

ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ТРЕНИЯ И НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА

Болгова Е.А., Мукутадзе М.А.

*Ростовский государственный университет путей сообщения,
Ростов-на-Дону, Россия*

Ключевые слова: оценка износостойкости, коэффициент трения, нагрузочная способность, ламинарный режим.

Аннотация. В статье затрагивается тема разработки модели модифицированной конструкции нестандартного узла трения, характеризованного радиальным подшипником, смазываемым неклассическим сжимаемым фрикционным материалом. Найдена новая модель, основанная на общепринятых формулах, позволяющая оценить параметр значения гидродинамического давления, нагрузочную способность, численную величину трения для инженерных изысканий радиального подшипника, имеющего полимерное покрытие на поверхности вала с осевой канавкой. Особое внимание уделено результатам сравнительных характеристик численного и экспериментального результатов. Модернизированный узел трения радиального подшипника скольжения исходя из результатов проведенного эксперимента обеспечила появление вала на гидродинамическом клине, а по результат расчетного анализа теоретических моделей подтвердил снижение погрешностей по эксплуатационным характеристикам

EVALUATION OF WEAR RESISTANCE BY COEFFICIENT OF FRICTION AND LOAD CAPACITY OF A RADIAL BEARING

Bolgova E.A., Mukutadze M.A.

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

Keywords: assessment of wear resistance, coefficient of friction, load capacity, laminar flow.

Abstract. The article touches upon the topic of developing a model of a modified design of a non-standard friction unit characterized by a radial bearing lubricated by a non-classical compressible friction material. A new model based on generally accepted formulas has been found, which makes it possible to estimate the parameter of the hydrodynamic pressure value, the load capacity, and the numerical value of friction for engineering surveys of a radial bearing having a polymer coating on the surface of a shaft with an axial groove. Special attention is paid to the results of comparative characteristics of numerical and experimental results. The upgraded friction unit of the radial sliding bearing, based on the results of the experiment, ensured the appearance of a shaft on a hydrodynamic wedge, and the result of the computational analysis of theoretical models confirmed the reduction of errors in performance characteristics.

Введение

Анализ работ [1-5] доказывает, что сжимаемость смазочного материала в узле трения машин и механизмов отрицательно в целом воздействует на энергетику и динамику работы рассматриваемого элемента.

В работах [6-11] при расчете динамических характеристик узлов трения высокой загруженности не учитывается сжимаемость смазки, что на наш взгляд не является правильным и понижает при этом точность рассчитываемых показателей, поэтому крайне важно, для получения более

точных данных необходимо вводить этот показатель, вследствие этого данная статья является важным и актуальным направлением исследования.

Разрабатываемые методики расчета в [12-15], посвященные подшипникам скольжения, опора которых покрыта полимерным композитом, имеет высокую несущую способность, область применения которой – это машиностроительная.

Анализ работ [16-19] посвященных гидродинамическому режиму смазывания подшипников скольжения смазываемых одновременно жидкими смазочными материалами и покрытиями показывает, что для расширения и конкретизации исследований применительно к трибоузлам машин и механизмов, возникает необходимость учета дополнительных факторов [20-22].

Представленное исследование направлено на получение математической модели модифицированной конструкции радиального подшипника, учитывающей сжимаемость жидкого смазочного материала.

Разработка математической модели

Реализация поставленной задачи формируется исходя из применения в расчетах общеизвестных безразмерных уравнений движения микрополярного смазочного материала для «тонкого слоя», выражений неразрывности, а также уравнением состояния и граничным условием (рис. 1).

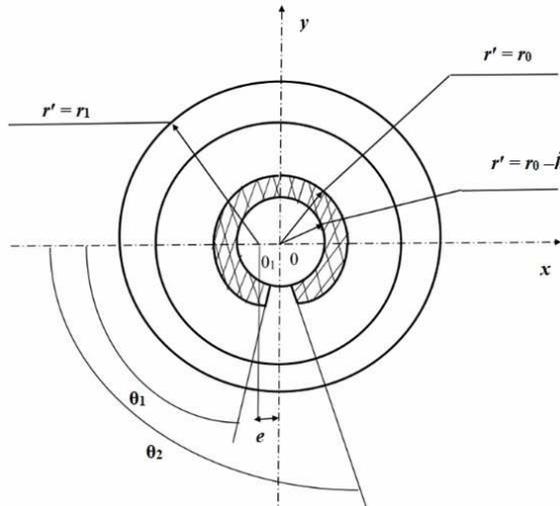


Рис. 1. Рабочий узел трения

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + N^2 \frac{\partial v_i}{\partial r} = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{dp_i}{d\theta}, \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} - \frac{v_i}{N_1} - \frac{1}{N_1} \cdot \frac{du_i}{dr} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0, \quad p = \rho. \tag{1}$$

здесь $\Lambda = \frac{r_0^2 \mu \Omega}{p_g \delta^2}, p = \frac{\lambda \Omega^2 r_0^2}{2} \rho.$

$$u = 0, \quad v = 0, \quad \nu = 0 \quad \text{at } r = 1 + \eta \cos \theta = h(\theta);$$

$$u = 1, \quad \nu = 0, \quad v = 1 \quad \text{at } r = r_0, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi; \quad (2)$$

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

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{P_g}{P_*}.$$

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

Уравнение контуров, примет вид:

$$C_1: r' = r_0, \quad C_0: r' = r_0 - \tilde{h}, \quad C_0: r' = r_1(1+H), \quad (3)$$

В нашем случае для сжимаемого смазочного материала допускаем, что $\frac{1}{N_1} \ll 1$ следовательно выражение (2) будем следующим:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2h}(2r-h) = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{dp_i}{d\theta}, \quad \nu_i = \frac{1}{2h}(r^2 - rh),$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho \nu_i)}{\partial r} = 0, \quad p = \rho. \quad (4)$$

Автомодельное решение (4) ищем по известному методу:

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

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

$$\xi_2 = \frac{r_1 + \tilde{h}}{h(\theta) + \tilde{h}} \quad \text{at } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

$$\xi_i = \frac{r}{h(\theta)} \quad \text{at } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi, \quad i = 1, 3. \quad (5)$$

В ходе вычислений уравнение (4) будет иметь вид:

$$\tilde{\Psi}_i''' = a_i; \quad \tilde{u}_i'' = b_i - \frac{N_i^2}{2}(2\xi_i - 1); \quad \tilde{u}_i(\xi_i) - \xi_i \tilde{\nu}_i'(\xi_i) + \frac{h(\theta)}{h'(\theta)} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{\partial p}{\partial \theta} = 0;$$

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

$$\frac{p}{\Lambda} \cdot \frac{dp_2}{d\theta} = \frac{b_2 p}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{a_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^3}. \quad (6)$$

$$\nu_i(0) = 0; \quad \tilde{\Psi}_i'(0) = 0, \quad \tilde{\Psi}_i'(1) = 0, \quad \tilde{u}_i'(1) = -\eta \sin \theta; \quad \tilde{\nu}_i'(1) = 0;$$

$$\nu_i(1) = 0; \quad \tilde{u}_i(0) = 0; \quad \tilde{\nu}_i(0) = 1; \quad \int_{\theta}^{\xi_i} \tilde{u}_i(\xi_i) d\xi_i = 0;$$

$$p(\theta) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{P_g}{P_*}. \quad (7)$$

Производя расчеты выражения (6) применяя методику последовательных приближений, ограничиваясь двумя приближениями, имеем:

$$P_{11} = \frac{P_g}{p^*}, P_{21} = \frac{P_g}{p^*}, P_{31} = \frac{P_g}{p^*}.$$

$$P_{12} = 6\Lambda \left[(\theta - 2\eta \sin \theta) - \frac{2(1-\eta^2)}{p(2+\eta^2)} (\theta - 3\eta \sin \theta) \right];$$

$$P_{22} = \frac{6\Lambda(\theta - \theta_1)}{(1+\tilde{h})^2} \left[\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} + \frac{\tilde{\eta}}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) \cdot \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2} \right) + \frac{\tilde{\eta}}{2\pi p} \sin \theta_1 \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi} \right) \right];$$

$$P_{32} = 6\Lambda(\theta - \theta_2) \left[\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} + \frac{\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) \cdot \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2} \right) + \frac{\eta}{2\pi p} \sin \theta_2 \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi} \right) \right].$$

Найденные результаты и их анализ

Для проверки адекватности вычисленной расчетной модели примем следующие значения основных показателей: $\theta_2 - \theta_1 = 4$ мм (ширина канавки), $r = 20$ мм; $V = 1-3$ м/с; $\sigma = 11...55$ МПа; $\mu_0 = 0,0707...0,0076$ Н·с/м². Производя расчеты, найдено, что погрешность по величине коэффициента трения понизилась на 6-8%, а несущая способность на 7-9%, находясь при этом в диапазоне заданных значений.

Эксперимент модернизированного радиального подшипника скольжения производился в виде частичных вкладышей на модернизированной машине трения марки ИИ5018.

Эксперимент проводился пять раз, полученные значения приведены в таблице 1.

Табл. 1. Экспериментальные данные

№	Режим		Теоретический результат		Экспериментальное исследование
	σ , МПа	V , м/с	покрытие	с учетом сжимаемости	покрытие
1	11	0,2	0,0096	0,0086	0,0088
2	22	0,2	0,0092	0,0082	0,0085
3	33	0,2	0,0093	0,0080	0,0084
4	44	0,2	0,0094	0,0072	0,0074
5	55	0,2	0,0091	0,0066	0,0068

Выводы

1. Разработанные математические модели позволяют учитывать параметр сжимаемости в модернизированном узле трения для машин и механизмов.

2. Усовершенствованные математические модели для конструкционных расчетов позволяют найти значения важных триботехнических величин, таких

как гидродинамическое давление, нагрузочная способность и величина трения.

3. Эксперимент с использованием фторпластсодержащего антифрикционного полимерного покрытия вала и канавкой шириной 4 мм в конструкции радиального подшипника позволило обеспечить всплытие вала на гидродинамическом клине, данный эффект подтвердил адекватность теоретических расчетов, представленных в работе.

4. Исследуемые модернизированные подшипники скольжения позволяют снизить погрешность по коэффициенту трения и нагрузочной способности.

Список литературы

1. Киришиева 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. Киришиева 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., Киришичева 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. Киришичева 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.

References

1. Kirishchieva V.I., Kolobov I.A., Mukutadze M.A., Shvedova V.E. Increasing the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile and a polymer

- coating // Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering. 2022, no. 3(87), pp. 18-25.
2. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Increasing the wear resistance of a radial sliding bearing lubricated with micropolar lubricants and melts of a metal coating // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2022, no. 4, pp. 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. Kirishchieva V.I., Mukutadze A.M., Mukutadze M.A. Mathematical model of the flow of lubricant and coating melt in the working gap of a radial bearing // Scientific potential of youth and technical progress: materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference. – SPb.: SRC MS, 2022. – P. 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. Mukutadze M.A., Kirishchieva V.I., Dabakhov G.A., Shvedova V.E., Zinoviev N.V. Study of wear resistance in a bearing with a metal coating taking into account the dependence of viscosity on pressure // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2023, iss. 35, pp. 30-38.
 12. Morozova A.V., Mukutadze M.A. Development of a mathematical model for the analysis of the economic effect and its forecasting for a modified design of a radial sliding bearing // Components of Scientific and Technological Progress. 2023, no. 4(82), pp. 115-125.
 13. Mukutadze M.A., Prikhodko V.M., Badakhov G.A., Shvedova V.E., Zinoviev N.V. Development of a computational model of a modified metal-polymer radial bearing taking into account the dependence of viscosity on pressure and temperature // International Scientific Research Journal. 2023, no. 9(135). DOI: 10.23670/IRJ.2023.135.57.
 14. Mukutadze M.A., Prikhodko V.M., Shvedova V.E., Badakhov G.A., Zinoviev N.V. Development of a mathematical model of the flow of ferromagnetic lubricant in a highly loaded wedge-shaped sliding support // International Scientific Research Journal. 2023, no. 8 (134). DOI: 10.23670/IRJ.2023.134.15.

15. Morozova A.V., Mukutadze M.A. Development of a mathematical model for analyzing the economic effect of a modified radial sliding bearing design and its forecasting. // Science of Krasnoyarsk region. 2023, vol. 12, no. 3, pp. 7-25.
16. Mukutadze M.A., Abdulrahman H.N., Shvedova V.E., Badakhov G.A., Zinoviev N.V. Studies on the wear resistance of a radial bearing structure taking into account the rheological properties of a micropolar lubricant // Omsk Scientific Bulletin. 2023, no. 3(187), pp. 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. Kirishchieva V.I., Logunova E.O., Mukutadze M.A. Increasing the wear resistance of a radial bearing with a non-standard support profile and a polymer coating on the shaft surface // Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University. 2023, vol. 27, no. 2(100), pp. 15-23.
21. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Establishing the regularity of increasing the wear resistance of a modified radial sliding bearing // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2023, no. 2, pp. 71-81.

Болгова Екатерина Александровна – аспирант	Bolgova Ekaterina Aleksandrovna – postgraduate student
Мукутадзе Мурман Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика»	Mukutadze Murman Aleksandrovich – doctor of technical sciences, professor, head of the Department of higher mathematics
murman1963@yandex.ru	

Received 31.10.2024