

---

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

*К.С. Ахвердиев<sup>1</sup>, С.В. Митрофанов<sup>1</sup>, Б.Е. Копотун<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения*

*<sup>2</sup>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  $\Omega$  (рис. 1).

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

$$\begin{aligned} C_0 : r' &= r_0; \quad C_1 : r' = r_0 + \delta\alpha + \alpha e \cos \theta - \alpha A \sin \omega \theta; \\ C_2 : r' &= r_2 + e \cos \theta - A \sin \omega \theta, \end{aligned}$$

(1)

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

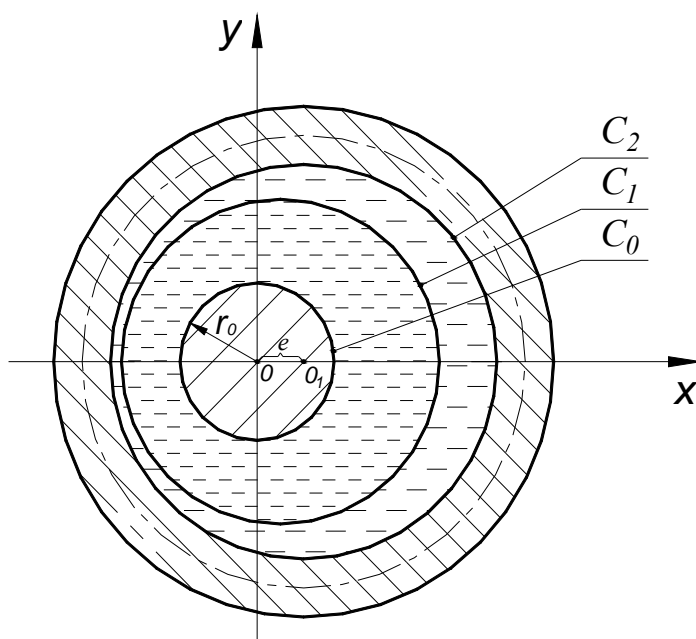


Рис. 1. – Схематическое изображение электропроводящей двухслойной смазки в зазоре радиального подшипника скольжения:

$C_0$  – 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

$$\frac{\partial p'_i}{\partial r'} = 0, \quad \mu_i \frac{\partial v'_{\theta i}}{\partial r'^2} = \frac{1}{r'} \frac{\partial p'_i}{\partial \theta} - \delta B'(E' - v'_{\theta i} B'), \quad \frac{\partial v'_{ri}}{\partial r'} + \frac{v'_{ri}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v'_{\theta i}}{\partial \theta} = 0, \quad i = 1, 2$$

(2)

Здесь  $v'_{r'_i}, v'_{\theta'_i}$  – 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;  $\mu_i$  – коэффициент динамической вязкости;  $r', \theta$  – 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

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

Эти уравнения удовлетворяются при

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

Осуществим переход к безразмерным переменным по формулам

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

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

(3)

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

будем иметь

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

Здесь  $N_i$  – число Гартмана.

В дальнейшем в слагаемом, обусловленном электропроводящими свойствами слоистого электропроводящего смазочного материала, скорость  $v_i$  заменяется ее максимальным значением.

Система уравнений (4) решается при следующих граничных условиях

$$u_1|_{r=0} = 0, \quad v_1|_{r=0} = 1, \quad p_1(0) = p_2(2\pi) = \tilde{p}_g, \quad p_1 = \frac{\mu_2}{\mu_1} p_2, \quad p_2(0) = p_2(2\pi) = \tilde{p}_g, \quad (5)$$

$$u_2|_{r=h(\theta)} = 0, \quad v_2|_{r=h(\theta)} = 0, \quad v_1|_{r=\alpha h} = v_2|_{r=\alpha h}, \quad u_1|_{r=\alpha h} = u_2|_{r=\alpha h},$$

$$\left. \frac{\partial v_1}{\partial r} \right|_{r=\alpha h} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \left. \frac{\partial v_2}{\partial r} \right|_{r=\alpha h}, \quad \frac{u_i}{v_i} = \alpha h'(\theta),$$
$$h(\theta) = 1 + \eta \cos \theta - \eta_1 \sin \omega \theta, \quad \eta = e/\delta, \quad \eta_1 = A/\delta.$$

(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

$$u_i = -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta), \quad v_i = \frac{\partial \psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta), \quad \psi_i = \tilde{\psi}_i(\xi), \quad U_i = -\tilde{u}_i(\xi)h'(\theta),$$
$$V_i = \tilde{v}_i(\xi), \quad \xi = \frac{r}{h}, \quad \frac{dp_1}{d\theta} = \frac{\tilde{c}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{c}_2}{h^3(\theta)} - A_1 + N_1,$$
$$\frac{dp_2}{d\theta} = \frac{\tilde{c}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{c}_2}{h^3(\theta)} - A_2 + N_2.$$

(7)

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

$$\tilde{\psi}_1''' = \tilde{c}_2, \quad \tilde{v}_1'' = \tilde{c}_1, \quad \tilde{\psi}_2''' = \tilde{c}_2, \quad \tilde{v}_2'' = \tilde{c}_1, \quad \tilde{u}_1' + \xi v_1' = 0, \quad \tilde{u}_2' + \xi v_2' = 0,$$

(8)

$$\psi_1'(0) = 0; \quad \tilde{u}_1(0) = 0, \quad \tilde{v}_1(0) = 1, \quad \tilde{u}_2(1) = 0, \quad \tilde{\psi}_2(1) = 0,$$
$$\tilde{v}_2(1) = 0, \quad \tilde{v}_1(\alpha) = \tilde{v}_2(\alpha), \quad \tilde{u}_1(\alpha) = \tilde{u}_2(\alpha), \quad \tilde{v}_1'(\alpha) = \frac{\mu_2}{\mu_1} v_2'(\alpha), \quad \tilde{\psi}_1''(\alpha) = \frac{\mu_2}{\mu_1} \tilde{\psi}_2''(\alpha),$$

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

(9)

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

$$\psi'_1 = \tilde{c}_2 \frac{\xi^2}{2} + c_2 \xi + c_3, \quad \tilde{v}_1 = \tilde{c}_1 \frac{\xi^2}{2} + c_6 \xi + c_7, \quad \psi'_2 = \tilde{c}_2 \frac{\xi^2}{2} + c_4 \xi + c_5,$$

$$v_2 = \tilde{c}_1 \frac{\xi^2}{2} + c_8 \xi + c_9, \quad \tilde{u}_1 = -\tilde{c}_1 \frac{\xi^3}{3} - c_6 \frac{\xi^2}{2} + c_{10}, \quad \tilde{u}_2 = -\tilde{c}_1 \frac{\xi^3}{3} - c_8 \frac{\xi^2}{2} + c_{11},$$

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

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

(10)

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

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

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

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

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

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

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

(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

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

(12)

где

$$\vec{x} = \{\tilde{c}_1; c_4; c_5; c_8; c_9\}, \quad \vec{b} = \left\{ 0; -2 \left( \frac{(N_2 - A_2)2\pi}{J_3(1)} \right); -k\alpha^2 \frac{(N_2 - A_2)2\pi}{J_3(1)} (k-1); -2; -6\alpha \right\},$$
$$\tilde{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 & 2 & 2 \\ -\frac{J_2(1)}{J_3(1)} & 2 & 2 & 0 & 0 \\ (1-k)\alpha^2 \frac{J_2(1)}{J_3(1)} & 2\alpha(k-1) & -2 & 0 & 0 \\ \alpha^2(k-1) & 0 & 0 & 2\alpha(k-1) & -2 \\ k\alpha^3 - \alpha^3 + 1 & 0 & 0 & 3(k\alpha^2 - \alpha^2 + 1) & 6(1-\alpha) \end{pmatrix}. \quad (13)$$

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

$$c_9 = (8ka^3 + 3ka^2 - 8a^3 - 3a^2 - 1) / (-1 + 4a + 8ka^3 - 8a^3 - 4ak - 10ka^4 + 5k^2a^4 + 5a^4),$$
$$c_2 = kc_4, \quad c_6 = kc_8,$$

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



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

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

$$/((1 + ak - a)J_3(2\pi)(-1 + 4a + 8ka^3 - 8a^3 - 4ak - 10ka^4 + 5k^2 a^4 + 5a^4)). \quad (14)$$

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:

$$p_1 = \tilde{c}_1 \left( \eta \sin \theta + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) - \frac{\theta \eta_1}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - 1) \right) + (A_1 - N_1) 3\eta \sin \theta - \\ - \frac{(A_1 - N_1) 3\eta_1}{\omega} (\cos \omega \theta - 1) + \frac{(A_1 - N_1) 3\eta_1 \theta}{2\pi \omega} (\cos 2\pi \omega - 1) + p_g. \quad (15)$$

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

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

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

(16)

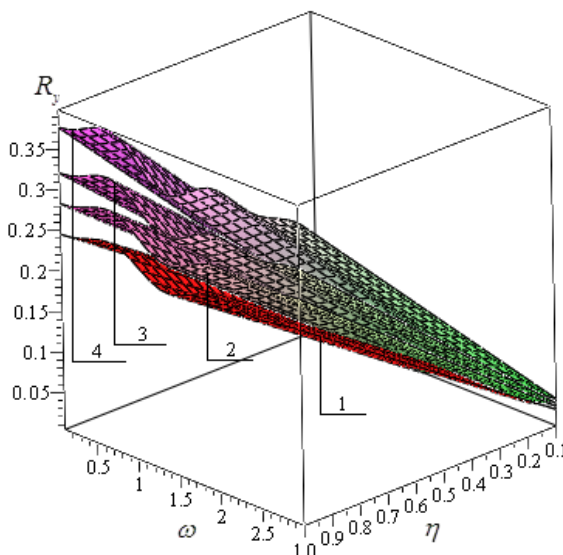
Влияние податливости опорной поверхности на основные рабочие характеристики можно оценить по методике, предусмотренной в работе [11].

Согласно работе [11] в рассматриваемом случае будем иметь

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

$$\text{Здесь } \tilde{\eta} = \frac{\eta}{1 + \frac{\tilde{p}}{M}}, \quad \tilde{\eta}_1 = \frac{\eta_1}{1 + \frac{\tilde{p}}{M}},$$

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



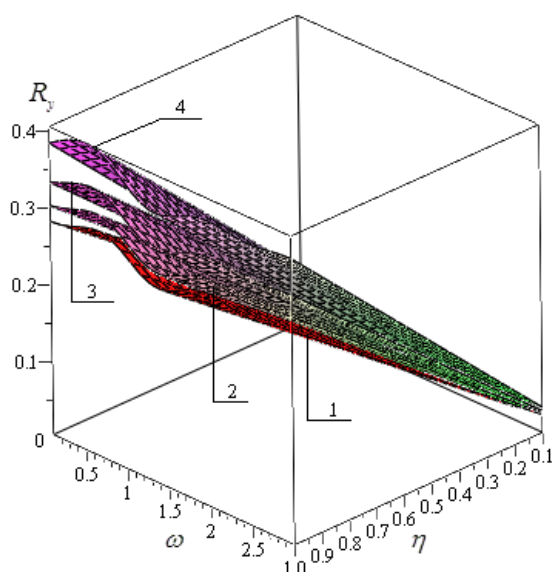
$$1) A_1 = 0; N_1 = 0; \frac{\mu_2}{\mu_1} = 1,3;$$

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

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

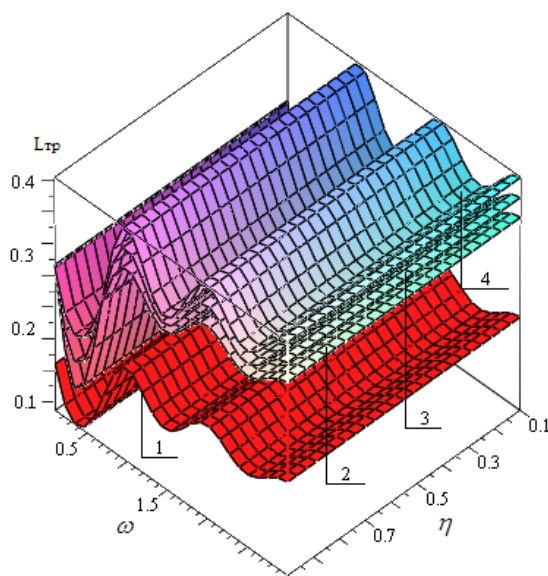
$$4) A_1 = 0,3; N_1 = 0,1; \frac{\mu_2}{\mu_1} = 2.$$

Рис. 2. – Зависимость безразмерной  $R_y$  - составляющей поддерживающей силы от параметров  $\omega$  и  $\eta$  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  $\omega$  и  $\eta$  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  $\omega$  и  $\eta$  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  $\omega = \frac{1}{2}$  подшипник по несущей способности обладает свойствами подшипника «двойного» действия.

2. В случае, когда смазочный материал обладает электропроводящими свойствами при  $A_1 = 0,7$ ,  $N_1 = 0,1$ ,  $\frac{\mu_2}{\mu_1} = 2$ , максимальная несущая способность подшипника также достигается при  $\omega = \frac{1}{2}$ . 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  $\omega = \frac{1}{2}$ ,  $k = 1,5$ , 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](http://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](http://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 mekhanizмах. 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. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, № 4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2201](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2201).
9. Akhverdiyev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, № 4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2200](http://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.