

Оценка износостойкости модифицированной конструкции радиального подшипника с учетом сжимаемости

Е.А. Болгова^a, М.А. Мукутадзе^b, И.А. Колобов^c, П.В. Харламов^d

Ростовский государственный университет путей сообщения, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, Ростов-на-Дону, Россия

^a bolgova_katya6@mail.ru, ^b murman1963@yandex.ru, ^c upp@rgups.ru, ^d pvharlamov@rgups.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-0737-1846>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-2810-3047>,

^c <https://orcid.org/0000-0003-0104-1886>, ^d <https://orcid.org/0000-0001-5100-4894>

Статья поступила 29.10.2024, принята 27.12.2024

В данной работе представлена новая методика инженерных расчетов для конструкции радиального подшипника скольжения с адаптированным к условиям трения профилем, а также с полимерным покрытием с осевой канавкой, учитывающая сжимаемость, зависимость вязкости от давления истинно вязкого смазочного материала. Эта методика позволяет определить ключевые триботехнические параметры. Целью работы является оценка износостойкости в рабочем зазоре модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения при учете сжимаемости и зависимости вязкости от давления истинно вязкого смазочного материала. На основе уравнения движения, исследуемого жидкого смазочного материала, уравнения неразрывности и уравнения состояния получены новые математические модели, дополнительно учитывающие сжимаемость и зависимость вязкости от давления смазочного материала. Расширены возможности практического применения разработанных математических моделей улучшенной конструкции радиального подшипника, которые позволяют оценивать его рабочие характеристики. Исследование показало, что подшипник с модифицированной конструкцией, включающей полимерное покрытие и канавку, существенно повышает свои эксплуатационные показатели. Отмечено снижение коэффициента трения и повышение несущей способности подшипника по сравнению с традиционными вариантами. В результате удалось увеличить срок службы подшипника, что имеет значительную важность для его использования в промышленности. Модифицированная конструкция радиального подшипника скольжения при учете дополнительного фактора – сжимаемости смазочного материала – позволила уточнить несущую способность на 11–12 %, а коэффициент трения – на 9–10 % в диапазоне исследованных режимов. В итоге это исследование представляет собой значимый вклад в изучение радиальных подшипников скольжения. Результаты этого труда могут быть применены для улучшения конструкций подшипников, что будет способствовать повышению их надежности и долговечности в разных секторах промышленности.

Ключевые слова: подшипник; оценка износостойкости; полимерное покрытие; осевая канавка; гидродинамический режим; верификация; зависимость вязкости от давления, сжимаемость смазочного материала.

Evaluation of the wear resistance of a modified radial bearing design taking into account compressibility

E.A. Bolgova^a, M.A. Mukutadze^b, I.A. Kolobov^c, P.V. Kharlamov^d

Rostov State Transport University; 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia Sq., Rostov-on-Don, Russia

^a bolgova_katya6@mail.ru, ^b murman1963@yandex.ru, ^c upp@rgups.ru, ^d pvharlamov@rgups.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-0737-1846>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-2810-3047>,

^c <https://orcid.org/0000-0003-0104-1886>, ^d <https://orcid.org/0000-0001-5100-4894>

Статья поступила 29.10.2024, принята 27.12.2024

The paper presents a new method of engineering calculations for the design of a radial bearing with an adapted profile to friction conditions and a polymer coating with an axial groove, taking into account the compressibility dependence of viscosity on the pressure of a truly viscous lubricant. This technique allows one to determine the key tribotechnical parameters. The aim of the work is to evaluate the wear resistance in the working gap of the modified design of the radial sliding bearing, taking into account compressibility and the dependence of viscosity on the pressure of a truly viscous lubricant. On the basis of the equation of the movement, the studied liquid lubricant, the equivalent equations and the co-state equation, new mathematical models are obtained that additionally take into account the compressibility and the dependence of the viscosity on the pressure of the lubricant. The possibilities of practical application of the developed mathematical models of improved radial bearing design are expanded, which make it possible to evaluate the performance characteristics of such bearings. The study shows that a bearing with a modified design, including a polymer coating and a groove, significantly increases its performance. A decrease in the coefficient of friction and an increase in the bearing capacity of the bearing compared to traditional options are noted. As a result, it is possible to increase the service life of the bearing, which is of significant importance for its use in industry. The modified design of the radial sliding bearing when taking into account the additional factor – compressibility of the lubricant – makes it possible to clarify the bearing capacity by 11–12 %, and the friction coefficient by 9–10 % in

the range of the studied regimes. As a result, this study is a significant contribution to the study of radial sliding bearings. The results of this work can be applied to improve bearing designs, which will contribute to increasing their reliability and durability in various industrial sectors.

Keywords: bearing; wear resistance assessment; polymer coating; axial groove; hydrodynamic regime; verification; dependence of the viscosity from pressure, compressibility of lubricants.

Введение. Для повышения надежности опор скольжения необходимо глубокое понимание структурных и динамических нагрузок, которым они подвергаются в процессе эксплуатации. Современные методы анализа, такие как компьютерное моделирование и численное тестирование, позволяют более точно прогнозировать поведение материалов и компонентов под действием различных нагрузок. Благодаря этим технологиям разработчики могут оптимизировать конструкцию опор скольжения, учитывая возможные деформации и износ.

Современные разработки в области полимерных покрытий включают модификацию базовых материалов для улучшения их трибологических характеристик. Это достигается путем введения в полимеры различных наполнителей [1–3], включая твердые смазки, такие как графит, дисульфид молибдена или углеродные нанотрубки. Данные композиты обладают значительно более высокой износостойкостью и могут противостоять сложным воздействиям, характерным для промышленных трибосистем. Исследования показывают, что такие покрытия способны работать в условиях без смазки, что значительно упрощает эксплуатацию механизмов и снижает эксплуатационные затраты.

Согласно исследовательским данным [4–6], применение композитных материалов и современных смазочных композиций также играет существенную роль в повышении качества узлов трения. Разработки в области нанотехнологий предлагают новые виды покрытий, которые существенно снижают коэффициент трения и износ, увеличивая срок службы деталей. Однако, чтобы достичь максимальной эффективности, требуется учитывать комплексность влияния внешних факторов, таких как температура, давление и коррозионные среды.

Исследование [7] подтверждает, что использование резинового порошка в качестве наполнителя для оксидных полимеров открывает новые возможности для создания высокоэффективных вибропоглощающих композитов. Доказано, что такой подход оказывает пластифицирующий эффект, снижая температуру стеклования материала и значительно улучшая его вибропоглощающие характеристики.

В статье [8] рассмотрено решение задачи, связанной с определением природы дефектов в стеклопластике на основе анализа Фурье-спектров сигналов акустоэмиссии. Работа продемонстрировала, что межслоевые повреждения матриц можно эффективно выявить в диапазоне частот 160–240 кГц. Этот интервал частот оказался характерным для появления и развития таких дефектов, что дает возможность проводить раннюю диагностику и принимать оперативные меры для их устранения.

Результаты, представленные в исследованиях [9–10], позволяют заключить, что применение мягкого шаблона с модифицированным полидопамином, сопровождаемое нанесением дисперсионного покрытия, произвело революцию в улучшении теплопроводности полимерных композитов. Невероятный рост теплопроводности на 1118 % по сравнению с исходной полимерной матрицей свидетельствует о существенном потенциале данного подхода в решении проблем теплового управления в различных технологических и промышленных приложениях.

Достижения, полученные с растворами полиэтиленоксида (ПЭО) в хлороформе [11], особенно впечатляют. Многократное увеличение времени релаксации и растяжения указывает на качественное изменение в поведении ПЭО, открывая новые перспективы для его промышленного применения. Такие изменения могут привести к улучшению механической стабильности полимерных изделий, расширить диапазон их использования и повысить эффективность производственных процессов.

Особое значение имеет показатель Флори, равный 0,54, который подтверждает высокую эффективность хлороформа как растворителя для ПЭО. Этот показатель не только иллюстрирует улучшенное поведение полимера в растворе, но и может стать основой для дальнейших исследований и разработок в этой области.

В результате проведенных трибологических испытаний [12, 13] было выявлено, что образцы втулок с нанесенными антифрикционными полимерными покрытиями демонстрируют значительное снижение коэффициента трения по сравнению с обычными стальными втулками. Это подтверждает целесообразность их применения в узлах, подвергающихся интенсивным эксплуатационным нагрузкам. Дополнительно анализ износа этих покрытий показал их высокую устойчивость к абразивному воздействию, что существенно увеличивает срок их службы.

Особое внимание было уделено подбору материалов для основы и покрытия, чтобы добиться оптимальных характеристик. Применение композитов, содержащих высокопрочные волокна и армирующие элементы, позволило значительно улучшить механическую прочность и теплопроводность изделий. Это означает, что такие втулки смогут более эффективно отводить тепло, что важно для предотвращения перегрева и преждевременного выхода узлов из строя.

Работы [14–16] показали, что применение специфических электроактивных наполнителей позволяет значительно улучшить экранирующие свойства композитов, что обусловлено формированием сложных структурных сетей внутри матрицы. Эти сети,

препятствуя распространению электромагнитных волн, способствуют повышению общей эффективности материала. Исследователи также акцентировали внимание на необходимости оптимизации соотношений компонентов композита для достижения баланса между механическими свойствами и уровнем экранирования.

В исследованиях [17, 18] проведен анализ поведения плазменных полимеров. Обнаруженные возможности для своевременного выявления изменений, связанных с их старением, самоочищением и адгезией к субстрату, позволяют не только повышать надежность и долговечность изделий, но и разрабатывать более эффективные материалы для разнообразных сфер применения.

В конечном итоге разработки и улучшение расчетных моделей подшипников оказывают непосредственное влияние на промышленное производство и технику. Более точные модели позволяют инженерам создавать оптимальные конструкции, обеспечивать их работу в более жестких условиях и продлевать срок службы агрегатов. Это, в свою очередь, снижает эксплуатационные издержки, улучшает энергоэффективность и повышает общую надежность машин и механизмов. В условиях глобальной конкурентной борьбы компаниям, занимающимся производством и эксплуатацией машин, важно инвестировать в подобные исследования и разработки, чтобы поддерживать и развивать свою конкурентоспособность.

Цель работы состоит в выявлении закономерностей устойчивого гидродинамического режима смазки путем учета сжимаемости используемого жидкого смазочного материала в рабочем зазоре модифицированной конструкции подшипника скольжения.

Теоретическая часть. Постановка задачи.

Исследуется движение смазочного вещества во время работы системы, состоящей из цапфы с полимерным покрытием и канавкой, а также опорного профиля радиального подшипника, оптимизированного под нагрузку. Вращение вала происходит с установленной угловой скоростью ω , тогда как нестандартная втулка остается неподвижной (рис. 1).

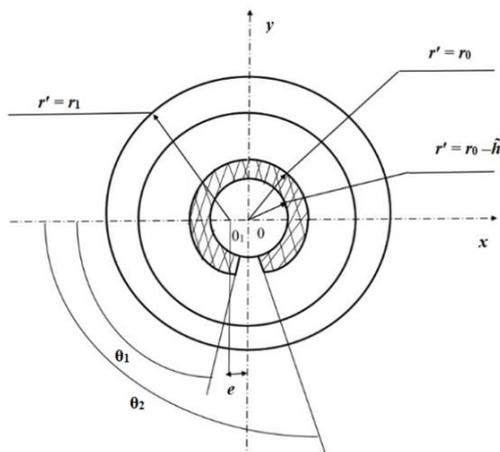


Рис. 1. Расчетная схема трибоконтакта

В системе координат r', θ полюс которой расположен в центре вала, уравнения контура вала

с покрытием C_1 , вала с канавкой C_0 , нестандартной подшипниковой втулки C_2 и втулки C_3 задаются в виде

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

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 определяется следующим образом:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha' p'}, \quad (2)$$

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

Исходные уравнения и граничные условия.

Основными уравнениями для решения поставленной задачи выступают уравнение истинно вязкого смазочного материала, уравнение неразрывности, скорректированное с учетом условия (2), а также уравнение состояния:

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

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:

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

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

Используем формулы (5) для перехода к безразмерным величинам:

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

$$\begin{aligned} \mu' &= \mu_0 \mu, \quad \alpha' = \frac{\alpha}{p^*}, \quad r' = (r_0 - \tilde{h}) + \delta r, \quad \delta = r_1 - (r_0 - \tilde{h}), \\ \rho' &= \rho^* \rho, \end{aligned} \quad (5)$$

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_i}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = \frac{1}{\Lambda} e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta}, \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial \theta} = 0, \quad p = \rho, \\ u = 0, \quad v = 1 \quad \text{при} \quad r = r_0 - \tilde{h}, \\ u = 0, \quad v = 1 \quad \text{при} \quad r = r_0, \end{aligned} \quad (6)$$

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

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

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

$$\text{где} \quad \eta = \frac{e}{\delta}, \quad \eta_1 = \frac{a'}{\delta}, \quad \Lambda = \frac{r_0^2 \mu \Omega}{p_g \delta^2},$$

где 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.

Введем обозначения $z = e^{-\alpha p}$ и, сделав ряд преобразований, в результате получим:

$$\frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = -\frac{1}{\Lambda} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial z_i}{\partial \theta}, \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial \theta} = 0, \quad p = \rho \quad (8)$$

с соответствующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} v = 0, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad r = h(\theta), \\ v = 1, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad r = r_0 - \tilde{h}, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2, \\ v = 1, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad r = r_0, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi, \\ z(0) = z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Нахождение гидродинамического давления и поля скоростей. Разработать автомодельное решение задачи (8) с учетом параметров (9) удалось благодаря использованию известной методики [20]:

$$\begin{aligned} \rho v_i &= \frac{\partial \Psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta), \quad \rho u_i = -\frac{\partial \Psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta), \\ \Psi_i(r, \theta) &= \tilde{\Psi}_i(\xi_i), \quad V_i(r, \theta) = p \tilde{v}_i(\xi_i), \\ U_i(r, \theta) &= -p \tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta), \\ \xi_i &= \frac{r_i}{h(\theta)} \quad \text{при} \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2, \end{aligned}$$

$$\xi_i = \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \quad \text{при} \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi \quad (10)$$

где Ψ – функция, зависящая от ξ ; V – вертикальная составляющая скорости; U – горизонтальная составляющая скорости; ξ – автомодельная переменная; η_2 – конструктивный параметр, характеризующий канавку.

Теперь, учитывая уравнение (8) и приведенные граничные условия (9), мы можем сформулировать следующее выражение:

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

$$\tilde{u}_i'(\xi_i) + \frac{h(\theta)}{h'(\theta)} \frac{1}{p} \frac{dp}{d\theta} - \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) = 0, \quad (11)$$

$$e^{-\alpha p_i} \frac{p_i}{\Lambda} \frac{dp_i}{d\theta} = \frac{b_i p_i}{h^2(\theta)} + \frac{a_i}{h^3(\theta)}, \quad i = 1, 3;$$

$$e^{-\alpha p_2} \frac{p_2}{\Lambda} \frac{dp_2}{d\theta} = \frac{b_2 p_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{a_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^3}.$$

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

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

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = 1 \quad (12)$$

Интегрируя уравнение (12) с учетом (13), получим:

– для поля скоростей:

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

$$\tilde{\Psi}'_2(\xi_2) = a_2 \frac{\xi_2}{2} (\xi_2 - 1), \quad \tilde{v}_2(\xi_2) = b_2 \frac{\xi_2^2}{2} - \left(1 + \frac{b_2}{2}\right) \xi_2 + 1,$$

$$\tilde{\Psi}'_3(\xi_3) = a_3 \frac{\xi_3}{2} (\xi_3 - 1), \quad (13)$$

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

– для гидродинамического давления:

$$\begin{aligned} p_1 &= 6\Lambda \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right) \times \\ &\times \left(\eta \sin \theta + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) - \frac{\eta_1 \theta}{2p\pi\omega} (\cos 2\pi\omega\theta - 1)\right) + \frac{p_g}{p^*}, \end{aligned}$$

$$p_2 = \frac{6\Lambda}{(1+\tilde{h})^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[(\theta - \theta_1) \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} + \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) - \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_1 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \left(\eta (\sin \theta - \sin \theta_2) + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_2) \right) \right] + \frac{p_g}{p^*}, \quad (15)$$

$$p_3 = 6\Lambda \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[(\theta - \theta_2) \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} + \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_2 \right) + \frac{1}{p} \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\eta (\sin \theta - \sin \theta_2) + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_2) \right) \right] + \frac{p_g}{p^*} \quad (14)$$

Решим уравнение (14) методом последовательных приближений, ограничиваясь при этом двумя приближениями:

$$p_{11} = 1, \quad p_{21} = 1, \quad p_{31} = 1,$$

$$p_{12} = 6\Lambda \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\ \times \left(\eta \sin \theta + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta - 1) - \frac{h_1\theta}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) \right),$$

$$p_{22} = \frac{6\Lambda}{(1+\tilde{h})^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\ \times \left[(\theta - \theta_1) \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} + \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) - \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_1 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \left(\tilde{\eta} (\sin \theta - \sin \theta_1) + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_1) \right) \right],$$

$$p_{23} = 6\Lambda \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\ \times \left[(\theta - \theta_2) \left(\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} + \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) - \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_2 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \left(\eta (\sin \theta - \sin \theta_2) + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_2) \right) \right],$$

$$p_{23} = 6\Lambda \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\ \times \left[(\theta - \theta_2) \left(\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} + \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) - \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_2 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \left(\eta (\sin \theta - \sin \theta_2) + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega\theta - \cos \omega\theta_2) \right) \right],$$

$$\times \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) - \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_2 \right) +$$

Проведенные проверки подтвердили надежность предложенной теоретической модели в указанных диапазонах параметров. В частности, значения параметра сжимаемости $\Lambda = 0,1-0,9$, напряжения σ в диапазоне 7–35 МПа были тщательно протестированы, чтобы убедиться в точности и применимости модели в широком диапазоне сценариев.

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.

Результаты исследования. Исследование позволило получить более точные данные о рабочих характеристиках радиальных подшипников скольжения с полимерным покрытием, что имеет немаловажное значение для их эффективного 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				
1	7	0,006790	0,0091130	0,0071100	0,0033000	0,0012300
2	14	0,003490	0,0034910	0,0036530	0,001085	0,0005935
3	21	0,000193	0,0002920	0,000206	0,0000705	0,0000470
4	28	0,000095	0,0001613	0,000104	0,0000136	0,00002793
5	35	0,000003	0,0000307	0,000002	0,000047	0,00000887

Данные эксперимента показали, что после начального периода приработки, длившегося 2 мин, 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 35 МПа, что эквивалентно ступенчатому увеличению нагрузки в 5 раз (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение теоретического результата с экспериментальным

№ п/п	Режим		Коэффициент трения		
	σ , МПа	V , м/с	Теоретический результат		Экспериментальное исследование
			Покрытие	С учетом сжимаемости	
1	7	0,3	0,0115	0,0107	0,0108
2	14	0,3	0,0105	0,0098	0,0099
3	21	0,3	0,0098	0,0091	0,0095
4	28	0,3	0,0085	0,0077	0,0079
5	35	0,3	0,0080	0,0073	0,0075

Результаты проведенного исследования убедительно подтверждают эффективность разработанных теоретических моделей и демонстрируют явное преимущество исследованных подшипников скольжения. Эти технологии не только значительно повышают их нагрузочную способность, но и существенно снижают коэффициент трения, что является критически важным для достижения высокой производительности и долговечности механических систем.

Обсуждение результатов. В ходе теоретического исследования был разработан и успешно применен метод расчета для выхода радиального подшипника скольжения с полимерным покрытием на режим гидродинамического смазывания при заданной нагрузке. Ключевым элементом этого процесса стало определение необходимого сечения маслоподдерживающих канавок, что является основополагающим для обеспечения оптимальной работы подшипника.

После установления параметров канавок была разработана расчетная модель, детально описывающая поведение подшипника в гидродинамическом режиме. Особое внимание уделено сжимаемости истинно вязкого смазочного материала, параметры вязкости которого зависят от давления и условий трения. Применение адаптированного опорного профиля позволило создать более точную и надежную модель.

Итогом проведенного исследования стала возможность устанавливать основные эксплуатационные характеристики подшипника с покрытием на этапе проектирования, что существенно повышает его надежность и долговечность в условиях реальной эксплуатации. Это открытие является важным шагом в развитии технологий подшипников и смазочных материалов, предоставляющих инженерам эффективные инструменты для оптимизации их работы.

Полученные результаты продемонстрировали, что использование комплекса экспериментального оборудования позволило существенно углубить существующее понимание поведения полимерных покрытий подшипников скольжения в различных условиях гидродинамического смазывания. Исследования выявили, что адаптированный опорный профиль играет ключевую роль в повышении эффективности и долговечности работы подшипников

под воздействием различного диапазона нагрузочно-скоростных режимов.

Таким образом, созданная на теоретической основе и подтвержденная экспериментально новая методика разработки расчетных моделей радиальных подшипников скольжения с антифрикционным полимерным покрытием, имеющим канавку на поверхности, и адаптированным для различных нагрузок профилем опорной поверхности предназначена для инженерных проектировочных и проверочных расчетов. Она обеспечивает гидродинамический режим смазывания, значительно расширяя диапазон применения моделей и уточняя результаты расчетов. Эти новые модели могут быть полезны в таких отраслях, как машиностроение, авиастроение, приборостроение и др., где необходимо поддержание гидродинамического режима смазки.

Выводы.

1. Полученные модели позволяют более точно предсказывать поведение подшипников при различных

нагрузках и эксплуатационных условиях, что, в свою очередь, обеспечивает повышение надежности и долговечности механизмов.

2. Учет сжимаемости позволяет не только теоретически обосновать, но и на практике оценивать такие критически важные эксплуатационные характеристики, как величина гидродинамического давления, нагрузочная способность и коэффициент трения.

3. 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 %. Этот прогресс не только выявляет важные конструкционные аспекты, но и открывает новые перспективы для применения таких подшипников в различных инженерных сферах.

Литература

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/mjprf.13355
5. Кондрашов С.В., Шашкев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 405–419. DOI:10.18577/2071-9140-2017-0-5-405-419
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., Саидахмедов 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 развивающихся 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 // Journ. of Molecular Structure. 2022. Vol. 1269. P. 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), № 133. P. 1-17. 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). P. 4697. DOI:10.1038/s41598-022-08448-x
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. P. 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 poly(ethylene oxide) // Journ. of Colloid and Interface Science. 2022. Vol. 626. P. 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 фенилона C-2 // Вестн. гос. ун-та путей сообщения. 2018. № 4 (72). С. 18–25.
17. Egge T., Ghobeira R., Morent R., Hoogenboom R., De Geyter N. Comparative study of the aging behavior of plasma activated hexamethyldisiloxane-based plasma polymers and sili-

- cone 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 Journ.* 2022. Vol. 449. P. 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 // *Journal of Applied and Fundamental Research*. 2022. № 2. P. 33-36. DOI:10.17513/mjpf.13355
 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. № 5. P. 405-419. DOI:10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419
 6. Kuznecov A.A., Semenova G.K., Svidchenko E.A. Structural thermoplastics as a basis for self-lubricating polymer composite materials of antifriction purpose // *Voprosy materialovedeniya*. 2009. № 1(57). P. 116-126.
 7. Negmatov S.S., Abed N.S., Saidahmedov R.H, Ul'masov T.U., Grigor'ev 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. № 7-8. P. 32-36. DOI:10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36
 8. Bryanskij A.A., Bashkov O.V., Belova I.V., Bashkova T.I. Investigation of developing damages under bending loading of polymer composite materials and their identification by acoustic emission method // *Science Vector of Togliatti State University*. 2022. № 2. P. 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 // *Journ. of Molecular Structure*. 2022. Vol. 1269. P. 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), № 133. P. 1-17. 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). P. 4697. DOI:10.1038/s41598-022-08448-x
 12. Ivanochkin P.G., Bol'shih I.V., Talahadze T.Z., Bol'shih E.P. Application of antifriction polymer composite polymer coatings in the brake lever transmission of locomotives // *Vestnik опорного кольца, имеющего канавку* // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2022. Т. 22, № 4. С. 365-372. DOI: 0.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372

References

1. Kohanovskij V.A., Kamerova E.A. Fluoroplast-containing composite coatings in lubricating media // *Friction&Lubrication in Machines and Mechanisms*. 2014. № 1. P. 34-37.
2. Kohanovskij V.A., Kamerova E.A. Friction of polymer coatings in liquid lubricants // *Friction&Lubrication in Machines and Mechanisms*. 2014. № 4. P. 17-20.
3. Kamerova E.A., Vlasenko I.B., Snezhina N.G., Oganessian P.A. Methodology for studying the effect of liquid media on fluoropolymer-containing antifriction coatings // *Ural Scientific Bulletin*. 2014. № 21(100). P. 137-142.
4. Pavlycheva E.A. Development of a polymer composition for obtaining a protective coating on metal surfaces // *International RGUPS*. 2022. № 1 (85). P. 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. P. 713-719.
14. Bryanskij A.A., Bashkov O.V. Identification of acoustic emission sources in a polymer composite material under conditions of cyclic stretching // *Science Vector of Togliatti State University*. 2021. № 3. P. 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 poly(ethylene oxide) // *Journ. of Colloid and Interface Science*. 2022. Vol. 626. P. 930-938. 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 RGUPS*. 2018. № 4 (72). P. 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 Journ.* 2022. Vol. 449. P. 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. № 4. P. 9-17. DOI:10.18323/2782-4039-2022-4-9-17
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, № 4. P. 365-372. DOI:0.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372