

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА В УСЛОВИЯХ НАЛИЧИЯ РАСПЛАВА НА ПОВЕРХНОСТИ ВАЛА

*Киришчиева В.И., Мукутадзе А.М., Мукутадзе М.А.*

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

**Ключевые слова:** радиальный подшипник, адаптированный к условиям трения профиль опорной поверхности, вязкопластичный смазочный материал, металлическое покрытие.

**Аннотация.** В работе рассмотрено установившееся течение вязкопластичного смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника скольжения, адаптированного к условиям трения подшипниковой втулки, с металлическим покрытием поверхности вала. На основе уравнения движения вязкопластичного смазочного материала (Генки – Ильюшина), уравнения неразрывности и уравнения, описывающего радиус расплавленного контура поверхности вала, с учетом скорости диссипации механической энергии найдено точное автомодельное решение, в результате определены поля скоростей и давления в смазочном слое, а также нагрузочная способность и сила трения.

## DESIGN MODEL OF A RADIAL BEARING IN THE PRESENCE OF A MELT ON THE SHAFT SURFACE

*Kirishchieva V.I., Mukutadze A.M., Mukutadze M.A.*

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

**Keywords:** radial bearing, profile of the bearing surface adapted to friction conditions, viscoplastic lubricant, metal coating.

**Abstract.** The paper considers the steady flow of a viscoplastic lubricant in the working gap of a radial sliding bearing adapted to the friction conditions of the bearing sleeve, with a metal coating of the shaft surface. Based on the equation of motion of a viscoplastic lubricant (Genki – Pyushin), the continuity equation and the equation describing the radius of the molten contour of the shaft surface, taking into account the rate of dissipation of mechanical energy, an exact self-similar solution was found, as a result, the velocity and pressure fields in the lubricating layer, as well as the load capacity and friction force were determined.

### Введение

Разработке расчетных моделей подшипников скольжения, обладающих повышенной несущей способностью, посвящено большое количество работ [1-10], в которых разработаны расчетные модели, не учитывающие неньютоновские свойства смазочных материалов, при наличии расплава покрытий. Анализ работ, посвященных подшипникам скольжения с металлическим покрытием подвижных и неподвижных контактных поверхностей с учетом реологических свойств [11-23], показал, что не учитываются адаптированный профиль опорной поверхности подшипниковой втулки и реологические свойства смазочного материала. В предполагаемой работе нами приводится расчетная модель смазывания подшипников скольжения, работающих на вязкопластичной смазке в условиях наличия металлического покрытия на поверхности вала.

### Постановка задачи

Рассматривается установившееся движение вязкопластичной жидкости между эксцентрично расположенным валом и подшипником. Подшипник с

некруговым профилем опорной поверхности неподвижен, а вал при наличии покрытия на его поверхности вращается с угловой скоростью  $\Omega$ . В полярной системе координат  $r', \theta$  с полюсом в центре вала уравнение контуров  $C_0, C_1, C_2$  запишем в виде (см. рис. 1):

$$C_0: r' = a - \beta f(\theta), \quad C_1: r' = a, \quad O_1M = b - a' \sin \omega \theta, \quad OM = OO_1 \cos \theta + O_1M \cos \varphi. \quad (1)$$

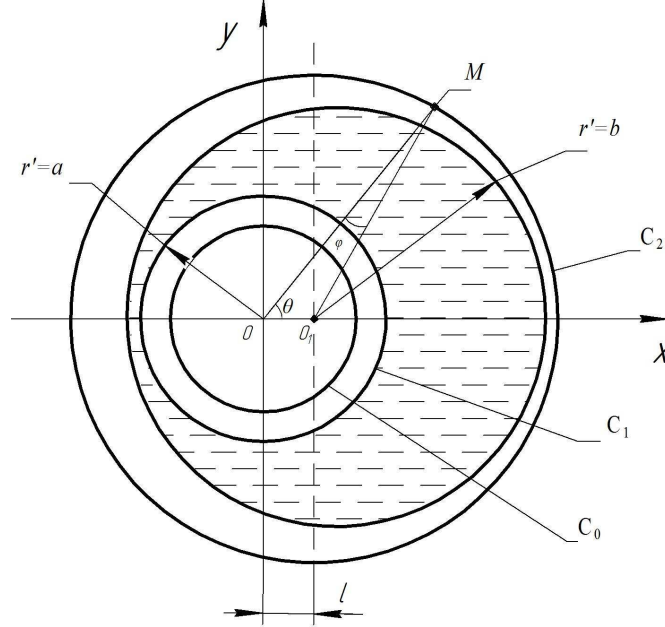


Рис. 1. Расчетная модель

Исходными базовыми уравнениями являются: уравнение движения несжимаемой вязкопластичной жидкости (уравнение Генки – Ильюшина), уравнение неразрывности, а также уравнение, описывающее радиус расплавленного контура поверхности вала.

$$\rho(\bar{v}\nabla)\bar{v} = -\nabla p + \left(\mu + \frac{\tau_0}{H'}\right)\nabla^2\bar{V} - \frac{2\tau_0}{H'^2}T_\varepsilon\nabla H', \quad \nabla\bar{v} = 0;$$

$$H' = \sqrt{\left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r'} - \frac{v_\theta}{r'} + \frac{1}{r'}\frac{\partial v_{r'}}{\partial \theta}\right)^2 + 4\left(\frac{\partial v_{r'}}{\partial r'}\right)^2};$$

$$\frac{d(OM)}{d\theta} = \frac{2\mu}{\Omega L^*} \int_{a-\beta f(\theta)}^{OM} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r'}\right)^2 dr'. \quad (2)$$

Система уравнений (2) решается при следующих граничных условиях:

$$v_{r'} = 0, \quad v_\theta = 0 \quad \text{при} \quad r' = OM; \quad v_{r'} = 0, \quad v_\theta = \Omega(a - \beta f(\theta)) \quad \text{при} \quad r' = a - \beta f(\theta);$$

$$p(0) = p(2\pi), \quad a - \beta f(\theta) = h_0^* \quad \text{при} \quad \theta = 0, \theta = 2\pi. \quad (3)$$

Осредняя  $\frac{\partial v_\theta}{\partial r'}$  по промежутку  $[a - \beta f(\theta); OM]$  и интегрируя полученное уравнение, получим:

$$\Phi = \frac{h_0^*}{a} + \frac{2\mu\Omega a}{L^* b} \int_0^\theta \frac{\Phi^2(\theta) d\theta}{1 + \eta \cos \theta - \eta_1 \sin \omega \theta - \frac{a}{b} \Phi(\theta)}, \quad (4)$$

$$\eta = \frac{e}{b}, \quad \eta_1 = \frac{a'}{b}.$$

Решая уравнение (4) методом последовательных приближений, будем иметь:

$$\Phi_1(\theta) = \frac{h_0^*}{a} + \frac{2\mu}{\Omega L^* b} \int_0^\theta \frac{\left(\frac{h_0^*}{a}\right) d\theta}{1 + \eta \cos \theta - \eta_1 \sin \omega \theta - \frac{h_0^*}{b}}. \quad (5)$$

С учетом (2) перейдем к безразмерным переменным по формулам:

$$v_{r'} = \delta \Omega u, \quad v_\theta = \alpha^* \Omega v, \quad p' = p^* p, \quad p^* = \frac{\mu \Omega \alpha^{*2}}{\delta^2}, \quad \delta = b - \alpha^*, \quad r' = \alpha^* + \delta r. \quad (6)$$

Используя метод оценок с учетом (6), будем иметь:

$$H' = \frac{\Omega \alpha^*}{\delta} \left[ -\frac{\partial v}{\partial r} + rv + O(r^2) \right], \quad \frac{1}{H'} = -\frac{\delta}{\Omega \alpha^*} \left[ \frac{1}{\frac{\partial v}{\partial r}} + \frac{rv}{\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)^2} + O^2(r^2) \right];$$

$$\frac{\partial H'}{\partial r'} = \frac{\Omega \alpha^*}{\delta^2} \left[ -\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + r \frac{\partial v}{\partial r} + O(r^2) \right], \quad \frac{\partial H'}{\partial \theta} = \frac{\Omega \alpha^*}{\delta} \left[ -\frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \theta} + r \frac{\partial v}{\partial \theta} + O(r^2) \right]. \quad (7)$$

Уравнение движения и уравнение неразрывности с учетом (7) сводятся к аналогам уравнения Рейнольдса для вязкопластичной смазки без учета сил инерции:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = A + \frac{dp}{d\theta}, \quad \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0, \quad A = \frac{2\tau\delta}{\mu \Omega \alpha^{*2}}. \quad (8)$$

Граничные условия при этом запишем в виде:

$$u = 0, \quad v = 1 \quad \text{при} \quad r = 0, \quad u = 0, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 + \eta \cos \theta - \eta_1 \sin \omega \theta,$$

$$p(0) = p(2\pi). \quad (9)$$

Находим точное автомодельное решение по известному методу [24], в результате для поля скоростей и давления получим:

$$\tilde{\psi}' = \frac{\tilde{C}_2}{2} (\xi^2 - \xi), \quad \tilde{v}(\xi) = \frac{\tilde{C}_1}{2} \xi^2 - \left( \frac{\tilde{C}_1}{2} + 1 \right) \xi + 1, \quad \tilde{C}_1 = 6,$$

$$P = (\tilde{C}_1 + 3A) \left[ \eta \sin \theta - \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) + \frac{\eta_1}{2\pi\omega} - (\cos 2\pi\omega - 1) \right]. \quad (10)$$

С учетом (10) для несущей способности и силы трения получим следующее выражение:

$$R_y = \left[ \frac{\mu r \alpha^* b}{\delta^2} \left[ 3\pi\eta(2 + A) + \frac{3\eta_1}{\omega} \left( \frac{\cos 2\pi(1 + \omega) - 1}{1 + \omega} + \frac{\cos 2\pi(1 - \omega) - 1}{1 - \omega} \right) \right] \left( 1 - \frac{A}{2} \right) \right];$$

$$R_x = \left[ \frac{\mu r \alpha^* b}{\delta^2} \frac{3\eta_1}{\omega} \left( \frac{\sin 2\pi(1 + \omega)}{1 + \omega} + \frac{\sin 2\pi(1 - \omega)}{1 - \omega} \right) \right] \left( 1 - \frac{A}{2} \right);$$

$$L_{TP} = 2\pi\Omega\alpha^* \left( \frac{3\eta_1}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) \left( 1 - \frac{A}{2} \right) - \frac{A}{2} \right). \quad (11)$$

### Результаты исследования

Из приведенных в (11) зависимостей для основных рабочих характеристик рассматриваемого подшипника следует: по результатам теоретических исследований доказано, что радиальный подшипник с металлическим покрытием поверхности вала, адаптированным к условиям трения опорной поверхности подшипниковой втулки, на вязкопластичном смазочном материале, увеличивает несущую способность примерно на 8-13 %, а коэффициент трения при этом уменьшается примерно на 11-18 %.

А также проведено экспериментальное исследование, которое подтвердило выводы теоретических исследований (см. табл. 1).

Табл. 1. Результаты экспериментального исследования

№	Радиальный подшипник			
	Стандартное	Легкоплавкое металлическое покрытие	Легкоплавкое металлическое и адаптированный профиль	
Коэффициент трения	1	0,0051	0,0033	0,0017
	2	0,0048	0,0035	0,0016
	3	0,0049	0,0037	0,0019
	4	0,0047	0,0038	0,0018
	5	0,0048	0,0040	0,0020

### Вывод

Разработано новое выражение для нагрузочной способности и силы трения для радиального подшипника с металлическим покрытием поверхности вала, адаптированным к условиям трения опорной поверхности подшипниковой втулки на вязкопластичном смазочном материале.

Дана оценка влияния параметров, характеризующих расплав металлического покрытия, адаптированного к условиям трения опорной поверхности подшипниковой втулки, и реологических свойств вязкопластичного смазочного материала.

### Список литературы

1. Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Working out of an analytical model of an axial bearing taking into account dependence of viscous characteristics of micropolar lubrication on pressure and temperature // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. No. 14. P. 4644-4650.
2. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Солоп К.С. Расчетная модель радиального подшипника скольжения с повышенной несущей способностью, работающего на микрополярной смазке с учетом ее вязкостных характеристик от давления // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4 (27). С. 22.
3. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Солоп К.С. Расчетная модель упорного подшипника скольжения с повышенной несущей способностью, работающего на неньютоновских смазочных материалах с адаптированной опорной поверхностью // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4 (27). С. 23.

4. Мукутадзе М.А., Флек Б.М., Задорожная Н.С., Поляков Е.В., Мукутадзе А.М. Расчетная модель гидродинамической смазки неоднородного пористого подшипника конечной длины, работающего в устойчивом нестационарном режиме трения при наличии принудительной подачи смазки // Инженерный вестник Дона. 2013. № 3 (26). С. 9.
5. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Semenko I.S. Hydrodynamic calculation of a thrust plain bearing that operates with viscoelastic lubricant under turbulent friction conditions // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2011. Vol. 40. No. 4. P. 359-365. DOI 10.3103/S1052618811040029.
6. Ахвердиев К.С.О., Эркенов А.Ч., Александрова Е.Е., Мукутадзе М.А. Стратифицированное течение трехслойной смазки в зазоре упорного подшипника, обладающего повышенной несущей способностью // Трибология и надежность. Сбор. научн. трудов X Международной конференции. СПб.: СПбГУПС, 2010. С. 15-24.
7. Ахвердиев К.С., Александрова Е.В., Кручинина Е.Е., Мукутадзе М.А. Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре упорного подшипника, обладающего повышенной несущей способностью // Вестник ДГТУ. 2010. Т.10. № 2 (45). С. 217-223.
8. Ахвердиев К.С.О., Мукутадзе М.А., Замшин В.А., Семенко И.С. Гидродинамический расчет радиального подшипника скольжения, работающего в турбулентном режиме трения при неполном заполнении зазора вязкоупругой смазкой // Вестник машиностроения. 2009. №7. С.11-17.
9. Ахвердиев К.С., Лагунова Е.О., Мукутадзе М.А. Гидродинамический расчет радиального подшипника при наличии электромагнитного поля с учетом зависимости вязкости и электропроводности от температуры // Вестник ДГТУ. 2009. Т.9. № 3 (42). С. 529-536
10. Ахвердиев К.С., Вовк А.Ю., Мукутадзе М.А., Савенкова М.А. Математическая модель гидродинамической смазки бесконечно широких опор, работающих в турбулентном режиме на микрополярной смазке // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2007. № 9. С. 12-15
11. Мукутадзе М.А. Разработка системы расчетных моделей подшипников скольжения на основе развития гидродинамической и реодинамической теории смазки: Автореферат дисс. ... докт. техн. наук. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2015.
12. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Вовк А.Ю., Семенко И.С. Гидродинамический расчет радиального подшипника, работающего в нестационарном режиме на вязкопластичной смазке, обладающей микрополярными свойствами // Вестник РГУПС. 2008. № 4 (32). С. 131-138.
13. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Савенкова М.А., Вовк А.Ю. Математическая модель гидродинамической смазки радиального подшипника, работающего в нестационарном режиме на микрополярной смазке // Вестник РГУПС. 2008. № 1 (29). С. 147-151.
14. Мукутадзе М.А., Хасьянова Д.У., Мукутадзе А.М. Гидродинамическая модель клиновидной опоры скольжения с легкоплавким металлическим покрытием // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 4. С. 51-58. DOI 10.31857/S0235711920040100.
15. Mukutadze M.A., Vasilenko V.V., Mukutadze A.M., Opatskikh A.N. Mathematical model of a plain bearer lubricated with molten metal // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering. 2019. P. 012021. DOI 10.1088/1755-1315/378/1/012021.
16. Mukutadze M.A., Mukutadze A.M., Vasilenko V.V. Simulation model of thrust bearing with a free-melting and porous coating of guide and slide surfaces // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 012031. DOI 10.1088/1757-899X/560/1/012031.
17. Mukutadze M.A., Khasyanova D.U. Radial friction bearing with a fusible coating in the turbulent friction mode // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. Vol. 48. No. 5. P. 421-430. DOI 10.3103/S1052618819050066.
18. Akhverdiev K.S., Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Calculated model of wedge-shaped sliding supports taking into account rheological properties of viscoelastic lubricant // Advances in

- Engineering Research. Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport" (AVENT 2018). 2018. P. 246-253. DOI 10.2991/avent-18.2018.47.
19. Mukutadze M.A., Khasyanova D.U. Optimization of the supporting surface of a slider bearing according to the load-carrying capacity taking into account the lubricant viscosity depending on pressure and temperature // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Vol. 47. No.4. P. 356-361. DOI 10.3103/S1052618818040106.
  20. Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Vasilenko V.V. Development of the design model of a hydrodynamic lubricating material formed during melting of the axial bearing, in the presence of forced lubrication // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Vol. 47. No. 3. P.271-277. DOI 10.3103/S105261881803010X.
  21. Akhverdiev K.S., Bolgova E.A., Mukutadze M.A., Vasilenko V.V. Mathematical model of a radial sliding bearing with a porous layer on its operating surface with a low-melting metal coating on shaft surface // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2020. 2021. P. 012005. DOI 10.1088/1757-899X/1064/1/012005.
  22. Кохановский В.А., Мукутадзе М.А. Матричные материалы антифрикционных композитов // Вестник ДГТУ. 2001. Т. 1. № 2. С. 51-56.
  23. Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Calculation of a radial slider bearing with a fusible coating // Journal of Friction and Wear. 2019. Vol. 40. No. 1. P. 88-94. DOI 10.3103/S1068366619010112.
  24. Mukutadze M.A., Khasyanova D.U. Optimization of the supporting surface of a slider bearing according to the load-carrying capacity taking into account the lubricant viscosity depending on pressure and temperature // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Vol. 47. No.4. P. 356-361. DOI 10.3103/S1052618818040106.

Сведения об авторах:

*Кирищичева Виктория Игоревна* – аспирант;

*Мукутадзе Александр Мурманович* – к.т.н., доцент;

*Мукутадзе Мурман Александрович* – д.т.н., профессор.