

ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ТРЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ РАДИАЛЬНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С УЧЕТОМ СЖИМАЕМОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОГО РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ МИКРОПОЛЯРНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Болгова Е.А., Мукутадзе М.А.

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону

Ключевые слова: сжимаемость, модифицированная конструкция, зависимость вязкости от давления и температуры, оценка износостойкости, микрополярный смазочный материал, турбулентный режим.

Аннотация. В данной статье рассматривается разработка и исследование модели движения микрополярного смазочного материала в рабочем зазоре модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения. Этот подшипник отличается нестандартным опорным профилем, на поверхности которого нанесено полимерное покрытие с канавкой. Особое внимание уделено учету сжимаемости и турбулентному режиму течения смазочного материала. В результате предложен новый подход к оценке влияния параметра сжимаемости модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения с учетом зависимости вязкости микрополярного смазочного материала от давления и температуры при турбулентном режиме течения.

WEAR RESISTANCE ASSESSMENT BASED ON THE FRICTION COEFFICIENT OF THE RADIAL PLAIN BEARING DESIGN TAKING INTO ACCOUNT COMPRESSIBILITY AND TURBULENT FLOW REGIME OF THE MICROPOLAR LUBRICANT

Bolgova E.A., Mukutadze M.A.

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don

Keywords: compressibility, modified design, viscosity dependence on pressure and temperature, wear resistance assessment, micropolar lubricant, turbulent regime.

Abstract. This article discusses the development and study of a model for the motion of a micropolar lubricant in the working clearance of a modified radial plain bearing design. This bearing is distinguished by a non-standard support profile, on the surface of which a polymer coating with a groove is applied. Particular attention is paid to taking into account the compressibility and turbulent flow regime of the lubricant. As a result, a new approach to assessing the influence of the compressibility parameter of the modified radial plain bearing design is proposed taking into account the dependence of the viscosity of the micropolar lubricant on pressure and temperature under turbulent flow conditions.

Введение. Успешное развитие тяжелонагруженных узлов трения транспортной и авиакосмической техники невозможно без использования надежной и высокопроизводительной техники. Для этого необходимо создание новых машин и механизмов, обладающих высокой износостойкостью и другими эксплуатационными параметрами.

Анализ работ [1-19], посвященных исследованию сжимаемости жидкостей в интервале температур и давления различными приемами, показывает, что предложенный новый метод способен дать надежные параметры в широком

диапазоне давления и температур, а также сопоставление данных о внутреннем давлении жидкости, полученных разными способами, приводит к выводу о наличии довольно большого количества ошибок в их определении. В связи с этим исследование, направленное на повышение эксплуатационных характеристик, является актуальным и востребованным.

Постановка задачи. Течение сжимаемого микрополярного смазочного материала происходит в рабочем зазоре модифицированного радиального подшипника.

В принятом расположении полярной системы координат (рис. 1) уравнение контуров, запишем в виде

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

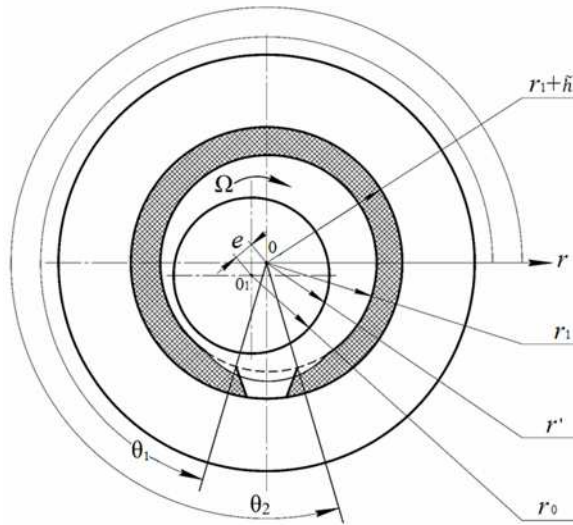


Рис. 1. Рабочий узел трения

Для разработки расчетной модели используем следующие исходные уравнения. Первым уравнением является уравнение, которое описывает движение жидкости. В дополнение к этому используем уравнение неразрывности и уравнение состояния:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2h(\theta)}(2r - h) &= \frac{1}{\Lambda j e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp_i}{d\theta}, \\ v_i &= \frac{1}{2h(\theta)}(r^2 - rh(\theta)), \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial \theta} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

$$v = 1, \quad u = -\eta \sin \theta, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 - \eta \cos \theta;$$

$$v = 0, \quad u = 0, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = \eta_1 \sin \omega \theta, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

$$v = v^*(\theta), \quad u = u^*(\theta), \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = \eta_2 + \eta_1 \sin \omega \theta, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}. \quad (3)$$

Автомодельное решение (2) ищем по известному методу [20-21]:

$$\begin{aligned}
\rho v_i &= \frac{\partial \psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta); \quad \rho u_i = -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta); \\
\psi_i(r, \theta) &= \tilde{\psi}(\xi_i); \quad V_i(r, \theta) = p \tilde{v}_i(\xi_i); \quad U_i(r, \theta) = -p \tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta); \\
\tilde{u}_i(\xi_i) - \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) + \frac{h(\theta)}{h'(\theta)} \cdot \frac{1}{p} \frac{dp}{d\theta} &= 0; \quad \xi_2 = \frac{r}{h(\theta)} \text{ при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\
\xi_{1,3} &= \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \text{ при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi.
\end{aligned} \tag{4}$$

В ходе вычислений уравнение (2) будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
\tilde{\psi}_i''' &= a_i; \quad \tilde{u}_i'' = b_i - \frac{N^2}{2}(2\xi_i - 1); \\
\frac{p}{j\Lambda e^{\alpha p - \beta T}} \cdot \frac{dp_i}{d\theta} &= \frac{b_i p}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3}, \quad i = 1, 3; \\
\frac{p}{j\Lambda e^{\alpha p - \beta T}} \cdot \frac{dp_2}{d\theta} &= \frac{b_2 p}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)}.
\end{aligned} \tag{5}$$

Система уравнений (5) решается при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned}
v_i(0) &= 0; \quad \tilde{\psi}_i'(0) = 0, \quad \tilde{\psi}_i'(1) = 0, \quad \tilde{u}_i'(1) = -\eta \sin \theta; \quad \tilde{v}_i'(1) = 0; \\
v_i(1) &= 0; \quad \tilde{u}_i(0) = 0; \quad \tilde{v}_i(0) = 1; \\
\int_{\theta}^{\xi_i} \tilde{u}_i(\xi_i) d\xi_i &= 0; \quad p(\theta) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}.
\end{aligned} \tag{6}$$

Продифференцируем по θ выражение $\mu = e^{\alpha p - \beta T}$. Учитывая значение повышения температуры, получим следующие аналитические выражения для гидродинамического давления:

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

Проведенный численный анализ полученных расчетных моделей при скорости 1 м/с, $\Lambda = 0,1-0,9$, $\sigma = 8-40$ МПа позволил построить графики коэффициента трения (рис. 2, 3) при использовании микрополярного смазочного материала с учетом сжимаемости.

Результаты исследования

Исследование позволило получить более точные данные о рабочих характеристиках радиальных подшипников скольжения с полимерным покрытием (табл. 1), что имеет важное значение для их эффективного применения в различных инженерных системах. Уточнены несущая способность на 14-16%, коэффициент трения на 9-11%.

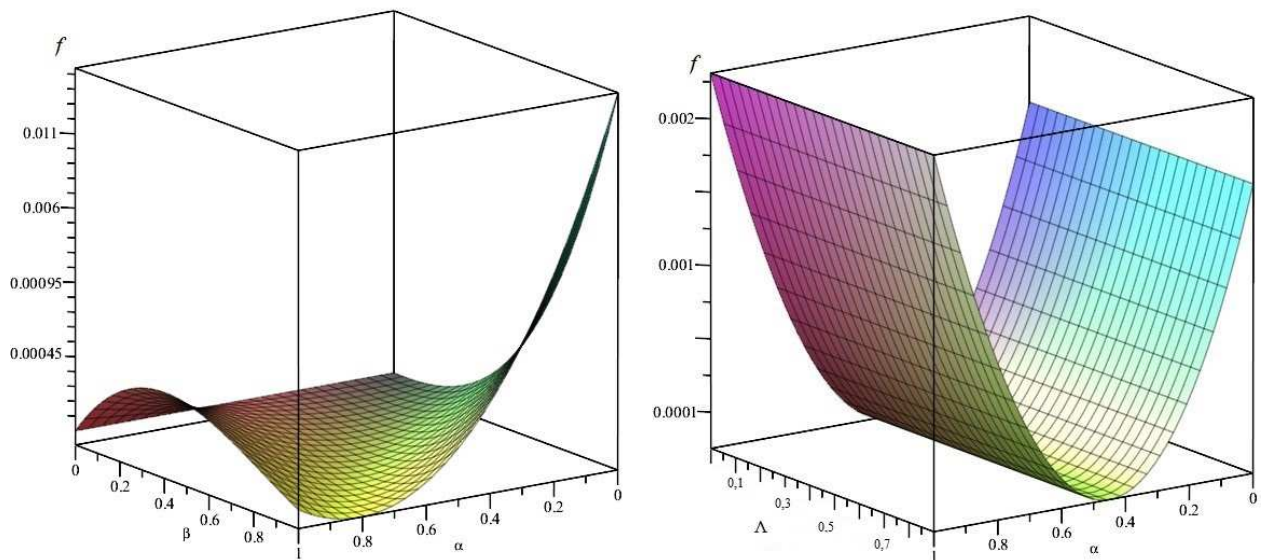


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от вязкости и параметра сжимаемости

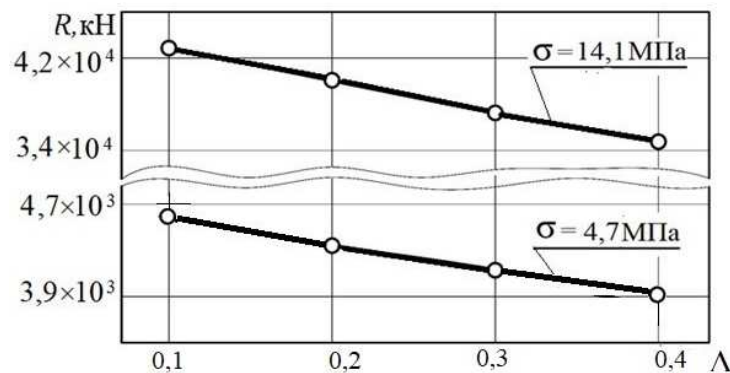


Рис. 3. Зависимость составляющей давления от параметра сжимаемости и рабочей нагрузки

Табл. 1. Результаты теоретического исследования

№	σ , МПа	Параметр сжимаемости Λ				
		0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
		Коэффициент трения				
1	8	0,0075	0,0100	0,008	0,0048	0,0022
2	16	0,0043	0,0044	0,0045	0,0028	0,0014
3	24	0,0010	0,0012	0,0011	0,0009	0,00094
4	32	0,00099	0,0011	0,0010	0,0009	0,00092
5	40	0,00087	0,0010	0,0009	0,0009	0,00801

Основные результаты

1. Проведенное исследование привело к значительному расширению возможностей практического использования расчетных моделей радиального подшипника скольжения и позволяет на практике оценивать его критически важные эксплуатационные характеристики.

2. Исследование радиальных подшипников скольжения, принимающих в учет сжимаемость, показало значительное улучшение их эксплуатационных характеристик. Результаты исследований демонстрируют, что несущая способность таких подшипников уточняется на 14-16%, а коэффициент трения –

на 9-11%. Этот прогресс не только выявляет важные конструкционные аспекты, но и открывает новые перспективы для применения таких подшипников в различных инженерных сферах.

Список литературы

1. Киришьева В.И., Колобов И.А., Мукутадзе М.А., Шведова В.Е. Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (87). – С. 18-25.
2. Хасьянова Д.У., Мукутадзе М.А. Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения смазываемого микрополярными смазочными материалами и расплавами металлического покрытия // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2022. – №4. – С. 46-53.
3. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Improved wear resistance of a metal-coated radial slider bearing // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2022, vol. 51, no. 2, pp. 128-133.
4. Mukutadze M.A., Morozova A.V., Kirishchieva V.I. Calculation model of a micropolar lubricant, taking into account the dependence of viscosity on pressure // Practice Oriented Science: UAE - RUSSIA - INDIA. – Dubai, 2022. – P. 194-202.
5. Киришьева В.И., Мукутадзе А.М., Мукутадзе М.А. Математическая модель течения смазочного материала и расплава покрытия в рабочем зазоре радиального подшипника // Научный потенциал молодежи и технический прогресс: материалы V Всероссийской научно-практической конференции. – СПб.: НИЦ МС, 2022. – С. 19-23.
6. Kirishchieva V.I., Mukutadze A.M., Mukutadze M.A. Calculation model of a micropolar lubricant // UAE - RUSSIA - INDIA. Proceedings of the International University Scientific Forum. – UAE, 2022. – P. 130-139.
7. Mukutadze M.A., Opatskikh A.N. Study of the wear resistance of a friction unit with a non-standard support profile and a metal coating // Transportation Research Procedia. Collection of materials XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability. – Krasnoyarsk, 2023. – P. 726-733.
8. Lagunova E., Mukutadze M., Badakhov G., Zinoviev N., Shvedova V. Increase of wear resistance of tribocontact with low-melting metal and porous coating // E3S Web of Conferences. 2023, vol. 383, p. 04033.
9. Abdurahman Kh., Mukutadze M., Badakhov G., Zinoviev N., Shvedova V. Calculated model of a lubricant in a bearing with a non-standard support profile of a sleeve and a metal-coated shaft // E3S Web of Conferences. 2023, vol. 383, p. 04031.
10. Badakhov G., Zinoviev N., Mukutadze M., Shvedova V. Calculation model for lubrication of bearings with unconventional support surface profile and fusible shaft surface coating // E3S Web of Conferences. 2023, vol. 376, p. 01084.
11. Мукутадзе М.А., Киришьева В.И., Бадахов Г.А., Шведова В.Е., Зиновьев Н.В. Исследование износостойкости в подшипнике с металлическим покрытием при учете зависимости вязкости от давления // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2023. – № 35. – С. 30-38.
12. Морозова А.В., Мукутадзе М.А. Разработка математической модели для анализа экономического эффекта и его прогнозирования для модифицированной конструкции радиального подшипника // Components of Scientific and Technological Progress. – 2023. – №4(82). – С. 115-125.
13. Мукутадзе М.А., Приходько В.М., Бадахов Г.А., Шведова В.Е., Зиновьев Н.В. Разработка расчетной модели модифицированного металлополимерного радиального подшипника с учетом зависимости вязкости от давления и температуры // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 9 (135). – DOI: 10.23670/IRJ.2023.135.57.
14. Мукутадзе М.А., Приходько В.М., Шведова В.Е., Бадахов Г.А., Зиновьев Н.В. Разработка математической модели течения ферромагнитного смазочного материала в

- высоконагруженной клиновидной опоре скольжения // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 8 (134). – DOI: 10.23670/IRJ.2023.134.15.
15. Морозова А.В., Мукутадзе М.А. Разработка математической модели для анализа экономического эффекта модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения и его прогнозирования // Наука Красноярья. – 2023. – Т. 12, №3. – С. 7-25
 16. Мукутадзе М.А., Абдулрахман Х.Н., Шведова В.Е., Бадахов Г.А., Зиновьев Н.В. Исследования на износостойкость конструкции радиального подшипника с учетом реологических свойств микрополярного смазочного материала // Омский научный вестник. – 2023. – № 3 (187). – С. 3-14.
 17. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Study of the wear resistance of a radial bearing with a nonstandard support profile taking into account the dependence of viscosity on the pressure and temperature. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023, vol. 52, no. S1, pp. S17-S25.
 18. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Study of wear resistance of a radial bearing covered by a polymer coating with an axial groove on a nonstandard base surface. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023, vol. 52, no. 5, pp. 452-459.
 19. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. The regularity of increasing the wear resistance of a modified radial slide bearing. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023, vol. 52, no. 2, pp. 151-160.
 20. Кирищичева В.И., Лагунова Е.О., Мукутадзе М.А. Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием на поверхности вала // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2023. – Т. 27, №2(100). – С. 15-23.
 21. Хасьянова Д.У., Мукутадзе М.А. Установление закономерности повышения износостойкости модифицированного радиального подшипника скольжения. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – №2. – С. 71-81.

Сведения об авторах:

Болгова Екатерина Александровна – аспирант;

Мукутадзе Мурман Александрович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика».