

## ИССЛЕДОВАНИЕ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ РАДИАЛЬНЫХ ПОДШИПНИКОВ ПРИ УЧЕТЕ ВЯЗКОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

*Болгова Е.А.*

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

**Ключевые слова:** радиальный подшипник, исследование износостойкости, полимерное покрытие, канавка, гидродинамический режим, турбулентный режим.

**Аннотация.** В данной статье исследуется износостойкость радиального подшипника в гидродинамическом режиме за счет применения полимерного композиционного покрытия с осевой канавкой на адаптированной под условия трения поверхности втулки. Анализируется зависимость реологических характеристик смазочного материала при турбулентном трении от давления и температуры. В результате работы были определены поля скоростей и давления в осевой канавке и на поверхности полимерного покрытия, что позволяет повысить несущую способность подшипника и уменьшить коэффициент трения.

## RESEARCH ON THE WEAR RESISTANCE OF A MODIFIED RADIAL BEARING DESIGN TAKING INTO ACCOUNT VISCOSITY FROM PRESSURE AND TEMPERATURE

*Bolgova E.A.*

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

**Keywords:** radial bearing, wear resistance study, polymer coating, groove, hydrodynamic mode, turbulent mode.

**Abstract.** This article examines the wear resistance of a radial bearing in a hydrodynamic mode due to the use of a polymer composite coating with an axial groove on a sleeve surface adapted to friction conditions. The dependence of the rheological characteristics of a lubricant under turbulent friction on pressure and temperature is analyzed. As a result of the work, velocity and pressure fields were determined in the axial groove and on the surface of the polymer coating, which makes it possible to increase the bearing capacity of the bearing and reduce the coefficient of friction

### Введение

Применение полимерного композиционного покрытия с осевой канавкой позволяет значительно увеличить срок службы радиального подшипника за счет более равномерного распределения нагрузки и смазочного материала по контактной поверхности [1-10]. Важным аспектом является выбор оптимального состава полимерного покрытия, которое должно обладать высокой износостойкостью и минимальным коэффициентом трения. Для этого были проведены испытания различных составов и определены условия, при которых достигается наилучший результат.

Исследования [11-19] показали, что введение осевой канавки в покрытие втулки способствует улучшению циркуляции смазочного материала, особенно в условиях турбулентного течения. Проведенные эксперименты и численное моделирование подтвердили, что канавка обеспечивает более равномерное распределение давления и снижает его пики, что препятствует локальному

перегреву и износу покрытия. Также было установлено, что в осевой канавке создаются благоприятные условия для формирования гидродинамического слоя смазки, который значительно понижает коэффициент трения и уменьшает механическое воздействие на подшипник.

При анализе влияния давления и температуры на реологические характеристики смазочного материала выявлены нестандартные зависимости, которые необходимо учитывать при эксплуатации подшипников в экстремальных условиях. В частности, повышение температуры приводит к разжижению смазки, что может негативно сказаться на несущей способности подшипника. Однако использование полимерного покрытия с осевой канавкой помогает компенсировать эти эффекты за счет улучшенной циркуляции и удержания смазочного материала на поверхности контакта.

### Постановка задачи

На внутренней поверхности втулки нанесено полимерное покрытие, которое включает в себя смазочные канавки, предназначенные для улучшения распределения вязкого материала. С учетом этого, уравнение контура рабочей поверхности рассматриваем в полярных координатах  $(r, \theta)$ , где  $r$  – это радиус, а  $\theta$  – угол. В случаях идеального подшипника с равномерным зазором без деформаций, уравнение контура вала  $r = R$  остается постоянным вдоль всей окружности.

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

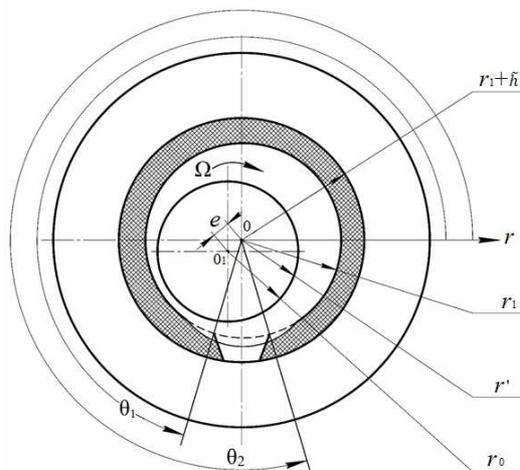


Рис. 1. Расчетная схема трибоконтакта

Полагаем, что зависимость от давления и температуры задается следующим выражением:

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

Движение смазочного материала описывается безразмерным уравнением течения в приближении для «тонкого слоя» и уравнением неразрывности с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{dp_i}{dr} = 0, \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = \frac{1}{j e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp_i}{d\theta}, \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0. \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 v &= 1, \quad u = -\eta \sin \theta \quad \text{при } r = 1 - \eta \cos \theta; \\
 v &= 0, \quad u = 0 \quad \text{при } r = \eta_1 \sin \omega \theta, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\
 v &= v^*(\theta), \quad u = u^*(\theta) \quad \text{при } r = \eta_2 + \eta_1 \sin \omega \theta, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi; \\
 p(0) &= p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{P_g}{p^*}; \\
 p_3(\theta_2) &= p_2(\theta_2), \quad p_1(\theta_1) = p_2(\theta_1), \quad Q = \text{const}, \\
 v^*(\theta) &= \frac{1}{h(\theta) - \eta_2}; \quad u^*(\theta) = \frac{\eta \sin \theta}{h(\theta) - \eta_2}. \tag{4}
 \end{aligned}$$

Переход к безразмерным величинам осуществлен следующими соотношениями

$$\begin{aligned}
 r' &= r_1 - \delta r, \quad \delta = r_1 - r_0, \quad v_{\theta_i} = \Omega r_0 v_i; \quad v_{r'} = \Omega \delta u_i; \\
 p' &= p^* p, \quad p^* = \frac{\mu_0 \Omega r_0^2}{\delta^2}, \quad \mu' = \mu_0 \mu, \quad \alpha' = \frac{\alpha}{p^*},
 \end{aligned}$$

$$T' = T^* \cdot T, \quad \beta = T^* \beta', \quad T^* = \frac{\mu_0 \Omega^2 r_0^2}{I \lambda}. \tag{5}$$

Автомодельное решение задачи (3) с учетом граничных условий (4) ищем в виде по известному методу [20-21]

$$\begin{aligned}
 v_i &= \frac{\partial \psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta); \quad u_i = -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta); \\
 \psi_i(r, \theta) &= \tilde{\psi}(\xi_i); \quad \xi_2 = \frac{r}{h(\theta)} \quad \text{при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\
 V_i(r, \theta) &= \tilde{v}_i(\xi_i); \quad U_i(r, \theta) = -\tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta); \\
 \xi_{1,3} &= \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \quad \text{при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi. \tag{6}
 \end{aligned}$$

Подставляя (6) в (3), с учетом граничных условий (4) для поля скоростей и давлений получим следующую систему уравнений:

следующее выражение:

$$\begin{aligned}
 \tilde{\psi}'_1(\xi_1) &= a_1 \frac{\xi_1^2}{2} - a_1 \frac{\xi_1}{2}, \quad \tilde{v}_1(\xi_1) = b_1 \frac{\xi_1^2}{2} + \left(1 - \frac{b_1}{2}\right) \xi_1 + 1; \quad u_1(\xi_1) = \int_0^{\xi_1} \xi_1 \tilde{v}'_1(\xi_1) d\xi_1; \\
 \tilde{\psi}'_2(\xi_2) &= a_2 \frac{\xi_2^2}{2} - a_2 \frac{\xi_2}{2}, \quad \tilde{v}_2(\xi_2) = b_2 \frac{\xi_2^2}{2} + \left(1 - \frac{b_2}{2}\right) \xi_2 + 1; \quad u_2(\xi_2) = \int_0^{\xi_2} \xi_2 \tilde{v}'_2(\xi_2) d\xi_2; \\
 \tilde{\psi}'_3(\xi_3) &= a_3 \frac{\xi_3^2}{2} - a_3 \frac{\xi_3}{2}, \quad \tilde{v}_3(\xi_3) = b_3 \frac{\xi_3^2}{2} + \left(1 - \frac{b_3}{2}\right) \xi_3 + 1; \quad u_3(\xi_3) = \int_0^{\xi_3} \xi_3 \tilde{v}'_3(\xi_3) d\xi_3. \tag{7} \\
 \frac{1}{j\mu_i(\theta)} \frac{dp_i}{d\theta} &= \frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3}, \quad i = 1, 3;
 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{j\mu_2(\theta)} \frac{dp_2}{d\theta} = \frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_i}{h^3(\theta)}. \quad (8)$$

Продифференцировав по  $\theta$  выражение  $\mu' = \mu_0 e^{\alpha'p' - \beta'T'}$  и учитывая значение повышения температуры для гидродинамического давления получим выражением:

$$p_i = \mu_i(\theta) \left( b_i I_2(\theta) + a_i I_3(\theta) \right) + \frac{P_g}{P_a}, \quad i = 1, 3. \quad (9)$$

Результаты численного анализа демонстрируют хорошие корреляции с экспериментальными данными, что подтверждает адекватность использованной модели. График, представленный на рисунке 2, ясно показывает линейную зависимость вертикальной составляющей гидродинамического давления от ширины канавки. Когда используется некруглый опорный профиль подшипниковой втулки. Влияние формы профиля на гидродинамическое давление неоднозначно и требует более детального рассмотрения. Как видно из анализа, с увеличением ширины маслоподдерживающей канавки вертикальная составляющая давления заметно снижается. Это можно объяснить возрастанием объема жидкости, который проходит через канавки, что приводит к снижению локального давления.

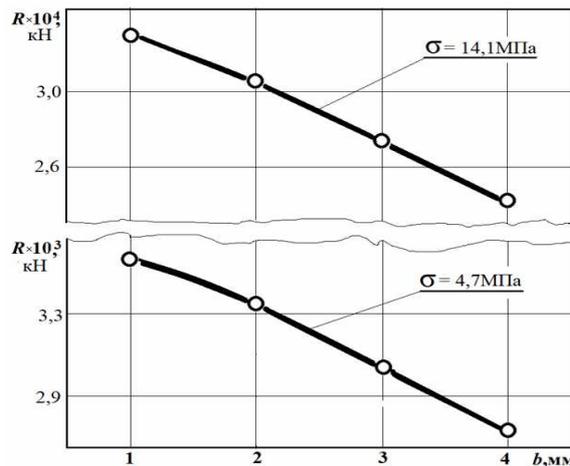


Рис. 2. Зависимость вертикальной составляющей давления в подшипнике с адаптированным профилем и канавкой от ее ширины и рабочей нагрузки

Экспериментальные исследования включали несколько этапов. На первом этапе была проведена верификация расчетной модели радиально-направляющей канавки. Для этого использовались данные ранее проведенных испытаний и результаты численного моделирования. Основной целью данной верификации было подтверждение правильности выбранных параметров маслодерживающей канавки и выявление возможных недостатков конструкции, требующих доработки.

Во втором этапе проводились триботехнические эксперименты на улучшенной машине трения ИИ 5018. В процессе тестирования применялись различные режимы нагружения и смазочные материалы, имитирующие реальные эксплуатационные условия. Измерение контактного сопротивления и трения

проводилось с высокой точностью, что позволило собрать значительный объём данных для последующего анализа.

В результате исследования установлено, что несущая способность повышается примерно на 8-10%, а коэффициент трения снижается на 6-8% в диапазоне исследованных режимов (табл. 1, 2).

Табл. 1. Результаты теоретического исследования

№	$\sigma$ , МПа	Угловые координаты ( $\theta_2 - \theta_1$ )				
		5,74	10,03	14,32	18,61	22,92
		Коэффициент трения				
1	3,5	0,008680	0,0120110	0,010090	0,0068000	0,00422551
2	7	0,005380	0,0063710	0,005540	0,0048630	0,00349110
3	10,5	0,002092	0,0031810	0,002102	0,0030302	0,00295200
4	14	0,002070	0,0030552	0,002095	0,0029523	0,00292993
5	17,5	0,001085	0,0029400	0,002003	0,0029369	0,00291553

В процессе экспериментального исследования были установлены области рационального применения полученных моделей.

Табл. 2. Сравнение результатов

№	Режим		Коэффициент трения				Погрешность, %	
	$\sigma$ , МПа	$V$ , м/с	Теоретический результат		Экспериментальное исследование			
			Полимерное покрытие	Покрытие с канавкой	Покрытие	Покрытие с канавкой		
1	3,5	0,3	0,0106	0,0078	0,0120	0,0105	6-11	7-12
2	7	0,3	0,0051	0,0034	0,0065	0,0035		
3	10,5	0,3	0,0031	0,0020	0,0044	0,0024		
4	14	0,3	0,0046	0,0021	0,0058	0,0043		
5	17,5	0,3	0,0056	0,0055	0,0069	0,0079		

### Заключение

Разработана теоретически и подтверждена экспериментально новая методология формирования расчетных моделей радиальных подшипников, значительно расширяющих область применения моделей и уточняющая получение результатов, которые могут быть использованы в машиностроении, авиастроении, приборостроении и там, где необходимо обеспечение гидродинамического режима смазывания.

### Список литературы

1. Кирищев 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: Proceedings of the International University Scientific Forum, Dubai, Part 1.* – Dubai: 2022. – P. 194-202.
5. Киришчиева 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 // *Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA : Proceedings of the International University Scientific Forum, UAE, Part 2.* – 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*. 2023, vol. 68, pp. 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, pp. 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., Киришчиева 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. – DOI: 10.26160/2474-5901-2023-35-30-38.
12. Морозова А.В., Мукутадзе М.А. Разработка математической модели для анализа экономического эффекта и его прогнозирования для модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения // *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). – С. 6-17.
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). – С. 7-14. – 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. Киришцева 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 авторе:

*Болгова Екатерина Александровна* – аспирант.