Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 http://naukovedenie.ru/

Том 9, №2 (2017) http://naukovedenie.ru/vol9-2.php

URL статьи: http://naukovedenie.ru/PDF/99TVN217.pdf

Статья опубликована 11.05.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:
Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Гармонина А.Н., Василенко В.В. Расчетная модель радиального подшипника скольжения с податливой опорной поверхностью с учетом зависимости электропроводности, вязкости смазочного материала и проницаемости пористого покрытия от давления // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017) http://naukovedenie.ru/PDF/99TVN217.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» 2210370/22.12.2016 на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта

УДК 621.891 + 06

Мукутадзе Мурман Александрович
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону[1]
Доцент кафедры «Высшая математика»
Доктор технических наук
E-mail: murman1963@yandex.ru

Лагунова Елена Олеговна
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону
Доцент кафедры «Высшая математика»
Кандидат технических наук
E-mail: lagunova@rambler.ru

Гармонина Анастасия Николаевна
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону
Старший лаборант кафедры «Высшая математика»
E-mail: opatskih@yandex.ru

Василенко Владимир Владимирович
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону
Аспирант кафедры «Высшая математика»
E-mail: vvv_voen@rgups.ru

Расчетная модель радиального подшипника скольжения с податливой опорной поверхностью с учетом зависимости электропроводности, вязкости смазочного материала и проницаемости пористого покрытия от давления

Аннотация. В работе на основе уравнений электропроводящей вязкой несжимаемой жидкости смазочного материала для «тонкого слоя», неразрывности, Дарси и Ламэ при наличии электромагнитного поля сформирована расчетная модель радиального подшипника скольжения с учетом зависимости проницаемости пористого покрытия, электропроводности и

[1] 344038, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2

вязкости жидкого смазочного материала от давления, а также деформации опорной поверхности подшипниковой втулки.

Авторами получены уточненные расчетные модели бесконечного радиального подшипника для поля скоростей и давления в смазочном, упругом слоях и пористом покрытии вала, а также многопараметрические выражения для основных рабочих характеристик подшипника, учитывающие наличие электромагнитных полей и зависимость от давления вязкости, электропроводности смазочного материала и проницаемости пористого покрытия.

В линейной постановке найдено точное автомодельное решение рассматриваемой задачи для гидродинамического давления в смазочном, упругом и пористом слоях в виде разложения в ряд Тейлора.

Получены уточненные расчетные модели позволили установить влияние ряда дополнительных факторов, а также выполнить сравнительный анализ вновь полученных результатов и уже имеющихся, что подтверждает большую приближенность новой модели к реальной практике.

Ключевые слова: электропроводящий смазочный материал; зависимость вязкости; электропроводности и проницаемости пористого покрытия от давления; деформация опорной поверхности; упругогидродинамический параметр

Введение

Возрастание рабочих скоростей и температур в узлах трения машин вращательного действия, а также работа подшипниковых опор в тяжело нагруженных условиях приводят к необходимости использования новых материалов трущихся тел и созданию новых смазочных композиций, обладающих улучшенными трибологическими свойствами.

Значительное количество исследований, посвященное подшипникам скольжения, не учитывается влияние магнитной жидкости деформация опорной поверхности подшипников [1 - 4]. Выполненные на сегодняшний день исследования показывают, что упругодеформируемые подшипники обеспечивают большую устойчивость при работе на высоких скоростях и малых нагрузках, нежели соответствующие жесткие подшипники. Однако теоретическое исследования упругодеформируемых подшипников, работающих на электропроводящем смазочном материале ограничены [5 - 10].

Ключ к решению проблемы лежит в возможном повышении несущей способности и уменьшения силы трения подшипников в результате уточнения их расчетных моделей при линейной постановке задачи. Это основано на формировании расчетных гидродинамических моделей радиальных подшипников бесконечной длины с учетом ряда дополнительных факторов, зависимость вязкости, электропроводности и проницаемости пористого покрытия от давления, а также деформации опорной поверхности подшипниковой втулки для «тонкого слоя», позволяющие приблизить полученные результаты к реальным.

Научная новизна разрабатываемой расчетной модели состоит в том, что впервые обобщены многопараметрические выражения для основных рабочих характеристик радиального подшипника с нежесткой опорной поверхностью с учетом зависимости электропроводности, проницаемости пористого покрытия и вязкости смазочного материала от давления.

Постановка задачи

Рассматривается установившееся движение вязкого несжимаемого электропроводящего жидкого смазочного материала в рабочем зазоре бесконечного радиального подшипника скольжения, с податливой опорной поверхностью, работающего в режиме гидродинамического смазывания, с 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 заполнена смазочным материалом.

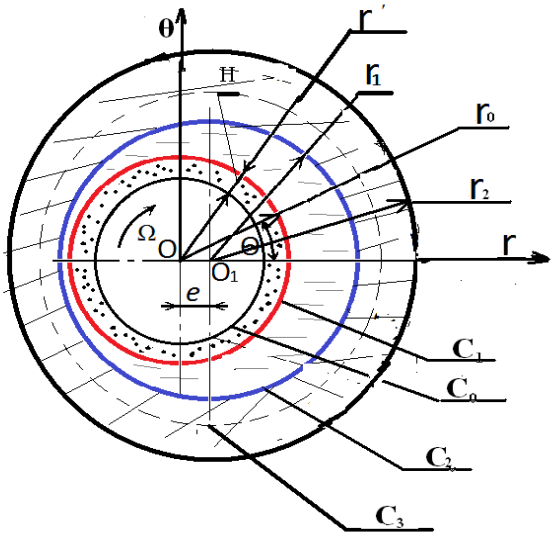

Рисунок 1. *Схема радиального подшипника с пористым покрытием на поверхности вала, деформируемой опорной поверхностью (составлено авторами)*

В полярной системе координат с полюсом в центре вала уравнение контуров вала с пористым слоем C_0 и C_1 подшипниковой втулки C_2 и деформируемой опорной поверхностью C_3 запишем в виде:

$$C_0 : r' = r_0 - H, \quad C_1 : r' = r_0, \quad C_2 : r' = r_1 + e\cos\theta,$$
$$C_3 : r' = r_1 + e\cos\theta + a\varphi(\theta), \quad C_4 : r' = r_2 + e\cos\theta, \qquad (1)$$

где: r_0 - радиус вала; H - толщина пористого слоя; e - эксцентриситет; r_1 - радиус подшипниковой втулки; $a\varphi(\theta)$ - функция, характеризующая деформацию опорной поверхности подшипниковой втулки; $r_2 - r_1$ - толщина упругого слоя

При оценке влияния деформаций опорной поверхности подшипника на его основные рабочие характеристики ограничимся максимальным значением функций $a\varphi(\theta)$, введем обозначение $\max a\varphi(\theta) = a\varphi^*$, $\theta \in [0, 2\pi]$.

Зависимость электропроводности, проницаемости пористого слоя и вязкости жидкого смазочного материала от давления запишем в виде:

$$\mu' = \mu_0 e^{\beta' p'}, \quad \sigma' = \sigma_0 e^{\beta' p'}, \quad k' = k_0 e^{\beta' p'} \qquad (2)$$

Исходные уравнения и граничные условия

Движение электропроводящего жидкого смазочного материала в рабочем зазоре бесконечного радиального подшипника скольжения описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r'^2} = \frac{1}{r'}\frac{1}{\mu'}\frac{\partial p'}{\partial \theta} - \frac{1}{\mu'}\sigma' B(E - v_\theta{}' B) \quad (3)$$

С учетом (2) уравнение (3), а также уравнение неразрывности, Дарси и Ламэ при наличии электромагнитного поля запишется в виде:

$$\frac{\partial v_{r'}}{\partial r'} + \frac{v'_{r'}}{r'} + \frac{1}{r'}\frac{\partial v'_\theta}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 P'}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'}\frac{\partial P'}{\partial r'} + \frac{1}{r'^2}\frac{\partial^2 P'}{\partial \theta^2} = 0,$$

$$\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r'^2} = \frac{1}{r'}\frac{1}{\mu_0 e^{\beta' p'}}\frac{\partial p'}{\partial \theta} - \frac{\sigma_0}{\mu_0} B(E - v_\theta{}' B), \quad (4)$$

$$(\lambda + G)\frac{\partial \varepsilon}{\partial r'} - G\left(\frac{u'_{r'}}{r'^2} + \frac{2}{r'^2}\frac{\partial u'_\theta}{\partial \theta}\right) + G\Delta u'_{r'} = 0, \quad (\lambda + G)\frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} - G\left(\frac{u'_\theta}{r'^2} + \frac{2}{r'^2}\frac{\partial u'_{r'}}{\partial \theta}\right) + G\Delta u'_\theta = 0,$$

где: $v'_{r'}$, v'_θ - компоненты вектора скорости; $\varepsilon = \frac{\partial u'_{r'}}{\partial r'} + \frac{\partial u'_\theta}{\partial \theta}$ - относительное изменение объема; μ_0 - характерная вязкость; σ' - электропроводность; Δ - оператор Лапласа; $u'_{r'}, u'_\theta$ - компоненты вектора перемещений; λ - постоянная Ламэ; G - модуль сдвига; P' - гидродинамическое давление в смазочном слое; $\bar{E}' = \{0, 0, E\}$ - вектор напряженности электрического поля; $\bar{B}' = \{0, B, 0\}$ - вектор магнитной индукции; μ' - коэффициент динамической вязкости; P' - давление в пористом слое. Здесь 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:

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0, \quad \operatorname{rot} \bar{E} = 0. \quad (5)$$

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

Для описания процессов в смазочном, пористом и упругом слое размерные величины связаны с соответствующими безразмерными следующими соотношениями:

- в смазочном слое:

$$v'_{r'} = \Omega \delta u, \; v'_\theta = \Omega r_0 v, \; r' = r_0 + \delta r, \; \delta = r_1 - r_0, \; p' = p^* p, \; p^* = \frac{\mu_0 \Omega r_0{}^2}{\delta^2}, \; k' = k_0 k, \; \mu' = \mu_0 \mu, \quad (6)$$
$$\sigma' = \sigma_0 \sigma, \; r' = r_2 + \delta_2 r, \; \delta_2 = r_2 - r_1, \; \beta = \beta' p^*;$$

- в пористом слое:

$$r' = Hr^*, \quad p' = p^* P; \tag{7}$$

- в упругом слое:

$$r' = r_0 + \delta_1 \tilde{r}, \quad \delta_1 = r_1 - r_0 + a\varphi^*, \quad u'_{r'} = \tilde{u} u_{r'}, \quad u'_\theta = \tilde{u} u_\theta, \tag{8}$$

где $\tilde{u}$ - характерная величина вектора перемещений.

С учетом перехода к безразмерным переменным в пористом, смазочном и упругом слое, опуская штрихи, с точностью до членов $O\left(\frac{r_1 - r_0}{\delta}\right)$ включительно, приходим к следующей системе дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = e^{-\beta p}\frac{dp}{d\theta} - A + Nv, \quad \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 P}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*}\frac{\partial P}{\partial r^*} + \frac{1}{r^{*2}}\frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} = 0,$$
$$\frac{\partial^2 u'_{r'}}{\partial \tilde{r}^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 u'_\theta}{\partial \tilde{r}^2} = 0, \tag{9}$$

где: $A = \frac{\sigma B_0 \delta E'}{\mu r_0^2 \Omega}$ - величина, обусловленная наличием электрического поля, $N = \frac{B_0^2 \delta^2 \sigma}{\mu r_0^2}$ - число Гартмана, и уравнению контуров:

а) в переменных (r, θ) и $(\tilde{r}, \theta)$ уравнения недеформируемого контура подшипника, прилегающего к смазочному слою, можно записать в виде

$$r = \frac{r_1 - r_0}{\delta} + \eta\cos\theta = h_2(\theta), \quad r = \eta_2 \cos\theta = h_4(\theta), \tag{10}$$

где $\eta = \frac{e}{\delta}$;

б) уравнения деформируемого контура и внешнего контура упругого слоя, прилегающего к жесткой поверхности подшипника, соответственно записываются в виде:

$$\tilde{r} = 1 + \eta_1 \cos\theta = h_3(\theta), \quad r = 1 + \eta_2 \cos\theta = h_5(\theta), \tag{11}$$

где $\eta_1 = \frac{e}{\delta_1}$, $\eta_2 = \frac{e}{\delta_2}$;

в) уравнение контуров вала с пористым слоем запишем в виде

$$r^* = \frac{r_0}{H} - 1 = h_0(\theta); \quad r^* = \frac{r_0}{H} = h_1(\theta). \tag{12}$$

Система уравнений (9) решается при следующих граничных условиях:

- в смазочном слое:

$$v = 0, \quad u = 0 \text{ при } \tilde{r} = 1 + \eta_1 \cos\theta, \quad v|_{r=0} = -1; \tag{13}$$

- в пористом слое:

$$p = P\big|_{r^*=\frac{r_0}{H}}, \quad \left.\frac{\partial P}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{H}-1} = 0, \quad u\big|_{r=0} = \tilde{M}\left.\frac{\partial p}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{H}}, \quad p(0) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}, \tag{14}$$

где $\tilde{M} = -\dfrac{kr_0^{\,2}}{H\delta^3}$;

- в упругом слое:

$$M\frac{\partial u_r}{\partial \tilde{r}}\Big|_{\tilde{r}=h_4(\theta)} = -\tilde{p}, \quad u_\theta\Big|_{\tilde{r}=h_5(\theta)} = u_{r'}\Big|_{\tilde{r}=h_5(\theta)} = 0, \tag{15}$$

где: $M = \dfrac{G(1+\alpha)u^*\delta}{(1-\alpha)\mu\Omega r_0^{\,2}\delta_1}$; α - постоянная Мусхелишвили;

$$\tilde{p} = \max p, \quad \theta \in [0,2\pi], \quad p = \eta\left(\tilde{C}_1 + 3(A+N)\right)\left(1 + \beta\frac{p_g}{p^*} - \frac{1}{2}\beta^2\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right)\sin\theta + \frac{p_g}{p^*},$$

p - безразмерное гидродинамическое давление в смазочном слое радиального подшипника с жесткой опорной поверхностью, найденное в работе [7].

Граничные условия (6) означают условия прилипания смазочного материала к поверхности вала и подшипниковой втулки, а также равенство давления атмосферному в начальном и конечном сечениях. Условия (7) показывают непрерывность гидродинамического давления на поверхности раздела между пористым слоем и смазочной пленкой. Кроме того, на этой поверхности нормальная составляющая скорости определяется законом Дарси. На непроницаемой поверхности пористого слоя нормальная составляющая скорости равна нулю.

Для $u'_{r'}$ и u'_θ граничные условия означают равенство нулю касательных и нормальных напряжений на недеформированной упругой поверхности, прилегающей к жесткой опорной поверхности подшипника.

Интегрируя четвертое уравнение системы (9) с учетом граничных условий (15), получим:

$$u_{r'} = -\tilde{p}\tilde{r} + \tilde{p}h_5(\theta). \tag{16}$$

Воспользуемся приближенной формулой

$$\left|h_3(\theta) - h_2(\theta)\right| \approx u_{r'}\big|_{r'=h_4(\theta)}. \tag{17}$$

С учетом (10), (11) и (17), получим

$$\frac{a\varphi^*}{\delta} \approx \frac{\tilde{p}}{M}. \tag{18}$$

Из уравнения (18) с точностью до членов $\left(\dfrac{1}{M^2}\right)$ для $a\varphi^*$ окончательно получим следующее приближенное выражение:

$$a\varphi^* = \frac{\tilde{p}}{M}\left(r_1 - r_0\right). \tag{19}$$

Из формулы (19) следует, что отношение максимального значения деформации к радиальному зазору прямо пропорционально безразмерному максимальному давлению и обратно пропорционально упругогидродинамическому параметру M при $M \to \infty,\ a\varphi^* \to 0$.

Точное автомодельное решение

Гидродинамическое давление и поле скоростей в смазочном слое будем искать в виде:

$$v = \frac{\partial\psi}{\partial r} + V(r,\theta),\quad u = -\frac{\partial\psi}{\partial\theta} + U(r,\theta),\quad \psi = \tilde{\psi}(\xi),\quad v = \tilde{v}(\xi),\quad V(r,\theta) = -\tilde{u}(\xi)h'(\theta),$$
$$\xi = \frac{r}{h_3(\theta)},\quad \frac{dp}{d\theta} - A - N = \frac{\tilde{C}_1}{h_3^2(\theta)} + \frac{\tilde{C}_2}{h_3^3(\theta)},\quad h_3(\theta) = 1 + \eta_1\cos\theta. \tag{20}$$

Подставляя (20) в первые три уравнения системы (9) с учетом граничных условий (13)-(14), придем к системе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\psi'''(\xi) = \tilde{C}_2,\quad \tilde{v}'' = \tilde{C}_1,\quad \tilde{u}' + \xi\tilde{v}' = 0 \tag{21}$$

и граничным условиям:

$$\psi'(0) = 0,\quad \psi'(1) = 0,\quad \tilde{u}(0) = 1,\quad \tilde{u}(1) = 0,\quad \tilde{v}(1) = 0,\quad \tilde{v}(0) = 1. \tag{22}$$

Решение задачи (21) с учетом (22) легко находятся непосредственным интегрированием. В результате получим:

$$\psi' = \frac{\tilde{C}_2}{2}\left(\xi^2 - \xi\right),\quad \tilde{v}(\xi) = \frac{\tilde{C}_1\xi^2}{2} - \left(\frac{\tilde{C}_1}{2} + 1\right)\xi + 1. \tag{23}$$

Определение гидродинамического давления

Безразмерное гидродинамическое давление в деформированном упругом слое находим из уравнения:

$$e^{-\beta p}\frac{dp}{d\theta} = \frac{\tilde{C}_1}{h_3^2(\theta)} + \frac{\tilde{C}_2}{h_3^3(\theta)} + A + N,$$

где

$$h_3(\theta) = 1 + \eta_1\cos\theta = 1 + \frac{e\cos\theta}{r_1 - r_0 + \frac{\tilde{p}}{M}(r_1 - r_0)} = 1 + \tilde{\eta}\cos\theta,\quad \tilde{\eta} = \frac{e}{(r_1 - r_0)\left(1 + \frac{\tilde{p}}{M}\right)}.$$

Введем обозначение:

$$Z = e^{-\beta p} \tag{25}$$

и, продифференцировав обе части равенства по θ, получим:

$$\frac{dZ}{d\theta} = -\beta e^{-\beta p}\frac{dp}{d\theta}. \tag{26}$$

С учетом (26) уравнение (24) запишется в виде:

$$\frac{dZ}{d\theta} = -\beta(\tilde{C}_1(1-2\tilde{\eta}\cos\theta) + \tilde{C}_2(1-3\tilde{\eta}\cos\theta) + A + N). \tag{27}$$

Интегрируя уравнение (27) с точностью до членов второго порядка малости $\theta\left(\eta^2\right)$, получим:

$$Z = -\beta(\tilde{C}_1(\theta - 2\tilde{\eta}\cos\theta) + \tilde{C}_2(1-3\tilde{\eta}\sin\theta) + (A+N)\theta) + e^{-\beta\frac{p_g}{p^*}}. \tag{28}$$

Используя граничные условия $Z(0) = Z(2\pi) = e^{-\beta\frac{p_g}{p^*}}$, получим:

$$\tilde{C}_2 = -\tilde{C}_1 - A - N. \tag{29}$$

С учетом (29) уравнение (28) примет следующий вид:

$$Z = -\beta\eta(\tilde{C}_1 + 3(A+N))\sin\theta + e^{-\beta\frac{p_g}{p^*}} \tag{30}$$

или

$$e^{-\beta p} - e^{-\beta\frac{p_g}{p^*}} = -\beta\tilde{\eta}(\tilde{C}_1 + 3(A+N))\sin\theta. \tag{31}$$

Выполнив аналитические разложения функций $e^{-\beta p}$ и $e^{-\beta\frac{p_g}{p^*}}$ в ряд Тейлора с точностью до членов $O\left(\beta^2\right)$ включительно, приходим к алгебраическому уравнению второго порядка для определения безразмерного гидродинамического давления:

$$1 - \beta p + \frac{\beta^2 p^2}{2} - \left(1 - \beta\frac{p_g}{p^*} + \frac{\beta^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right) + \beta\tilde{\eta}\left[\tilde{C}_1 + 3(A+N)\right]\sin\theta = 0. \tag{32}$$

Решая уравнение (32) с точностью до членов $O\left(\eta^2\right)$, $O\left(\beta^3\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right)$ для p, получим следующее выражение:

$$p = \frac{p_g}{p^*} + \left[1 + \beta\frac{p_g}{p^*} - \frac{\beta^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right]\tilde{\eta}\left[\tilde{C}_1 + 3(A+N)\right]\sin\theta. \tag{33}$$

С учетом (33) давление фильтрующегося смазочного материала в пористом слое будем искать в виде:

$$P(r^*,\theta) = R(r^*)\tilde{\eta}\left(\tilde{C}_1 + 3(A+N)\right)\left(1 + \beta\frac{p_g}{p^*} + \frac{\beta^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right)\sin\theta + \frac{p_g}{p^*}. \tag{34}$$

Подставляя (34) в уравнение Дарси системы (9) для определения функции $R\left(r^*\right)$, приходим к следующему дифференциальному уравнению:

$$R''(r^*)+\frac{R'}{r^*}-\frac{R}{r^{*2}}=0 \tag{35}$$

и граничным условиям:

$$\left.\frac{dR}{dr^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{H}-1}=0, \quad R\left(\frac{r_0}{H}\right)=1. \tag{36}$$

Непосредственное интегрирование уравнения (35) с учетом (36) для функции $R\left(r^*\right)$ позволяет получить выражение:

$$R(r^*)=\frac{r_0Hr^*}{2r_0^2-2Hr_0+H^2}+\frac{r_0(r_0^2-2Hr_0+H^2)}{H(2r_0^2-2Hr_0+H^2)r^*}. \tag{37}$$

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:

$$M\left.\frac{\partial P}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{H}}=\int_0^1\tilde{v}(\xi)d\xi=\left(-\frac{\hat{C}_1}{12}+\frac{1}{2}\right)\tilde{\eta}\sin\theta; \tag{38}$$

$$\tilde{M}\left(\tilde{C}_1+3(A+N)\right)\left(1+\beta\frac{p_g}{p^*}-\frac{\beta^2}{2}\left(\frac{p_g}{p^*}\right)^2\right)\frac{2H^2r_0-H^3}{r_0(2r_0^2-2Hr_0+H^2)}=-\frac{\tilde{C}_1}{12}+\frac{1}{2}. \tag{39}$$

Для $\tilde{C}_1$ получим следующее выражение:

$$\tilde{C}_1=\frac{6\left[-6\tilde{M}H^2(A+N)\left(1+\beta\frac{P_g}{p^*}-\frac{\beta^2}{2}\left(\frac{P_g}{p^*}\right)^2\right)\left(2r_0-H\right)+r_0\left(2r_0^2-2Hr_0+H^2\right)\right]}{12\tilde{M}H^2\left(1+\beta\frac{P_g}{p^*}-\frac{\beta^2}{2}\left(\frac{P_g}{p^*}\right)^2\right)\left(2r_0-H\right)+r_0\left(2r_0^2-2Hr_0+H^2\right)}. \tag{40}$$

Определение несущей способности и силы трения

С учетом (23), (33) и (40) для составляющей вектора поддерживающей силы и силы трения получим выражения:

$$R_x=\frac{\mu_0\Omega r_0^3}{\delta^2}\int_0^{2\pi}\left(p-\frac{p_g}{p^*}\right)\cos\theta d\theta=0;$$

$$R_y=\frac{\mu_0\Omega r_0^3}{\delta^2}\int_0^{2\pi}\left(p-\frac{p_g}{p^*}\right)\sin\theta d\theta=\frac{\mu_0\Omega r_0^3\tilde{\eta}\pi}{\delta^2}(\tilde{C}_1+3(A+N))\left(1+\beta\frac{P_g}{p^*}-\frac{\beta^2}{2}\left(\frac{P_g}{p^*}\right)^2\right); \tag{41}$$

$$L_{\text{тр}}=-\frac{\Omega r_0}{\delta}\left[\int_0^{2\pi}\mu\frac{\psi''(\theta)}{h_3^3(\theta)}d\theta-\int_0^{2\pi}\mu\frac{\tilde{v}'(0)}{h_3(\theta)}d\theta\right]=\frac{\mu_0\Omega r_0\pi}{\delta}\left(1+\beta p-\frac{\beta^2}{2}p^2\right)(A+N-2).$$

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

P_g =0,1÷0,2 МПа; $r_0 = 0{,}019985 \div 0{,}04933$ м; $\mu_0 = 0{,}00595 \frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}$;

Ω =100÷1800 с$^{-1}$; $\delta = 0{,}05\cdot10^{-3} \div 0{,}07\cdot10^{-3}$ м; $\eta = 0{,}3 \div 1$; $\tilde{M} = 0{,}1 \div 3$;

$\tilde{\eta} = 0{,}01 \div 0{,}9$; $M = 0 \div 200$; $H = 0{,}0055$ м; $A = 1 \div 3$; $N = 0{,}1 \div 0{,}9$.

Результаты численных расчетов приведены на рисунках 2-6.

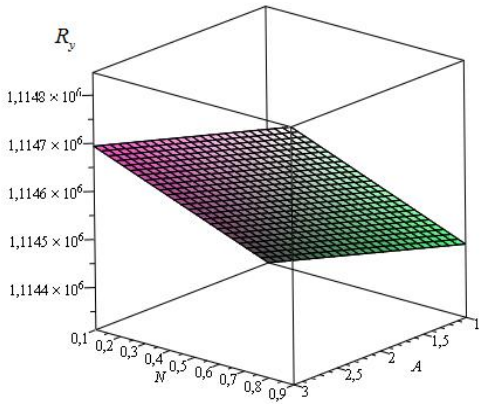

Рисунок 2. *Зависимость составляющей вектора поддерживающей силы от параметра A, обусловленного наличием электрического поля, и от числа Гартмана N (составлено авторами)*

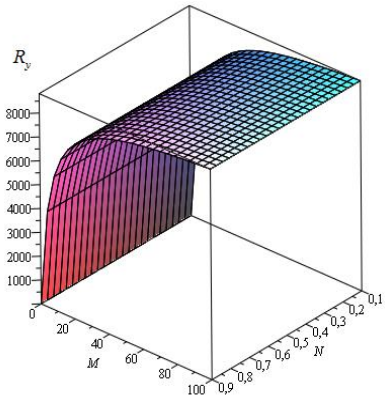

Рисунок 3. *Зависимость составляющей вектора поддерживающей силы* R_y *от числа Гартмана N и от упругогидродинамического параметра M (составлено авторами)*

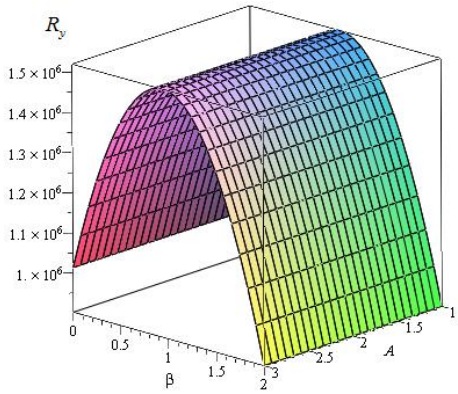

Рисунок 4. *Зависимость составляющей вектора поддерживающей силы* R_y *от параметра A, обусловленного наличием электрического поля, и от параметра* β*, характеризующего зависимость вязкости от давления (составлено авторами)*

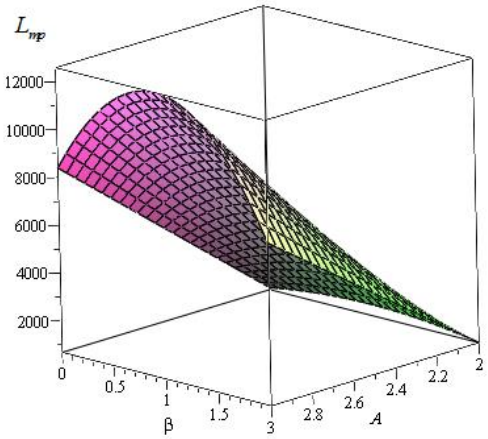

Рисунок 5. *Зависимость силы трения* $L_{тр}$ *от параметра A, обусловленного наличием электрического поля, и от параметра β, характеризующего зависимость вязкости от давления (составлено авторами)*

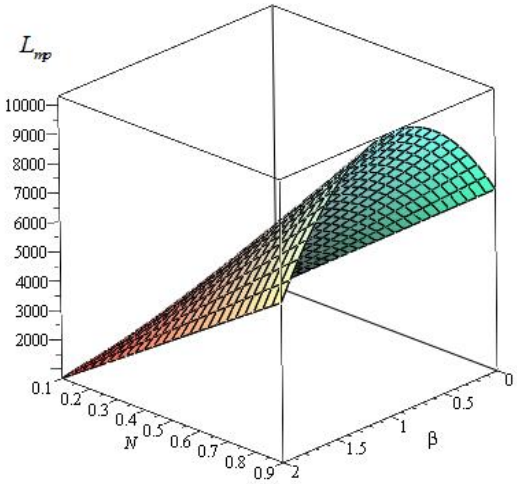

Рисунок 6. *Зависимость силы трения* $L_{тр}$ *от числа Гартмана N и от параметра β, характеризующего зависимость вязкости от давления (составлено авторами)*

Выводы

Анализ полученных расчетных моделей и графиков позволяет сделать ряд следующих выводов.

1. Анализ теоретически полученных зависимостей позволил установить незначительный рост вертикальной составляющей вектора R_y поддерживающей силы при уменьшении числа Гартмана *N*.
2. Величины характеристики электрического поля практически не оказывают влияния на составляющую вектора поддерживающей силы в исследованном диапазоне параметров $\tilde{\eta}$ и *N*.
3. Существенный рост вектора R_y $(\approx \text{в } 4{,}5 \text{ раза})$ наблюдается при увеличении $\tilde{\eta}$ как при варьировании величины числа Гартмана (*N*), так и величины *A* - обусловленного наличием электрического поля.

4. Ростом упругогидродинамического параметра (*M*) (до 50) величина вектора R_y увеличивается, а затем стабилизируется при больших значениях *M*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лагунова, Е.О. Нелинейные эффекты воздействия электропроводящей смазки на шип подшипника, обладающего демпфирующими свойствами / Е.О. Лагунова, А.Н. Гармонина, Е.А. Копотун // Сборка в машиностроении и приборостроении. - 2016. - №3. - С. 40-46.
2. Гармонина, А.Н. Расчетная модель электропроводящей смазки радиального подшипника с демпфирующими свойствами при наличии электромагнитных полей / А.Н. Гармонина // Вестник РГУПС. - 2015. - №3. - С. 121-127.
3. Ахвердиев, К.С. Гидродинамический расчёт радиального подшипника при наличии электромагнитного поля с учетом зависимости вязкости и электропроводимости от температуры / К.С. Ахвердиев, Е.О. Лагунова, М.А. Мукутадзе // Вестник ДГТУ. - 2009. - Т. 9, №3 (42). - С. 529-536.
4. Ахвердиев, К.С. Гидродинамический расчет радиального подшипника при наличии электромагнитного поля с учетом нелинейных факторов / К.С. Ахвердиев, Е.О. Лагунова // Вестник РГУПС. - 2008. - №4. - С. 138-144.
5. 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.
6. Лагунова, Е.О. Математическая модель прогнозирования влияния напряженности электрического поля и магнитной индукции на рабочие характеристики и на устойчивость работы упорного подшипника, работающего на электропроводящей смазке / Е.О. Лагунова // Вестник РГУПС. - 2009. - №1 (33). - С. 143-148.
7. Разработка расчетной модели радиального подшипника с учетом зависимости проницаемости, электропроводности и вязкости жидкого смазочного материала от давления / К.С. Ахвердиев, М.А. Мукутадзе, И.А. Колобов, А.Н. Гармонина // Интернет-журнал «Науковедение». - 2016. - Т. 8, №6. - Режим доступа: http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN616.pdf.
8. Mukutadze, A.M. Coefficient of a rolling motion bearing drive / A.M. Mukutadze // Procedia Engineering. - 2016. - No. 150. - P. 547-558.
9. Akhverdiev, K.S. Damper with porous anisotropic ring / K.S. Akhverdiev, A.M. Mukutadze // Mechanical Engineering Research. - 2016. - Vol. 6, No. 2. - P. 1-10.
10. Akhverdiev, K.S. Research of Drive Factor of Damper with Doble-Layer Porous Ringwith Compound Feed of Lubricant Material // K.S. Akhverdiev, A.M. Mukutadze // International Journal of Engineering Research. - 2017. - No. 1 - P. 76-85.
11. Mukutadze, M.A. Radial bearings with Porous Elements / M.A. Mukutadze // Procedia Engineering. - 2016. - No. 150. - P. 559-570.

Mukutadze Murman Aleksandrovich
Rostov state transport university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: murman1963@yandex.ru

Lagunova Elena Olegovna
Rostov state transport university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: lagunova@rambler.ru

Garmonina Anastasia Nikolaevna
Rostov state transport university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: opatskih@yandex.ru

Vasilenko Vladimir Vladimirovich
Rostov state transport university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: vvv_voen@rgups.ru

The estimated model of the radial sliding bearing with a pliable support surface based on the dependence of electrical conductivity of the lubricant viscosity and permeability of porous coating from the pressure

Abstract. On the basis of the equations of a viscous incompressible electrically conducting fluid lubricant for "a thin layer", of the continuity, Darcy and Lamey in the presence of an electromagnetic field generated analysis model of the radial sliding bearing taking into account the dependence of the permeability of a porous coating, the electrical conductivity and viscosity of liquid lubricant from the pressure and deformation of the supporting surface of the bearing sleeve.

The authors obtained the refined analysis model an infinite radial bearing for the velocity field and pressure in the lubricant, the elastic layers and the porous surface of the shaft, and multi-parameter expressions for the main performance characteristics of the bearing, taking into account the presence of electromagnetic fields and the pressure dependence of viscosity, electrical conductivity of the lubricant and the permeability of the porous coating.

In a linear formulation of exact self-similar solution of the considered problem for the hydrodynamic pressure in the lubricating, resilient and porous layers in the form of the decomposition in a Taylor series.

Obtained specified the design of the model allows to determine the influence of several additional factors, and also to perform a comparative analysis of the newly obtained results and existing, which confirms the great proximity of the new model to real practice.

Keywords: electrically conductive lubricant; viscosity; conductivity and permeability of porous coating from the pressure; the deformation of the support surface; elastohydrodynamic option

REFERENCES

1 Lagunova, E.O. Nonlinear effects of conductive grease on the dowel bearing having damping properties / E.O. Lagunova, A.N. Harmonina, E.A. Kopotun // Assembly in mechanical engineering and instrument making. - 2016. - No. 3. - P. 40-46.

2 Garmonina, A.N. A computational model of conductive grease radial sub-release bearing with damping properties in the presence of electromagnetic fields / A.N. Garmonina // Vestnik RGUPS. - 2015. - №3. - P. 121-127.

3 Akhverdiev, K.S. Hydrodynamic calculation of the radial bearing in the presence of the electromagnetic field, taking into account the dependence of viscosity and conductivity on temperature / K.S. Akhverdiev, E.O. Lagunova, M.A. Mukutadze // Vestnik DGTU. - 2009. - Vol. 9, No. 3(42). - P. 529-536.

4 Akhverdiev, K.S. Hydrodynamic calculation of the radial bearing in the presence of electromagnetic field with nonlinear factors / K.S. Akhverdiev, E.O. Lagunova // Vestnik RGUPS. - 2008. - No. 4. - P. 138-144.

5 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.

6 Lagunova, E.O. A Mathematical model to predict the influence of the electric field and magnetic induction on the performance and stability of operation of the thrust bearing operating on a conductive grease / E.O. Lagunova // Vestnik RGUPS. - 2009. - No. 1(33). - P. 143-148.

7 Development of design models of the radial bearing is based on the dependence of the permeability, conductivity and viscosity of liquid lubricant from the pressure / K.S. Akhverdiev, M.A. Mukutadze, I.A. Kolobov, A.N. Harmonina // Internet-journal “Naukovedenie”. - 2016. - Vol. 8, No. 6. - Mode of access: http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN616.pdf.

8 Mukutadze, A.M. Coefficient of a rolling motion bearing drive / A.M. Mukutadze // Procedia Engineering. - 2016. - No. 150. - P. 547-558.

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

10 Akhverdiev, K.S. Research of Drive Factor of Damper with Doble-Layer Porous Ringwith Compound Feed of Lubricant Material // K.S. Akhverdiev, A.M. Mukutadze // International Journal of Engineering Research. - 2017. - No. 1 - P. 76-85.

11 Mukutadze, M.A. Radial bearings with Porous Elements / M.A. Mukutadze // Procedia Engineering. - 2016. - No. 150. - P. 559-570.