

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2023-35-30-38>

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ В ПОДШИПНИКЕ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ ПРИ УЧЕТЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ

*Мукутадзе М.А., Киришчиева В.И., Бадахов Г.А., Шведова В.Е.,
Зиновьев Н.В.*

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

Ключевые слова: нестандартная опора скольжения, металлическое покрытие, гидродинамический режим, расплав покрытия, несжимаемый жидкий смазочный материал.

Аннотация. В работе на основе уравнения течения вязкой жидкости, уравнения неразрывности, а также уравнения, описывающего радиус расплавленного контура покрытия вала с учетом скорости диссипации механической энергии, найдено асимптотическое и точное автомодельное решение подшипника с нестандартным опорным профилем, адаптированным к условиям трения в гидродинамическом режиме при смазывании металлическим покрытием поверхности вала с учетом зависимости вязкости от давления. Дана оценка влияния параметров: характеризующих расплав покрытия; адаптированного к условиям трения опорного профиля; зависимость вязкости от давления на нагрузочную способность и силу трения.

STUDY OF WEAR RESISTANCE IN A BEARING WITH A METAL COATING TAKING INTO ACCOUNT THE DEPENDENCE OF VISCOSITY ON PRESSURE

*Mukutadze M.A., Kirishchieva V.I., Badakhov G.A., Shvedova V. E.,
Zinoviev N.V.*

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

Keywords: non-standard sliding support, metal coating, hydrodynamic regime, coating melt, incompressible liquid lubricant.

Abstract. In the work on the basis of the viscous fluid flow equation, the continuity contour of the shaft coating, taking into account the rate of dissipation of mechanical energy, an asymptotic and exact self-similar solution of a bearing with a non-standard support profile adapted to the conditions of friction in the hydrodynamic mode when the shaft surface is lubricated with a metal coating, taking into account the dependence of viscosity on pressure, is found. The influence of the parameters characterizing the melt of the coating adapted to the friction conditions of the support profile, the dependence of viscosity on pressure on the load capacity and friction force is estimated.

Введение

Разработке расчетной модели радиальных подшипников скольжения металлическим покрытием посвящено значительное количество работ [1-12]. Однако процесс смазывания на расплавах покрытий не является самоподдерживающимся процессом. Для обеспечения самоподдерживающегося процесса смазывания подшипников скольжения возникает необходимость не только наличия металлического покрытия на одной из контактных поверхностей, но и постоянной подачи смазочного материала, которое можно обеспечить при постоянной подаче смазочного

материала или пористым покрытием на другой контактной поверхности [13-22], а также нестандартным опорным профилем.

В предлагаемой работе для обеспечения самоподдерживающегося процесса и гидродинамического режима течения приводится расчетная модель радиального подшипника скольжения с нестандартным опорным профилем подшипниковой втулки и металлическим покрытием поверхности вала с учетом зависимости вязкости от давления.

Постановка задачи

Рассмотрим ламинарное течение несжимаемой вязкой жидкости и металлического расплава в рабочем зазоре радиального подшипника с учетом реологических свойств. При этом вал имеет металлическое покрытие, а втулка – нестандартный опорный профиль (рис. 1). Вал вращается со скоростью Ω , а втулка неподвижна.

Уравнения контуров: вала с покрытием C_1 ; вала с расплавленной поверхностью покрытия C_0 ; подшипниковой втулки с нестандартным профилем C_2 ; подшипниковой втулки C_3 представлены:

$$C_1 : r' = r_0, \quad C_0 : r' = r_0 - \lambda' f(\theta), \quad C_2 : r' = r_1(1+H) - a' \sin \omega \theta, \quad C_3 : r' = r_1(1+H), \quad (1)$$

В решении задачи исходными из безразмерного уравнения будут движения несжимаемой жидкости для «тонкого слоя» с учетом (2) и уравнения неразрывности, а также уравнение, описывающее радиус расплавленного контура поверхности вала с учетом скорости диссипации механической энергии и зависимости вязкости от давления $\mu' = \mu_0 e^{\alpha p'}$.

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = e^{-\alpha p} \frac{dp}{d\theta}; \quad \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0; \\ \frac{d\lambda' f(\theta)}{d\theta} = -K e^{-\alpha p} \int_{-\Phi(\theta)}^{h(\theta)} \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 dr, \end{aligned} \quad (2)$$

где $K = \frac{2\mu_0 \Omega (r_0 - \lambda' f(\theta))}{L' \delta}$; $\eta = \frac{e}{\delta}$; $\eta_1 = \frac{a'}{\delta}$; $\Phi(\theta) = r_0 - \lambda' f(\theta)$,

с соответствующими граничными условиями

$$\begin{aligned} u = 0, \quad v = 1 \quad \text{при} \quad r = r_0 - \lambda' f(\theta); \\ u = 0, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 + \eta \cos \theta - \eta_1 \sin \omega \theta = h(\theta); \end{aligned}$$

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

Асимптотическое решение задачи ищем в виде:

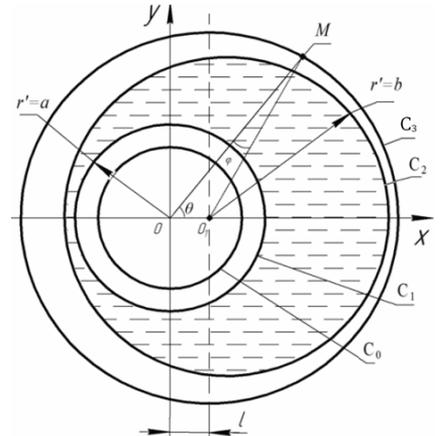


Рис. 1. Расчетная модель

$$\begin{aligned}
 v &= v_0(r, \theta) + Kv_1(r, \theta) + K^2v_2(r, \theta) + \dots; \\
 u &= u_0(r, \theta) + Ku_1(r, \theta) + K^2u_2(r, \theta) + \dots; \\
 \Phi(\theta) &= -K\Phi_1(\theta) - K^2\Phi_2(\theta) - K^3\Phi_3(\theta) - \dots; \\
 z(\theta) &= z_0(\theta) + Kz_1(\theta) + K^2z_2(\theta) + K^3z_3(\theta) \dots
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Учитывая (4) в системе уравнений (2) и (3), получим новые системы уравнений для дальнейшего решения задачи:

– для нулевого приближения:

$$\frac{\partial^2 v_0}{\partial r^2} = \frac{dz_0}{d\theta}, \quad \frac{\partial v_0}{\partial \theta} + \frac{\partial u_0}{\partial r} = 0
 \tag{5}$$

$$v_0 = 0, \quad u_0 = 0, \quad \text{при } r = 1 + \eta \cos \theta - \eta_1 \sin \omega \theta;$$

$$v_0 = 1, \quad u_0 = 0 \quad \text{при } r = r_0 - \lambda' f(\theta) = 0; \quad z_0(0) = z_0(2\pi) = e^{-\alpha \frac{P_g}{P^*}};
 \tag{6}$$

– для первого приближения:

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial r^2} = \frac{dz_1}{d\theta}; \quad \frac{\partial v_1}{\partial \theta} + \frac{\partial u_1}{\partial r} = 0; \quad -z_0 \frac{d\Phi_1(\theta)}{d\theta} = K \int_0^{h(\theta)} \left(\frac{\partial v_0}{\partial r} \right)^2 dr
 \tag{7}$$

$$v_1 = \left(\frac{\partial v_0}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} \cdot \Phi_1(\theta); \quad u_1 = \left(\frac{\partial u_0}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} \cdot \Phi_1(\theta);$$

$$v_1 = 0 \quad u_1 = 0 \quad \text{при } r = h(\theta) + \tilde{\Phi};$$

$$z_1(0) = z_1(2\pi) = 0; \quad \Phi(0) = \Phi(2\pi) = h_0^*.
 \tag{8}$$

Автомодельное решение ищем по известному методу [21-24]. В результате для поля скоростей и давления получаем

$$\tilde{\Psi}'_0(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2}(\xi^2 - \xi), \quad \tilde{v}_0(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} - \left(1 + \frac{\tilde{C}_1}{2} \right) \xi + 1,$$

$$z_0 = -6\alpha \left(\eta \sin \theta + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) - \frac{\eta_1 \theta}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - 1) \right) + e^{-\alpha \frac{P_g}{P^*}}.
 \tag{9}$$

Получим формулу для определения радиуса расплавленного контура вала

$$\Phi_1(\theta) = \frac{1}{\sup_{\theta \in [0; 2\pi]} z_0} \left[\theta - \eta \sin \theta - \frac{\eta_1}{\omega} \cos \omega \theta + h_0^* \right].
 \tag{10}$$

Для первого приближения автомодельное решение ищем по аналогии с решением для нулевого приближения. В результате получим расчётные формулы для поля скоростей и давлений

$$\tilde{\Psi}'''_1(\xi) = \tilde{C}_2, \quad \tilde{v}''_1(\xi) = \tilde{C}_1, \quad \tilde{u}'_1(\xi) - \xi \tilde{v}'_1(\xi) = 0;$$

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

$$z_1 = -6M\alpha \left[\frac{\left(\tilde{\eta} \sin \theta + \frac{\tilde{\eta}_1}{\omega} (\cos \omega\theta - 1) - \frac{\tilde{\eta}_1 \theta}{2\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) \right)}{(1 + \tilde{\Phi})^2} \right]. \quad (11)$$

Применяя известное разложение в ряд Тейлора для функции $e^{-\alpha p}$ и $e^{-\alpha \frac{p_g}{p^*}}$, получим

$$p = \frac{p_g}{p^*} - 6(A + KMB) \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right). \quad (12)$$

Учитывая (9), (11) и (12) в решении поставленной задачи получим зависимости для составляющей вектора поддерживающей силы и силы трения:

$$\begin{aligned} R_x &= p^* r \int_0^{2\pi} p \cos \theta d\theta = 0; \\ R_y &= \frac{6\mu_0 \Omega r_0^3}{\delta^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\ &\times \left[\eta\pi + \frac{\eta_1}{\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) - KM \left(\frac{\tilde{\eta}\pi + \frac{\tilde{\eta}_1}{\pi\omega} (\cos 2\pi\omega - 1)}{(1 + \tilde{\Phi})^2} \right) \right] \\ L_{TP} &= \mu_0 \left(1 - \alpha p + \frac{\alpha^2 p^2}{2} \right) \times \\ &\times \left[-2\pi + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) + K \left(2\pi - \frac{2\eta_1}{\omega} (\cos 2\pi\omega - 1) \right) \cdot \tilde{\Phi} \right]. \quad (13) \end{aligned}$$

Исходя из численного анализа, на рис. 2 приведены графики этих зависимостей.

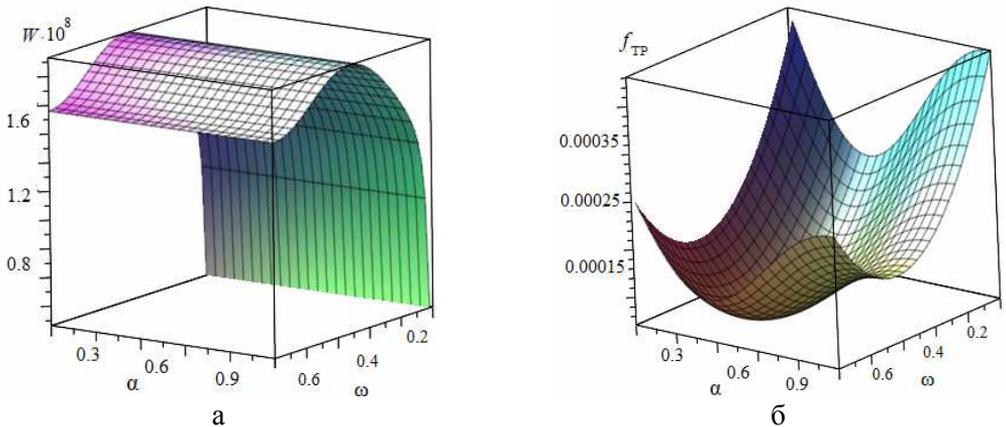


Рис. 2. Влияние параметров ω , характеризующих адаптированный профиль, и α , характеризующих зависимости вязкости, на значение: а) нагрузочной способности и б) силы трения

Заключительным этапом теоретических исследований являлось исследование, численный анализ которого показал, что несущая способность может быть повышена в диапазоне исследования нагрузочно-скоростных режимов на 11-14 % при этом коэффициент трения снижается на 9-12%.

Экспериментальные исследования проводились с целью верификации и подтверждения эффективности полученных теоретических моделей. В первом случае исследовалось металлическое покрытие; во втором – дополнительно нестандартный опорный профиль подшипниковой втулки. Результаты представлены в таблице 1.

Табл. 1. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований

№	Теоретические исследования		Экспериментальные исследования	
	без покрытия	с покрытием	с покрытием	
Коэффициент трения	1	0,0058	0,0033	0,0035
	2	0,0056	0,0032	0,0036
	3	0,0055	0,0031	0,0037
	4	0,0053	0,0034	0,0039
	5	0,0052	0,0036	0,0037

В результате экспериментальных исследований определены триботехнические характеристики, позволяющие судить о наличии продолжительности гидродинамического режима трения и достоверности теоретических исследований.

Разработаны новые многопараметрические выражения для основных рабочих характеристик (несущая способность и сила трения) радиального подшипника скольжения с учетом реологических свойств истинно вязкого смазочного материала и расплава покрытия.

Разработаны расчетные соотношения несущей способности и силы трения, позволяющие регулировать покрытие вала и профиль контура подшипниковой втулки с учетом реологических свойств смазочного материала расплава покрытия.

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, pp. 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 микрополяриной 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, pp. 359-365.
 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: Сборник научных 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 Донского государственного технического университета. – 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 электропроводимости от температуры // Вестник Донского государственного технического университета. – 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: Автореф. 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 Ростовского государственного университета путей сообщения. – 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 Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 1(29). – С. 147-155.
 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.

15. Mukutadze M.A., Vasilenko V.V., Mukutadze A.M., Opatiskikh A.N. Mathematical model of a plain bearer lubricated with molten metal // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, p. 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, pp. 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, pp. 421-430.
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.
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, pp. 356-361.
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, pp. 271-277.
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. 2021, pp. 012005.
22. Кохановский В.А., Мукутадзе М.А. Матричные материалы антифрикционных композитов // Вестник Донского государственного технического университета. – 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, pp. 88-94.
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, pp. 356-361.

References

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, pp. 4644-4650.
2. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Calculation model of a radial sliding bearing with increased bearing capacity, operating on a micropolar lubricant, taking into account its viscosity characteristics from pressure // Engineering bulletin of the Don. 2013, no. 4(27), p. 22.
3. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Calculation model of a thrust sliding bearing with increased bearing capacity, operating on non-Newtonian lubricants with an adapted bearing surface // Engineering bulletin of the Don. 2013, no. 4(27), p. 23.

4. Mukutadze M.A., Fleck B.M., Zadorozhnaya N.S., Polyakov E.V., Mukutadze A.M. Computational model of hydrodynamic lubrication of a nonuniform porous bearing of finite length operating in a stable non-stationary friction mode in the presence of forced lubrication supply // *Engineering bulletin of the Don*. 2013, no. 3(26), p. 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, pp. 359-365.
6. Akhverdiev K.S.O., Erkenov A.Ch., Alexandrova E.E., Mukutadze M.A. Stratified flow of a three-layer lubricant in the gap of a thrust bearing with increased bearing capacity // *Tribology and reliability. Collection of scientific papers of the X International Conference*. – SPb.: SPbSUR, 2010. – P. 15-24.
7. Akhverdiev K.S., Alexandrova E.V., Kruchinina E.E., Mukutadze M.A. Stratified flow of a two-layer lubricant in the gap of a thrust bearing with increased bearing capacity // *Bulletin of the Don State Technical University*. 2010, vol. 10, no. 2(45), pp. 217-223.
8. Akhverdiev K.S.O., Mukutadze M.A., Zamshin V.A., Semenko I.S. Hydrodynamic calculation of a radial sliding bearing operating in a turbulent friction mode with incomplete filling of the gap with viscoelastic lubricant // *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2009, no. 7, pp. 11-17.
9. Akhverdiev K.S., Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Hydrodynamic calculation of a radial bearing in the presence of an electromagnetic field taking into account the dependence of viscosity and electrical conductivity on temperature // *Bulletin of the Don State Technical University*. 2009, vol. 9, no. 3(42), pp. 529-536.
10. Akhverdiev K.S., Vovk A.Yu., Mukutadze M.A., Savenkova M.A. Mathematical model of hydrodynamic lubrication of infinitely wide supports operating in turbulent mode on micropolar lubrication // *Friction and lubrication in machines and mechanisms*. 2007, no. 9, pp. 12-15.
11. Mukutadze M.A. Development of a system of calculation models of sliding bearings based on the development of the hydrodynamic and rheodynamic theory of lubrication: Abstract of diss. ... doct. of tech. sc. – Rostov-on-Don, 2015.
12. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Vovk A.Yu., Semenko I.S. Hydrodynamic calculation of a radial bearing operating in a non-stationary mode on a viscoplastic lubricant with micropolar properties // *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2008, no. 4(32), pp. 131-138.
13. Akhverdiev K.S. Mukutadze M.A., Savenkova M.A., Vovk A.Yu. Mathematical model of hydrodynamic lubrication of a radial bearing operating in non-stationary mode on micropolar lubrication // *Bulletin of the Rostov State Transport University*. 2008, no. 1(29), pp. 147-155.
14. Mukutadze M.A., Khasyanova D.U., Mukutadze A.M. Hydrodynamic model of a wedge-shaped sliding support with a fusible metal coating // *Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2020, no. 4, pp. 51-58.
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*. 2019, p. 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, pp. 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, pp. 421-430.
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.
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, pp. 356-361.
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, pp. 271-277.
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. 2021, pp. 012005.
22. Kohanovsky V.A., Mukutadze M.A. Matrix materials of antifriction composites // Bulletin of the Don State Technical University. 2001, vol. 1, no. 2, pp. 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, pp. 88-94.
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, pp. 356-361.

Мукутадзе Мурман Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Высшая математика»	Mukutadze Murman Aleksandrovich – doctor of technical sciences, professor of the department of higher mathematics
Киришчиева Виктория Игоревна – аспирант	Kirishchieva Victoria Igorevna – graduate student
Бадахов Григорий Андреевич – аспирант	Badakhov Grigory Andreevich – graduate student
Шведова Валентина Евгеньевна – аспирант	Shvedova Valentina Evgenievna – graduate student
Зиновьев Никита Владимирович – аспирант	Zinoviev Nikita Vladimirovich – graduate student
murman1963@yandex.ru	

Received 04.05.2023