

УДК 621.822

*Е. О. Лагунова, С. В. Куманин***ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ С ДВУХСЛОЙНЫМ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ¹**

Аннотация. В данной работе осуществлен переход к гидродинамическому расчету радиального подшипника бесконечной длины. Для формирования расчетной модели данного подшипника были использованы уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости в случае "тонкого слоя", уравнения неразрывности, а также уравнения, описывающие контуры расплавленных слоев покрытий на валу. В результате проведенных исследований было найдено поле скоростей и давлений в смазочном слое. Далее были получены аналитические выражения для несущей способности и силы трения рассматриваемой конструкции подшипника. В работе осуществлена оценка влияния обобщенных параметров, характеризующих расплав покрытий, а также параметра, описывающего опорную поверхность (с не круговым контуром) подшипника на вышеуказанные характеристики данной конструкции.

Ключевые слова: двухслойное металлическое покрытие, радиальный подшипник, последовательное приближение, автомобильное решение, гидродинамическое давление.

Для цитирования: Лагунова, Е. О. Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения с двухслойным металлическим покрытием / Е. О. Лагунова, С. В. Куманин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 31–36.

Гидродинамическому расчету подшипников скольжения, содержащих на одной рабочей поверхности металлические покрытия посвящено большое количество работ [1-5]. Здесь в основном рассматривается случай наличия лишь однослойных покрытий на рабочей поверхности как радиальных, так и упорных подшипников скольжения, что не обеспечивает жидкостный режим работы подшипников в экстремальных случаях. Возникает необходимость в исследовании нескольких покрытий поверхности подшипников. Так же возникает необходимость в разработке методов расчета радиальных подшипников не с круговой опорной поверхностью, обуславливающей его повышенную несущую способность. Содержание данной статьи направлено на формирование расчетной модели радиальных подшипников с некруговой опорной поверхностью при наличии двухслойного покрытия на поверхности вала.

Данное исследование посвящено анализу движения вязкой несжимаемой жидкости в радиальном подшипнике скольжения с несовершенной круговой опорной поверхностью. В предлагаемой модели предполагается, что подшипник остается неподвижным, а вращательное движение осуществляется шипом с двухслойным покрытием, причем вращение происходит со скоростью Ω (рис. 1).

Для удобства и точности анализа, мы разместим начало системы координат в центре шипа (точка О). Ось Ох будет направлена по линии центров, указывающей на наибольшую толщину смазочного слоя, в то время как ось Оу будет перпендикулярна оси Ох.

Радиус не кругового подшипника будем искать в виде $b - a' \sin \omega \theta$, полагая a' и e одного порядка малости. С учетом (1) будем иметь

¹Статья рекомендована к публикации оргкомитетом по результатам 15-й юбилейной Международной научно-практической конференции «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава».

$$\begin{aligned}
 1: r' &= b(1 + \varepsilon \cos \theta) + O(\varepsilon^2); & 2: r' &= a; & 3: r' &= a - \beta'_1 \varphi_1(\theta); \\
 4: r' &= a - \beta'_2 \varphi_2(\theta); & 5: r' &= b + e \cos \theta - a' \sin \omega \theta = h.
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

Основными базовыми уравнениями являются уравнение движение вязкой несжимаемой жидкости для случая «тонкого слоя» и уравнение неразрывности

$$\mu \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r'^2} = \frac{1}{r'} \frac{dp'}{d\theta}; \quad \frac{\partial v_{r'}}{\partial r'} + \frac{v_{r'}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0. \quad (2)$$

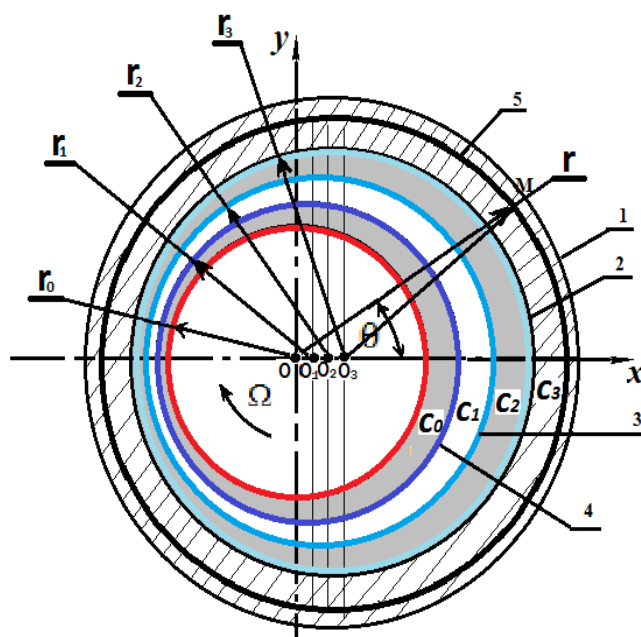


Рис. 1. Система «вал с расплавленной двухслойной поверхностью – подшипник с не круговой опорной поверхностью»

Нами предлагается для решения рассматриваемой задачи метод, являющийся аналогом метода последовательных приближений. Функцию $\frac{\partial v_\theta}{\partial r'}$ определим интегрально по промежуткам $[\Phi_1; h'(\theta)]$, $[\Phi_2; h'(\theta)]$ с учетом выражения для скорости диссипации энергии соответственно их выше указанным промежуткам будем иметь:

$$\begin{aligned}
 \Omega L' \Phi_1(\theta) \frac{d\Phi_1}{d\theta} &= -2\mu \int_{\Phi_1(\theta)}^{h'(\theta)} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r'} \right)^2 dr' = -\frac{2\mu \Omega^2 \Phi_1^2}{h'(\theta) - \Phi_1(\theta)}; \\
 \Omega L' \Phi_2(\theta) \frac{d\Phi_2(\theta)}{d\theta} &= -2\mu \int_{\Phi_1(\theta)}^{h'(\theta)} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r'} \right)^2 dr' - 2\mu \int_{\Phi_2(\theta)}^{\Phi_1(\theta)} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r'} \right)^2 dr' = \\
 &= -\frac{2\mu \Omega^2 \Phi_2^2 (h' - \Phi_1)}{(h'(\theta) - \Phi_2(\theta))^2} - \frac{2\mu \Omega^2 \Phi_2^2 (\Phi_1 - \Phi_2)}{(h'(\theta) - \Phi_2(\theta))^2}.
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

Здесь L' – удельная теплота плавления на единицу объема, которая задается в виде:

$$\begin{aligned} L' &= L'_1 \text{ в интервале } [\Phi_1; h'(\theta)]; \\ L' &= L'_2 \text{ в интервале } [\Phi_2; \Phi_1]; \end{aligned} \quad (4)$$

Система уравнений (2) – (3) решается при следующих граничных условиях

$$\begin{aligned} v_\theta &= \Omega \Phi_i \text{ при } r' = \Phi_i \ (i=1,2,3); \quad v_{r'} = 0 \text{ при } r' = \Phi_i \ (i=1,2,3); \\ v_\theta &= 0, \ v_{r'} = 0 \text{ при } r' = h'(\theta); \quad p(0) = p(2\pi); \\ \Phi_i(\theta) &= a - h_i^* \ (i=1,2,3) \text{ при } \theta = 0; \ \theta = 2\pi. \end{aligned} \quad (5)$$

Решая уравнения (2)-(3) методом последовательных приближений (ограничиваясь двумя приближениями) будем иметь

$$\begin{aligned} \Phi_1^{(1)} &= a - h_1^* - \frac{K_1 a (a - h_0^*)}{b - (a - h_1^*)} \left[\frac{2}{(1 - \eta^2)^{\frac{3}{2}}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{1 - \eta}{1 + \eta}} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) - \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) \right]; \\ \Phi_2^{(1)} &= a - h_2^* - \frac{K_1 a (a - h_2^*) (b - (a - h_1^*))}{(b - (a - h_2^*))^2} \left[\frac{2}{(1 - \eta^2)^{\frac{3}{2}}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{1 - \eta}{1 + \eta}} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\tilde{\eta}}{1 - \tilde{\eta}^2} \frac{\sin \theta}{(1 - \tilde{\eta}^2)^{\frac{3}{4}}} - (\eta - 2\tilde{\eta}) \sin \theta - \frac{\tilde{\eta}_1 - \eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) \right] - \\ &\quad - \frac{K_2 a (a - h_2^*) (h_2^* - h_1^*)}{(b - (a - h_2^*))^2} \left[\frac{2}{(1 - \tilde{\eta}^2)^{\frac{3}{2}}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{1 - \eta}{1 + \eta}} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\tilde{\eta}}{1 - \tilde{\eta}^2} \frac{\sin \theta}{(1 - \tilde{\eta}^2)^{\frac{3}{4}}} - \frac{2\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Осредним $\Phi_2^{(1)}$ интегрально по промежутку $[0; 2\pi]$. При приближенном вычислении интеграла от функции $\Phi_2^{(1)}$ воспользуемся теоремой о среднем значении. Значение этой функции вычислим при $\theta = \frac{\pi}{2}$ и уменьшим на длину промежутка интегрирования.

Будем иметь

$$\begin{aligned}
\Phi_2^{(1)} \approx \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Phi_2^{(1)}(\theta) d\theta = \Phi_2^{(1)}\left(\frac{\pi}{2}\right) = H^* = a - h_2^* - \\
- \frac{K_1 a (a - h_2^*) (b - (a - h_1^*))}{(b - (a - h_2^*))^2} \left[\frac{2}{(1 - \eta^2)^{\frac{3}{2}}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{1 - \tilde{\eta}}{1 + \tilde{\eta}}} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) - \right. \\
\left. - \frac{\tilde{\eta}}{1 + \tilde{\eta}^2} \frac{1}{(1 - \tilde{\eta}^2)^{\frac{3}{4}}} - (\eta - 2\tilde{\eta}) - \frac{\tilde{\eta}_2 - \eta_1}{\omega} \left(\cos \frac{\omega \pi}{2} - 1 \right) \right] - \\
- \frac{K_2 a (a - h_2^*) (h_2^* - h_1^*)}{(b - (a - h_2^*))^2} \left[\frac{2}{(1 - \tilde{\eta})^2} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{1 - \tilde{\eta}}{1 + \tilde{\eta}}} \right) - \right. \\
\left. - \frac{\tilde{\eta}}{1 + \tilde{\eta}^2} \frac{\sin \theta}{(1 - \tilde{\eta}^2)^{\frac{3}{4}}} - \frac{2\tilde{\eta}_1}{\omega} \left(\cos \frac{\omega \pi}{2} - 1 \right) \right]. \quad (7)
\end{aligned}$$

Из формулы (7) и граничных условий $\Phi_i^{(1)}(0) = \Phi_i^{(1)}(2\pi)$ ($i = 1, 2$) следует, что это условие выполняется при $\omega = 0$, т.е. в случае подшипника с круговой опорной поверхностью, а также в случае $\omega = 1, 2, \dots$.

Переходя к безразмерным переменным, система уравнений (2), (3) и (5) запишутся в виде:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = \frac{dp}{d\theta}; \quad \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial u}{\partial r} = 0, \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
u = 0, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 + \eta_1 \cos \theta - \eta_2 \sin \omega \theta, \\
u = 0, \quad v = 1 \quad \text{при} \quad r = 0, \\
p(0) = p(2\pi),
\end{aligned} \quad (9)$$

где $\eta_1 = \frac{e}{b}$, $\eta_2 = \frac{a'}{b}$.

Используя метод точного автомодельного решение с точностью до членов $O(\eta_1)$, $O(\eta_2)$, $O(\eta_1 \eta_2)$, для гидродинамического давления получим выражение

$$p = \tilde{C}_1 \left[\eta_1 \sin \theta + \frac{\eta_2}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) - \frac{\eta_2}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - 1) \theta \right]. \quad (10)$$

С учетом формулы (10) для несущей способности и силы трения получим аналитические выражения в виде (при $\omega = 1$)

$$R_y = \frac{\mu \Omega H^{*3}}{(b - H^*)^2} \int_0^{2\pi} \tilde{C}_1 \left[\eta_1 \sin \theta + \frac{\eta_2}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) - \frac{\eta_1 \theta}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - 1) \right] \sin \theta d\theta = \frac{\mu \Omega H^{*3}}{(b - H^*)^2} \tilde{C}_1 \eta_1 \pi;$$

$$\begin{aligned}
 R_x &= \frac{\mu \Omega H^{*3}}{(b-H^*)^2} \int_0^{2\pi} \tilde{C}_1 \left[\eta_1 \sin \theta + \frac{\eta_2}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) - \frac{3\eta_1 \theta}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - 1) \right] \cos \theta d\theta = \\
 &= \frac{\mu \Omega H^{*3}}{(b-H^*)^2} \tilde{C}_1 \eta_2 \pi; \\
 L_{\text{тр}} &= \frac{\mu \Omega H^*}{(b-H^*)} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\psi''(0)}{H^2} + \frac{\tilde{v}'(0)}{H} \right) d\theta = -\frac{2\pi \mu \Omega H^*}{b-H^*}. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Из найденных аналитических выражений (11) следует, что несущая способность и сила трения рассматриваемой конструкции подшипника существенно зависит от параметра H^* , который также зависит от обобщенных параметров K_1 и K_2 , характеризующих расплав покрытий (рис. 2, 3). С увеличением количества покрытий H^* - уменьшается.

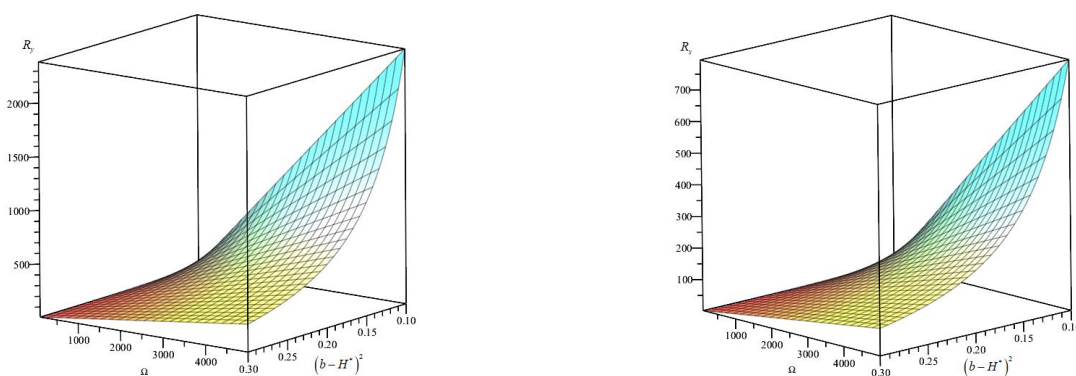


Рис. 2. Зависимости вектора поддерживающей силы от угловой скорости и толщины смазочного слоя

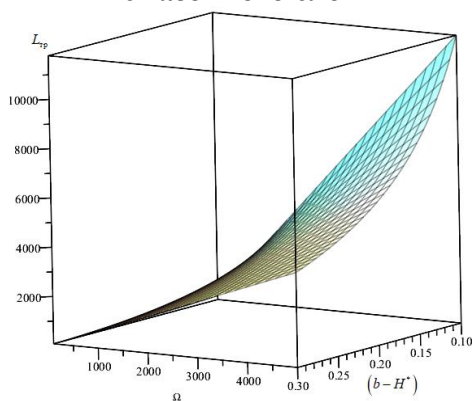


Рис. 3. Зависимости силы трения от угловой скорости и толщины смазочного слоя

Благодарность. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, номер гранта 22-49-08014, <https://rscf.ru/en/project/22-49-08014/>.

Библиографический список

1. **Ахвердиев, К. С.** Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре сложнагруженного радиального подшипника конечной длины, обладающего повышенной несущей способностью / К. С. Ахвердиев, Е. Е. Александрова, М. А. Мукутадзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 1(37). – С. 132–137. – ISSN: 0201-727X

2. **Мукутадзе, М. А.** Разработка расчетной модели гидродинамического смазочного материала, образующегося при плавлении подпятника, при наличии принудительной смазки / М. А. Мукутадзе, Е. О. Лагунова, В. В. Василенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2018. – № 3. – С. 76–83. – ISSN: 0235-7119

3. **Ахвердиев, К. С.** Клиновидная опора скольжения с податливой опорной поверхностью, работающая на сжимаемом материале в условиях наличия расплава на поверхности направляющей / К. С. Ахвердиев, Е. А. Болгова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(82). – С. 8–16. – ISSN: 0201-727X

4. **Lagunova, E., Mukutadze, M.** Radial friction bearing conditioned by melt (ICIE 2018) Lecture Notes in Mechanical Engineering, PP. 897–910. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_94

5. **Болгова, Е. А.** Повышение износостойкости подшипника скольжения с нелинейным контуром и металлическим покрытием / Е. А. Болгова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 5-1(119). – С. 9 – 16. – ISSN: 2227-6017 Online.

E. O. Lagunova, S.V. Kumanin

INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF A RADIAL SLIDING BEARING WITH A TWO-LAYER METAL COATING

Abstract. The paper presents a method for the hydrodynamic calculation of a radial bearing of infinite length. The calculation model of the bearing in question is formed on the basis of the equations of motion of a viscous incompressible fluid for the case of a "thin layer", the continuity equation, as well as equations describing the contours of the molten layers of shaft coatings. As a result, the velocity and pressure field in the lubricating layer was found, and subsequently analytical expressions were found for the bearing capacity and friction force of the bearing structure in question. The influence of generalized parameters characterizing the melt of coatings, as well as a parameter characterizing the (non-circular) contour of the bearing bearing surface on the above bearing characteristics is estimated.

Keywords: double-layer metal coating, radial bearing, sequential approximation, self-similar solution, hydrodynamic pressure.

For citation: Lagunova, E. O. Increasing the wear resistance of a radial sliding bearing with a two-layer metal coating / E. O. Lagunova, S.V. Kumanin // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. – 2024. – № 1. – P. 31–36.

Сведения об авторах

Лагунова Елена Олеговна

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС)
кафедра «Строительная механика»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: lagunova@rambler.ru

Куманин Станислав Витальевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС)
кафедра «Высшая математика»,
аспирант,
e-mail: Stanislav.kum@mail.ru

Information about the authors

Lagunova Elena Olegovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Structural Mechanics»,
Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: lagunova@rambler.ru

Kumanin Stanislav Vitalevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Higher Mathematics»,
Graduate Student,
e-mail: Stanislav.kum@mail.ru