

Уточнение эксплуатационных характеристик модифицированной конструкции радиального подшипника с учетом нелинейных факторов

Е.А. Болгова

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: В работе представлена расчетная модель для оценки износостойкости радиальных подшипников скольжения с полимерным покрытием и канавкой, учитывающая инерционные эффекты и нелинейные свойства среды в условиях стационарного трения. Разработаны уточнённые аналитические зависимости, позволяющие повысить точность расчетов гидродинамических характеристик подшипника. Основной целью исследования является создание многофакторной модели, учитывающей влияние геометрических параметров подшипника (наличие и конфигурация канавки), свойств полимерного покрытия и силы инерции. Модель позволяет прогнозировать ресурс подшипника в реальных условиях эксплуатации, учитывая влияние различных факторов, что повышает точность проектирования и оптимизации конструкции. Результаты работы направлены на повышение эксплуатационной надежности подшипников скольжения за счет более точного прогнозирования их износостойкости и оптимизации конструктивных параметров.

Ключевые слова: модифицированная конструкция, нелинейные факторы, полимерное покрытие, осевая канавка, нагрузочная способность, коэффициент трения, повышение износостойкости.

Введение

Современная теория гидродинамических подшипников скольжения уверенно опирается на классическое уравнение Рейнольдса, однако именно линеаризованные предпосылки традиционного подхода становятся главным ограничением при переходе к высоконагруженным и высокоскоростным узлам. В реальных условиях смазочный зазор подвержен существенным колебаниям давления и температуры, что вызывает нелинейные изменения вязкости и сжимаемости смазочного материала [1]. Одновременно с этим возрастают силы инерции, связанные как с ускорениями вала, так и с турбулентными эффектами течения. Игнорирование этих факторов приводит к расхождениям между расчётными и экспериментальными показателями несущей способности, жёсткости и теплового состояния подшипника —

особенно при переходных режимах пуска-остановки и переменной нагрузки [2].

Исследования, представленные в работах [3–5], демонстрируют, что для более точного моделирования реальных процессов необходимо учитывать зависимость вязкости от давления и температуры. Включение этих факторов, а также учёт сжимаемости жидкости, повышают адекватность модели и приближают её к практическим условиям применения.

Современные подшипники скольжения часто используют композиционные покрытия, наносимые на опорные поверхности втулок. Одним из распространенных материалов является фторопласт, чьи преимущества подробно описаны в исследовании [6]. Альтернативным решением является подход, предложенный в статьях [7,8], где рассматривается подшипник с полимерным покрытием, имеющим специальную канавку. Эта канавка оптимизирована для улучшения распределения смазочного материала, что потенциально увеличивает эффективность и срок службы подшипника. Целью данной модификации является повышение долговечности системы. Тем не менее эти исследования ограничиваются стационарными условиями и не полностью охватывают инерционные силовые факторы. В статье будет представлена математическая модель, учитывающая инерционные силы, для оценки эффективности предложенной конструкции.

Настоящая статья предлагает расширенный многофакторный подход, в котором нелинейность реологических свойств смазки и динамика инерционных нагрузок рассматриваются совместно.

Полученные аналитические зависимости позволяют формировать расчётные схемы, отражающие реальные колебательные процессы в зазоре, и тем самым служат надёжным инструментом для инженеров при проектировании радиальных подшипников скольжения.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения.

Согласно ранее проведенным исследованиям [9] установлена ширина осевой канавки равная 4 мм, при которой достигаются максимальное увеличение нагрузочной способности и снижение коэффициента трения. В статье [10], выполнено уточнение триботехнических характеристик радиальных подшипников скольжения с полимерным покрытием вала и осевой канавкой. Ключевым аспектом этой работы является учет сжимаемости смазочного материала в рабочем зазоре. Разработанная расчетная модель с учетом этого фактора позволила уточнить несущую способность на 11–12 %, а коэффициент трения – на 9–10 % в диапазоне исследованных режимов.

В данной статье рассматривается ламинарное течение истинно вязкого смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника, имеющего на поверхности вала полимерное покрытие с осевой канавкой шириной 4 мм, с учетом нелинейных факторов.

Для решения задачи принята полярная система координат, полюсом которого являются центр втулки (рис.1). При этом контур вала, втулки и модифицированной втулки описаны в виде:

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

Экспоненциальную зависимость вязкости смазочного материала от давления запишем в виде:

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

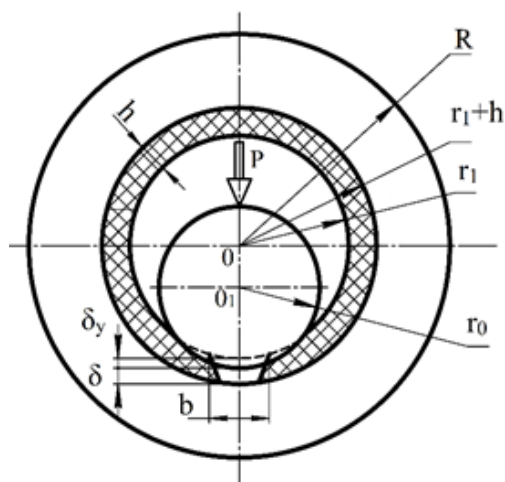


Рис. 1. – Схема трибоконтакта (рисунок авторов)

Для разработки расчетной модели с учетом нелинейных факторов используем следующие безразмерные исходные уравнения: уравнение, описывающие движение жидкости с учетом нелинейных факторов, уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial p_i}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta} + \text{Re} \left(u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) e^{-\alpha p} \quad (3)$$

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

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

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

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p_*}. \quad (4)$$

$$\text{Где } \eta = \frac{e}{\delta}, \quad \eta = \frac{\tilde{h}}{\delta}, \quad \text{Re} = \frac{\Omega \delta^2}{\nu}.$$

В первом уравнении системы (3) нелинейные члены осредним по методу Слезкина-Тарга. Введем следующее обозначение:

$$D_i(\theta) = \frac{\text{Re}}{h_i(\theta)} \int_0^{h_i(\theta)} \left(u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) z_i dr \quad (5)$$

Автомодельное решение задачи (3) с учетом параметров (4) найдено по известной методике:

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

С учетом (6) уравнения (3) и граничные условия (4) примут вид:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_i''' &= a_i, \quad \tilde{v}_i'' = b_i, \quad \tilde{u}'(\xi_i) + \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) = 0 \\ -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_i}{d\theta} + D_i &= \left[\frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right], \quad (i = 1, 3) \\ -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_2}{d\theta} + D_2 &= \left[\frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнения системы (7) решаются при соблюдении перечисленных ниже граничных условий:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_i'(0) &= 0, \quad \tilde{\psi}_i'(1) = 0, \quad \tilde{u}_i(1) = -\eta \sin \theta, \quad \tilde{v}_i'(1) = 0, \\ \tilde{u}_i(0) &= 0, \quad \tilde{v}_i(0) = 1, \quad \int_0^1 \tilde{v}_i(\xi_i) d\xi_i = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Интегрируя уравнение (7) с учетом (8), получим:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_1'(\xi_1) &= a_1 \frac{\xi_1^2}{2} - a_1 \frac{\xi_1}{2}, \quad \tilde{v}_1(\xi_1) = b_1 \frac{\xi_1^2}{2} - \left(1 + \frac{b_1}{2}\right) \xi_1 + 1, \quad u_1(\xi_1) = \int_0^{\xi_1} \xi_1 \tilde{v}_1'(\xi_1) d\xi_1; \\ z_1 &= \alpha \left[\int_0^{\theta} \tilde{D}(\theta) d\theta - b_1 \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^2} - a_1 \int_0^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p}} \\ \tilde{\psi}_2'(\xi_2) &= a_2 \frac{\xi_2^2}{2} - a_2 \frac{\xi_2}{2}, \quad \tilde{v}_2(\xi_2) = b_2 \frac{\xi_2^2}{2} - \left(1 + \frac{b_2}{2}\right) \xi_2 + 1; \quad u_2(\xi_2) = \int_0^{\xi_2} \xi_2 \tilde{v}_2'(\xi_2) d\xi_2; \end{aligned}$$

$$z_2 = \alpha \left[\int_{\theta_1}^{\theta} \tilde{D}(\theta) d\theta - b_2 \int_{\theta_1}^{\theta} \frac{d\theta}{h^2(\theta)} - a_2 \int_{\theta_1}^{\theta} \frac{d\theta}{h^2(\theta)} \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p}};$$

$$\tilde{\Psi}'_3(\xi_3) = a_3 \frac{\xi_3^2}{2} - a_3 \frac{\xi_3}{2}, \quad \tilde{v}_3(\xi_3) = b_3 \frac{\xi_3^2}{2} - \left(1 + \frac{b_3}{2}\right) \xi_3 + 1; \quad u_3(\xi_3) = \int_0^{\xi_3} \xi_3 \tilde{v}'_3(\xi_3) d\xi_3;$$

$$z_3 = \alpha \left[\int_{\theta_2}^{\theta} \tilde{D}(\theta) d\theta - b_3 \int_{\theta_2}^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^2} - a_3 \int_{\theta_2}^{\theta} \frac{d\theta}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right] + e^{-\alpha \frac{p_g}{p}}$$

$$\tilde{D}(\theta) = \operatorname{Re} \int_0^1 z \left[\left(\frac{\tilde{\Psi}'(\xi) h'(\theta)}{h(\theta)} + \tilde{u}(\xi) h'(\theta) \right) \left(\frac{\Psi''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{v'(\xi)}{h(\theta)} \right) + \right. \\ \left. + \left(\frac{\tilde{\Psi}'(\xi)}{h(\theta)} + \tilde{v}(\xi) \right) \left(\frac{\tilde{\Psi}'(\xi)}{h^2(\theta)} + h'(\theta) - \frac{\tilde{\Psi}''(\xi) h'(\theta)}{h^2(\theta)} - \frac{\tilde{v}(\xi) h'(\theta)}{h(\theta)} \right) \right] d\xi \quad (9)$$

Используя ранее установленным значениям параметров;
 $\theta_2 = 275,73^\circ$; $b = 4$ мм (ширина канавки); $r = 20$ мм; $\tilde{h} = 0,0055$ мм глубина канавки, из уравнения (9) получим:

$$p_1 = \frac{p_g}{p^*} + \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[z_1 \operatorname{Re} \left(-\frac{\frac{6,87}{1 + 0,087 \operatorname{Re}}}{40(1 - \eta(\cos \theta - 1) - \eta_2)} - \frac{6(\theta + 2\tilde{\eta} \sin \theta)}{(1 - \eta_2)^2} - \right. \right. \\ \left. \left. - \left(\frac{2,29}{1 + 0,087 \operatorname{Re}} \right) \frac{(\theta + 3\tilde{\eta} \sin \theta)}{(1 - \eta_2)^3} \right) \right]$$

$$p_2 = \frac{p_g}{p^*} + \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[\operatorname{Re} \left(\frac{\frac{15,9}{1 - 0,16 \operatorname{Re}}}{40(1 - \eta(\cos \theta - \cos \theta_1))} - \right. \right. \\ \left. \left. - 6(\theta - \theta_1 + 2\eta(\sin \theta - \sin \theta_1)) + \left(\frac{5,3}{1 - 0,16 \operatorname{Re} z_2} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (\theta - \theta_1 + 3\eta(\sin \theta - \sin \theta_1)) \right) \right],$$

$$p_3 = \frac{p_g}{p^*} + \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \left[\operatorname{Re} \frac{\frac{-9,69}{1 + 0,001 \operatorname{Re}}}{40(1 - \eta(\cos \theta - \cos \theta_2) - \eta_2)} - \right. \\ \left. - 6 \frac{(\theta - \theta_2 + 2\tilde{\eta}(\sin \theta - \sin \theta_2))}{(1 - \eta_2)^2} + \left(\frac{3,23}{1 + 0,001 \operatorname{Re}} \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{(\theta - \theta_2 + 3\tilde{\eta}(\sin \theta - \sin \theta_2))}{(1 - \eta_2)^3} \right]$$

В работе впервые совместно рассмотрено влияние полимерного покрытия, наличия канавки и нелинейных факторов, таких как инерционные эффекты и особенности реологических свойств смазочного материала, на эксплуатационные характеристики подшипника. Эталонные расчеты, представленные в работах [9,10], выполнялись без учета этих факторов. В связи с этим, для обеспечения корректности сравнения результатов, полученные в настоящей работе данные, сопоставлялись с исходным эталонным расчетом. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение результатов

Несущая способность, $\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$					Коэффициент трения				
В работе	[9]	[10]	Отличие		В работе	[9]	[10]	Отличие	
			[9] %	[10] %				[9] %	[10] %
$1,0 \cdot 10^5$	$0,87 \cdot 10^5$	$0,93 \cdot 10^5$	13	7	0,0361	0,039	0,0384	8	6
$2,0 \cdot 10^5$	$1,71 \cdot 10^5$	$1,85 \cdot 10^5$	15	8	0,0135	0,0151	0,0142	12	5
$3,0 \cdot 10^5$	$2,58 \cdot 10^5$	$2,74 \cdot 10^5$	14	9	0,0080	0,009	0,0086	13	8
$4,0 \cdot 10^5$	$3,49 \cdot 10^5$	$3,72 \cdot 10^5$	13	7	0,0060	0,0067	0,0064	12	7
$5,0 \cdot 10^5$	$4,25 \cdot 10^5$	$4,49 \cdot 10^5$	15	10	0,0075	0,0082	0,0079	9	5

Результаты исследования

Проведенное исследование позволило уточнить расчетную модель рабочих характеристик подшипников с полимерным покрытием.

В частности, точность прогнозирования данных о несущей способности улучшилась на 7–15%, а точность прогнозирования коэффициента трения – на 5–13%. Это стало возможным благодаря учету сложных физических явлений, влияющих на работу подшипника, которые ранее не учитывались в упрощенных моделях.

Итоги работы можно представить в следующих ключевых пунктах: впервые совместно рассмотрено влияние полимерного покрытия, наличия канавки и нелинейных факторов; повышена точность прогнозирования рабочих характеристик подшипников с полимерным покрытием благодаря учету нелинейных факторов и сил инерции; результаты научной работы, описанной в данной статье, позволяют устанавливать основные эксплуатационные характеристики подшипника на этапе проектирования.

Литература

1. Машков Ю. К. Трибофизика металлов и полимеров. Омск: ОГТУ, 2013. 240 с.
2. Хасьянова Д.У., Мукутадзе М.А. Установление закономерности повышения износостойкости модифицированного радиального подшипника скольжения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2023. №2. С. 71–81.
3. Кохановский В. А., Камерова Э. А. Фторопластсодержащие композиционные покрытия в смазочных средах // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. №1. С. 34–37.
4. 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 // Journal of Molecular Structure. 2022. No 1269. P. 133753.

5. 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. No 14(1). P. 133.

6. Robertson B.P., Calabrese M.A. Evaporation-controlled dripping-onto-substrate (DoS) extensional rheology of viscoelastic polymer solutions. Scientific Reports. 2022. №12 (1). P. 4697.

7. Khatak P., Garg H. C. Performance analysis of capillary compensated hybrid journal bearing by considering combined influence of thermal effects and micropolar lubricant // Journal of Tribology. 2016. Vol. 139, No 1. P. 011707

8. Кирищиева В.И. Моделирование методики повышения износостойкости радиального подшипника с полимерным покрытием // Инженерный вестник Дона. 2022. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7954.

9. Задорожная Н. С., Кирищиева В. И., Мукутадзе М. А. Расчетная модель радиального подшипника скольжения с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием поверхности вала // Вестник РГТА имени П. А. Соловьева. 2022. № 4(63). С. 90 – 96.

10. Мукутадзе М. А., Опацких А. Н., Болгова Е. А. Оценка износостойкости по коэффициенту трения при учете зависимости вязкости от давления и температуры модифицированной конструкции радиального подшипника // Инженерный вестник Дона. 2024. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2024/9607

References

1. Mashkov Yu. K. Tribofizika metallov i polimerov [Tribophysics of metals and polymers]. Omsk: OGTU, 2013. 240 p.



2. Khasyanova D. U., Mukutadze M. A. Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 2023. No 2. pp. 71–81.
3. Kokhanovsky V. A., Kamerova E. A. Trenie i smazka v mashinah i mekhanizmah. 2014. No 1. pp. 34–37.
4. Wen S. Z, Zhong S. D., Kan W. Q., Zhao P. S., He Y. C. Journal of Molecular Structure. 2022. No 1269. P. 133753.
5. Jin L., Cao W., Wang P., Song N., Din P. Nano-Micro Letters. 2022. No 14(1). P. 133.
6. Robertson B.P., Calabrese M.A. Scientific Reports. 2022. No 12(1). P. 4697.
7. Khatak P., Garg H. C. Journal of Tribology. 2016. Vol. 139, No 1. P. 011707
8. Kirishchieva V. I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. No 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7954.
9. Zadorozhnaya N. S., Kirishchieva V. I., Mukutadze M. A. Vestnik RGATA imeni P. A. Solov'eva. 2022. No 4(63). pp. 90-96.
10. Mukutadze M. A., Opatskikh A. N., Bolgova E. A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. No 11. URL :[ivdon.ru /ru/magazine/archive/n11y2024/ 9607](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2024/9607).

Дата поступления: 30.05.2025

Дата публикации: 25.07.2025