

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ С ПОРИСТЫМ ПОКРЫТИЕМ ВАЛА И ЛЕГКОПЛАВКИМ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ ПОВЕРХНОСТИ ПОДШИПНИКОВОЙ ВТУЛКИ

*Василенко В.В., Вернигора Г.Д., Мукутадзе М.А.,
Опатских А.Н., Сухорукова О.Б.*

Ключевые слова: гидродинамика, радиальный подшипник, вязкий несжимаемый жидкий смазочный материал, пористое покрытие, легкоплавкое металлическое покрытие.

Аннотация. В работе на основе уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости для «тонкого слоя», неразрывности, Дарси и выражения для скорости диссипации энергий найдено асимптотическое решение системы дифференциальных уравнений по малому параметру K , обусловленный расплавом для нулевого приближения без учета расплава поверхности подшипниковой втулки, покрытой легкоплавким металлическим расплавом, и для первого приближения с учетом расплава поверхности подшипниковой втулки. На основе точного решения для нулевого и первого приближения авторами определены поле скоростей и давлений в смазочном и пористых слоях, а также функцию $\Phi_1(\theta)$, обусловленное расплавом поверхности подшипниковой втулки. Кроме того определены основные рабочие характеристики: несущая способность и сила трения. А также автором установлено влияние параметров K – обусловленный расплавом легкоплавкого металлического покрытия, $\tilde{H}$ – толщины пористого слоя, η – конструктивного параметра на несущую способность и силу трения

MATHEMATICAL MODEL OF RADIAL BEARING OF SLIDING WITH POROUS SHAFT COATING AND EASY METAL COATING OF BEARING BUSH SURFACE

*Vasilenko V.V., Vernigora G.D., Mukutadze M.A.,
Opatskikh A.N., Sukhorukova O.B.*

Keywords: hydrodynamics, radial bearing, viscous incompressible liquid lubricant, porous coating, low-melting metallic coating.

Abstract. Based on the equation of motion for a viscous incompressible fluid for a “thin layer”, continuity, Darcy and an expression for the energy dissipation rate, an asymptotic solution of a system of differential equations for a small parameter K is found, due to the melt for the zero approximation without taking into account the melt of the surface of a bearing sleeve covered with low-melting metallic melt, and for the first approximation, taking into account the melt surface of the bearing sleeve. Based on the exact solution for the zero and first approximations, the author determined the velocity and pressure fields in the lubricant and porous layers, as well as the function due to the melting of the surface of the bearing sleeve. In addition, the main performance characteristics are determined: bearing capacity and friction force. The author also established the influence of the parameters K - due to the melt of the light-melting metal coating, - the thickness of the porous layer, - the design parameter on the carrying capacity and friction force

Как известно, новые машины проектируются при учете увеличений статических и ударных нагрузок, которые определяется задачей современных инженерных исследований. Одной из важнейших элементов опор скольжения является смазочная среда.

Одним из методов решения эксплуатационных задач, на наш взгляд, является использование в качестве смазочного материала легкоплавкого металлического расплава, покрытое поверхности подшипниковой втулки и пористое покрытие.

Использование расплава в качестве смазочного материала рассматривались в работах [1-6]. Гидродинамическому расчету опор скольжения с учетом демпфирующих свойств и зависимости вязкости от давления, а также с учетом неньютоновских свойств смазочных материалов посвящено большое количество работ [7-14].

Однако в этих работах отсутствует одновременный учет зависимости вязкости применяемого смазочного материала от давления, а также учет проницаемости пористого слоя.

Данная работа посвящена разработке расчетной модели радиального подшипника скольжения при учете расплава поверхности подшипниковой втулки, покрытой легкоплавким металлическим расплавом и пористым покрытием шейки вала.

Постановка задачи

Рассматривается движение смазочного материала в зазоре подшипника, подшипниковая втулка, выполненная из материала с низкой температурой плавления, неподвижна, а вал, покрытый пористым слоем, вращается со скоростью Ω . Все тепло при вращении идет на плавление поверхности материала подшипниковой втулки, покрытое легкоплавким металлическим расплавом.

В полярной координатной системе (рис. 1) уравнение контура вала, уравнение контура вала с пористым покрытием, уравнение поверхности подшипниковой втулки, покрытой легкоплавким металлическим расплавом, запишется в виде:

$$r' = r_0 - \tilde{H}; \quad r' = r_0; \quad r' = r_1(1 + H) + \lambda'f(\theta), \quad (1)$$

где $H = \varepsilon \cos \theta - \frac{1}{2} \varepsilon^2 \sin^2 \theta + \dots$, $\varepsilon = \frac{e}{r_0}$; r_0 – радиус вала; r_1 – радиус подшипниковой втулки, покрытой легкоплавким металлическим расплавом; e – эксцентриситет; ε – относительный эксцентриситет; $\tilde{H}$ – толщина пористого слоя; $\lambda'f(\theta)$ – функция, характеризующая расплав поверхности подшипниковой втулки.

Исходные уравнения и граничные условия

Для описания течения смазочного материала между валом и подшипниковой втулкой воспользуемся безразмерными уравнениями течения несжимаемой жидкости «для тонкого слоя», неразрывности, Дарси, а также формулы для скорости диссипации механической энергии для определения функции $\lambda'f(\theta)$, обусловленной расплавом поверхности подшипниковой втулки

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = \frac{dp}{d\theta}; \quad \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0; \quad \frac{\partial^2 P}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial P}{\partial r^*} + \frac{1}{r^{*2}} \frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} = 0,$$

$$\frac{d\Phi(\theta)}{d\theta} = K \int_{r_0}^{1+\eta \cos \theta + \Phi(\theta)} \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 dr, \quad (2)$$

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

соответствующими граничными условиями:

$$u = 0, v = 0 \text{ при } r = 1 + \eta \cos \theta + \Phi(\theta) \quad u|_{r=0} = \tilde{M} \frac{\partial P}{\partial r^*} \bigg|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}}$$

$$v(0) = 1, p = P \text{ при } r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}, \frac{\partial P}{\partial r^*} \bigg|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}} = 0, p(0) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*} \quad (3)$$

где $\tilde{M} = -\frac{k^* r_0^2}{\tilde{H}\delta^3}$

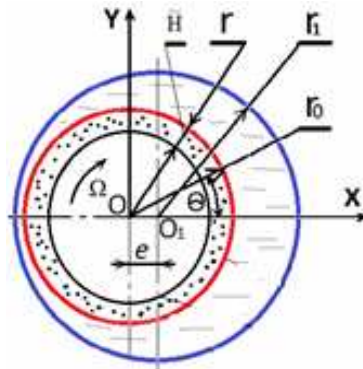


Рис. 1. Рабочая схема

Безразмерные и размерные величины связаны в смазочном слое:

$$v'_r = \Omega \delta u; v'_\theta = \Omega r_0 v, r' = r_0 + \delta r, \delta = r_1 - r_0, p' = p^* p; p^* = \frac{\mu\Omega r_0^2}{\delta^2}. \quad (4)$$

$$\text{В пористом слое: } P' = p^* P, r' = \tilde{H} r^*. \quad (5)$$

Принимая в качестве малого параметра K , обусловленной расплавом. Функцию $\Phi(\theta)$ ищем в виде:

$$\Phi(\theta) = K\Phi_1(\theta) + K^2\Phi_2(\theta) + K^3\Phi_3(\theta) + \dots = H(\theta), \quad (6)$$

Граничные условия компонентов скорости u и v на контуре $r = -\Phi(\theta)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} v(1+\eta \cos \theta+H(\theta)) &=v(1+\eta \cos \theta)+\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)\bigg|_{r=1+\eta \cos \theta} \cdot H(\theta)+\left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2}\right)\bigg|_{r=1+\eta \cos \theta} \cdot H^2(\theta)-\ldots=0; \\ u(1+\eta \cos \theta+H(\theta)) &=u(1+\eta \cos \theta)+\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)\bigg|_{r=1+\eta \cos \theta} \cdot H(\theta)-\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}\right)\bigg|_{r=1+\eta \cos \theta} \cdot H^2(\theta)-\ldots=0. \end{aligned} \quad (7)$$

Асимптотическое решение (2) с учетом (3) и (7):

$$\begin{aligned} v &=v_0(r, \theta)+K v_1(r, \theta)+K^2 v_2(r, \theta)+\ldots; \\ u &=u_0(r, \theta)+K u_1(r, \theta)+K^2 u_2(r, \theta)+\ldots; \\ \Phi(\theta) &=-K \Phi_1(\theta)-K^2 \Phi_2(\theta)-K^3 \Phi_3(\theta)-\ldots; \\ p &=p_0+K p_1(\theta)+K^2 p_2(\theta)+K^3 p_3(\theta) \ldots \end{aligned} \quad (8)$$

Подставляя (8) в (2) с учетом (3), получим:

– для нулевого приближения:

$$\frac{\partial^2 v_0}{\partial r^2}=\frac{d p_0}{d \theta}, \quad \frac{\partial v_0}{\partial \theta}+\frac{\partial u_0}{\partial r}=0 \quad \frac{\partial^2 P_0}{\partial r^{*2}}+\frac{1}{r^*} \frac{\partial P_0}{\partial r^*}+\frac{1}{r^{*2}} \frac{\partial^2 P_0}{\partial \theta^2}=0 \quad (9)$$

с граничными условиями $v_0=1$, при $r_0=0, v_0=0, u_0=0$ при $r=1+\eta \cos \theta$;

$$u_0|_{r=0}=\tilde{M} \frac{\partial P}{\partial r^*}\bigg|_{r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}}, \quad p_0=P_0 \text{ при } r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}, \frac{\partial P_0}{\partial r^*}\bigg|_{r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}}=0, \quad p_0(0)=p_0(2 \pi)=\frac{p_g}{p^*} \quad (10)$$

– для первого приближения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 v_1}{\partial r^2} &=\frac{d p_1}{d \theta}; \quad \frac{\partial v_1}{\partial \theta}+\frac{\partial u_1}{\partial r}=0; \quad \frac{\partial^2 P_1}{\partial r^{*2}}+\frac{1}{r^*} \frac{\partial P_1}{\partial r^*}+\frac{1}{r^{*2}} \frac{\partial^2 P_1}{\partial \theta^2}=0, \\ \frac{d \Phi_1(\theta)}{d \theta} &=K \int_0^{1+\eta \cos \theta}\left(\frac{\partial v_0}{\partial r}\right)^2 d r. \end{aligned} \quad (11)$$

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

$$v_1=0; \quad u_1=0 \quad \text{при } r=1+\eta \cos \theta; \quad u_1|_{r=0}=\tilde{M} \frac{\partial P}{\partial r^*}\bigg|_{r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}}, \quad p_1=P_1 \text{ при}$$

$$r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}, \frac{\partial P_1}{\partial r^*}\bigg|_{r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}}=0 \quad p_1(0)=p_1(2 \pi)=0; \quad K \Phi_1(0)=K \tilde{\alpha}, \quad \Phi(0)=\Phi(2 \pi)=\tilde{\alpha}. \quad (12)$$

Точное решение

Для нулевого приближения ищем:

$$\begin{aligned} v_0 &= \frac{\partial \Psi_0}{\partial r} + V_0(r, \theta); \quad u_0 = -\frac{\partial \Psi_0}{\partial \theta} + U_0(r, \theta); \quad \Psi_0(r, \theta) = \tilde{\Psi}_0(\xi); \\ \xi &= \frac{r}{h(\theta)}; \quad V_0(r, \theta) = \tilde{v}(\xi); \quad U_0(r, \theta) = -\tilde{u}_0(\xi) \cdot h'(\theta); \end{aligned} \quad (13)$$

Подставим (13) в (9) - (10), имеем:

$$\tilde{\Psi}_0''' = \tilde{C}_2; \quad \tilde{v}_0'' = \tilde{C}_1; \quad \tilde{u}_0'(\xi) + \xi \tilde{v}_0'(\xi) = 0; \quad \frac{dp_0}{d\theta} = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(\theta)}. \quad (14)$$

и граничные условия:

$$\begin{aligned} u_0|_{\xi=0} &= \tilde{M} \frac{\partial P}{\partial r^*} \bigg|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}} , \quad \tilde{\Psi}_0'(0) = 0, \quad \tilde{\Psi}_0'(1) = 0, \quad \tilde{u}_0(1) = 0, \quad \tilde{v}_0(1) = 0; \\ \tilde{u}_0(0) &= 0, \quad \tilde{v}_0(0) = 1, \quad \int_0^1 \tilde{v}_0(\xi) d\xi = 0, \\ \frac{\partial P}{\partial r^*} \bigg|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}} - 1} &= 0, \quad p_0 = P_0 \text{ при } r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}} \end{aligned} \quad (15)$$

Интегрируя (14), с учетом (15), имеем:

$$\tilde{\Psi}_0'(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2}(\xi^2 - \xi), \quad \tilde{v}_0(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} - \left(1 + \frac{\tilde{C}_1}{2}\right)\xi + 1, \quad (16)$$

Из $p_0(0) = p_0(2\pi) = \frac{P_g}{p^*}$ получены следующие выражения:

$$\tilde{C}_2 = -\tilde{C}_1 \quad (17)$$

Для гидродинамического давления (14) имеем:

$$p_0 = \tilde{C}_1 \eta \cos \theta + \frac{P_g}{P^*}. \quad (18)$$

С учетом (18) давление в пористом слое ищем:

$$P(r^*, \theta) = R(r^*) \tilde{C}_1 \eta \sin \theta + \frac{P_g}{P^*}, \quad (19)$$

Подставляя (19) в уравнение Дарси для функции $R(r^*)$, получим уравнение:

$$R(r^*) = \frac{r_0 \tilde{H} r^*}{2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2} + \frac{r_0(r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)}{\tilde{H}(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)r^*} \quad (20)$$

С учетом

$$\tilde{M} \frac{\partial P}{\partial r^*} \bigg|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}} = \int_0^1 \tilde{v}(\xi) d\xi \quad (21)$$

для выражения $\tilde{C}_1$ будем иметь:

$$\tilde{C}_1 = \frac{6r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)}{12\tilde{H}^2\tilde{M}(r_0 - \tilde{H}) + r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)} \quad (22)$$

Тогда для p_0 получим:

$$p_0 = \frac{6r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)}{12\tilde{H}^2\tilde{M}(r_0 - \tilde{H}) + r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)} \eta \sin \theta + \frac{p_g}{p^*}, \quad (23)$$

Для $\Phi_1(\theta)$ с учетом $K\Phi_1(0) = K\tilde{\alpha}$, получим:

$$\begin{aligned} \Phi_1(\theta) = & \frac{2}{\sqrt{1-\eta^2}} \arctg \left(\sqrt{\frac{1+\eta}{1-\eta}} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) \left(\frac{\tilde{C}_1^2}{12} \frac{2+\eta^2}{(1-\eta^2)^2} + \frac{\tilde{C}_1^2}{3(1-\eta^2)} + 8 \right) + \\ & + \frac{\eta \tilde{C}_1^2}{1-\eta^2} \frac{\sin \theta}{1-\eta \cos \theta} \left[\frac{1}{8(1-\eta^2)} + \frac{1}{6} \right] + \frac{\tilde{C}_1^2}{24(1-\eta^2)} \frac{\sin \theta}{(1-\eta \cos \theta)^2} + \tilde{\alpha}. \end{aligned} \quad (24)$$

Решение для первого приближения ищем так же, как и для нулевого, в результате имеем:

$$\tilde{\Psi}'_1(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2} (\xi^2 - \xi), \quad \tilde{v}_1(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} - \left(\frac{\tilde{C}_1}{2} + M \right) \xi + M, \quad (25)$$

Из $p_1(0) = p_1(2\pi) = 0$ получим:

$$\tilde{C}_2 = -M \tilde{C}_1, \quad (26)$$

где $M = \sup_{\theta \in [0; 2\pi]} \left. \frac{\partial v_0}{\partial r} \right|_{r=0} \cdot \Phi_1(\theta)$

Окончательно:

$$p_1 = \frac{6Mr_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)}{12\tilde{H}^2\tilde{M}(r_0 - \tilde{H}) + r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)} \eta \sin \theta \quad (27)$$

Результаты исследований

$$R_y = \frac{\mu \Omega r_0^3}{\delta^2} \int_0^{2\pi} \left(p_0 - \frac{P_g}{P^*} + Kp_1 \right) \sin \theta d\theta = \frac{3\mu \Omega r_0^3 \eta}{\delta^2} \frac{Mr_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)}{12\tilde{H}^2\tilde{M}(r_0 - \tilde{H}) + r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)};$$

$$R_x = \frac{\mu \Omega r_0^3}{\delta^2} \int_0^{2\pi} \left(p_0 - \frac{P_g}{P^*} + K(p_1) \right) \cos \theta d\theta = 0.$$

$$L_{\text{тр}} = \frac{\mu \Omega r_0^3}{\delta} \int_0^{2\pi} \left[\left. \frac{\partial v_0}{\partial r} \right|_{r=0} + K \left. \frac{\partial v_1}{\partial r} \right|_{r=0} \right] d\theta = \frac{\mu \Omega r_0^3}{\delta} \left[-2\pi(\tilde{C}_1 + 1)(1 + KM) \right]. \quad (28)$$

По результатам теоретических исследований построены графики, приведенные на рисунке 2.

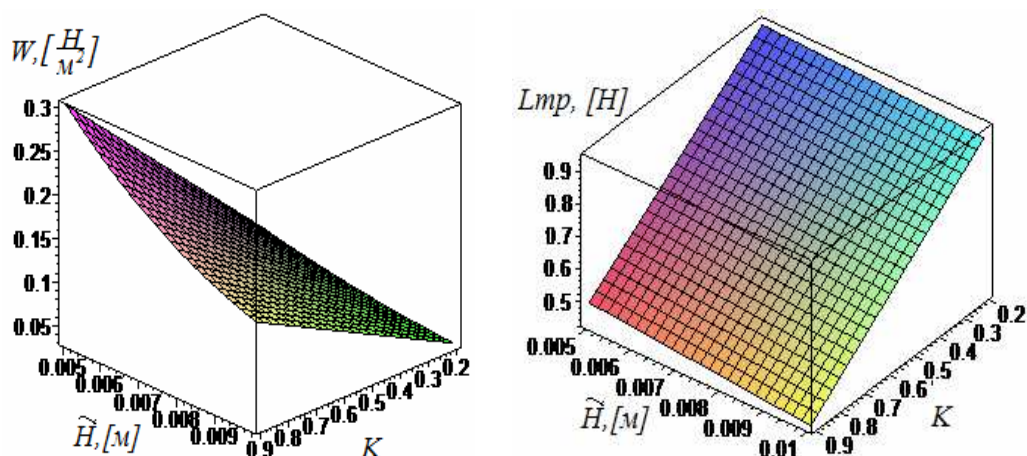


Рис. 2. Графики зависимости несущей способности и силы трения от толщины пористого слоя $\tilde{H}$ и параметра K , обусловленного расплавом

Анализ расчетных моделей и графиков позволил сделать следующие выводы.

1. Показан значительный вклад конструктивного параметра K , обусловленного расплавом. С увеличением конструктивного параметра K (при $K = 0$ и $K \neq 0$) коэффициент трения уменьшается на 19 %, а несущая способность увеличивается на 11 %.

2. Зависимость коэффициента трения от конструктивного параметра K , обусловленного расплавом, близкая линейной в пределах 0,00011–0,0055.

Список литературы

1. Levanov, I., Doykin, A., Zadorozhnaya, E., Novikov, R. Investigation antiwear properties of lubricants with the geo-modifiers of friction, (2017) Tribology in Industry, 39 (3), pp. 302-306.
2. Mukhortov, I.V., Pochkaylo, K.A., Zadorozhnaya, E.A. The Influence of Anti-Wear Additives on the Bearings Hydro-Mechanical Characteristics, (2016) Procedia Engineering, 150, pp. 607-611.
3. Zadorozhnaya, E. The research of non-Newtonian properties and rheology of thin lubricant layers in hydrodynamic journal bearings, (2013) Society of Tribologists and Lubrication Engineers Annual Meeting and Exhibition 2013, pp. 95-97.
4. Vasilenko V.V., Lagunova E.O., Mukutadze M.A., Prihodko V.M. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 19 (2017), pp. 9138-9148.
5. The dynamic monitoring of friction systems. Shapovalov V.V., Boiko N.I., Ozyabkin A.L., Erkenov A.C., Scherbak P.N. International Journal of Applied Engineering Research. 2016. T. 11. № 23. С. 11421-11427.
6. Friction contact control in "wheel - rail" locomotive system. Shapovalov V.V., Kharlamov P.V., Gorin S.L. В сборнике: Procedia Engineering Сер. "International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017" 2017. С. 682-687.

7. Сордже, Ф. Численный метод расчета радиальных подшипников конечной длины, смазываемых феррожидкостью // Проблемы трения. – 1987. – № 1. – С. 72–77.
7. Sorge, F. The numerical method for calculating radial bearings of finite length, lubricated with ferrofluid // Problems of friction. – 1987. – № 1. – P. 72–77.
8. Das, S. On the steady-state performance of misaligned hydrodynamic journal bearing lubricated with micropolar fluids / S. Das, S.K. Guha, A.K. Chattopadhyay // Tribology International. – 2002. – Vol. 35. – P. 201–210.
9. Harnoy, A. Bearing Design in Machinery: Engineering Tribology and Lubrication / A. Harnoy. – New York : Marcel Dekker, 2003. – 440 p.
10. Taylor, R.I. Lubrication, Tribology & Motorsport / R.I. Taylor // SAE Paper 2002-01-3355 Society of Automotive Engineers, Detroit. 2002.
11. Rahmatabadi, A.D. Micropolar lubricant effects on the performance of noncircular lobed bearings / A.D. Rahmatabadi, M. Nekoeimehr, R. Rashidi // Tribology International. – 2010. – Vol. 43. – P. 404–413.
12. Radial slip bearing with a pliable supporting surface. Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Garmonina A.N., Vasilenko V.V. Russian Engineering Research. 2018. T. 38. № 3. С. 166-171.
13. Mukutadze M.A. Radial bearing with porous Elements // Procedia Engineering 150, 2016. – pp. 559-570.
14. Akhverdiev, K.S. Radial bearing with porous barrel / K.S. Akhverdiev, M.A. Mukutadze, A.M. Mukutadze // Proceedings of Academic World : International Conference, 28th of March, 2016, San Francisco, USA. – IRAG Research Forum: Institute of Research and Journals, 2016. – P. 28–31.

Мукутадзе Мурман Александрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Высшая математика», murman1963@yandex.ru	Mukutadze Murman Alexandrovich – Doctor of Technical Sciences, docent, professor of "Higher Mathematics", murman1963@yandex.ru
Опатских Анастасия Николаевна – ассистент кафедры «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог», opatskih@yandex.ru.	Opatskikh Anastasia Nikolaevna – Assistant of the Department "Research, design and construction of railways", patskih@yandex.ru
Сухорукова Ольга Борисовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Высшая математика», bs@rgups.ru.	Sukhorukova Olga Borisovna – Candidate of Technical Sciences, docent, docent of "Higher Mathematics", bs@rgups.ru
Вернигора Галина Дмитриевна – старший преподаватель кафедры «Высшая математика», Galina.vernigora@mail.ru	Galina Dmitrievna Vernigora – Senior Lecturer, of "Higher Mathematics", Galina.vernigora@mail.ru
Василенко Владимир Владимирович – аспирант кафедры «Высшая математика», vvv_voen@rgups.ru	Vasilenko Vladimir Vladimirovich - Postgraduate Student of "Higher Mathematics", vvv_voen@rgups.ru
Ростовский государственный университет путей сообщения, г.Ростов-на-Дону, Россия	Rostov state university of railway engineering, Rostov-on-Don, Russia

Received 25.06.2019