
Расчетная модель радиального подшипника с двухслойным пористым покрытием на поверхности вала, работающего на электропроводящем смазочном материале

А.Н. Гармонина, М.А. Мукутадзе, В.М. Приходько

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: В работе на основе линейных уравнений движения электропроводящего жидкого смазочного материала для случая «тонкого слоя», уравнений неразрывности и Дарси приводится метод точного автомодельного решения задачи гидродинамического расчета радиального подшипника с электропроводящим смазочным материалом. В работе найдено поле скоростей и давлений в смазочном и пористых слоях, в последующем получены аналитические зависимости для основных рабочих характеристик подшипника с двухслойным пористым покрытием на поверхности шейки вала. Также дана оценка влияния электропроводящих свойств смазочного материала, наличия пористого слоя на основные рабочие характеристики подшипника.

Ключевые слова: электропроводящий жидкий смазочный материал, радиальный подшипник, проницаемость пористых слоев, электромагнитное поле.

Введение. Одним из важных конструктивных элементов подшипников жидкостного трения является смазочная среда. В современных машинах широко используются пористые покрытия, наносимые газотермическим напылением, обладающие более высокой маслосемкостью и демпфирующей способностью. В последнее время в качестве смазочной среды используются жидкости, обладающие электропроводящими свойствами. Анализ существующих работ в данном направлении [1–7], в которых сравнивались характеристики подшипников, работающих на электропроводящих смазочных материалах с пористым покрытием на поверхности шейки вала, подтвердил эффект возрастания толщины смазочной пленки по сравнению с подшипниками, работающими на обычных смазочных материалах. А также результаты работ, посвященных расчету подшипников скольжения с пористым покрытием из пористых псевдосплавов, подтверждают, что в приведенных расчетах не учитываются многослойность пористых слоев и электропроводность смазочного материала [8–12].

Постановка задачи. Рассматривается установившееся течение вязкого несжимаемого электропроводящего жидкого смазочного материала в рабочем зазоре бесконечного радиального подшипника скольжения, работающего в режиме гидродинамического смазывания, с двухслойным пористым покрытием на поверхности шейки вала в условиях действия внешнего электромагнитного поля (рис. 1). Вал вращается с угловой скоростью Ω , а подшипниковая втулка неподвижна. Предполагается, что пространство между валом и подшипником полностью заполнено смазочным материалом.

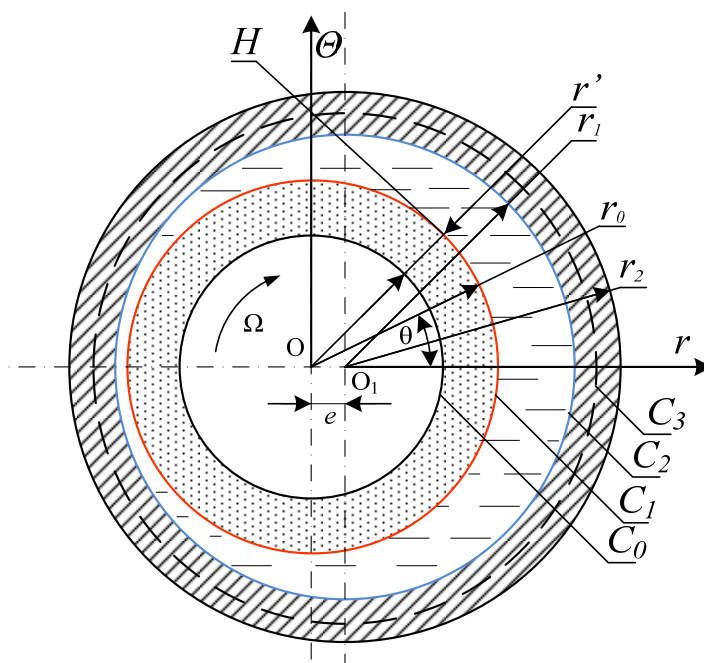


Рисунок 1 – Схема радиального подшипника с пористым покрытием на поверхности шейки вала

В полярной системе координат с полюсом в центре вала уравнение контуров вала с пористыми покрытиями вала C_0, C_1 и C_2 подшипниковой втулки C_3 :

$$C_0 : r' = r_0 - \tilde{H}, C_1 : r' = r_0 - \tilde{H}_1, C_2 : r' = r_0, C_3 : r' = r_1 + e \cos \theta, \quad (1)$$

где r_0 – радиус вала; \tilde{H} – толщина двухслойного пористого покрытия на поверхности шейки вала; e – эксцентриситет; r_1 – радиус подшипниковой

втулки; \tilde{H}_2 – толщина пористого покрытия, прилегающего к поверхности вала; \tilde{H}_1 – толщина пористого слоя, прилегающего к смазочному слою

Исходные уравнения и граничные условия

Будем исходить из уравнений «тонкого слоя» для электропроводящей вязкой несжимаемой жидкости, неразрывности и Дарси при наличии электромагнитного поля:

$$\mu' \frac{\partial^2 v'_\theta}{\partial r'^2} = \frac{1}{r'} \frac{\partial p'}{\partial \theta} - \sigma' B (E_z - B v'_\theta), \frac{\partial v'_{r'}}{\partial r'} + \frac{v'_{r'}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v'_\theta}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial^2 P'}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial P'}{\partial r'} + \frac{1}{r'^2} \frac{\partial^2 P'}{\partial \theta^2} = 0, \quad (2)$$

где $v'_{r'}$, v'_θ – компоненты вектора скорости; P' – гидродинамическое давление в смазочном слое; $\bar{E}' = \{0, 0, E\}$ – вектор напряженности электрического поля; $\bar{B}' = \{0, B, 0\}$ – вектор магнитной индукции; μ' – вязкость смазочного материала; P' – давление в пористом слое, σ' – электропроводность смазочного материала. Предполагается, что величина E' , B' и скорости течения электропроводящей жидкости таковы, что можно пренебречь влиянием потока на электрическое и магнитное поля.

При этом значения $E'(r, 0)$ и $B'(r, 0)$ считаются заданными и удовлетворяющими уравнениям Максвелла:

$$\text{div} \bar{B} = 0, \text{rot} \bar{E} = 0. \quad (3)$$

Данные уравнения удовлетворяются при $E' = \text{const}$, $B' = \frac{B_0}{r}$, $B_0 = \text{const}$.

Система уравнений (2) решаются при следующих граничных условиях:

- в смазочном слое: $v'_{r'} = 0$, $v'_\theta = 0$ при $r' = r_1 + e \cos \theta$; $p'(0) = p'(2\pi) = \frac{p_a}{p^*}$ при

$$r' = r_0 - \tilde{H} \quad (4)$$

- в пористом слое:

$$\frac{\partial P'_2}{\partial r'} = 0 \text{ при } r' = r_0 - \tilde{H}; \quad v'_{r'} = -\frac{k'_1}{\mu'} \frac{\partial P'_1}{\partial r'} \text{ при } r' = r_0; \quad v'_\theta = \Omega r_0 \text{ при } r' = r_0; \quad P'_1 = P' \text{ при}$$

$$r' = r_0; \quad P'_1 = P'_2 \text{ при } r' = r_0 - \tilde{H}_1; \quad \frac{\partial P'_1}{\partial r'} = \frac{k'_2}{k'_1} \frac{\partial P'_2}{\partial r'} \text{ при } r' = r_0 - \tilde{H}_1. \quad (5)$$

Для описания процессов в смазочном и пористых слоях размерные величины связаны со следующими соответствующими безразмерными соотношениями:

$$\begin{aligned} & \text{— в смазочном слое: } v_{r'} = \Omega \delta u; \quad v_{\theta'} = \Omega r_0 v, \quad r' = r_0 + \delta r, \quad \delta = r_1 - r_0, \quad p' = p^* p, \\ & p^* = \frac{\mu \Omega r_0^2}{\delta^2}, \quad \sigma' = \sigma, \quad \mu' = \mu, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{— в пористом слое: } r' = \tilde{H} r^*, \quad p' = p^* P, \quad k'_1 = k_1, \quad k'_2 = k_2, \quad P_1 = p^* P'_1, \quad P_2 = p^* P'_2 \quad (7)$$

С учетом перехода к безразмерным переменным в пористых и смазочном слоях, опуская штрихи, приходим к следующей системе дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = \frac{dp}{d\theta} - A + Nv, \quad \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 P}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial P}{\partial r^*} + \frac{1}{r^{*2}} \frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} = 0, \quad (8)$$

где $A = \frac{\sigma B_0 \delta E'}{\mu r_0^2 \Omega}$ — величина, обусловленная наличием электрического поля,

$$N = \frac{B_0^2 \delta^2 \sigma}{\mu r_0^2} \text{ — число Гартмана}$$

Система уравнений (8) решается при следующих граничных условиях:

— в смазочном слое:

$$v = 0, \quad u = 0 \text{ при } r = 1 + \eta \cos \theta, \quad v|_{r=0} = -1, \quad (9)$$

— в пористом слое:

$$P_1 = P \text{ при } r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}, \quad \left. \frac{\partial P_1}{\partial r^*} \right|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}} - \frac{\tilde{H}_1}{\tilde{H}}} = \frac{k_2}{k_1} \left. \frac{\partial P_2}{\partial r^*} \right|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}} - \frac{\tilde{H}_1}{\tilde{H}}}, \quad \tilde{u}|_{r=0} = \tilde{M}_1 \left. \frac{\partial p_1}{\partial r^*} \right|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}}, \quad \left. \frac{\partial P_2}{\partial r^*} \right|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}} - 1} = 0,$$

$$P_1 = P_2 \Big|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}} - \frac{\tilde{H}_1}{\tilde{H}}} \quad p(0) = p(2\pi) = \frac{p_a}{p^*}, \quad (10)$$

$$\text{где } \tilde{M}_1 = -\frac{k_1 r_0^2}{\tilde{H}_1 \delta^3}, \quad \tilde{M}_2 = -\frac{k_2 r_0^2}{\tilde{H}_2 \delta^3}, \quad \eta = \frac{e}{\delta}.$$

В дальнейшем в правой части второго уравнения системы (8) скорость v заменим ее наибольшим значением (то есть принимаем $v = -1$).

Точное автомодельное решение

Для гидродинамического давления и поля скоростей в смазочном слое точное автомодельное решение будем искать в виде:

$$v = \frac{\partial \psi}{\partial r} + V(r, \theta), u = -\frac{\partial \psi}{\partial \theta} + U(r, \theta), \psi = \tilde{\psi}(\xi), V(r, \theta) = \tilde{v}(\xi), U(r, \theta) = -\tilde{u}(\xi)h'(\theta); \quad (11)$$
$$\xi = \frac{r}{h(\theta)}, \frac{dp}{d\theta} - A - N = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(\theta)}, h(\theta) = 1 + \eta \cos \theta$$

Подставляя (11) в (8) с учетом граничных условий (9)–(10), приходим к системе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\psi'''(\xi) = \tilde{C}_2, \tilde{v}'' = \tilde{C}_1, \tilde{u}' + \xi \tilde{v}' = 0. \quad (12)$$

И граничным условиям:

$$\psi'(0) = 0, \psi'(1) = 0, \tilde{u}(0) = 0, \tilde{u}(1) = 0, \tilde{v}(1) = 0, \tilde{v}(0) = 1, \int_0^1 \tilde{v}(\xi) d\xi = 0. \quad (13)$$

Решение задачи (12) с учетом (13) легко находится непосредственным интегрированием. В результате получим:

$$\psi' = \frac{\tilde{C}_2}{2}(\xi^2 - \xi), \tilde{v}(\xi) = \frac{\tilde{C}_1 \xi^2}{2} - \left(\frac{\tilde{C}_1}{2} + 1\right)\xi + 1. \quad (14)$$

Определение гидродинамического давления

Безразмерное гидродинамическое давление в смазочном слое находим из уравнения:

$$\frac{dp}{d\theta} = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(\theta)} + A + N, \quad (15)$$

Интегрируя уравнение (15), получим:

$$P = (A + N)\theta + \tilde{C}_1(\theta - 2\eta \sin \theta) + \tilde{C}_2(\theta - 3\eta \sin \theta) + \frac{P_a}{p}. \quad (16)$$

Используя граничные условия $p(0) = p(2\pi) = \frac{P_a}{p}$, будем иметь:

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

С учетом (17) для P получим:

$$P = \eta(\tilde{C}_1 + 3(A + N))\sin \theta + \frac{P_a}{p}. \quad (18)$$

С учетом (18) давление фильтрующегося смазочного материала в пористых слоях будем искать в виде:

$$P_i(r^*, \theta) = R_i(r^*) \eta \sin \theta (\tilde{C}_1 + 3(A + N)) + \frac{P_a}{p^*}. \quad (19)$$

Подставляя (19) в уравнение Дарси для определения выражения $R_i(r^*)$, приходим к следующему дифференциальному уравнению и граничным условиям:

$$R_i''(r^*) + \frac{R_i'}{r^*} - \frac{R_i}{r^{*2}} = 0, \quad i = 1, 2. \quad (20)$$

$$R_1\left(\frac{r_0}{\tilde{H}}\right) = 1, R_1\left(\frac{r_0 - \tilde{H}_1}{\tilde{H}}\right) = R_2\left(\frac{r_0 - \tilde{H}_1}{\tilde{H}}\right), R_2\left(\frac{r_0}{\tilde{H}} - 1\right) = 0, R_1'\left(\frac{r_0 - \tilde{H}_1}{\tilde{H}}\right) = \frac{k_2}{k_1} R_2'\left(\frac{r_0 - \tilde{H}_1}{\tilde{H}}\right). \quad (21)$$

Решение задачи (20) с учетом граничных условий (21) находим непосредственным интегрированием, в результате получим:

$$R_1(r^*) = C_1 r^* + \frac{C_2}{r^*}, \quad R_2(r^*) = C_3 r^* + \frac{C_4}{r^*},$$
$$C_1 = \frac{r_0 \tilde{H} (r_0 - \tilde{H}_1)^2 (2r_0^2 - 2r_0(2\tilde{H}_1 + \tilde{H}_2) + \tilde{H}_1^2 + \tilde{H}^2)}{(-2r_0 \tilde{H}_1 + \tilde{H}_1^2) [(2r_0^2 - 2r_0 \tilde{H}_1 + \tilde{H}_1^2) (2r_0^2 - 2r_0(2\tilde{H}_1 + \tilde{H}_2) + \tilde{H}_1^2 + \tilde{H}^2) - \frac{k_2}{k_1} (2r_0 \tilde{H}_2 - 2\tilde{H}_1 \tilde{H}_2 - \tilde{H}_2^2) (-2r_0 \tilde{H}_1 + \tilde{H}_1^2)]} \quad (22)$$
$$C_2 = \frac{r_0}{\tilde{H}} - C_1 \frac{r_0^2}{\tilde{H}^2}.$$

Таким образом, решение задачи будет найдено после определения константы \tilde{C}_1 .

Интегрируя уравнение неразрывности по ξ от 0 до 1, приходим к следующему уравнению:

$$\tilde{M}_1 \frac{\partial P_1}{\partial r^*} \bigg|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}} = \int_0^1 \tilde{v}(\xi) d\xi. \quad (23)$$

Подставляя (14), (19) в (23) с учетом (22) для \tilde{C}_1 получим следующее уравнение:

$$\tilde{M}_1 \left(2C_1 - \frac{\tilde{H}}{r_0} \right) (\tilde{C}_1 + 3(A + N)) = -\frac{\tilde{C}_1}{12} + \frac{1}{2}. \quad (24)$$

Решая уравнение (24) относительно \tilde{C}_1 , будем иметь:

$$\tilde{C}_1 = \frac{6 \left[1 - 6\tilde{M}_1(A + N) \left(2C_1 - \frac{\tilde{H}}{r_0} \right) \right]}{12\tilde{M}_1 \left(2C_1 - \frac{\tilde{H}}{r_0} \right) + 1} \quad (25)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Переходим к определению основных рабочих характеристик радиального подшипника.

С учетом (14), (19), (25) для составляющих вектора поддерживающей силы и силы трения получим выражения:

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{\mu \Omega r_0^3}{\delta^2} \int_0^{2\pi} \left(p_1 - \frac{p_a}{p^*} \right) \cos \theta d\theta = 0, \\ R_y &= \frac{\mu \Omega r_0^3}{\delta^2} \int_0^{2\pi} \left(p_1 - \frac{p_a}{p^*} \right) \sin \theta d\theta = \frac{\mu \Omega r_0^3 \eta \pi}{\delta^2} [\tilde{C}_1 + 3(A + N)], \\ L_{mp} &= \frac{\mu \Omega r_0}{\delta} \left[\int_0^{2\pi} \frac{\psi''(0)}{h_3^2(0)} d\theta - \int_0^{2\pi} \frac{\tilde{v}'(0)}{h_3(0)} d\theta \right] = \frac{\mu \Omega r_0 \pi}{\delta} (A + N - 2). \end{aligned} \quad (26)$$

Для проверочных расчетов на основе полученных теоретических моделей использованы следующие их значения:

$$P_a = 0,08 \div 0,101325 \text{ МПа}; \quad r_0 = 0,019985 \div 0,04933 \text{ м}; \quad \frac{\tilde{H}_2}{\tilde{H}_1} = 0,5 \div 2, \quad \frac{k_2}{k_1} = 0,1 \div 0,9$$

$$\mu = 0,0608 \frac{\text{Нс}}{\text{м}^2}; \quad \Omega = 100 \div 1800 \text{ с}^{-1}; \quad \delta = 0,05 \cdot 10^{-3} \div 0,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad \eta = 0,3 \div 1;$$

$$\tilde{M}_1 = 0,1 \div 3; \quad \tilde{\eta} = 0,01 \div 0,9; \quad A = 1 \div 3; \quad N = 0,1 \div 0,9.$$

Результаты численных расчетов приведены на рисунках 2–6.

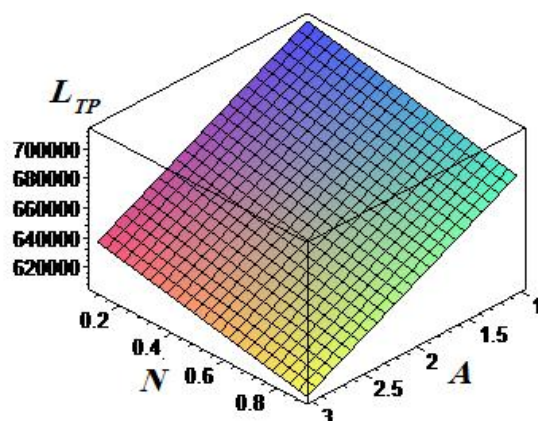


Рисунок 2 – График зависимости силы трения от параметров (N), числа Гартмана и (A), величины, обусловленной наличием электрического поля

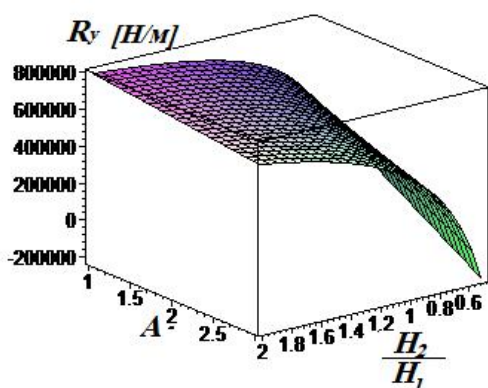


Рисунок 3 – График зависимости несущей способности от параметров (A), величины, обусловленной наличием электрического поля, и отношения толщин пористых слоев (H_2/H_1)

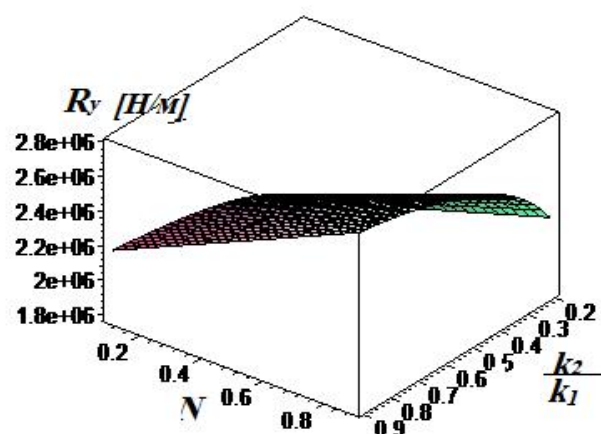


Рисунок 4 – График зависимости несущей способности от параметров (N), числа Гартмана и отношения проницаемости пористых слоев (k_2/k_1)

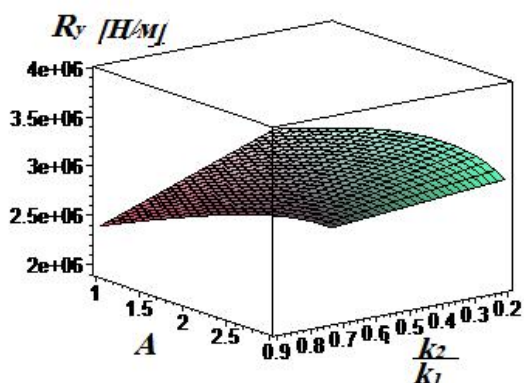


Рисунок 5 – График зависимости несущей способности от параметра (A), величины, обусловленной наличием электрического поля, и отношения проницаемости пористых слоев (k_2/k_1)

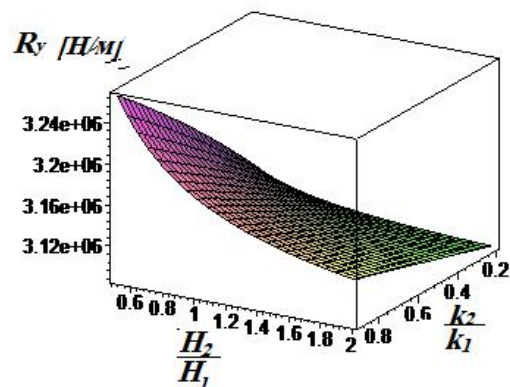


Рисунок 6 – График зависимости несущей способности от отношений толщин пористых слоев (H_2/H_1) и проницаемости пористых слоев (k_2/k_1)

Выводы

Анализ полученных расчетных моделей и графиков позволил сделать ряд следующих выводов:

1. Получена уточненная расчетная модель бесконечного радиального подшипника скольжения, работающего в условиях гидродинамического смазывания на электропроводящем жидком смазочном материале с двухслойным пористым покрытием на поверхности шейки вала.

2. Показан значительный вклад параметров: (A), обусловленного наличием электрического поля, число Гартмана (N) и отношение толщин пористых покрытий на поверхности шейки вала на величину триботехнических параметров рассматриваемого подшипника.

3. Установлено, что значительное повышение несущей способности и уменьшение силы трения происходит с увеличением отношения проницаемости пористых слоев $\left(\frac{k_2}{k_1}\right)$, а также параметров (A) , обусловленного наличием электромагнитного поля, и числа Гартмана (N) .

Литература

1. Лагунова, Е.О., Гармони́на А.Н., Копотун Е.А. Нелинейные эффекты воздействия электропроводящей смазки на шип подшипника, обладающего демпфирующими свойствами // Сборка в машиностроении и приборостроении. – 2016. – № 3. – С. 40–46.
2. Гармони́на, А.Н. Расчетная модель электропроводящей смазки радиального подшипника с демпфирующими свойствами при наличии электромагнитных полей // Вестник РГУПС. – 2015. – № 3. – С. 121–127.
3. Ахвердиев, К.С., Мукутадзе М.А., Колобов И.А., Гармони́на А.Н. Разработка расчетной модели радиального подшипника с учетом зависимости проницаемости, электропроводности и вязкости жидкого смазочного материала от давления // Наукoведение. – 2016. – Т. 8. – № 6. – С. 1–18.
4. Мукутадзе М.А., Флек Б.М., Задорожная Н.С. 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. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1765/.
5. 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 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2201/.

6. Ахвердиев, К.С., Мукутадзе М.А., Флек Б.М., Задорожная Н.С. Расчетная модель составного цилиндрического подшипника, работающего в устойчивом режиме, при неполном заполнении смазочным материалом зазора // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – № 3. – С. 64–69.

7. Ахвердиев, К.С., Мукутадзе М.А., Флек Б.М., Задорожная Н.С. Демпфер с пористым элементом для подшипниковых опор // Трение и износ. – 2016. – Т. –37, № 4. – С. 502–509.

8. 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. – pp. 28–31.

9. Mukutadze, A.M. Coefficient of a rolling motion bearing drive / A.M. Mukutadze // Procedia Engineering. – 2016. – No. 150. – pp. 547–558.

10. Akhverdiev, K.S. Damper with porous anisotropic ring / K.S. Akhverdiev, A.M. Mukutadze // Mechanical Engineering Research. – 2016. – Vol. – 6, №. 2. – pp. 1–10.

11. Akhverdiev, K.S. Research of Drive Factor of Damper with Double-Layer Porous Ring with Compound Feed of Lubricant Material / K.S. Akhverdiev, A.M. Mukutadze // International Journal of Engineering Research. – 2017. – № 1 – pp. 76–85.

12. Mukutadze, M.A. Radial bearings with Porous Elements / M. A. Mukutadze // Procedia Engineering. – 2016. – № 150. – pp. 559–570.

References

1. Lagunova, E.O., Garmonina A.N., Kopotun E.A. Sborka v mashinostroenii i priborostroenii. 2016. № 3. pp. 40–46.

2. Garmonina, A.N. Vestnik RGUPS. 2015. № 3. pp. 121–127.



3. Akhverdiev, K.S., Mukutadze M.A., Kolobov I.A., Garmonina A.N. Naukovedenie. 2016. V. 8. №6. pp.1–18.
4. Mukutadze, M.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1765/.
5. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2201/.
6. Akhverdiev, K.S., Zadorozhnaya N.S., Mukutadze A.M., Flek B.M. Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 2016. № 3. pp. 64–69.
7. Akhverdiev, K.S., Zadorozhnaya N.S., Mukutadze A.M., Flek B.M. Trenie i iznos. 2016. T. 37, №4. Pp.502–509.
8. Akhverdiev, K.S., Mukutadze M.A., Mukutadze A.M. Proceedings of Academic World: International Conference, 28th of March, 2016, San Francisco, USA. IRAG Research Forum: Institute of Research and Journals, 2016. pp. 28–31.
9. Mukutadze, A.M. Procedia Engineering. 2016. №. 150. pp. 547–558.
10. Akhverdiev, K.S., Mukutadze A.M. Mechanical Engineering Research. 2016. Vol.6, №2. pp. 1–10.
11. Akhverdiev, K.S., Mukutadze A.M. International Journal of Engineering Research. 2017. №1, pp. 76–85.
12. Mukutadze, M.A. Procedia Engineering. 2016. №. 150. pp. 559–570.