

Разработка нового математического метода моделирования модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения

М.А. Мукутадзе, Е.Г. Чуб

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: Статья посвящена разработке нового математического метода моделирования радиальных подшипников скольжения, имеющих на опорной поверхности полимерное покрытие с осевой канавкой. Для расчетной оценки технических решений на износостойкость учитывается сжимаемость истинно вязкого смазочного материала при ламинарном режиме течения. В результате получены новые математические модели, позволяющие оценить продолжительность гидродинамического режима течения смазочного материала, доказать стабильность и возможность смены режимов смазывания с граничного на гидродинамический, а также произвести расчетную оценку влияния сжимаемости смазочного материала и износостойкости на эксплуатационные характеристики.

Ключевые слова: моделирование, разработка математического метода, модифицированная конструкция, сжимаемость оценка влияния.

Введение

Разработке новых математических моделей для расчетной оценки и технических решений по повышению работоспособности и эффективности машин и механизмов, в частности подшипников скольжения, уделяется большое внимание. Реализации этой задачи можно достичь путем разработки новых математических методов с учетом конструктивных особенностей подшипников и факторов, ранее не принимаемых во внимание, которые способствуют повышению износостойкости [1–2].

К сожалению, в современной технической литературе практически полностью отсутствуют прямые экспериментальные данные о процессе трения полимерных покрытий в среде жидких смазочных материалов. Имеется лишь небольшое количество работ [3–5], доказывающее эффективность применения полимерных покрытий.

Основы качества узлов закладываются в первую очередь при их расчетах. Однако постоянное увеличение количества значимых параметров,

влияющих на работу трибосопряжений, изменение условий их работы в направлении увеличения скоростей вращения и рабочей температуры [6 – 8].

Использование различных конструкционных материалов для получения защитного покрытия на металлических покрытиях [9–10] вынуждает исследователей разрабатывать новые методики и математические модели для адекватного моделирования условий работы узлов трения машин и механизмов.

Целью работы является разработка нового математического метода моделирования модифицированной конструкции радиального подшипника с учетом сжимаемости смазочного материала при ламинарном режиме его течения.

Постановка задачи

Для разработки математического метода моделирования радиального подшипника скольжения нами разработана новая конструкция (рис. 1), имеющая на опорной поверхности полимерное покрытие с осевой канавкой. Нами рассматривается случай, когда полюс находится в центре подшипника. При этом уравнения контуров цапфы, втулки подшипника и втулки с покрытием записаны в виде [11]:

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

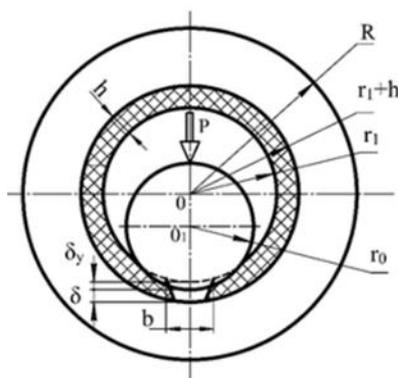


Рис. 1. – Расчетная схема

Кроме контуров также задаем общеизвестные безразмерные уравнения: уравнение движения смазочного материала для «тонкого слоя», уравнение неразрывности [11], а также уравнение состояния:

$$\frac{\partial p_i}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{dp_i}{d\theta}; \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial \theta} = 0; \quad p = \rho, \quad (2)$$

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

При этом граничные условия записываются в виде:

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

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

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

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

условие постоянства расхода смазочного материала в любом сечении

$$Q = \text{const},$$

условие непрерывности гидродинамического давления в окрестности канавки:

$$p_3(\theta_2) = p_2(\theta_2); \quad p_1(\theta_1) = p_2(\theta_1).$$

Полагаем, что функции $u^*(\theta)$ и $v^*(\theta)$ определяются соотношениями:

$$v^*(\theta) = \frac{1}{h(\theta) - \eta_2}; \quad u^*(\theta) = \frac{\eta \sin \theta}{h(\theta) - \eta_2},$$

где $\eta = \frac{e}{\delta}$ – конструктивный параметр; $\eta_2 = \frac{\tilde{h}}{\delta}$; θ_1 и θ_2 – соответственно

угловые координаты канавки; $u^*(\theta)$ и $v^*(\theta)$ – известные функции, обусловленные наличием полимерного покрытия.

Переход к безразмерным величинам осуществлен таким образом:

$$r' = r_1 - \delta r, \quad \delta = r_1 - r_0, \quad v_{\theta_i} = \Omega r_0 v_i, \quad v_{r'_i} = \Omega \delta u_i, \quad \mu' = \mu. \quad (4)$$

Для удобства решения применяем известный метод – метод точного решения задачи [12]:

$$\begin{aligned} \rho v_i &= \frac{\partial \Psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta), \quad \rho u_i = -\frac{\partial \Psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta), \\ \Psi_i(r, \theta) &= \tilde{\Psi}(\xi_i), \quad U_i(r, \theta) = -p \tilde{u}_i(\xi_i) h'(\theta), \\ V_i(r, \theta) &= p \tilde{v}_i(\xi_i), \\ \xi_2 &= \frac{r}{h(\theta)} \quad \text{при} \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2, \\ \xi_{1,3} &= \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \quad \text{при} \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi. \end{aligned} \quad (5)$$

В результате уравнение (2) примет вид:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}_i'''(\xi_i) &= a_i, \quad \tilde{v}_i''(\xi_i) = b_i, \\ u_i'(\xi_i) + \frac{h(\theta)}{h'(\theta)} \cdot \frac{1}{p} \frac{dp}{d\theta} - \xi_i v_i'(\xi_i) &= 0, \\ \frac{p}{\Lambda} \frac{dp_i}{d\theta} &= \frac{b_i p}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3}, \quad i = 1, 3, \\ \frac{p}{\Lambda} \frac{dp_2}{d\theta} &= \frac{b_2 p}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Систему уравнений (6) решаем при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}_i'(0) &= 0, \quad \tilde{u}_i'(1) = -\eta \sin \theta, \\ \tilde{v}_i'(1) &= 0, \quad \tilde{u}_i'(0) = 0, \quad \tilde{v}_i'(0) = 1, \\ \int_0^1 \tilde{v}_i(\xi_i) d\xi_i &= 0, \\ p(\theta) &= p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}. \end{aligned} \quad (7)$$

Гидродинамическое давление определим из (6) с учетом (7), в результате имеем:

$$p_i = \Lambda \left[b_i J_2(\theta) + \frac{a_i}{p} J_3(\theta) \right] + 1. \quad (8)$$

Решая уравнение (8) методом последовательных приближений, ограничиваясь при этом двумя приближениями, получим:

$$p_{10} = 1, \quad p_{20} = 1, \quad p_{30} = 1,$$
$$p_{11} = \frac{6\Lambda \left(\theta + 2\tilde{\eta} \sin \theta - \frac{2}{p} \frac{\sqrt{1-\tilde{\eta}^2}}{2+\tilde{\eta}^2} (\theta + 3\tilde{\eta} \sin \theta) \right)}{(1-\eta_2)^2} + 1,$$
$$p_{21} = 6\Lambda [\theta - \theta_1] \left[1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) - \frac{1}{p} \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \right] \times$$
$$\times \left[1 + \frac{3\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) \right] + 1,$$
$$p_{31} = \frac{6\Lambda (\theta - \theta_2)}{(1-\eta_2)^2} \left[1 + \frac{2\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) - \frac{1}{p} \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) \right] \times$$
$$\times \left[1 + \frac{3\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right] + 1. \quad (9)$$

Для оценки износостойкости по результатам исследования определим коэффициент трения.

Заключительным этапом теоретических исследований является численный анализ полученных расчетных моделей.

Проверочные расчеты полученной теоретической математической модели проведены при ширине канавки $(\theta_2 - \theta_1) = 5,74^\circ \div 22,92^\circ$, нагрузке $16 \div 80$ МПа и скорости $0,3$ м/с (табл. 1).

Таблица № 1

Результаты численного анализа на основе математической модели

| № | $(\theta_2 - \theta_1), ^\circ$ | Коэффициент трения | | | | |
|---|---------------------------------|--------------------|-----------|----------|-----------|------------|
| | $\sigma, \text{МПа}$ | | | | | |
| 1 | 16 | 0,00979 | 0,01203 | 0,0092 | 0,006 | 0,00423 |
| 2 | 32 | 0,00649 | 0,006581 | 0,006743 | 0,005075 | 0,0036925 |
| 3 | 48 | 0,003283 | 0,003382 | 0,003296 | 0,0031695 | 0,003047 |
| 4 | 64 | 0,003185 | 0,0032603 | 0,003194 | 0,0031126 | 0,00303783 |
| 5 | 80 | 0,003087 | 0,0031297 | 0,003092 | 0,003047 | 0,00301877 |

Для подтверждения эффективности теоретических моделей нами проведено экспериментальное исследование (табл. 2). Экспериментальные исследования проводились на модернизированной машине трения ИИ 5018 на образцах в виде частичных вкладышей.

Таблица № 2

Сравнительный анализ результатов исследований

| № п/п | Режим | | Теоретический результат | | Результат эксперимента | | Погрешность, % | |
|-------|----------------------|-----------------|-------------------------|----------------------|------------------------|---------------------|----------------|------|
| | $\sigma, \text{МПа}$ | $V, \text{м/с}$ | без учета сжимаемости | с учетом сжимаемости | покрытие | покрытие с канавкой | | |
| 1 | 16 | 0,3 | 0,0145 | 0,0122 | 0,0169 | 0,0144 | 5–12 | 6–13 |
| 2 | 32 | 0,3 | 0,0088 | 0,0063 | 0,0104 | 0,0072 | | |
| 3 | 48 | 0,3 | 0,007 | 0,0051 | 0,0081 | 0,0063 | | |
| 4 | 64 | 0,3 | 0,0085 | 0,0061 | 0,0107 | 0,0072 | | |
| 5 | 80 | 0,3 | 0,0125 | 0,0094 | 0,0137 | 0,0108 | | |

Заключение

В результате исследования на износостойкость достигнуто существенное расширение разработанных новых математических моделей, позволяющих провести оценку эксплуатационных характеристик.

Применение исследованных радиальных подшипников скольжения значительно повышает несущую способность (8–10 %), а коэффициент трения при этом снижается на 7–9 %.

Конструкция радиального подшипника с полимерным покрытием и канавкой шириной 4 мм обеспечила стабильное всплытие вала на гидродинамическом клине, что экспериментально подтвердило правильность результатов теоретических исследований. Полученные результаты могут быть использованы в машиностроении, авиастроении, приборостроении и т. д. – везде, где необходимо обеспечение гидродинамического режима смазывания.

Литература

1. Baryshnikova A.M., Baryshnikov M.P., Nosov L.V. Development of production technology for polymer coated wire based on the study of the stress state scheme in the progress of drawing // The theory and progress engineering of metallurgical production. 2020. Vol. 3(34). Pp. 21–25.
2. Ikromov N., Dilshod R. Technique and installations for electromagnetic treatment in the formation of composite polymer coatings // Universum: Технические науки. 2021. Vol. 1, No. 7-3(88). Pp. 52–55.
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. Кохановский В.А., Камерова Э.А. Вязкоупругие свойства полимерных покрытий в жидких смазочных средах // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. №2. С. 44–48.
5. Негматов С.С., Абед Н.С., Саидахмедов Р.Х. [и др.]. Исследование вязкоупругих и адгезионно-прочностных свойств и разработка эффективных вибропоглощающих композиционных полимерных материалов и покрытий

машиностроительного назначения // Пластические массы. 2020. №7–8. С. 32–36.

6. Levanov I.G., Zadorozhnaya E.A., Mukhortov I.V, Eschiganov M.O. Study of effect of metal oleates on mixed and boundary lubrication // Tribology in Industry. 2020. Vol. 42(3). pp. 461–467. DOI 10.24874/ti.708.06.19.08.

7. Shutin D.V., Polyakov R.N. Adaptive non-linear controller of rotor position in active hybrid bearings // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910935.

8. Gorin A.V., Poliakov R.N., Sytin A.V. Test bench for analyzing adaptability of foil gas-dynamic bearings to external changes // Lecture Notes in Mechanical Engineering ICIE 2019: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Pp. 941–949. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_100.

9. Дерлугян Ф.П., Щербаков И.Н. Обоснование процесса получения композиционных антифрикционных самосмазывающихся материалов с заданными техническими характеристиками методом химического наноконструирования // Инженерный вестник Дона. 2010. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2010/287.

10. Данюшина Г.А. Дерлугян П.Д. Стрельников В.В. Шишка Н.В. Композиционный антифрикционный полимерный материал // Инженерный вестник Дона. 2017. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4053.

11. 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.

12. 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.

References

1. Baryshnikova A.M., Baryshnikov M.P., Nosov L.V. The theory and progress engineering of metallurgical production. 2020. vol. 3(34). pp. 21–25.
2. Ikromov N., Dilshod R. Universum: Tekhnicheskie nauki. 2021. vol. 1, no. 7-3(88). pp. 52–55.
3. Kohanovskij V.A., Kamerova E.A. Trenie i smazka v mashinah i mekhanizmah. 2014. №1. pp. 34–37.
4. Kohanovskij V.A., Kamerova E.A. Trenie i smazka v mashinah i mekhanizmah. 2014. №2. pp. 44–48.
5. Negmatov S.S., Abed N.S., Saidahmedov R.H. [i dr.]. Plasticheskie massy. 2020. №7–8. pp. 32–36.
6. Levanov I.G., Zadorozhnaya E.A., Mukhortov I.V, Eschiganov M.O. Tribology in Industry. 2020. vol. 42(3). pp. 461–467. DOI: 10.24874/ti.708.06.19.08.
7. Shutin D.V., Polyakov R.N. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910935.
8. Gorin A.V., Poliakov R.N., Sytin A.V. Lecture Notes in Mechanical Engineering ICIE 2019: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). pp. 941–949. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_100.
9. Derlugyan F.P., Shcherbakov I.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2010. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2010/287.
10. Danyushina G.A. Derlugyan P.D. Strel'nikov V.V. SHishka N.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4053.



11. Kirishchieva V.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7954.

12. Has'yanova D.U., Mukutadze M.A. Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 2022. №4. pp. 46–53.

Дата поступления: 25.03.2024

Дата публикации: 8.05.2024