

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.822.17 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_180

*Х. Н. Абдулрахман, Е. А. Болгова, В. А. Кохановский, Ю. И. Жарков, П. С. Шевчук***ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ТРЕНИЯ
МОДИФИЦИРОВАННОГО РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА
С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ ФАКТОРОВ**

Аннотация. Предложена расчетная модель модифицированной конструкции радиального подшипника, основанная на учете нелинейных факторов, описывающих движение микрополярного смазочного материала в зазоре радиального подшипника с нестандартным, адаптированным к условиям трения опорным профилем. В отличие от предыдущих подходов, разработанная модель позволяет более точно рассчитать распределение давления и скорости в слое микрополярного смазочного материала при определении нагрузочной способности и величины коэффициента трения. Новизна исследования заключается в одновременном учете нелинейных факторов и реологических свойств микрополярного смазочного материала модифицированного радиального подшипника с адаптированным к условиям трения опорным профилем, а также в комплексной верификации модели с использованием экспериментальных данных, обеспечивающей ее практическую значимость.

Ключевые слова: нелинейные факторы, радиальный подшипник, покрытие, адаптированный профиль, микрополярный смазочный материал, канавка.

Для цитирования: Оценка износостойкости по коэффициенту трения модифицированного радиального подшипника с учетом нелинейных факторов / Х. Н. Абдулрахман, Е. А. Болгова, В. А. Кохановский [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3. – С. 180–189. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_180.

Введение

Радиальные подшипники скольжения, работающие с антифрикционным покрытием, представляют собой узел трения, от надежности которого зависит порой эффективная работа целых механизмов и систем. Поэтому поиск способов обеспечения их безотказной работы является предметом целого направления научных изысканий. Исследования [1–7] посвящены гидродинамическому расчету подшипников, имеющих на поверхности металлическое покрытие; в статьях [8–11] анализируется влияние пористого покрытия. Авторы этих работ изучают влияние различных факторов на надежность и долговечность подшипников, ключевым из которых является сложная трибологическая природа взаимодействия поверхностей. На результаты работы подшипников скольжения существенное влияние оказывают нелинейные процессы: изменение вязкости смазочного материала под давлением, микрополярные свойства смазочных материалов, динамика образования смазочного клина за счет канавки на поверхности вала, а также геометрия контактирующих поверхностей нестандартных, адаптированных к условиям трения опорных профилей [12–17]. Существующие модели, широко применяемые в инженерной практике, часто не учитывают эти особенности [18–21], что приводит к расхождению между смоделированным результатом и фактическими данными испытаний.

Не менее важным фактором является разработка и оптимизация геометрии опорной поверхности подшипника. Наличие осевых канавок [22, 23] существенно влияет на распределение смазочного материала, давления в зоне канавки и, как следствие, на трибологические характеристики подшипника.

Необходимость разработки и верификации математических моделей, учитывающих вышеуказанные факторы, является актуальной научно-технической проблемой. Для решения указанной проблемы в рамках данного исследования предложен вариант построения математической модели.

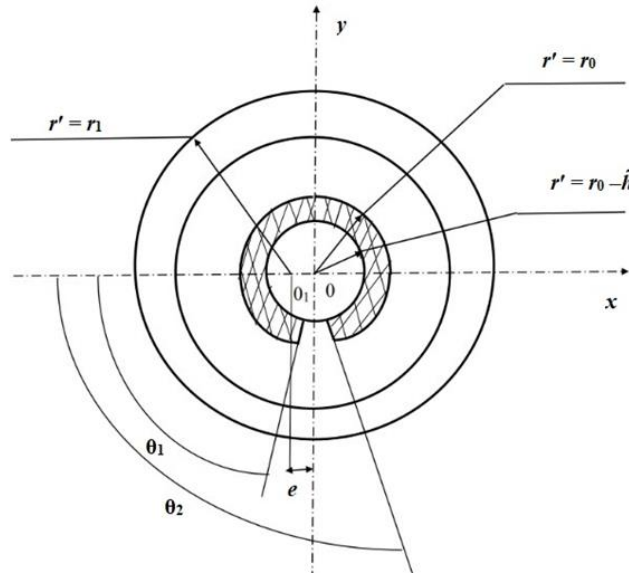
Постановка задачи

Предполагается, что течение несжимаемой жидкой смазки с микрополярными характеристиками считается установившимся. При этом принято, что скорость вращения вала равна Ω , а скорость вращения втулки равна нулю.

Рассмотрим модифицированный подшипник, у которого на поверхности вала выполнена осевая канавка, изменяющая распределение смазки в зазоре.

Запишем уравнения контуров вала с полимерным покрытием C_1 , вала без покрытия (с канавкой) C_0 , подшипниковой втулки C_2 в полярной системе координат (см. рисунок) с полюсом в центре вала:

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



Расчетная схема

В качестве исходных базовых уравнений воспользуемся уравнением движения несжимаемой микрополярной жидкости для «тонкого слоя» и уравнением неразрывности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_i}{\partial r'} = 0; \quad (2\mu + \kappa) \left(\frac{\partial^2 v_{\theta_i}}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial r'} \right) &= \frac{1}{r'} \frac{dp'_i}{d\theta} - \kappa \frac{\partial v'_{r'_i}}{\partial r'} + \rho \left(v'_{r'_i} \frac{\partial v'_{\theta_i}}{\partial r'_i} + \frac{v'_{\theta_i}}{r'_i} \frac{\partial v'_{\theta_i}}{\partial \theta} - \frac{v'_{r'_i} v'_{\theta_i}}{r'} \right), \\ \gamma \left(\frac{\partial^2 v'_{r'_i}}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v'_{r'_i}}{\partial r'} \right) &= \kappa v'_i + \kappa \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial r'}, \quad \frac{\partial v'_{r'_i}}{\partial r'} + \frac{v'_{r'_i}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial \theta} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Систему уравнений (2) решаем при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} v_{\theta} = 0, \quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1(1+H) - a' \sin \omega \theta; \\ v_{r'} = 0, \quad v_{\theta} = \Omega(r_0 - \tilde{h}) \quad \text{при} \quad r' = r_1 - \tilde{h}; \\ v'_{r'_i} = 0, \quad v_{\theta} = \Omega r_0 \quad \text{при} \quad r' = r_0; \\ p(0) = p(\theta) = p_g; \quad r_0 - \tilde{h} = h^* \quad \text{при} \quad \theta_1 < \theta < \theta_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Для удобства решения применим стандартную методику перехода к безразмерным величинам

$$\begin{aligned} r' = (r_0 - \tilde{h}) + \delta r; \quad \delta = r_1 - (r_0 - \tilde{h}); \quad v_{r'} = \Omega \delta u_i, \quad v_{\theta_i} = \Omega v_i (r_0 - \tilde{h}); \\ p' = p^* p; \quad p^* = \frac{(2\mu + \kappa) \Omega (r_0 - \tilde{h})^2}{2\delta^2}; \\ v' = v, \quad \mu' = \mu, \quad \kappa' = \kappa, \quad \gamma' = \gamma, \\ N^2 = \frac{\kappa}{2\mu + \kappa}; \quad N_1 = \frac{2\mu l^2}{\delta^2 \kappa}; \quad l^2 = \frac{\gamma}{4\mu}. \end{aligned} \quad (4)$$

Выполнив подстановку (4) в систему дифференциальных уравнений (2)–(3), получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + N^2 \frac{\partial v_i}{\partial r} = \frac{dp_i}{d\theta} + \text{Re} \left(u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial \theta} \right); \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = \frac{v_i}{N_1} + \frac{1}{N_1} \frac{du_i}{dr}; \quad \frac{\partial u_i}{\partial \theta} + \frac{\partial v_i}{\partial r} = 0; \\ u = 0, \quad v = 0, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 + \eta \cos \theta - \eta_1 \sin \omega \theta = h(\theta); \end{aligned} \quad (5)$$

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

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

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{P_g}{p^*}, \quad (6)$$

$$\text{где } \eta = \frac{e}{\delta}; \quad \eta_1 = \frac{a'}{\delta}; \quad \text{Re} = \frac{\Omega \delta^2}{\nu}.$$

В первом уравнении системы (5) нелинейные члены осредним по методу Слезкина – Тарга. Введем следующее обозначение:

$$D_i(\theta) = \frac{\text{Re}}{h(\theta)} \int_0^{h(\theta)} \left(u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) dr, \quad (7)$$

а также, ввиду наличия небольшого зазора, осредним второе уравнение системы (5) по толщине слоя смазочного материала. Тогда система уравнений (5) с учетом (7) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{N^2}{2N_1 h(\theta)} (2r(\theta) - h(\theta)) &= \frac{dp_i}{d\theta} + D_i(\theta), \\ v_i &= \frac{1}{2N_1 h(\theta)} (r_i^2(\theta) - r_i(\theta)h(\theta)), \quad \frac{\partial u_i}{\partial r_i} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta_i} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Автомодельное решение задачи (8) с учетом (6) и (7) ищем по известному методу [24–25] в виде

$$\begin{aligned} v_i &= \frac{\partial \Psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta); \quad u_i = -\frac{\partial \Psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta); \\ \Psi_i(r, \theta) &= \tilde{\Psi}_i(\xi_i); \quad V_i(r, \theta) = \tilde{V}_i(\xi_i); \quad U_i(r, \theta) = -\tilde{U}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta); \\ \xi_i &= \frac{r_i}{h(\theta)} \quad \text{при} \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi; \\ \xi_i &= \frac{r + \tilde{h}}{h(\theta) + \tilde{h}} \quad \text{при} \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2. \end{aligned} \quad (9)$$

В результате для поля скоростей и давления получим:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}'_1(\xi_1) &= a_1 \frac{\xi_1^2}{2} - a_1 \frac{\xi_2}{2}; \quad \tilde{u}_1(\xi_1) = b_1 \frac{\xi_1^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left(\frac{\xi_1^3}{3} - \frac{\xi_1^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_1}{2} + 1 \right) \xi_1 + 1; \\ \tilde{\Psi}'_2(\xi_2) &= a_2 \frac{\xi_2^2}{2} - a_2 \frac{\xi_2}{2}, \quad \tilde{u}_2(\xi_2) = b_2 \frac{\xi_2^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left(\frac{\xi_2^3}{3} - \frac{\xi_2^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_2}{2} + 1 \right) \xi_2 + 1; \\ \tilde{\Psi}'_3(\xi_3) &= a_3 \frac{\xi_3^2}{2} - a_3 \frac{\xi_3}{2}, \quad \tilde{u}_3(\xi_3) = b_3 \frac{\xi_3^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left(\frac{\xi_3^3}{3} - \frac{\xi_3^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_3}{2} + 1 \right) \xi_3 + 1; \end{aligned} \quad (10)$$

$$p_1 = 6 \left(\eta \sin \theta + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) - \frac{\eta_1 \theta}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - 1) \right) + \frac{P_g}{p^*};$$

$$p_2 = \frac{6}{(1 + \tilde{h})^2} \left[(\theta - \theta_1) \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} + \left(1 - \frac{5\tilde{\eta}\theta_1}{2\pi} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) - \frac{\tilde{\eta}}{2\pi\omega} \sin \theta_1 \right) \right) + \right.$$

$$\left. + \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \left(\tilde{\eta} (\sin \theta - \sin \theta_1) + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega \theta - \cos \omega \theta_1) \right) \right] + \frac{P_g}{p^*};$$

$$p_3 = 6 \left[(\theta - \theta_2) \left(\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} + \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) - \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) + \right.$$

$$+ \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \left(\eta (\sin \theta - \sin \theta_2) + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - \cos \omega \theta_2) \right) \left] + \frac{p_g}{p^*}. \quad (11)$$

Зная выражения гидродинамического давления и скорости, найдем аналитические выражения для несущей способности и силы трения:

$$R_x = p^* r_0 \left[\int_0^{\theta_1} p_1 \cos \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_2 \cos \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_3 \cos \theta d\theta \right] =$$

$$= \frac{6(2\mu + \kappa)\Omega r_0^3}{2\delta^2} \left[\frac{1}{4}(1 - \cos 2\theta_1) + \frac{\eta_1}{\omega} \left(\frac{1}{2(\omega+1)} \sin(\omega+1)\theta_1 + \frac{1}{2(\omega-1)} \sin(\omega-1)\theta_1 - \sin \theta_1 \right) - \right.$$

$$\left. - \frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1)(\theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 - 1) + \frac{1}{(1+\tilde{h})^2} \left[((\theta_2 - \theta_1) \sin \theta_2 + \cos \theta_2 - \cos \theta_1) \times \right. \right.$$

$$\left. \times \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} + \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) - \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_1 \right) \right) \right] + \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \times$$

$$\times \left(-\frac{\tilde{\eta}}{4} (\cos 2\theta_2 - \cos 2\theta_1) + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \left(\frac{\sin(\omega+1)\theta_2 - \sin(\omega+1)\theta_1}{2(\omega+1)} + \frac{\sin(\omega-1)\theta_2 - \sin(\omega-1)\theta_1}{2(\omega-1)} \right) - \right.$$

$$\left. - \left(\tilde{\eta} \sin \theta_1 - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \cos \omega\theta_1 \right) (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \right] + (-\theta_2 \sin \theta_2 + 1 - \cos \theta_2 + \theta_2 \sin \theta_2) \times$$

$$\times \left(\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} + \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) - \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_1 \right) \right) + \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \left(-\frac{\eta}{4} (1 - \cos 2\theta_2) + \right.$$

$$\left. + \frac{\eta_1}{\omega} \left(\frac{\sin 2\pi\omega - \sin(\omega+1)\theta_2}{2(\omega+1)} - \frac{\sin 2\pi\omega + \sin(\omega-1)\theta_2}{2(\omega-1)} \right) + \sin \theta_2 \left(\eta \sin \theta_2 - \frac{\eta_1}{\omega} \cos \omega\theta_2 \right) \right] \left. \right].$$

$$R_y = p^* r_0 \left[\int_0^{\theta_1} p_1 \sin \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_2 \sin \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_3 \sin \theta d\theta \right] = \frac{6(2\mu + \kappa)\Omega r_0}{2\delta^2} \times$$

$$\times \left[\frac{\eta}{2} \left(\theta_1 - \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \right) + \frac{\eta_1}{\omega} \left(\frac{-\cos(\omega+1)\theta_1 + 1}{2(\omega+1)} + \frac{\cos(\omega-1)\theta_1 - 1}{2(\omega-1)} + \cos \theta_1 - 1 \right) - \frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) \times \right.$$

$$\left. \times (-\theta_1 \cos \theta_1 + \sin \theta_1) + \frac{1}{(1+\tilde{h})^2} \left[((-\theta_2 + \theta_1) \cos \theta_2 + \sin \theta_2 - \sin \theta_1) \left(\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} + \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. + \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_1) - \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_1 \right) \right] + \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \left(\frac{\tilde{\eta}}{2} \left(\theta_2 - \theta_1 - \frac{1}{2} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) + \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \left(\frac{-\cos(\omega+1)\theta_2 + \cos(\omega+1)\theta_1}{2(\omega+1)} + \frac{\cos(\omega-1)\theta_2 - \cos(\omega-1)\theta_1}{2(\omega-1)} \right) - \right.$$

$$\left. - \left(\tilde{\eta} \sin \theta_1 - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} \cos \omega\theta_1 \right) (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \right] - (2\pi + \sin \theta_2 + \theta_2) \times$$

$$\times \left(\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} + \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega\theta_2) - \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_2 \right) \right) + \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) \times$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[\frac{\eta}{2} \left(2\pi - \theta_2 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_2 \right) + \frac{\eta_1}{\omega} \left(\frac{-\cos 2\pi(\omega+1) + \cos(\omega+1)\theta_2}{2(\omega+1)} + \frac{\cos 2\pi(\omega-1) - \cos(\omega-1)\theta_2}{2(\omega-1)} \right) - \right. \\
& \quad \left. - \left(\eta \sin \theta_2 + \frac{\eta_1}{\omega} \cos \omega \theta_2 \right) (1 - \cos \theta_2) \right] \Bigg]. \\
L_{\text{тр}} &= \mu \left[\int_0^{\theta_1} \left(\frac{\tilde{\psi}_1''(\theta)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_1'(\theta)}{h(\theta)} \right) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{\tilde{\psi}_2''(\theta)}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{\tilde{v}_2'(\theta)}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} \right) d\theta + \right. \\
& \quad \left. + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(\frac{\tilde{\psi}_3''(\theta)}{h(\theta)^2} + \frac{\tilde{u}_3'(\theta)}{h(\theta)} \right) d\theta \right] = \mu \left[-3 \left(1 + \frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) \right) \left(\theta_1 - 2\eta \sin \theta_1 - \frac{2\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta_1 - 1) \right) + \right. \\
& \quad \left. + \left(\frac{N^2}{12N_1} + 4 \right) \left[\left(\theta_1 - \eta \sin \theta_1 - \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta_1 - 1) \right) + \frac{\theta_2 - \theta_1 + \tilde{\eta} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) - \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega \theta_2 - \cos \omega \theta_1)}{1 + \tilde{h}} + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 2\pi - \theta_2 - \eta \sin \theta_2 - \frac{\eta_1}{\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega \theta_2) \right) - 3 \left(1 + \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \left(\frac{\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega \theta_1) - \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_1 \right) - \frac{\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \times \right. \\
& \quad \left. \times \left(\frac{\theta_2 - \theta_1 - 2\tilde{\eta} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) - \frac{2\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega \theta_2 - \cos \omega \theta_1)}{1 + \tilde{h}} - 3 \left(1 + \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \times \right. \right. \right. \\
& \quad \left. \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) - \frac{\theta_1^2}{4\pi^2} \right) \left(2\pi - \theta_2 + 2\eta \sin \theta_2 - \frac{2\eta_1}{\omega} (\cos 2\pi\omega - \cos \omega \theta_2) \right) \right] \right]. \quad (12)
\end{aligned}$$

Проверочные расчеты полученной теоретической модели проведены с использованием параметров в следующих диапазонах их численных значений: ширина канавки равна 4 мм, радиус составляет 20 мм; изменение скорости – от 0,1 до 3 м/с; нагрузка – от 4,6 до 23 МПа; вязкость жидкости 0,0707–0,0076 Н·с/м².

Для подтверждения эффективности теоретической модели нами проведено экспериментальное исследование (см. таблицу).

Сравнительный анализ результатов исследований коэффициента трения

№ п/п	Режим		Теоретический результат		Экспериментальное исследование
	σ , МПа	V , м/с	Покрытие	С учетом нелинейных факторов	
1	4,6	0,2	0,0150	0,0132	0,0149
2	9,2	0,2	0,0095	0,0078	0,0077
3	13,8	0,2	0,0075	0,0056	0,0068
4	18,4	0,2	0,0090	0,0066	0,0087
5	23,0	0,2	0,0130	0,0099	0,0113

Результаты экспериментального исследования подтвердили эффективность теоретических исследований, в результате чего получен устойчивый режим гидродинамического трения. При этом нагрузка увеличивалась ступенчато в 5 раз до 23 МПа.

Анализ экспериментальных исследований доказал эффективность разработанных математических моделей, которые обеспечивают повышенную нагрузочную способность и снижение коэффициента трения.

Выводы

1 В результате исследований получены новые математические модели для инженерных расчетов, позволяющих определить величину основных триботехнических параметров (коэффициент трения, нагрузочная способность, гидродинамическое давление).

2 Полученные математические модели учитывают применение дополнительного смазывания полимерным покрытием и канавку на поверхности вала, а также дополнительные факторы.

Заключение

Учет нелинейных факторов при моделировании позволил повысить точность расчетов несущей способности на 7–10 %, коэффициента трения – на 6–8 %. Экспериментальная часть продемонстрировала близкое совпадение с теоретическими результатами. Проведенные исследования подтвердили, что модификация вала радиального подшипника осевой канавкой и использование антифрикционных полимерных покрытий обеспечивают значительно улучшение эксплуатационных характеристик подшипников скольжения.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения предложенной методики при проектировании и эксплуатации подшипниковых узлов различного назначения.

Список литературы

- 1 Гидродинамический расчет радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, Е. О. Лагунова, В. В. Василенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 2 (66). – С. 129–135. – ISSN 0201-727X.
- 2 Применение антифрикционных полимерных композиционных покрытий в тормозной рычажной передаче локомотивов / П. Г. Иваночкин, И. В. Больших, Т. З. Талахадзе, Е. П. Больших // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1 (85). – С. 16–22. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_16.
- 3 **Лагунова, Е. О.** Расчет радиального подшипника скольжения с легкоплавким покрытием / Е. О. Лагунова, М. А. Мукутадзе // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 1. – С. 112–120. – ISSN 0202-4977.
- 4 Клиновидные опоры скольжения, работающие на микрополярном смазочном материале, обусловленные расплавом / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, Е. О. Лагунова, В. В. Василенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 3 (67). – С. 8–15. – ISSN 0201-727X.
- 5 **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.
- 6 Radial slip bearing with a pliable supporting surface / М. А. Mukutadze, Е. О. Lagunova, А. N. Gar-

References

- 1 Hydrodynamic calculation of a radial bearing lubricated by a melt of a low-melting coating in the presence of a lubricant / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, E. O. Lagunova, V. V. Vasilenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2017. – No. 2 (66). – P. 129–135. – ISSN 0201-727X.
- 2 The use of antifriction polymer composite coatings in the brake lever transmission of locomotives / P. G. Ivanochkin, I. V. Bolshikh, T. Z. Talakhadze, E. P. Bolshikh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2022. – No. 1 (85). – P. 16–22. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_16.
- 3 **Lagunova, E. O.** Calculation of a radial sliding bearing with a low-melting coating / E. O. Lagunova, M. A. Mukutadze // Friction and Wear. – 2019. – Vol. 40, No. 1. – P. 112–120. – ISSN 0202-4977.
- 4 Wedge-shaped sliding bearings operating on a micropolar lubricant caused by melt / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, E. O. Lagunova, V. V. Vasilenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2017. – No. 3 (67). – P. 8–15. – ISSN 0201-727X.
- 5 **Khasyanova, D. U.** Increasing the wear resistance of a radial sliding bearing lubricated with micropolar lubricants and metal coating melts / D. U. Khasyanova, M. A. Mukutadze // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2022. – No. 4. – P. 46–53. – DOI 10.31857/S0235711922040101.
- 6 Radial slip bearing with a pliable supporting surface / М. А. Mukutadze, Е. О. Lagunova, А. N. Gar-

- monina, V. V. Vasilenko // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, No. 3. – P. 166–171. – DOI 10.3103/S1068798X18030115.
- 7 Математическая модель смазочного материала в опоре скольжения с плавким покрытием и учетом зависимости вязкости от давления при неполном заполнении рабочего зазора / Д. У. Хасьянова, М. А. Мукутадзе, А. М. Мукутадзе, Н. С. Задорожная // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2021. – № 5. – С. 33–40. – DOI 10.31857/S0235711921050084.
- 8 Расчетная модель гидродинамической смазки неоднородного пористого подшипника конечной длины, работающего в устойчивом нестационарном режиме трения при наличии принудительной подачи смазки / М. А. Мукутадзе, Б. М. Флек, Н. С. Задорожная [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 3 (26). – С. 9. – eISSN 2073-8633.
- 9 Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре радиального подшипника, обладающего повышенной несущей способностью и демпфирующими свойствами / К. С. Ахвердиев, Е. Е. Александрова, М. А. Мукутадзе, Б. Е. Копотун // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 4 (36). – С. 133–139. – ISSN 0201-727X.
- 10 Разработка расчетной модели радиального подшипника с учетом зависимости проницаемости, электропроводности и вязкости жидкого смазочного материала от давления / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, И. А. Колобов, А. Н. Гармонина // Интернет-журнал Науковедение. – 2016. – Т. 8, № 6 (37). – С. 74. – eISSN 2223-5167.
- 11 Гидродинамический расчет радиального пористого подшипника бесконечной длины с повышенной несущей способностью с учетом сил инерции / М. А. Мукутадзе, Е. Е. Александрова, А. А. Константинов, А. И. Шевченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 2 (46). – С. 194–198. – ISSN 0201-727X.
- 12 **Ахвердиев, К. С.** Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре сложнонагруженного радиального подшипника конечной длины, обладающего повышенной несущей способностью / К. С. Ахвердиев, Е. Е. Александрова, М. А. Мукутадзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 1 (37). – С. 132–137. – ISSN 0201-727X.
- 13 **Мукутадзе, М. А.** Разработка системы расчетных моделей подшипников скольжения на основе развития гидродинамической и реодинамической теории смазки : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.02.04 / Мукутадзе Мурман Александрович. – Ростов-на-Дону, 2015. – 22 с.
- monina, V. V. Vasilenko // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, No. 3. – P. 166–171. – DOI 10.3103/S1068798X18030115.
- 7 Mathematical model of a lubricant in a sliding bearing with a fusible coating and taking into account the dependence of viscosity on pressure when the working gap is not fully filled / D. U. Khasyanova, M. A. Mukutadze, A. M. Mukutadze, N. S. Zadorozhnaya // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2021. – No. 5. – P. 33–40. – DOI 10.31857/S0235711921050084.
- 8 A computational model of the hydrodynamic lubrication of an inhomogeneous porous bearing of finite length operating in a stable non-stationary friction mode in the presence of forced lubrication / M. A. Mukutadze, B. M. Flek, N. S. Zadorozhnaya [et al.] // Engineering Journal of Don. – 2013. – No. 3 (26). – P. 9. – eISSN 2073-8633.
- 9 Stratified flow of double-layer lubricant in the gap of a radial bearing with increased bearing capacity and damping properties / K. S. Akhverdiev, E. E. Aleksandrova, M. A. Mukutadze, B. E. Kopotun // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2009. – No. 4 (36). – P. 133–139. – ISSN 0201-727X.
- 10 Development of a calculation model of a radial bearing, taking into account the dependence of permeability, electrical conductivity and viscosity of a liquid lubricant on pressure / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, I. A. Kolobov, A. N. Garmonina // Online Journal Naukovedenie. – 2016. – Vol. 8, No. 6 (37). – P. 74. – eISSN 2223-5167.
- 11 Hydrodynamic calculation of a radial porous bearing of infinite length with increased bearing capacity, taking into account inertia forces / M. A. Mukutadze, E. E. Aleksandrova, A. A. Konstantinov, A. I. Shevchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2012. – No. 2 (46). – P. 194–198. – ISSN 0201-727X.
- 12 **Akhverdiev, K. S.** Stratified flow of double-layer lubricant in the gap of a complexly loaded radial bearing of finite length with increased bearing capacity / K. S. Akhverdiev, E. E. Aleksandrova, M. A. Mukutadze // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2010. – No. 1 (37). – P. 132–137. – ISSN 0201-727X.
- 13 **Mukutadze, M. A.** Development of a system of computational models of sliding bearings based on the development of hydrodynamic and rheodynamic lubrication theory : abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences : 05.02.04 / Mukutadze Murman Aleksandrovich. – Rostov-on-Don, 2015. – 22 p.

- 14 **Ахвердиев, К. С. О.** Гидродинамический расчет упорного подшипника скольжения, работающего на вязкоупругой смазке в турбулентном режиме трения / К. С. О. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, И. С. Семенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2011. – № 4. – С. 69–77. – ISSN 0235-7119.
- 15 Гидродинамический расчет радиального подшипника скольжения, работающего в турбулентном режиме трения при неполном заполнении зазора вязкоупругой смазкой / К. С. О. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, В. А. Замшин, И. С. Семенко // Вестник машиностроения. – 2009. – № 7. – С. 11–17. – ISSN 0042-4633.
- 16 Математическая модель гидродинамической смазки радиального подшипника, работающего в нестационарном режиме на микрополярной смазке / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, М. А. Савенкова, А. Ю. Вовк // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 1 (29). – С. 147–151. – ISSN 0201-727X.
- 17 Математическая модель гидродинамической смазки бесконечно широких опор, работающих в турбулентном режиме на микрополярной смазке / К. С. Ахвердиев, А. Ю. Вовк, М. А. Мукутадзе, М. А. Савенкова // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 9. – С. 12–15. – ISSN 1819-2092.
- 18 Гидродинамический расчет радиального подшипника при наличии электромагнитного поля с учетом зависимости вязкости и электропроводимости от температуры / К. С. Ахвердиев, Е. О. Лагунова, М. А. Мукутадзе // Вестник Донского государственного технического университета. – 2009. – Т. 9, № 3 (42). – С. 529–536. – ISSN 1992-5980.
- 19 Расчетная модель радиального подшипника скольжения с повышенной несущей способностью, работающего на микрополярной смазке с учетом ее вязкостных характеристик от давления / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, Е. О. Лагунова, К. С. Солоп // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4 (27). – С. 22. – eISSN 2073-8633.
- 20 Mathematical model of a plain bearer lubricated with molten metal / М. А. Mukutadze, V. V. Vasilenko, А. М. Mukutadze, А. N. Opatskikh // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science : International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019. – 2019. – Article no. 012021. – DOI 10.1088/1755-1315/378/1/012021.
- 21 Гидродинамический расчет радиального подшипника, работающего в нестационарном режиме на вязкопластичной смазке, обладающей микрополярными свойствами / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, А. Ю. Вовк, И. С. Семенко // 14 **Akhverdiev, K. S. O.** Hydrodynamic calculation of a thrust sliding bearing operating on viscoelastic lubrication in a turbulent friction regime / K. S. O. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, I. S. Semenko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2011. – No. 4. – P. 69–77. – ISSN 0235-7119.
- 15 Hydrodynamic calculation of a radial sliding bearing operating in a turbulent friction mode with incomplete filling of the gap with viscoelastic lubricant / K. S. O. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, V. A. Zamshin, I. S. Semenko // Vestnik Mashinostroeniya. – 2009. – No. 7. – P. 11–17. – ISSN 0042-4633.
- 16 Mathematical model of hydrodynamic lubrication of a radial bearing operating in a non-stationary mode with micropolar lubrication / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, M. A. Savenkova, A. Yu. Vovk // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2008. – No. 1 (29). – P. 147–151. – ISSN 0201-727X.
- 17 Mathematical model of hydrodynamic lubrication of infinitely wide bearings operating in a turbulent mode on micropolar lubrication / K. S. Akhverdiev, A. Yu. Vovk, M. A. Mukutadze, M. A. Savenkova // Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms. – 2007. – No. 9. – P. 12–15. – ISSN 1819-2092.
- 18 Hydrodynamic calculation of a radial bearing in the presence of an electromagnetic field, taking into account the dependence of viscosity and electrical conductivity on temperature / K. S. Akhverdiev, E. O. Lagunova, M. A. Mukutadze // Vestnik of Don State Technical University. – 2009. – Vol. 9, No. 3 (42). – P. 529–536. – ISSN 1992-5980.
- 19 A calculation model of a radial sliding bearing with increased bearing capacity operating on micropolar grease, taking into account its viscosity characteristics from pressure / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, E. O. Lagunova, K. S. Solop // Engineering Journal of Don. – 2013. – No. 4 (27). – P. 22. – eISSN 2073-8633.
- 20 Mathematical model of a plain bearer lubricated with molten metal / M. A. Mukutadze, V. V. Vasilenko, A. M. Mukutadze, A. N. Opatskikh // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science : International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019. – 2019. – Article no. 012021. – DOI 10.1088/1755-1315/378/1/012021.
- 21 Hydrodynamic calculation of a radial bearing operating in an unsteady mode on a viscoplastic lubricant with micropolar properties pressure / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, A. Yu. Vovk, I. S. Semenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo

- Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 4 (32). – С. 131–138. – ISSN 0201-727X.
- 22 **Киришчьева, В. И.** Моделирование методики повышения износостойкости радиального подшипника с полимерным покрытием / В. И. Киришчьева // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 10 (94). – С. 229–239. – eISSN 2073-8633.
- 23 **Хасьянова, Д. У.** Установление закономерности повышения износостойкости модифицированного радиального подшипника скольжения / Д. У. Хасьянова, М. А. Мукутадзе // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – № 2. – С. 71–81. – DOI 10.31857/S0235711923010066.
- 24 Исследование износостойкости подшипника скольжения с полимерным покрытием опорного кольца, имеющего канавку / В. В. Василенко, В. И. Киришчьева, М. А. Мукутадзе, В. Е. Шведова // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2022. – № 22 (4). – С. 365–372. – DOI 10.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372.
- 25 **Киришчьева, В. И.** Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала / В. И. Киришчьева, Е. О. Лагунова, М. А. Мукутадзе // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2023. – Т. 27, № 2 (100). – С. 15–23. – DOI 10.54708/19926502_2023_27210015.
- Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2008. – No. 4 (32). – P. 131–138. – ISSN 0201-727X.
- 22 **Kirishchieva, V. I.** Modeling of a technique for increasing the wear resistance of a polymer-coated radial bearing / V. I. Kirishchieva // Engineering Journal of Don. – 2022. – No. 10 (94). – P. 229–239. – eISSN 2073-8633.
- 23 **Khasyanova, D. U.** Establishing of a pattern for increasing the wear resistance of a modified radial sliding bearing / D. U. Khasyanova, M. A. Mukutadze // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2023. – No. 2. – P. 71–81. – DOI 10.31857/S0235711923010066.
- 24 Investigation of wear resistance of a sliding bearing with a polymer-coated support ring having a groove / V. V. Vasilenko, V. I. Kirishchieva, M. A. Mukutadze, V. E. Shvedova // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2022. – No. 22 (4). – P. 365–372. – DOI 10.23947/2687-1653-2022-22-4-365-372.
- 25 **Kirishchieva, V. I.** Improving the wear resistance of a radial bearing with a non-standard bearing profile and a polymer coating on the shaft surface / V. I. Kirishchieva, E. O. Lagunova, M. A. Mukutadze // Vestnik UGATU. – 2023. – Vol. 27, No. 2 (100). – P. 15–23. – DOI 10.54708/19926502_2023_27210015.

Kh. N. Abdulrahman, E. A. Bolgova, V. A. Kokhanovskiy, Yu. I. Zharkov, P. S. Shevchuk

EVALUATION OF WEAR RESISTANCE BY THE FRICTION COEFFICIENT OF A MODIFIED RADIAL BEARING WITH ACCOUNT OF NON-LINEAR FACTORS

Abstract. A computational model of a modified radial bearing design is proposed. This model considers nonlinear factors describing the movement of a micropolar lubricant within the bearing clearance with a non-standard bearing profile adapted to friction conditions. Unlike previous approaches, the developed model makes it possible to more accurately calculate the distribution of pressure and velocity in a layer of micropolar lubricant when determining the load capacity and the value of friction coefficient. The novelty of the study lies in the simultaneous consideration of nonlinear factors and rheological properties of the micropolar lubricant of a modified radial bearing with a support profile adapted to friction conditions, as well as in the comprehensive verification of the model using experimental data, ensuring its practical significance.

Keywords: nonlinear factors, radial bearing, coating, adapted profile, micropolar lubricant, groove.

For citation: Evaluation of wear resistance by the friction coefficient of a modified radial bearing with account of non-linear factors / Kh. N. Abdulrahman, E. A. Bolgova, V. A. Kokhanovskiy [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 3. – P. 180–189. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_180.

Сведения об авторах**Абдулрахман Хайдар Нофалович**

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Высшая математика»,
кандидат физико-математических наук, доцент,
e-mail: abdulrahm.haidar@gmail.com

Болгова Екатерина Александровна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Высшая математика»,
аспирант,
e-mail: bolgova_katya6@mail.ru

Кохановский Вадим Алексеевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Технология металлов»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: tehn_met@rgups.ru

Жарков Юрий Иванович

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Электроэнергетика
и электромеханика транспорта»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: eet@rgups.ru

Шевчук Петр Сергеевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Информатика»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: informat@rgups.ru

Information about the authors**Abdulrahman Khaidar Nofalovich**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair "Higher Mathematics",
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: abdulrahm.haidar@gmail.com

Bolgova Ekaterina Aleksandrovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair "Higher Mathematics",
Postgraduate Student,
e-mail: bolgova_katya6@mail.ru

Kokhanovskiy Vadim Alekseevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair "Metals Technology",
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: tehn_met@rgups.ru

Zharkov Yuri Ivanovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair "Electric Power Engineering
and Electromechanics of Transport",
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: eet@rgups.ru

Shevchuk Petr Sergeevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair "Computer Science",
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: informat@rgups.ru