодирование или нанесение защитных покрытий. В конечном итоге, только комплексный подход, включающий в себя как традиционные, так и инновационные методы, позволит добиться оптимального баланса между надежностью, стоимостью и эксплуатационными характеристиками. Исследования и разработки в этой области продолжают активно развиваться.

В настоящее время разработки в области полимерных покрытий активно направлены на модификацию базовых материалов для улучшения их трибологических характеристик. Эти усилия направлены на создание покрытий, способных выдерживать сложные условия эксплуатации, характерные для промышленных трибосистем, что открывает широкие перспективы для их применения в различных отраслях. Одним из ключевых подходов является введение в полимеры различных наполнителей, включая твердые смазки. Такие наполнители, как графит, дисульфид молибдена и углеродные нанотрубки, значительно повышают износостойкость полимерных материалов [1-3]. Включение этих компонентов в полимерную матрицу приводит к образованию композитов с

улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Согласно исследованиям [4–6], композитные материалы характеризуются высокой стойкостью к механическим нагрузкам и улучшенными антифрикционными свойствами. Использование таких материалов позволяет существенно уменьшить вес деталей, улучшить их механическую прочность и долговечность. В сочетании с правильно подобранными смазочными композициями это приводит к снижению коэффициента трения и уменьшению износа.

Исследование [7] акцентирует внимание на применении резинового порошка в качестве наполнителя для эпоксидных полимеров. Это направление открывает новые возможности в разработке высокоэффективных вибропоглощающих композитов. Одним из основных выводов исследования является доказанный пластифицирующий эффект, который оказывает резиновый порошок на эпоксидные полимеры. Это проявляется в снижении температуры стеклования материала, что подразумевает более высокую эластичность и гибкость полимера при различных температурах. Такая модификация материала может быть особо важна в условиях, где температурные колебания являются значительным фактором.

Технологический прогресс в области материаловедения предъявляет новые требования к качеству и надежности композитных материалов. Стеклопластики, благодаря своим уникальным свойствам, находят широкое

применение в различных отраслях промышленности. Однако, как и любые другие материалы, они подвержены возникновению дефектов, которые могут негативно сказаться на их эксплуатационных характеристиках. В статье [8] предложено эффективное решение по выявлению дефектов в стеклопластике с использованием анализа Фурье-спектров сигналов акустоэмиссии.

В последние годы ведутся активные исследования в области улучшения теплопроводности полимерных композитов. Одним из перспективных направлений является использование мягких шаблонов в сочетании с модифицированным полидопамином. Результаты исследований [9–10] показывают, что предложенный подход позволяет достичь увеличения теплопроводности на 118 % по сравнению с исходной полимерной матрицей.

Исследования, посвященные эффекту растворителей на поведение полимеров, помогают глубже понять молекулярные механизмы взаимодействия [11]. Использование хлороформа как растворителя не только способствует улучшению свойств высокомолекулярного полиэтилена, но и демонстрирует важность выбора растворителя для достижения оптимальных характеристик. Это создает возможности для синтеза новых полимерных композиций с заданными свойствами.

В ряде трибологических испытаний [12; 13] было выявлено, что образцы втулок с нанесенными антифрикционными полимерными покрытиями демонстрируют значительное снижение коэффициента трения. В сравнении с обычными стальными втулками, применение полимерных покрытий обеспечило улучшенные трибологические характеристики.

Работы [14–16] подчеркивают, что внедрение в матрицу специфических электроактивных наполнителей способно значительно повысить экранирующие свойства композитных материалов. Эти наполнители формируют сложные структурные сети, которые являются ключевым фактором в повышении общей эффективности материала. Авторы также отметили необходимость оптимизации соотношения компонентов композита. Для достижения наилучшего результата требует-

ся баланс между механическими свойствами композита и уровнем его экранирования. Оптимизация компонентов композита поможет обеспечить стабильность, прочность и необходимые экранирующие характеристики без ущерба для общей функциональности материала

В последние годы наблюдается значительный интерес к исследованиям в области плазменных полимеров. Исследования, проведенные в работах [17 - 18], сосредоточены на изучении поведения этих полимеров. Обнаружены возможности для своевременного выявления изменений, связанные со старением, самоочищением и адгезией, это позволяет не только повышать надежность и долговечность изделий, но и развивать более эффективные материалы для разнообразных сфер применения.

Таким образом, развитие и применение полимерных покрытий и усовершенствованных расчетных моделей является неотъемлемой частью инновационного процесса, направленного на улучшение качества и долговечности промышленных технологий.

Данное исследование включает разработку и анализ математической модели смазочного материала в подшипнике с композиционными фторопластсодержащими покрытиями на поверхности вала. Модифицированная конструкция подшипника предусматривает наличие полимерного покрытия с канавкой, что способствует улучшению распределения смазочного материала и повышению долговечности системы.

2. Методика проведения исследования

2.1. Постановка задачи

Исследуется динамика взаимодействия компонентов системы во время её работы, уделяя особое внимание распределению смазочного вещества. Во вращающемся механизме, где цапфа с полимерным покрытием снабжена канавкой, критически важной становится оптимизация радиального подшипника под нагрузку. Такое сочетание позволяет обеспечить более плавное движение вала, который вращается с постоянной угловой

скоростью Ω , тогда как нестандартная втулка остаётся неподвижной (рис. 1).

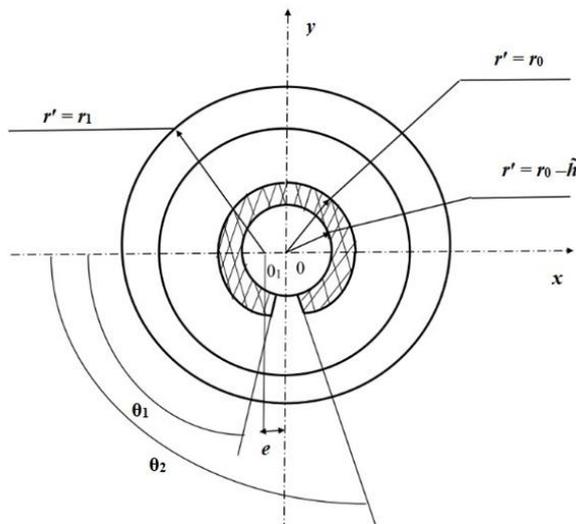


Рис. 1. Расчетная схема трибоконтакта

В системе координат r', θ , полюс которой расположен в центре вала, уравнения контура вала с покрытием, вала с канавкой, нестандартной подшипниковой втулки и втулки задаются в виде:

$$\begin{aligned} C_1 : r' &= r_0, \quad C_0 : r' = r_0 - \tilde{h}, \\ C_2 : r' &= r_1(1+H) - a' \sin \omega\theta, \\ C_3 : r' &= r_1(1+H), \end{aligned} \quad (1)$$

где r_0 – радиус вала с полимерным покрытием; \tilde{h} – высота канавки; r_1 – радиус подшипниковой втулки; H – толщина смазочного слоя; a' – постоянная; θ – угловая координата.

Взаимозависимость реологических свойств смазочного вещества и создаваемого давления и температуры определяется следующим образом:

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

где μ' – коэффициент динамической вязкости смазочного материала; μ_0 – характерная вязкость; e – эксцентриситет; p' – гидродинамическое давление в смазочном слое.

Основными уравнениями для решения поставленной задачи выступают уравнение течения смазочного материала, уравнение неразрывности, скорректированные с учетом

условия (2), а также уравнение состояния:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p'_i}{\partial r'} &= 0, \quad \mu' \frac{\partial^2 v_{\theta_i}}{\partial r'^2} = \frac{dp'_i}{d\theta}, \\ \frac{\partial(\rho' v'_{r'_i})}{\partial r'} + \frac{\rho' v'_{r'_i}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial(\rho' v_{\theta_i})}{\partial \theta} &= 0, \\ p' &= \frac{\lambda \Omega^2 r'^2}{2} \rho', \end{aligned} \quad (3)$$

где $v_{\theta_i}, v_{r'_i}$ – компоненты вектора скорости смазочной среды; ρ' – плотность (безразмерная величина); λ – коэффициент потерь на трение (определяется экспериментально); Ω – угловая скорость вала.

Граничные условия для системы уравнений (3) выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} v_{r'} &= 0, \quad v_{\theta} = 0 \text{ при} \\ r' &= r_1(1+H) - a' \sin \omega\theta = h'(\theta), \\ v_{r'} &= 0, \quad v_{\theta} = \Omega r_0 \text{ при } r' = r_0, \\ v_{r'} &= 0, \quad v_{\theta} = \Omega(r_0 - \tilde{h}) \text{ при } r' = r_0 - \tilde{h}, \\ p'(0) &= p'(\theta) = p_g, \\ r_0 - \tilde{h} &= h_0^* \text{ при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где p_g – давление подачи смазки; h_0^* – толщина полимерного покрытия.

Используем формулы (5) для перехода к безразмерным величинам:

$$\begin{aligned} v_{\theta} &= \Omega v(r_0 - \tilde{h}), \quad v_{r'} = \Omega \delta u, \quad p' = p^* p, \\ p^* &= \frac{\mu_0 \Omega (r_0 - \tilde{h})^2}{\delta^2}, \quad \rho^* = \frac{2 p_g}{\lambda \Omega^2 r_0^2}, \end{aligned}$$

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

$$\delta = r_1 - (r_0 - \tilde{h}), \quad \rho' = \rho^* \rho.$$

$$T^* = \frac{\mu_0 \Omega^2 (r_0 - \tilde{h})^2}{J \lambda}, \quad \beta = T^* \beta', \quad T' = T^* T. \quad (5)$$

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

В результате произведенных преобразований (5), опираясь на уравнения (3) и (4), мы получили выражения:

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial \theta} = 0, p = p, \quad (6)$$

$$u = 0, v = 1 \text{ при } r = r_0 - \tilde{h},$$

$$u = 0, v = 1 \text{ при } r = r_0,$$

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

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

$$Q = \text{const},$$

$$p_3(\theta_2) = p_2(\theta_2), p_1(\theta_1) = p_2(\theta_1), \quad (7)$$

где $\eta = \frac{e}{\delta}$; $\eta_1 = \frac{a'}{\delta}$ $\Lambda = \frac{r_0^2 \mu \Omega}{p_g \delta^2}$; Λ – параметр

сжимаемости; u – горизонтальная компонента скорости; v – вертикальная компонента скорости; η – конструктивный параметр подшипника со стандартным опорным профилем; η_1 – конструктивный параметр подшипника с адаптированным опорным профилем.

Нахождение гидродинамического давления и поля скоростей.

Разработать автомодельное решение задачи (6) с учетом параметров (7) удалось благодаря использованию известной методики [19-20]:

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

$$\psi_i(r, \theta) = \tilde{\psi}_i(\xi_i), \quad V_i(r, \theta) = p \tilde{v}_i(\xi_i),$$

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

$$\xi_i = \frac{r + \tilde{h}}{h(\theta) + \tilde{h}} \text{ при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2,$$

$$\xi_i = \frac{r}{h(\theta)} \text{ при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi, \quad (8)$$

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

Теперь, учитывая уравнение (8), мы можем сформулировать следующее выражение:

$$\tilde{\psi}_i''(\xi_i) = a_i; \quad \tilde{v}_i''(\xi_i) = b_i;$$

$$\tilde{u}_i'(\xi_i) + \frac{h(\theta)}{h'(\theta)} \frac{1}{p} \frac{dp}{d\theta} - \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) = 0,$$

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

$$\frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp_2}{d\theta} =$$

$$= \left[\frac{b_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{a_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} \right]. \quad (9)$$

$$\tilde{\psi}'_{\xi} = 0 \text{ при } \xi = 0, \xi = 1; \tilde{v}_i(\xi, \theta) = p, \tilde{u}_i = 0 \text{ при } \xi = 0;$$

$$\tilde{v}_i(\xi, \theta) = 0, \tilde{u}_i = 0 \text{ при } \xi = 1; \int_0^1 \tilde{v}_i(\xi) d\xi = 0,$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*} \quad (10)$$

Интегрируя уравнение (9) с учетом (10), получим:

– для поля скоростей:

$$\tilde{\psi}'_1(\xi_1) = a_1 \frac{\xi_1}{2} (\xi_1 - 1), \quad \tilde{v}_1(\xi_1) = b_1 \frac{\xi_1^2}{2} - \left(1 + \frac{b_1}{2}\right) \xi_1 + 1$$

$$\tilde{\psi}'_2(\xi_2) = a_2 \frac{\xi_2}{2} (\xi_2 - 1),$$

$$\tilde{v}_2(\xi_2) = b_2 \frac{\xi_2^2}{2} - \left(1 + \frac{b_2}{2}\right) \xi_2 + 1, \quad (11)$$

$$\tilde{\psi}'_3(\xi_3) = a_3 \frac{\xi_3}{2} (\xi_3 - 1),$$

$$\tilde{v}_3(\xi_3) = b_3 \frac{\xi_3^2}{2} - \left(1 + \frac{b_3}{2}\right) \xi_3 + 1$$

Гидродинамическое давление можно определить из аналитических уравнений:

$$\frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j \mu_i(\theta)} \frac{dp_i}{d\theta} = \left[\frac{b_i}{h^2(\theta)} + \frac{a_i}{h^3(\theta)} \right], \quad (i = 1, 3),$$

$$\frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j \mu_2(\theta)} \frac{dp_2}{d\theta} =$$

$$= \left[\frac{b_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{a_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} \right] \quad (12)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j\mu_i^2(\theta)} \frac{d\mu_i}{d\theta} &= \frac{\alpha b_i}{h^2(\theta)} + \frac{\alpha a_i}{h^3(\theta)} + \\ &+ \frac{24\mu_0\beta\Omega r_0(h(\theta))}{T^* C_p \delta^2 a_i} \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}''(\xi_i)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}'(\xi_i)}{h^3(\theta)} \right)^2 d\xi, \\ &(i=1,3); \\ \frac{p}{\Lambda} \frac{1}{j\mu_2^2(\theta)} \frac{d\mu_2}{d\theta} &= \frac{\alpha b_2}{(h(\theta)+\tilde{h})^2} + \frac{\alpha a_2}{(h(\theta)+\tilde{h})^3} + \\ &+ \frac{24\mu_0\beta\Omega r_0(h(\theta)+\tilde{h})}{T^* C_p \delta^2 a_2} \times \\ &\times \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}''(\xi_i)}{(h(\theta)+\tilde{h})^2} + \frac{\tilde{v}'(\xi_i)}{(h(\theta)+\tilde{h})^3} \right)^2 d\xi. \end{aligned} \quad (13)$$

Аналитические выражения для давления:

$$p_i = \Lambda \mu_i(\theta) \left(b_i I_2(\theta) + \frac{a_i}{p} I_3(\theta) \right) + \frac{P_g}{p^*} \quad (14)$$

Проведенные проверки подтвердили надежность предложенной теоретической модели в указанных диапазонах параметров. В частности, значения параметра сжимаемости $\Lambda=0,1\dots0,5$, напряжения σ в диапазоне $6\dots30$ МПа были тщательно протестированы, чтобы убедиться в точности и применимости модели в широком диапазоне сценариев.

3. Экспериментальная часть

Исследование началось с верификации разработанной расчетной модели радиального подшипника скольжения. Для этого были проведены численные расчеты, которые позволили оценить основные параметры функционирования подшипника. Верификация включала сопоставление этих расчетных данных с результатами лабораторных испытаний, направленных на измерение сил трения, температурного режима и износа подшипника. Анализ показал, что расчетная модель с высокой степенью точности предсказывает поведение конструкции, при этом выявленные отклонения находятся в пределах допустимой погрешности. Это подтверждает, что модель

может быть использована для дальнейшего оптимального проектирования подшипников с маслоподдерживающей канавкой.

Далее был проведен комплекс экспериментальных исследований для подшипника, оснащенного новыми конструктивными особенностями опорной поверхности подшипниковой втулки. Использование антифрикционного полимерного композиционного покрытия, наряду с особым профилем и контуром маслоподдерживающей канавки, было рассчитано на снижение коэффициента трения и повышение срока службы подшипника. Эксперименты проводились при различных режимах работы, включая изменения скорости вращения, нагрузки и температурные условия. Результаты подтвердили, что новая конструкция позволяет значительно уменьшить износ и улучшить тепловыделение, что способствует повышению надежности и сокращению простоев в работе механизмов.

Особое внимание в исследованиях было уделено адаптации профиля и контура маслоподдерживающей канавки к конкретным условиям трения. Было важным определить оптимальные геометрические параметры, которые обеспечивали бы стабильное распределение смазки в зоне контакта. При проведении испытаний использовали как традиционные методы измерения трения и износа, так и современные инструментальные методы, такие как лазерная интерференция и спектроскопия.

Было установлено, что благодаря уникальному сочетанию фторопластовых и полиимидных нитей в конструкции тканого каркаса обеспечивается надежная база с выдающейся прочностью и устойчивостью к механическим нагрузкам. Использование матричного связующего на основе фенольной смолы, модифицированной термостойким каучуком, существенно расширяет область применения такой основы. Достигается не только высокая термическая стойкость, но и устойчивость к агрессивным химическим средам, что делает эту структуру идеальной для использования в экстремальных условиях, где традиционные материалы быстро приходят в негодность.

Рациональное использование таких композитов позволяет значительно повысить долговечность и надежность оборудования, что, в свою очередь, ведет к снижению эксплуатационных затрат и повышению общей эффективности производства.

4. Результаты исследования

Исследование позволило получить более точные данные о рабочих характеристиках радиальных подшипников скольжения с полимерным покрытием (табл. 1), что имеет немаловажное значение для их эффективно-го применения в различных инженерных системах. Исследование радиальных подшипников скольжения, включающее учет

сжимаемости жидкого смазочного материала повышает точность их инженерных расчетов для несущей способности на 11...12 %, а для коэффициента трения на 9...10 %. В дальнейших исследованиях представляется целесообразным изучение дополнительных факторов, влияющих на работу подшипников с полимерным покрытием, таких как температурные условия, динамические нагрузки и взаимодействие с различными смазочными материалами. Комплексный подход к анализу подшипников скольжения позволит продолжать совершенствовать их конструкцию и расширять области применения, способствуя развитию новых технологий и повышению производительности промышленных систем.

Таблица 1

Результаты теоретического исследования

| σ , МПа | Параметр сжимаемости Λ | | | | |
|-------------------|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| | Коэффициент трения | | | | |
| 6 | 0,005680 | 0,0081120 | 0,006900 | 0,002800 | 0,0011600 |
| 12 | 0,003490 | 0,0034910 | 0,0036530 | 0,001085 | 0,0004827 |
| 18 | 0,000193 | 0,0002920 | 0,000206 | 0,0000705 | 0,0000470 |
| 24 | 0,000095 | 0,0001613 | 0,000104 | 0,0000136 | 0,00002793 |
| 30 | 0,000003 | 0,0000307 | 0,000002 | 0,000045 | 0,00000775 |

Данные эксперимента показали, что после начального периода приработки, длившегося 2 минуты, был достигнут устойчивый гидродинамический режим трения. Важным наблюдением является наличие колебаний коэффициента трения, что может быть связано с динамическими изменениями в условиях контакта поверхностей и воздействиями внешних параметров. Такое поведение коэффициента трения при увеличении нагрузки указывает на сложность взаимодействий в системе, особенно с учетом того, что максимальная нагрузка достигала 30 МПа, что эквивалентно ступенчатому увеличению нагрузки в 5 раз (табл. 2).

Результаты проведенного исследования подтверждают эффективность разработанных теоретических моделей и демонстрируют преимущество исследованных подшипников скольжения. Эти технологии не только

Таблица 2

Сравнение теоретического результата с экспериментальным исследованием

| Режим | | Коэффициент трения | |
|-------------------|--------------|-------------------------|--------------------------------|
| | | Теоретический результат | Экспериментальное исследование |
| σ , МПа | V , м/с | | |
| 6 | 0,3 | 0,0107 | 0,0118 |
| 12 | 0,3 | 0,0043 | 0,0052 |
| 18 | 0,3 | 0,0021 | 0,0031 |
| 24 | 0,3 | 0,0041 | 0,0050 |
| 30 | 0,3 | 0,0074 | 0,0082 |

значительно повышают их нагрузочную способность, но и существенно снижают коэффициент трения, что является критически важным для достижения высокой производительности и долговечности механических систем.

Список литературы

1. Кохановский В.А., Камерова Э.А. Фторопластсодержащие композиционные покрытия в смазочных средах // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 1. С. 34–37.
2. Кохановский В.А., Камерова Э.А. Трение полимерных покрытий в жидких смазочных средах // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 4. С. 17–20.
3. Камерова Э.А., Власенко И.Б., Снежина Н.Г., Оганесян П.А. Методика исследования влияния жидких сред на фторопластсодержащие антифрикционные покрытия // Уральский научный вестник. 2014. № 21(100). С. 137–142.
4. Павлычева Е.А. Разработка полимерной композиции для получения защитного покрытия на металлических поверхностях // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2022. № 2. С. 33–36. DOI 10.17513/mjpf.13355.
5. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 405–419. DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
6. Кузнецов А.А., Семенова Г.К., Свидченко Е.А. Конструкционные термопласты как основа для самосмазывающихся полимерных композиционных материалов антифрикционного назначения // Вопросы материаловедения. 2009. № 1(57). С. 116–126.
7. Негматов С.С., Абед Н.С., Саидакмедов Р.Х., Ульмасов Т.У., Григорьев А.Я., Сергиенко В.П., Негматова К.С., Жовлиев С.С., Негматов Ж.Н., Махаммаджонов З.У., Садыкова М.М., Негматова М.Н., Абдуллаев О.Х., Наврузов Ф.М. 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.
8. Брянский А.А., Башков О.В., Белова И.В., Башкова Т.И. Исследование разви-

References

1. Kohanovsky V.A., Kamerova E.A. Fluoroplast-containing composite coatings in lubricating media. *Friction and lubrication in machines and mechanisms*, 2014, no. 1, pp. 34–37. (In Russian)
2. Kohanovsky V.A., Kamerova E.A. Friction of polymer coatings in liquid lubricants. *Friction and lubrication in machines and mechanisms*, 2014, no. 4, pp. 17–20. (In Russian)
3. Kamerova E.A., Vlasenko I.B., Snezhina N.G., Oganesyanyan P.A. Methodology for studying the effect of liquid media on fluoropolymer-containing antifricition coatings. *Ural Scientific Bulletin*, 2014, no. 21(100), pp. 137–142. (In Russian)
4. Pavlycheva E.A. Development of a polymer composition for obtaining a protective coating on metal surfaces. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2022, no. 2, pp. 33–36. DOI 10.17513/mjpf.13355. (In Russian)
5. Kondrashov S.V., Shashkeev K.A., Petrova G.N., Mekalina I.V. Polymer composite materials of structural purpose with functional properties. *Aviation materials and technologies*, 2017, no. S, pp. 405–419. DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419. (In Russian)
6. Kuznetsov A.A., Semenova G.K., Svidchenko E.A. Structural thermoplastics as a basis for self-lubricating polymer composite materials of antifricition purpose. *Voprosy materialovedeniya*, 2009, no. 1(57), pp. 116–126. (In Russian)
7. Abed N.S., Saidakhmedov R.H., Ulmasov T.U., Grigoriev A.Ya., Sergienko V.P., Negmatova K.S., Zhovliev S.S., Negmatov Zh.N., Mahammadzhonov Z.U., Sadykova M.M., Negmatova M.N., Abdullaev O.H., Navruzov F.M. Research of viscoelastic and adhesive-strength properties and development of effective vibration-absorbing composite polymer materials and coatings for machine-building purpose. *Journal of Russian plastics*, 2020, no. 7–8, pp. 32–36. DOI 10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36. (In Russian)
8. Bryansky A.A., Bashkov O.V., Belova

вающихся повреждений при изгибном нагружении полимерных композиционных материалов и их идентификация методом акустической эмиссии // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2022. № 2. С. 7–16. DOI 10.18323/2782-4039-2022-2-7-16.

9. Wen S.-Z, Zhong S.-D., Kan W.-Q., Zhao P.-S., He Y.-C. Experimental and theoretical investigation on the hydrochromic property of Ni(II)-containing coordination polymer with an inclined 2D–3D polycatenation architecture // Journal of Molecular Structure. 2022. Vol. 1269. No. 133753. DOI 10.1016/j.molstruc.2022.133753.

10. Jin L., Cao W., Wang P., Song N., Din P. Interconnected MXene/Graphene network constructed by soft template for multi-performance improvement of polymer composites // Nano-Micro Letters. 2022. Vol. 14 (1). No. 133. DOI 10.1007/s40820-022-00877-7.

11. Robertson B.P., Calabrese M.A. Evaporation-controlled dripping-onto-substrate (DoS) extensional rheology of viscoelastic polymer solutions // Scientific Reports. 2022. Vol. 12(1). No. 4697.

12. Иваночкин П.Г., Больших И.В., Талахадзе Т.З., Больших Е.П. Применение антифрикционных полимерных композиционных полимерных покрытий в тормозной рычажной передаче локомотивов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1(85). С. 16–22. DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_16.

13. Ivanochkin P.G. Manturov D.S., Danilchenko S.A., Karpenko K.I. Study on the effect of the sealers on the steel surface layer modified by electrical discharge machining // Solid State Phenomena. 2021. Vol. 316. Pp. 713–719.

14. Брянский А.А., Башков О.В. Идентификация источников акустической эмиссии в полимерном композиционном материале в условиях циклического растяжения // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 3. С. 19–27. DOI 10.18323/2073-5073-2021-3-19-27

15. Saha S., Adachi Y. Shielding behavior of electrokinetic properties of polystyrene latex particle by the adsorption of neutral

I.V., Bashkova T.I. Investigation of developing damages under bending loading of polymer composite materials and their identification by acoustic emission method. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, No. 2, pp. 7–16. DOI 10.18323/2782-4039-2022-2-7-16. (In Russian)

9. Wen S.-Z, Zhong S.-D., Kan W.-Q., Zhao P.-S., He Y.-C. Experimental and theoretical investigation on the hydrochromic property of Ni(II)-containing coordination polymer with an inclined 2D–3D polycatenation architecture. *Journal of Molecular Structure*, 2022, vol. 1269, No. 133753. DOI 10.1016/j.molstruc.2022.133753.

10. Jin L., Cao W., Wang P., Song N., Din P. Interconnected MXene/Graphene network constructed by soft template for multi-performance improvement of polymer composites. *Nano-Micro Letters*, 2022, vol. 14(1), No. 133. DOI 10.1007/s40820-022-00877-7.

11. Robertson B.P., Calabrese M.A. Evaporation-controlled dripping-onto-substrate (DoS) extensional rheology of viscoelastic polymer solutions. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12(1), No. 4697.

12. Ivanochkin P.G., Bolshykh I.V., Talakhadze T.Z., Bolshykh E.P. Application of antifriction polymer composite polymer coatings in the brake lever transmission of locomotives. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putyey soobshcheniya*, 2022, no. 1(85), pp. 16–22. DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_16. (In Russian)

13. Ivanochkin P.G. Manturov D.S., Danilchenko S.A., Karpenko K.I. Study on the effect of the sealers on the steel surface layer modified by electrical discharge machining. *Solid State Phenomena*, 2021, vol. 316, pp. 713–719.

14. Bryansky A.A., Bashkov O.V. Identification of acoustic emission sources in a polymer composite material under conditions of cyclic stretching. *Frontier Materials & Technologies*, 2021, no. 3, pp. 19–27. DOI 10.18323/2073-5073-2021-3-19-27. (In Russian)

15. Saha S., Adachi Y. Shielding behavior of electrokinetic properties of polystyrene latex particle by the adsorption of neutral poly(ethylene oxide). *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022. vol. 626, pp. 930–938.

poly(ethylene oxide) // Journal of Colloid and Interface Science. 2022. Vol. 626. Pp. 930–938. DOI 10.1016/j.jcis.2022.06.154.

16. Иваночкин П.Г., Суворова Т.В., Данильченко С.А., Новиков Е.С., Беляк О.А. Комплексное исследование полимерных композитов с матрицей на основе фенолона С-2 // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2018. № 4 (72). С. 18–25.

17. Egghe T., Ghobeira R., Morent R., Hoogenboom R., De Geyter N. Comparative study of the aging behavior of plasma activated hexamethyldisiloxane-based plasma polymers and silicone elastomer thin films // Progress in Organic Coatings. 2022. Vol. 172. P. 107091. DOI 10.1016/j.porgcoat.2022.107091.

18. Hu P., Xie R., Xie Q., Ma C., Zhang G. Simultaneous realization of antifouling, self-healing, and strong substrate adhesion via a bioinspired self-stratification strategy // Chemical Engineering Journal. 2022. Vol. 449. Pp. 137875. DOI 10.1016/j.cej.2022.137875.

19. Абдулрахман Х.Н., Киришчиева 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. DOI 10.18323/2782-4039-2022-4-9-17.

20. Василенко В.В., Киришчиева 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. DOI 10.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372.

† DOI 10.1016/j.jcis.2022.06.154.

† 16. Ivanochkin P.G., Suvorova T.V., Danilchenko S.A., Novikov E.S., Belyak O.A. Comprehensive study of polymer composites with a matrix based on phenylene C-2. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*, 2018, No. 4(72), pp. 18–25. (In Russian)

† 17. Egghe T., Ghobeira R., Morent R., Hoogenboom R., De Geyter N. Comparative study of the aging behavior of plasma activated hexamethyldisiloxane-based plasma polymers and silicone elastomer thin films. *Progress in Organic Coatings*, 2022, vol. 172, pp. 107091. DOI 10.1016/j.porgcoat.2022.107091.

† 18. Hu P., Xie R., Xie Q., Ma C., Zhang G. Simultaneous realization of antifouling, self-healing, and strong substrate adhesion via a bioinspired self-stratification strategy. *Chemical Engineering Journal*, 2022, vol. 449, pp. 137875. DOI 10.1016/j.cej.2022.137875.

† 19. Abdulrahman H.N., Kirishchieva 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. С. 9-17. DOI 10.18323/2782-4039-2022-4-9-17. (In Russian)

† 20. Vasilenko V.V., Kirishchieva V.I., Mukutadze M.A., Shvedova V.E. Study of the wear resistance of a sliding bearing with a polymer coating of a support ring having a groove // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2022, Vol. 22, No.4, pp. 365-372. DOI 10.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372. (In Russian)