Инженерный вестник Дона, №2 ч.2 (2015)
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/ 2982

Метод гидродинамического расчета радиального подшипника с повышенной несущей способностью со слоистым электропроводящим смазочным материалом

К.С. Ахвердиев[1], С.В. Митрофанов[1], Б.Е. Копотун[2]

[1]Ростовский государственный университет путей сообщения
[2]Южное управление государственного железнодорожного надзора Федеральной службы по надзору в сфере транспорта

Аннотация: В работе с учетом особенностей взаимодействия электропроводящего слоистого смазочного материала с твердой опорной поверхностью дается метод расчета радиального подшипника скольжения с повышенной несущей способностью. Здесь на основе уравнений Навье-Стокса, уравнения неразрывности и уравнения Ламе для случая «тонкого слоя» дается метод формирования точного автомодельного решения рассматриваемой задачи. В результате найдено поле скоростей и давлений в смазочном слое и в последующем найдены аналитические выражения для основных рабочих характеристик подшипника. Дана оценка комплекса параметров, характеризующих разные аспекты функционирования трибосистемы, таких как: параметра, характеризующего слоистый характер смазочного материала; адаптированный профиль опорной поверхности; электропроводящие свойства смазочного материала; напряженность электрического поля и магнитная индукция на основные рабочие характеристики радиального подшипника.

Ключевые слова: электропроводящий смазочный материал, радиальный подшипник, несущая способность, стратифицированное течение.

Введение. В последнее время проведены многочисленные экспериментальные исследования, в которых сравнивались характеристики подшипников скольжения, работающие на ньютоновских и неньютоновских смазках, в частности на электропроводящих смазках. Эти результаты подтвердили эффект возрастания толщины пленок при использовании смазок, обладающих электропроводящими свойствами.

Однако, несмотря на очевидную актуальность вопроса в настоящее время обширных данных и применений электропроводящих смазочных композиций в узлах трения разного рода машин и механизмов отсутствуют.

Всестороннее изучение особенностей гидродинамических течений в смазочном слое, влияющих на работоспособность узлов трения, при достаточно полном учете реологических свойств смазки, в частности электропроводящих свойств смазки с учетом особенностей взаимодействия смазки с твердой опорной поверхностью подшипника, в результате которого образуются структурированные граничные слои, является одной из актуальных задач трибологии.

Анализ существующих работ в данном направлении [1-6] показывает, что полученные здесь результаты не позволяют более корректно аналитически прогнозировать вязкости структурированных граничных слоев достаточно малой толщины, имеющими вблизи поверхности свойства близкие к свойствам твердого тела. Максимальное расстояние, на котором обнаруживается структурирующее воздействие поверхности достигает не более 2-3 мкм. Влияние структурированных граничных слоев существенно отражается на условиях трения и на механизме изменения условий трения [3]. Ключевую роль здесь играет изменение реологических свойств смазки в зависимости от толщины слоя и от индивидуальных свойств смазочного материала. В существующих вышеуказанных работах, в основном, влияние особенностей воздействия жидкости с твердой поверхностью проводится на основе реологических моделей микрополярной и вязкоупругой жидкости. Здесь не учитывается слоистый характер течения жидкости в смазочном слое в виду разнообразия структуры граничных слоев и в связи с этим используются приближенные эмпирические зависимости для определения эффективной вязкости граничных слоев. В расчетных моделях, представленных в работах [4-10], хотя учитывается слоистый характер течения смазочного материала в зазоре радиального подшипника, однако полученный здесь результат не позволяет оценить влияние на устойчивый режим работы комплекса параметров, характеризующих разные аспекты функционирования трибосистем, таких как: адаптированный профиль опорной поверхности подшипника; деформацию опорной поверхности подшипника; электропроводящие свойства смазочного материала; напряженность электрического поля; магнитную индукцию. Разработка расчетной модели подшипников скольжения, работающих на слоистых смазочных материалах с учетом вышеуказанных факторов, является одной из основных задач современной трибологии. Основное содержание данной работы находится в русле данного актуального направления.

Постановка задачи. Рассматривается установившееся течение смазочной электропроводящей смазки в зазоре радиального подшипника скольжения с адаптированным профилем опорной поверхности. Предполагается, что подшипник неподвижен, а шип вращается с угловой скоростью Ω (рис. 1).

В полярной системе координат (r; θ) с началом в центре шипа уравнение контура шипа и границ раздела слоев и адаптированного контура опорной поверхности можно записать в виде (рис. 1)

$$C_0: r' = r_0;\ C_1: r' = r_0 + \delta\alpha + \alpha e\cos\theta - \alpha A\sin\omega\theta;$$

$$C_2: r' = r_2 + e\cos\theta - A\sin\omega\theta,$$

(1)

где $\alpha \in [0,\ 1]$, $\delta = r_2 - r_0$, ω в дальнейшем определяется из условия максимальной несущей способности подшипника.

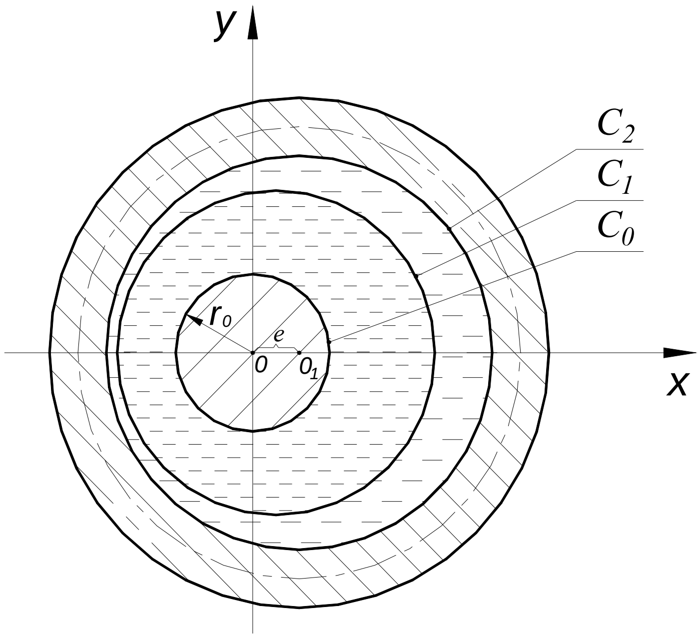


Рис. 1. – Схематическое изображение электропроводящей двухслойной смазки в зазоре радиального подшипника скольжения:
C_0 – контур шипа; C_1 – граница раздела 2-х смазочных слоев; C_2 – внутренний контур подшипника, прилегающий к смазочному слою

Решение задачи. Будем исходить из уравнений «тонкого слоя» для вязкой несжимаемой жидкости при наличии электромагнитных полей. Эти уравнения при пренебрежении эффекта Холла и в случае малых значений магнитного числа Рейнольдса имеют следующий вид

$$\frac{\partial p_i'}{\partial r'}=0, \qquad \mu_i\frac{\partial \upsilon_{\theta i}'}{\partial r'^2}=\frac{1}{r'}\frac{\partial p_i'}{\partial\theta}-\delta B'(E'-\upsilon_{\theta i}'B'), \qquad \frac{\partial \upsilon_{ri}'}{\partial r'}+\frac{\upsilon_{r'i}'}{r'}+\frac{1}{r'}\frac{\partial \upsilon_{\theta i}'}{\partial\theta}=0, \quad i=1,2 \tag{2}$$

Здесь $\upsilon_{r_i'}', \upsilon_{\theta_i}'$ – компоненты вектора скорости в смазочных слоях; p_i' гидродинамическое давление в смазочных слоях; $\vec{E}=\{0,0,E'\}$ – вектор напряженности электрического поля; $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции; μ_i – коэффициент динамической вязкости; r', θ – полярные координаты.

Здесь предполагается, что величины $\vec{E}$ и $\vec{B}$ и скорость течения жидкости таковы, что можно пренебречь влиянием потока жидкости на приложенные электрические и магнитные поля (это предположение подразумевает малость магнитного числа Рейнольдса). При этом функции E' и B' считаем заданными, удовлетворяющие уравнениям Максвелла

$$div\vec{B}=0,\ rot\vec{E}=0.$$

Эти уравнения удовлетворяются при

$$E'=const,\ B'=\frac{c}{r'},\ c=const.$$

Осуществим переход к безразмерным переменным по формулам

$$r'=r_0+\delta r,\quad \upsilon'_{\theta i}=\Omega r_0\upsilon_i,\quad \upsilon'_{r'i}=\Omega\delta u_i,\ p'_i=p^*{}_i p_i,$$

$$p^*{}_i=\frac{\mu_i\Omega r_0^2}{\delta^2},\quad i=1,2.$$

(3)

Подставляя (3) в (2) и в (1) с точностью до членов $0\left(\frac{\delta A_i}{r_0}\right)$, $0\left(\frac{\delta N_i}{r_0}\right)$, $0\left(\frac{\delta}{r_0}\right)$ будем иметь

$$\frac{\partial p_i}{\partial r_0}=0,\ \frac{\partial^2\upsilon_i}{\partial r^2}=\frac{\partial p_i}{\partial\theta}-A_i+N_i\nu_i,\ \frac{\partial u_i}{\partial r}+\frac{\partial\upsilon_i}{\partial\theta}=0,\ A_i=\frac{\sigma\delta^2E'c}{r_0^2\mu_i\Omega},\ N_i=\frac{\sigma\delta^2c^2}{r_0^2\mu_i}.\qquad(4)$$

Здесь N_i – число Гартмана.

В дальнейшем в слагаемом, обусловленным электропроводящими свойствами слоистого электропроводящего смазочного материала, скорость υ_i заменяется ее максимальным значением.

Система уравнений (4) решается при следующих граничных условиях

$$u_1\big|_{r=0}=0,\ \upsilon_1\big|_{r=0}=1,\ p_1(0)=p_2(2\pi)=\tilde{p}_g,\ p_1=\frac{\mu_2}{\mu_1}p_2,\ p_2(0)=p_2(2\pi)=\tilde{\tilde{p}}_g,\qquad(5)$$

$$u_2\big|_{r=h(\theta)}=0,\ \upsilon_2\big|_{r=h(\theta)}=0,\ \upsilon_1\big|_{r=\alpha h}=\upsilon_2\big|_{r=\alpha h},\ u_1\big|_{r=\alpha h}=u_2\big|_{r=\alpha h},$$

$$\left.\frac{\partial \upsilon_1}{\partial r}\right|_{r=\alpha h} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \left.\frac{\partial \upsilon_2}{\partial r}\right|_{r=\alpha h}, \quad \frac{u_i}{\upsilon_i} = \alpha h'(\theta),$$

$$h(\theta) = 1 + \eta\cos\theta - \eta_1 \sin\omega\theta, \quad \eta = e/\delta, \quad \eta_1 = A/\delta.$$

(6)

Граничные условия (5) означают прилипание смазки к поверхности шипа и подшипника, а также периодичность гидродинамического давления. Граничные условия (6) означают равенство скоростей, касательных и нормальных напряжений на границе раздела слоев, а также условия существования слоистого течения смазки, т.е. требуется, чтобы скорость точек границы раздела слоев в каждой точке была направлена по касательной к контуру раздела слоев.

Точное автомодельное решение системы уравнений (4), удовлетворяющее граничным условиям(5)–(6) ищется в виде

$$u_i = -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r,\theta), \; \upsilon_i = \frac{\partial \psi_i}{\partial r} + V_i(r,\theta), \; \psi_i = \tilde{\psi}_i(\xi), \; U_i = -\tilde{u}_i(\xi) h'(\theta),$$

$$V_i = \tilde{\upsilon}_i(\xi), \; \xi = \frac{r}{h}, \; \frac{dp_1}{d\theta} = \frac{\tilde{c}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{c}_2}{h^3(\theta)} - A_1 + N_1,$$

$$\frac{dp_2}{d\theta} = \frac{\tilde{\tilde{c}}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{\tilde{c}}_2}{h^3(\theta)} - A_2 + N_2.$$

(7)

Подставляя (7) в (4) и в граничные условия (5) и (6) будем иметь

$$\tilde{\psi}_1''' = \tilde{c}_2, \; \tilde{\upsilon}_1'' = \tilde{c}_1, \; \tilde{\psi}_2''' = \tilde{\tilde{c}}_2, \; \tilde{\upsilon}_2'' = \tilde{\tilde{c}}_1, \; \tilde{u}_1' + \xi\upsilon_1' = 0, \; \tilde{u}_2' + \xi\tilde{\upsilon}_2' = 0,$$

(8)

$$\psi_1'(0) = 0; \; \tilde{u}_1(0) = 0, \; \tilde{\upsilon}_1(0) = 1, \; \tilde{u}_2(1) = 0, \; \tilde{\psi}_2(1) = 0,$$

$$\tilde{\upsilon}_2(1) = 0, \; \tilde{\upsilon}_1(\alpha) = \tilde{\upsilon}_2(\alpha), \; \tilde{u}_1(\alpha) = \tilde{u}_2(\alpha), \; \tilde{\upsilon}_1'(\alpha) = \frac{\mu_2}{\mu_1}\upsilon_2'(\alpha), \; \tilde{\psi}_1''(\alpha) = \frac{\mu_2}{\mu_1}\tilde{\psi}_2''(\alpha),$$

$$p_1 = \frac{\mu_2}{\mu_1} p_2, \ \int_0^\alpha \tilde{\upsilon}_1(\xi) d\xi + \int_\alpha^1 \tilde{\upsilon}_2(\xi) d\xi = 0.$$

(9)

Решение задачи (8)–(9) находится непосредственным интегрированием. В результате будем иметь

$$\psi_1' = \tilde{c}_2 \frac{\xi^2}{2} + c_2\xi + c_3, \ \tilde{\upsilon}_1 = \tilde{c}_1 \frac{\xi^2}{2} + c_6\xi + c_7, \ \psi_2' = \tilde{c}_2 \frac{\xi^2}{2} + c_4\xi + c_5,$$

$$\upsilon_2 = \tilde{\tilde{c}}_1 \frac{\xi^2}{2} + c_8\xi + c_9, \ \tilde{u}_1 = -\tilde{c}_1 \frac{\xi^3}{3} - c_6 \frac{\xi^2}{2} + c_{10}, \ \tilde{u}_2 = -\tilde{\tilde{c}}_1 \frac{\xi^3}{3} - c_8 \frac{\xi^2}{2} + c_{11},$$

$$p_1 = \tilde{c}_1 J_2(\theta) + \tilde{c}_2 J_3(\theta) - A_1\theta + N_1\theta + \tilde{p}_g, \quad p_2 = \tilde{\tilde{c}}_1 J_2(\theta) + \tilde{\tilde{c}}_2 J_3(\theta) - A_2\theta + N_2\theta + \tilde{\tilde{p}}_g,$$

$$J_k = \int_0^\theta \frac{d\theta}{h^k(\theta)}.$$

(10)

Для определения постоянных $c_i (i = 2,3,...11)$, $\tilde{c}_1, \tilde{c}_2, \tilde{\tilde{c}}_1, \tilde{\tilde{c}}_2$ придем к следующей алгебраической системе уравнений

$$c_7 = 1, \ c_{10} = 0, \ c_3 = 0, \ -\tilde{\tilde{c}}_1 \frac{1}{3} - c_8 \frac{1}{2} + c_{11} = 0, \ \tilde{\tilde{c}}_1 \frac{1}{2} + c_8 + c_9 = 0,$$

$$\tilde{\tilde{c}}_2 \frac{1}{2} + c_4 + c_5 = 0, \ \tilde{c}_1 = \frac{\mu_2}{\mu_1} \tilde{\tilde{c}}_1, \ \tilde{c}_2 = \frac{\mu_2}{\mu_1} \tilde{\tilde{c}}_2, \ \tilde{\tilde{c}}_2 = -\frac{\tilde{\tilde{c}}_1 J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)} + \frac{(N_2 + A_2)2\pi}{J_3(2\pi)},$$

$$\tilde{c}_2 = -\frac{\tilde{c}_1 J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)} + \frac{(N_1 + A_1)2\pi}{J_3(2\pi)}, \ \tilde{c}_1\alpha + c_6 = \frac{\mu_2}{\mu_1}\left(\tilde{\tilde{c}}_1\alpha + c_8\right),$$

$$\tilde{c}_2\alpha + c_2 = \frac{\mu_2}{\mu_1}\left(\tilde{\tilde{c}}_2\alpha + c_4\right), \ \tilde{c}_2 \frac{\alpha^2}{2} + c_2\alpha + c_3 - \tilde{\tilde{c}}_2 \frac{\alpha^2}{2} - c_4\alpha - c_5 = 0,$$

$$\tilde{c}_1 \frac{\alpha^2}{2} + c_6\alpha + c_7 - \tilde{\tilde{c}}_1 \frac{\alpha^2}{2} - c_8\alpha - c_9 = 0,$$

$$\tilde{c}_1\frac{\alpha^3}{6}+c_6\frac{\alpha^2}{2}+c_7\alpha-\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\alpha^3}{6}-c_8\frac{\alpha^2}{2}-c_9\alpha+\tilde{\tilde{c}}_1\frac{1}{6}+c_8\frac{1}{2}+c_9=0.$$

(11)

Из условия $p_1=kp_2 \Rightarrow A_1-N_1=k(A_2-N_2)$.

Решение системы (11) сводится к решению следующего матричного уравнения

$$\tilde{M}\cdot\vec{x}=\vec{b}, \tag{12}$$

где

$$\vec{x}=\left\{\tilde{\tilde{c}}_1;c_4;c_5;c_8;c_9\right\},\quad \vec{b}=\left\{0;-2(\frac{(N_2-A_2)2\pi}{J_3(1)});-k\alpha^2\frac{(N_2-A_2)2\pi}{J_3(1)}(k-1);-2;-6\alpha\right\},$$

$$\tilde{M}=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 & 2 & 2 \\ -\dfrac{J_2(1)}{J_3(1)} & 2 & 2 & 0 & 0 \\ (1-k)\alpha^2\dfrac{J_2(1)}{J_3(1)} & 2\alpha(k-1) & -2 & 0 & 0 \\ \alpha^2(k-1) & 0 & 0 & 2\alpha(k-1) & -2 \\ k\alpha^3-\alpha^3+1 & 0 & 0 & 3(k\alpha^2-a^2+1) & 6(1-\alpha) \end{pmatrix}. \tag{13}$$

$$c_8=-(4(-2a^3+2ka^3-1))/(-1+4a+8ka^3-8a^3-4ak-10ka^4+5k^2a^4+5a^4),$$

$$c_9=(8ka^3+3ka^2-8a^3-3a^2-1)/(-1+4a+8ka^3-8a^3-4ak-10ka^4+$$

$$+5k^2a^4+5a^4,\quad c_2=kc_4,\quad c_6=kc_8,$$

$$\tilde{\tilde{c}}_1=-(6(1+ka^2-a^2))/(-1+4a+8ka^3-8a^3-4ak-10ka^4+5k^2a^4+5a^4),$$

$$c_4 = (-3J_2(2\pi) + 2\pi N_2 - 2\pi A_2 + 6a^2 J_2(2\pi) + k^2 a^2 \pi N_2 - ka^2 \pi N_2 - k^2 a^2 \pi A_2 +$$
$$+ka^2\pi A_2 + 10k^2 a^4 \pi A_2 - 20ka^4 \pi A_2 - 10k^2 a^4 \pi N_2 + 20ka^4 \pi N_2 - 6a^2 J_2(2\pi)k +$$
$$+10a^4 \pi A_2 - 10a^4 \pi N_2 + 16\pi N_2 a^3 - 8\pi N_2 a - 16\pi A_2 a^3 + 8\pi A_2 a - 12\pi N_2 a^3 k +$$
$$+8\pi N_2 ak + 12\pi A_2 a^3 k - 8\pi A_2 ak - 8\pi N_2 a^5 k + 5\pi N_2 a^6 k - 15\pi N_2 a^6 k^2 + 16k^2 a^5 \pi N_2 -$$
$$-8k^2 a^3 \pi N_2 + 15k^3 a^6 \pi N_2 + 8\pi A_2 a^5 k - 5\pi A_2 a^6 k + 15\pi A_2 a^6 k^2 - 16k^2 a^5 \pi A_2 +$$
$$+8k^2 a^3 \pi A_2 - 15k^3 a^6 \pi A_2 + 8k^3 a^5 \pi A_2 - 4k^3 a^3 \pi A_2 + 5k^4 a^6 \pi A_2 - 8k^3 a^5 \pi N_2 +$$
$$+4k^3 a^3 \pi N_2 - 5k^4 a^6 \pi N_2 - 3J_2(2\pi)a^4 + 6J_2(2\pi)ka^4 - 3J_2(2\pi)k^2 a^4) /$$
$$/((1 + ak - a)J_3(2\pi)(-1 + 4a + 8ka^3 - 8a^3 - 4ak - 10ka^4 + 5k^2 a^4 + 5a^4)),$$

$$c_5 = -(a(-3J_2(2\pi) + 2\pi N_2 - 2\pi A_2 + 3a^2 J_2(2\pi) - 8k^2 a^2 \pi N_2 + 4ka^2 \pi N_2 +$$
$$+8k^2 a^2 \pi A_2 - 4ka^2 \pi A_2 + 14k^2 a^4 \pi A_2 - 2k^3 a^4 \pi A_2 - 22ka^4 \pi A_2 - 14k^2 a^4 \pi N_2 +$$
$$+2k^3 a^4 \pi N_2 + 22ka^4 \pi N_2 - 6a^2 J_2(2\pi)k + 10a^4 \pi A_2 - 10a^4 \pi N_2 + 16\pi N_2 a^3 -$$
$$-8\pi N_2 a - 16\pi A_2 a^3 + 8\pi A_2 a - 32\pi N_2 a^3 k + 15\pi N_2 ak + 32\pi A_2 a^3 k - 15\pi A_2 ak +$$
$$+5\pi N_2 a^5 k - 15k^2 a^5 \pi N_2 + 16k^2 a^3 \pi N_2 - 5\pi A_2 a^5 k + 15k^2 a^5 \pi A_2 - 16k^2 a^3 \pi A_2 -$$
$$-15k^3 a^5 \pi A_2 + 15k^3 a^5 \pi N_2 + 5k^4 a^5 \pi A_2 - 5k^4 a^5 \pi N_2 - 7k^2 a\pi N_2 + 7k^2 a\pi A_2 +$$
$$+4k^3 a^2 \pi N_2 - 4k^3 a^2 \pi A_2 - 3J_2(2\pi)a^3 + 3J_2(2\pi)a + 3kJ_2(2\pi) + 3a^2 J_2(2\pi)k^2 +$$
$$+6J_2(2\pi)ka^3 - 3J_2(2\pi)ak - 2k\pi N_2 + 2k\pi A_2 - 3a^3 J_2(2\pi)k^2)) /$$
$$/((1 + ak - a)J_3(2\pi)(-1 + 4a + 8ka^3 - 8a^3 - 4ak - 10ka^4 + 5k^2 a^4 + 5a^4)). \quad (14)$$

Перейдем к определению основных рабочих характеристик подшипника.

Для безразмерного гидродинамического давления в слое смазки, прилегающем к поверхности вала с точностью до членов $0(\eta^2)$, $0(\eta_1^2)$ будем иметь:

$$p_1 = \tilde{c}_1 \left(\eta \sin\theta + \frac{\eta_1}{\omega}(\cos\omega\theta - 1) - \frac{\theta\eta_1}{2\pi\omega}(\cos 2\pi\omega - 1) \right) + (A_1 - N_1)3\eta\sin\theta -$$
$$-\frac{(A_1 - N_1)3\eta_1}{\omega}(\cos\omega\theta - 1) + \frac{(A_1 - N_1)3\eta_1\theta}{2\pi\omega}(\cos 2\pi\omega - 1) + p_g.$$

(15)

С учетом (14) и (15) для безразмерных составляющих вектора поддерживающей силы и силы трения получим

$$\frac{R_y}{p_1^* r_0} = -\int_0^{2\pi} p_1 \sin\theta d\theta, \quad \frac{R_x}{p_1^* r_0} = -\int_0^{2\pi} p_1 \cos\theta d\theta,$$

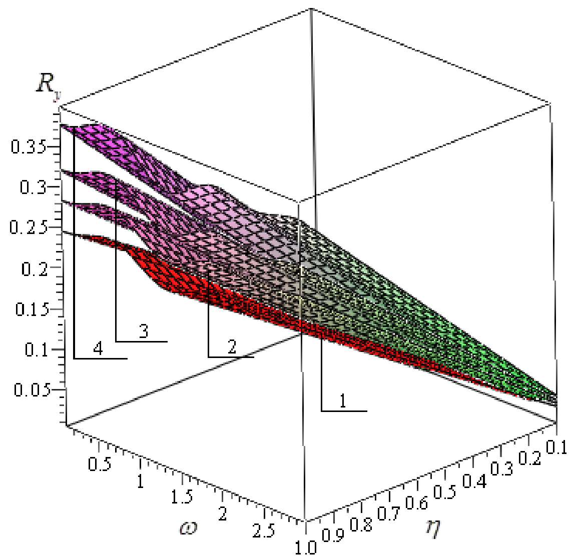
$$\frac{L_{\text{тр}}\delta}{\mu_1 \Omega r_0} = \int_0^{2\pi} \frac{c_2}{h^2(\theta)} d\theta + \int_0^{2\pi} \frac{c_6}{h(\theta)} d\theta. \tag{16}$$

Влияние податливости опорной поверхности на основные рабочие характеристики можно оценить по методике, предусмотренной в работе [11]. Согласно работе [11] в рассматриваемом случае будем иметь

$$h(\theta) = \left(1 + \lambda f(\theta)\right)\left(1 + \tilde{\eta}\cos\theta - \tilde{\eta}_1 \sin\omega\theta\right) = \left(1 + \frac{\tilde{p}}{M}\right)\left(1 + \tilde{\eta}\cos\theta - \tilde{\eta}_1 \sin\omega\theta\right). \tag{17}$$

Здесь $\tilde{\eta} = \dfrac{\eta}{1 + \dfrac{\tilde{p}}{M}}$, $\tilde{\eta}_1 = \dfrac{\eta_1}{1 + \dfrac{\tilde{p}}{M}}$,

где $\tilde{p} = \max p_1(\theta)$, $\theta \in [0; 2\pi]$, M – упругогидродинамический параметр (явный вид параметра M приведен в работе [11]).



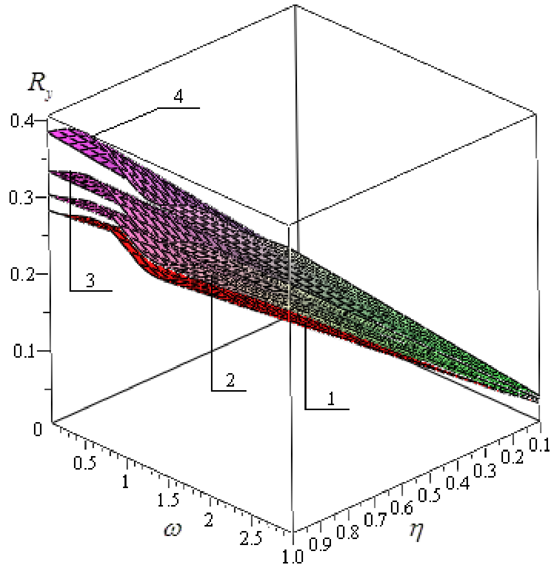
1) $A_1 = 0$; $N_1 = 0$; $\dfrac{\mu_2}{\mu_1} = 1{,}3$;

2) $A_1 = 0{,}3$; $N_1 = 0{,}1$; $\dfrac{\mu_2}{\mu_1} = 1{,}3$;

3) $A_1 = 0{,}3$; $N_1 = 0{,}1$; $\dfrac{\mu_2}{\mu_1} = 1{,}5$;

4) $A_1 = 0{,}3$; $N_1 = 0{,}1$; $\dfrac{\mu_2}{\mu_1} = 2$.

Рис. 2. – Зависимость безразмерной R_y - составляющей поддерживающей силы от параметров ω и η при разных значениях вязкостных отношений слоев



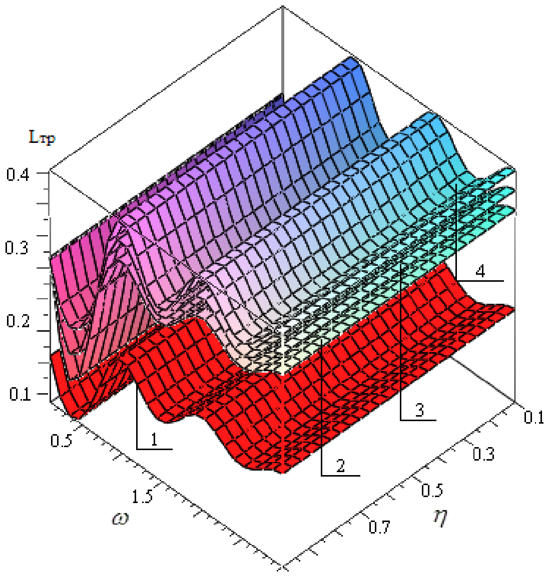
1) $A_1 = 0;\ N_1 = 0;\ \frac{\mu_2}{\mu_1} = 1,5;$

2) $A_1 = 0,3;\ N_1 = 0,1;\ \frac{\mu_2}{\mu_1} = 1,5;$

3) $A_1 = 0,5;\ N_1 = 0,1;\ \frac{\mu_2}{\mu_1} = 1,5;$

4) $A_1 = 0,7;\ N_1 = 0,1;\ \frac{\mu_2}{\mu_1} = 1,5.$

Рис. 3. – Зависимость безразмерной R_y - составляющей поддерживающей силы от параметров ω и η при разных значениях параметров N_1 и A_1, обусловленных электропроводящими свойствами смазочного материала



1) $A_1 = 0;\ N_1 = 0;\ \frac{\mu_2}{\mu_1} = 1,5;$

2) $A_1 = 0,3;\ N_1 = 0,1;\ \frac{\mu_2}{\mu_1} = 1,5;$

3) $A_1 = 0,5;\ N_1 = 0,1;\ \frac{\mu_2}{\mu_1} = 1,5;$

4) $A_1 = 0,7;\ N_1 = 0,1;\ \frac{\mu_2}{\mu_1} = 1,5.$

Рис. 4. – Зависимость безразмерной $L_{тр}$ - силы трения от параметров ω и η при разных значениях параметров N_1 и A_1, обусловленных электропроводящими свойствами смазочного материала

Результаты численного анализа, приведенные на рис. 2–4, показывают:

1. В случае, когда $A_1 = 0$, $N_1 = 0$, т.е. когда слоистый смазочный материал не обладает электропроводящими свойствами, при $\omega = {}^1\!/_2$ подшипник по несущей способности обладает свойствами подшипника «двойного» действия.

2. В случае, когда смазочный материал обладает электропроводящими свойствами при $A_1 = 0,7$, $N_1 = 0,1$, ${}^{\mu_2}\!/_{\mu_1} = 2$, максимальная несущая способность подшипника также достигается при $\omega = {}^1\!/_2$. Однако в этом случае максимальная несущая способность подшипника практически в два раза выше по сравнению со случаем, при $A_1 = 0$, $N_1 = 0$.

3. С увеличением вязкостного отношения k несущая способность подшипника вырастает. Особенно резкое возрастание наблюдаем при $k \geq 2$.

4. При $\omega = {}^1\!/_2$, $k = 1,5$, несущая способность подшипника существенно зависит от безразмерной напряженности электрического поля E; с увеличением значения E несущая способность подшипника резко возрастает.

5. С учетом полученной в работе [3] эмпирической зависимости электропроводимости смазки от контактного давления и с учетом найденного в данной работе аналитического выражения для гидродинамического давления можно прогнозировать вязкость структурированного граничного слоя, прилегающего к твердой опорной поверхности подшипника. Вязкость этого слоя практически в два и более раза больше, чем вязкость основного базового масла.

6. Несущая способность подшипника с податливой опорной поверхностью на 2-3% ниже по сравнению с подшипником с жесткой опорной поверхностью.

Литература

1. Gecim B.A. Non-Newtonian Effect of Multigrade Oils on Journal Bearing Performance // Tribology Transaction. 1990. Vol. 3. Pp. 384-394.

2. Garg H.C., Vijay Kumar, Sharda H.B. Thermohydrostatic analysis of capillary compensated Asymmetric holes-entry hybrid journal bearing operating with non-Newtonian lubricant // Industrial Lubrication and Tribology 2009. Vol. 61, № 1. Pp. 11-21.

3. Мухортов И.В., Усольцев, Н.А., Задорожная Е.А., Леванов И.Г. Усовершенствованная модель реологических свойств граничного слоя смазки // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 5. С. 8-19.

4. Ахвердиев К.С., Александрова Е.Е., Мукутадзе М.А. Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре сложнонагруженного радиального подшипника конечной длины, обладающего повышенной несущей способностью // Вестник РГУПС. 2010. №1. С. 132-137.

5. 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 ДГТУ. 2009. Т. 9, № 3. С. 529-536.

6. Ахвердиев К.С., Воронцов П.А., Черкасова Т.С. Гидродинамический расчет подшипников скольжения с использованием моделей слоистого течения вязкой и вязкопластичной смазки // Трение и износ. 1998. Т. 16, № 6. С. 698-707.

7. Ахвердиев К.С., Воронцов П.А., Черкасова Т.С. Математическая модель стратифицированного течения смазки в зазоре радиального

металлополимерного подшипника скольжения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1999. № 3. С. 93-101.

8. 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/ru/magazine/archive/n4y2013/2201.

9. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Солоп К.С. Расчетная модель радиального подшипника скольжения с повышенной несущей способностью, работающего на микрополярной смазке с учетом ее вязкостных характеристик от давления // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2200.

10. Ахвердиев К.С., Александрова Е.Е., Мукутадзе М.А., Копотун Б.Е. Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре радиального подшипника, обладающего повышенной несущей способностью и демпфирующими свойствами // Вестник РГУПС. 2009. № 4. С. 133-139.

11. Лагунова Е.О., Митрофанов С.В., Копотун Б.Е. Расчетная модель слоистой электропроводящей смазки упорного подшипника с податливой опорной поверхностью, обладающего повышенной несущей способностью // Вестник РГУПС. 2014. № 4. С. 126-132.

References

1. Gecim B.A. Non-Newtonian Effect of Multigrade Oils on Journal Bearing Performance. Tribology Transaction. 1990. Vol. 3. pp. 384-394.

2. Garg H.C., Vijay Kumar, Sharda H.B. Thermohydrostatic analysis of capillary compensated Asymmetric holes-entry hybrid journal bearing operating with non-Newtonian lubricant. Industrial Lubrication and Tribology 2009. Vol. 61, № 1. pp. 11-21.

3. Mukhortov I.V., Usolcev N.A., Zadorozhnaya E.A., Levanov I.G. Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh. 2010. № 5. pp. 8-19.

4. Akhverdiyev K.S., Aleksandrova E.E., Mukutadze M.A. Vestnik of RGUPS. 2010. № 1. pp. 132-137.

5. Akhverdiyev K.S., Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Vestnik of DSTU. 2009. vol. 9, № 3 (42). pp. 529-536.

6. Akhverdiyev K.S., Vorontsov P.A., Cherkasova T.S. Trenie i iznos. 1998. vol. 16, № 6. pp. 698-707.

7. Akhverdiyev K.S., Vorontsov P.A., Cherkasova T.S. Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin. 1999. № 3. Pp. 93-101.

8. Akhverdiyev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, № 4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2201.

9. Akhverdiyev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, № 4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2200.

10. Akhverdiyev K.S., Aleksandrova E.E., Mukutadze M.A., Kopotun B.E. Vestnik of RGUPS. 2009. № 4. pp. 133-139.

11. Lagunova E.O., Mitrofanov S.V., Kopotun B.E. Vestnik of RGUPS. 2014. № 4. pp. 126-132.