
Стратификация смазочного материала в упорных подшипниках скольжения

М.А. Мукутадзе

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: В работе на основе системы уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости с учетом зависимости вязкости от давления, и уравнений неразрывности, приводится автомодельное решение с использованием функций тока стратифицированного течения смазочного материала в упорных подшипниках. Предложенные здесь расчетные модели в отличие от существующих с трехслойной стратификацией, дополнительно усложнена зависимостью вязкости смазочного материала от давления. Получено аналитическое выражение позволяющее, получить описание стратифицированных трехслойных жидких смазочных материалов и график зависимости влияния структурного параметра и вязкостного отношения стратифицированных слоев на основные эксплуатационные характеристики подшипника. Численный анализ зависимостей параметров адаптированного профиля и несущей способности смазочных слоев.

Ключевые слова: трехслойная смазка, поддерживающая сила, адаптированный контур ползуна, стратифицированное течение, зависимость вязкости от давления.

Трехслойная стратификация жидких смазочных материалов пока не наблюдалась в общемашиностроительных узлах трения. Адсорбированные контактными поверхностями слои смазочных материалов не имеют объемных свойств и обеспечивают только граничное трение. Вместе с тем разработка смазочных материалов, расслаивающихся на три и более слоев, является перспективнейшей задачей, увеличивающей экранирование контактных поверхностей и снижающей их износ. Течение вязкого стратифицированного несжимаемого смазочного материала в зазоре упорного и радиального подшипников рассматривалось в работах [1-8]. Существенным недостатком этих работ является то, что в расчетной модели не учитывается зависимость вязкости от давления. При больших значениях давления в смазочном слое вязкость смазочного материала существенно возрастает и возникает необходимость учета зависимости вязкости от давления [9-15].

Ранее нами рассмотрены случаи, когда расслоение смазки имеет место вблизи опорной поверхности подшипника. Рассмотрим случай, когда расслоение смазки происходит вблизи неподвижной и подвижной поверхностей подшипника, т. е. случай наличия в смазочном слое трехслойной смазки.

Также будем предполагать, что зависимости вязкостей слоев от давления выражаются формулами

$$\mu'_i = \mu_{0i} e^{\tilde{\alpha} p'}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где μ_{0i} – характерные вязкости; p' – гидродинамическое давление.

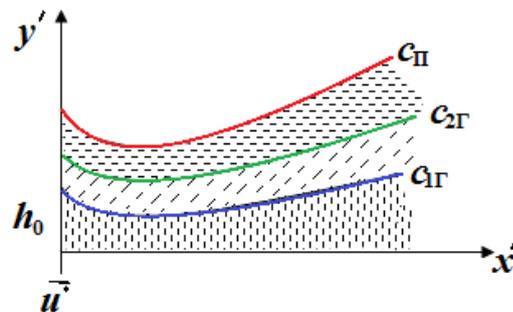


Рис. 1. Схема расслоения смазочного материала на три слоя

В декартовой системе координат $x'O'y'$ уравнение адаптированного контура ползуна $C_П$, границы раздела слоев $C_{2Г}$ и $C_{1Г}$, а также направляющей $C_Н$ можно записать в виде

$$y' = h_0 + x' \operatorname{tg} \alpha^* - a' \sin \omega' x' = h'(x'), \quad y' = \beta h'(x'), \quad y' = \alpha h'(x'), \quad y' = 0. \quad (2)$$

Исходные уравнения и граничные условия

В качестве исходных уравнений принимаем безразмерную систему уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости с учетом зависимости вязкости от давления и уравнение неразрывности

$$\frac{\partial^2 v_i}{\partial y^2} = \frac{\Lambda_i}{e^{\tilde{\alpha} p}} \frac{dp}{dx}, \quad \frac{\partial u_i}{\partial y} + \frac{\partial v_i}{\partial x} = 0 \quad (i = 1, 2, 3). \quad (3)$$

Размерные величины $x', y', u'_i, v'_i, p', \mu'_i$, описывающие поведение смазочных слоев, связаны с соответствующими безразмерными величинами следующими соотношениями:

$$y' = h_0 y; \quad x' = lx; \quad u'_i = u^* v_i; \quad v'_i = u^* \varepsilon u_i, \quad \varepsilon = \frac{h_0}{l};$$

$$p' = p_a p, \quad \mu'_i = \mu_{0i} \mu_i, \quad \Lambda_i = \frac{h_0^2 p_a}{\mu_{0i} u^* l}, \quad \tilde{\alpha} = \tilde{\alpha}^* p_a, \quad (4)$$

где u'_i, v'_i – компоненты вектора скорости смазочной среды; p_a – атмосферное давление; l – длина подшипника.

Система уравнений (8.5.3) решается при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} u_1|_{y=0} = 0; \quad v_1|_{y=0} = 1; \quad p(0) = p(1) = 1; \quad u_2|_{y=h(x)} = 0, \quad v_2|_{y=h(x)} = 0; \\ \frac{u_1}{v_1}|_{y=\alpha h(x)} = \alpha h'(x); \quad \frac{\partial v_1}{\partial y} = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}} \frac{\partial v_2}{\partial y} \text{ при } y = \alpha h(x); \quad u_1 = u_2, \quad v_1 = v_2 \text{ при } y = \alpha h; \\ \frac{u_2}{v_2}|_{y=\beta h(x)} = \beta h'(x); \quad \frac{\partial v_2}{\partial y} = \frac{\mu_{03}}{\mu_{02}} \frac{\partial v_3}{\partial r}; \quad u_3 = 0, \quad v_3 = 0 \text{ при } y = h(x), \end{aligned} \quad (5)$$

$$u_2 = u_3, \quad v_2 = v_3 \text{ при } y = \beta h, \quad h = 1 + \eta x - \eta_1 \sin \omega x, \quad \eta = \frac{ltg\alpha^*}{h_0}, \quad \eta_1 = \frac{a}{h_0}, \quad \omega = \omega' l.$$

Точное автомодельное решение

Формирование точного автомодельного решения системы дифференциальных уравнений (3), соответствующее граничным условиям (5), проводим, используя функцию тока, предполагая, что поле скоростей и давлений является потенциальным:

$$u_i = -\frac{\partial \psi_i}{\partial x} + U_i(x, y), \quad v_i = \frac{\partial \psi_i}{\partial y} + V_i(x, y), \quad \psi_i = \tilde{\psi}_i(\xi),$$

$$U_i(x, y) = -\tilde{u}_i(\xi) h' x, \quad V_i(x, y) = \tilde{v}_i(\xi), \quad \xi = \frac{y}{h(x)},$$

$$\frac{\Lambda_1 dp}{e^{\tilde{\alpha} p} dx} = \frac{\tilde{c}_1}{h^2(x)} + \frac{\tilde{c}_2}{h^3(x)},$$

$$\frac{\Lambda_2 dp}{e^{\tilde{\alpha} p} dx} = \frac{\tilde{c}_1}{h^2(x)} + \frac{\tilde{c}_2}{h^3(x)}, \quad \frac{\Lambda_3 dp}{e^{\tilde{\alpha} p} dx} = \frac{\tilde{c}_3}{h^2(x)} + \frac{\tilde{c}_4}{h^3(x)}, \quad (6)$$

где $\tilde{c}_1 = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}} \tilde{c}_1$, $\tilde{c}_2 = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}} \tilde{c}_2$, $\tilde{c}_2 = \frac{\mu_{03}}{\mu_{03}} \tilde{c}_3$, $\tilde{c}_3 = \frac{\mu_{03}}{\mu_{01}} \tilde{c}_4$.

Подставляя (6) в (3) и в граничные условия (5), будем иметь

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}_1''' &= \tilde{c}_2, \quad \tilde{v}_1'' = \tilde{c}_1, \quad \tilde{u}_1' + \xi \tilde{v}_1' = 0, \quad \tilde{\Psi}_2''' = \tilde{c}_2, \quad \tilde{v}_2 = \tilde{c}_1, \quad \tilde{u}_2' + \xi \tilde{v}_2' = 0, \quad (7) \\ \tilde{\Psi}_3''' &= \tilde{c}_4, \quad \tilde{v}_3'' = \tilde{c}_3, \quad \tilde{u}_3' + \xi \tilde{v}_3' = 0, \\ \tilde{\Psi}_1'(0) &= 0; \quad \tilde{u}_1(0) = 0, \quad \tilde{v}_1(0) = 1, \quad \tilde{\Psi}_3'(1) = 0, \quad \tilde{u}_3(1) = 0, \quad \tilde{v}_3(1) = 0, \\ \tilde{\Psi}_1'(\alpha) &= \tilde{\Psi}_2'(\alpha), \quad \tilde{v}_1(\alpha) = \tilde{v}_2(\alpha), \quad \tilde{u}_1(\alpha) = \tilde{u}_2(\alpha), \\ \tilde{v}_2'(\beta) &= \tilde{v}_3(\beta), \quad \tilde{u}_2(\beta) = \tilde{u}_3(\beta), \quad \tilde{\Psi}_2'(\beta) = \tilde{\Psi}_3'(\beta), \\ \tilde{v}_1'(\alpha) &= \frac{\mu_2}{\mu_1} \tilde{v}_2'(\alpha), \quad \tilde{\Psi}_1''(\alpha) = \frac{\mu_2}{\mu_1} \tilde{\Psi}_2''(\alpha), \quad p_1 = \frac{\mu_2}{\mu_1} p_2, \\ \int_0^\alpha \tilde{v}_1(\xi) &+ \int_\alpha^1 \tilde{v}_2(\xi) d\xi + \int_\alpha^1 \tilde{v}_3(\xi) d\xi = 0, \\ \tilde{\Psi}_2''(\beta) &= \tilde{\Psi}_3''(\beta) \frac{\mu_3}{\mu_2}, \quad \tilde{v}_2'' = \frac{\mu_3}{\mu_2} \tilde{v}_3(\beta). \quad (8) \end{aligned}$$

Осуществляя подстановку (6) в (3) и в граничные условия (5), будем иметь

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}_1'(\xi) &= \tilde{c}_2 \frac{\xi^2}{2} + c_2 \xi + c_3, \quad \tilde{\Psi}_2' = \tilde{c}_2 \frac{\xi^2}{2} + c_4 \xi + c_5, \\ \tilde{v}_1(\xi) &= \tilde{c}_1 \frac{\xi^2}{2} + c_6 \xi + c_7, \quad \tilde{v}_2(\xi) = \tilde{c}_1 \frac{\xi^2}{2} + c_8 \xi + c_9, \\ \tilde{u}_1(\xi) &= -\tilde{c}_1 \frac{\xi^3}{3} - c_6 \frac{\xi^2}{2} + c_{10}, \quad \tilde{u}_2(\xi) = -\tilde{c}_1 \frac{\xi^3}{3} - c_8 \frac{\xi^2}{2} + c_{11}, \\ \tilde{\Psi}_1'(\xi) &= \tilde{c}_4 \frac{\xi^2}{2} + c_{12} \xi + c_{13}, \quad \tilde{v}_3 = \tilde{c}_3 \frac{\xi^2}{2} + c_{14} \xi + c_{15}, \\ \tilde{u}_3(\xi) &= -\tilde{c}_3 \frac{\xi^3}{3} - c_{14} \frac{\xi^2}{2} + c_{16}, \\ e^{\tilde{\alpha}p} &= e^{\tilde{\alpha}} - \frac{\tilde{\alpha}}{\Lambda_1} (J_2 \tilde{c}_1 + J_3 \tilde{c}_2), \quad e^{\tilde{\alpha}p} = e^{\tilde{\alpha}} - \frac{\tilde{\alpha}}{\Lambda_1} (J_2 \tilde{\tilde{c}}_1 + J_3 \tilde{\tilde{c}}_2), \\ e^{\alpha p} &= e^{\alpha} - \frac{\tilde{\alpha}}{\Lambda_2} (J_2 \tilde{\tilde{c}}_1 + J_3 \tilde{\tilde{c}}_2), \quad J_k = \int_0^x \frac{dx}{(1 + \eta x - \eta_1 \sin \omega x)^k}. \quad (9) \end{aligned}$$

С помощью алгебраической системы, состоящей из 21 уравнения с 21 неизвестными, определяем постоянные $c_i (i = 2, 3, \dots, c_{16})$ и $\tilde{c}_1, \tilde{c}_2, \tilde{\tilde{c}}_1, \tilde{\tilde{c}}_2, \tilde{\tilde{c}}_3, \tilde{\tilde{c}}_4$:

$$\begin{aligned}c_7 &= 1, \quad c_{10} = 0, \quad c_3 = 0, \\c_{13} &= -\frac{\tilde{c}_4}{2} - c_{12}, \quad c_{15} = -\frac{\tilde{c}_3}{2} - c_{14}, \quad c_{16} = -\frac{\tilde{c}_3}{3} + \frac{c_{14}}{2}, \\c_6 &= k_1(\tilde{\tilde{c}}_1\alpha + c_8) - \tilde{c}_1\alpha, \quad c_4 = k_2(\tilde{c}_4\beta + c_{12}) - \tilde{c}_2\beta, \\c_2 &= k_1c_4, \quad c_8 = k_2c_{14}, \quad \tilde{c}_2\frac{\alpha^2}{2} + c_2\alpha + c_3 - \tilde{\tilde{c}}_2\frac{\alpha^2}{2} - c_4\alpha - c_5 = 0, \\&\tilde{c}_1\frac{\alpha^2}{2} + c_6\alpha + c_7 - \tilde{\tilde{c}}_1\frac{\alpha^2}{2} - c_8\alpha - c_9 = 0, \\&-\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\beta^3}{3} - c_8\frac{\beta^2}{2} + c_{11} + \tilde{c}_3\frac{\beta^3}{3} + c_{14}\frac{\beta^2}{2} - c_{16} = 0, \\&\tilde{\tilde{c}}_2\frac{\beta^2}{2} + c_4\beta + c_5 - \tilde{c}_4\frac{\beta^2}{2} - c_{12}\beta - c_{13} = 0, \\&\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\beta^2}{2} + c_8\beta + c_9 - \tilde{c}_3\frac{\beta^2}{2} - c_{14}\beta - c_{15} = 0, \\&\tilde{c}_1\frac{\alpha^3}{6} + c_6\frac{\alpha^2}{2} + c_7\alpha + \tilde{\tilde{c}}_1\frac{\beta^3}{6} + c_8\frac{\beta^2}{2} + c_9\beta - \tilde{\tilde{c}}_1\frac{\alpha^3}{6} - c_8\frac{\alpha^2}{2} - c_9\alpha + \\&+ \frac{\tilde{c}_3}{6} + \frac{c_{14}}{2} + c_{15} - \tilde{c}_3\frac{\beta^3}{6} - c_{14}\frac{\beta^2}{2} - c_{15}\beta = 0, \\&\tilde{c}_1 = k_1\tilde{\tilde{c}}_1, \quad \tilde{c}_2 = k_1\tilde{\tilde{c}}_2, \quad \tilde{\tilde{c}}_1 = k_3\tilde{\tilde{c}}_3, \quad \tilde{\tilde{c}}_2 = k_3\tilde{\tilde{c}}_4, \quad \tilde{c}_4 = -\tilde{c}_3\frac{J_2(1)}{J_3(1)}.\end{aligned}\tag{10}$$

Здесь $k_1 = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}}, \quad k_3 = \frac{\mu_{03}}{\mu_{02}}.$

Решение системы (10) сводится к решению следующего матричного уравнения:

$$M \cdot \bar{x} = \bar{b},\tag{11}$$

где $\bar{x} = \{\tilde{c}_3; c_4; c_5; c_6; c_9; c_{11}; c_{12}; c_{14}\}, \quad \bar{b} = \{0; 0; 0; -1; 0; 0; 0; -6\alpha\}.$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -k_1k_2 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_3 & 0 & 0 & \alpha & -1 & 0 & 0 & -k_2\alpha \\ \alpha_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \alpha_5 \\ \alpha_6 & \beta & 1 & 0 & 0 & 0 & \alpha_7 & 0 \\ \alpha_8 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \alpha_9 \\ \alpha_{10} & 0 & 0 & 3\alpha^2 & \alpha_{11} & 0 & 0 & \alpha_{12} \end{bmatrix}.$$

Здесь

$$\alpha_1 = k_2 \frac{\alpha^2}{2} \frac{J_2(1)}{J_3(1)} (1 - k_1); \quad \alpha_2 = \alpha(k_1 - 1); \quad \alpha_3 = \frac{k_2\alpha^2}{2} (k_1 - 1);$$

$$\alpha_4 = \frac{1}{3} (\beta^3 - k_2\beta^3 - 1); \quad \alpha_5 = \frac{1}{2} (\beta^2 - \beta^2k_2 - 1); \quad \alpha_6 = \frac{1}{2} \frac{J_2(1)}{J_3(1)} (\beta^2 - k_2\beta^2 - 1);$$

$$\alpha_7 = 1 - \beta; \quad \alpha_8 = \frac{1}{2} (1 - \beta^2 + k_2\beta^2), \quad \alpha_9 = 1 + \beta k_2 - \beta;$$

$$\alpha_{10} = -2 - \beta^3 + 3\beta - k_2\alpha^3 + k_2\beta^3 + k_1k_2\alpha^3, \quad \alpha_{11} = 6(\beta - \alpha);$$

$$\alpha_{12} = 6\beta + 3(1 - \beta^2 - k_2\alpha^2 + k_2\beta^2).$$

Решая матричное уравнение (8.4.11), получим:

$$\Delta = \alpha_{10}\alpha_9 - 3\alpha^2k_1k_2\alpha_8 - \alpha_{10}k_2\alpha - \alpha_{11}\alpha_8\alpha k_1k_2 + \alpha_{11}\alpha_8k_2\alpha + \alpha_{10}\alpha k_1k_2 -$$

$$- 3\alpha^2k_1k_2\alpha_3 + \alpha_{11}\alpha_9\alpha_3 - \alpha_{12}\alpha_8 - \alpha_{12}\alpha_3,$$

$$c_{14} = \frac{\alpha_{11}\alpha_8 + 6\alpha\alpha_3 + 6\alpha\alpha_8 - \alpha_{10}}{\Delta}, \quad c_4 = k_2c_{12},$$

$$\tilde{c}_3 = \frac{6\alpha^2k_2 - 3\alpha^2k_1k_2 + \alpha_{12} - \alpha_{11}\alpha_9 - 6\alpha_9\alpha}{\Delta},$$

$$c_9 = \frac{3\alpha^2k_1k_2\alpha_8 - 6\alpha^2k_2\alpha_8 - \alpha_{12}\alpha_8 - 6\alpha_9\alpha\alpha_3 + \alpha_{10}\alpha_9}{\Delta},$$

$$c_6 = \frac{k_1k_2(\alpha_{11}\alpha_8 + 6\alpha\alpha_3 + 6\alpha\alpha_8 - \alpha_{10})}{\Delta}, \quad (12)$$

$$c_{11} = \frac{3\alpha_4\alpha^2k_1k_2 - 6\alpha_4\alpha^2k_2 - \alpha_4\alpha_{12} + \alpha_4\alpha_{11}\alpha_9 + 6\alpha_4\alpha_9\alpha - \alpha_5\alpha_{11}\alpha_8 - 6\alpha_5\alpha_3\alpha - 6\alpha_5\alpha_8\alpha + \alpha_5\alpha_{10}}{\Delta},$$

$$c_{12} = \frac{3\alpha^2 k_1 k_2 \alpha_1 - \alpha_{12} \alpha_6 - 6\alpha^2 k_2 \alpha_1 - 6\alpha^2 k_2 \alpha_6 + 3\alpha^2 k_1 k_2 \alpha_6 - \alpha_{12} \alpha_1 + \alpha_{11} \alpha_9 \alpha_6 + 6\alpha_9 \alpha_6 \alpha + \alpha_{11} \alpha_9 \alpha_1 + 6\alpha_9 \alpha_1 \alpha}{\Delta(\beta k_2 + \alpha_2 k_2 + \alpha_7)},$$

$$c_5 = \left(\alpha_1 \alpha_{12} \alpha_7 - 3\alpha_1 \alpha^2 k_1 k_2^2 \beta - 3\alpha_1 \alpha^2 k_1 k_2 \alpha_7 + 6\alpha_1 \alpha^2 k_2^2 \beta + 6\alpha_1 \alpha^2 k_2 \alpha_7 + \alpha_1 \alpha_{12} k_2 \beta - \right. \\ \left. - \alpha_1 \alpha_{11} \alpha_9 k_2 \beta - \alpha_1 \alpha_{11} \alpha_9 \alpha_7 - 6\alpha_1 \alpha_9 \alpha \beta k_2 - 6\alpha_1 \alpha_9 \alpha_7 \alpha - \alpha_2 k_2 \alpha_{12} \alpha_6 + 6\alpha_2 k_2^2 \alpha^2 \alpha_6 + \right. \\ \left. + 3\alpha_2 k_2^2 \alpha^2 k_1 \alpha_6 + \alpha_2 k_2 \alpha_{11} \alpha_9 \alpha_6 + 6\alpha_2 k_2 \alpha_9 \alpha_6 \alpha \right) / \left(\Delta(\beta k_2 + \alpha_2 k_2 + \alpha_7) \right).$$

Определение несущей способности

В рассматриваемом случае несущая способность подшипника с учетом (12) определяется формулой

$$W = \frac{\tilde{c}_1}{\Lambda_1} \left(1 + \frac{\tilde{\alpha}}{2} \right) \left(\frac{\eta}{12} + \frac{\eta_1}{\omega} - \frac{\eta_1}{\omega^2} \sin \omega + \frac{\eta_1}{2\omega} (\cos \omega - 1) \right),$$

где \tilde{c}_1 определяется согласно (10) и (12).

Результаты качественного анализа полученных зависимостей, графическая интерпретация которых приведена на рис. 2, показывают:

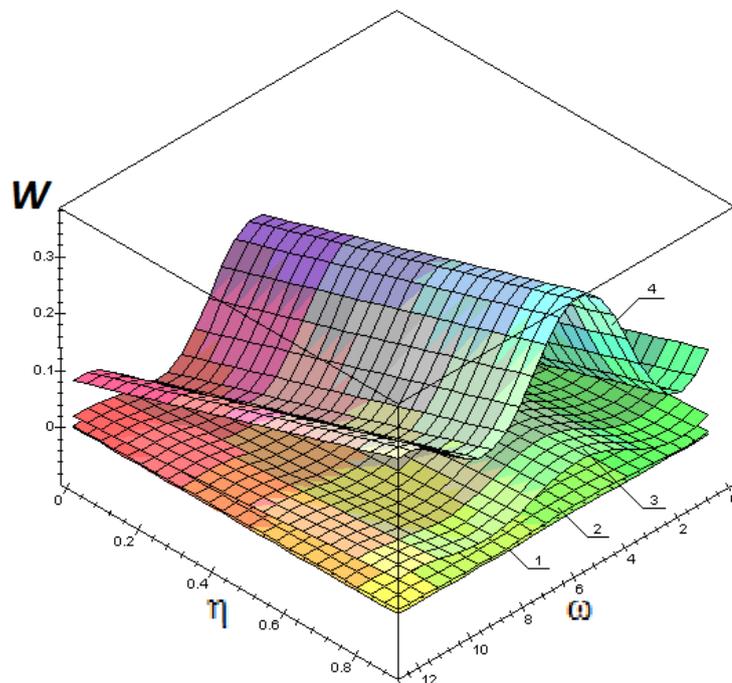


Рис. 2. Зависимость нормализованной несущей способности от параметров адаптированного профиля ω и η :

$$1 - \tilde{\alpha} = 0,1; 2 - \tilde{\alpha} = 0,5; 3 - \tilde{\alpha} = 0,8; 4 - \tilde{\alpha} = 0,9$$

- В случае единого смазочного слоя при $\alpha = 0$, $\beta = 1$ наибольшая несущая способность достигается при $\omega = \frac{3\pi}{2}$. В этом случае условие замкнутости смазочного слоя выполняется и несущая способность подшипника на 50 % больше, чем при $\omega = 0$.

- При трехслойной стратификации смазочного материала с увеличением значений вязкостного отношения k_2 при $k_1 \approx 1$, β , близких к единице и α , близких к нулю, несущая способность подшипника сочетается с наименьшим значением силы трения.

Литература

1 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. №6, Т16. - С. 698-707.

2 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. РАН. 1999, №3. С. 93-101.

3 Семенко И.С., Александрова Е.Е. Гидродинамический расчет упорного подшипника на вязкоупругой смазке при наличии пористого слоя на одной из сопряженных поверхностей // Тр. ВНИПК «Транспорт-2009», 2009. ч. 2. С. 271-272.

4 Прокопьев В.Н., Караваяев В.Г., Задорожная Е.А. и др. Динамика ротора на подшипниках с двумя и тремя смазочными слоями // Труды международного научного симпозиума "Гидродинамическая теория смазки - 120 лет". 2006. С. 436-446.

5 William, C. and W.C. Gear, 1971. Numerical initial value problems in ordinary differential equations. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 59: 253.

6 Reynolds, O., 1886. On the Theory of Lubrication and Its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments, Including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil. Proceedings of the Royal Society of London, 40 (242-245): 191-203.

7 Александрова Е.Е. Стратифицированное течение трехслойной смазки в зазоре упорного подшипника, обладающего повышенной несущей способностью и демпфирующими свойствами // Труды РГУПС, 2011. №1(15). С. 14-21.

8 Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О. Математическая модель двухслойной гидродинамической смазки упорного подшипника // Математическое моделирование и биомеханика в современном университете : Тез. докл. VIII Всерос. шк.-сем. 27–31 мая 2013, пос. Дивноморск. 2013. – С. 13.

9 Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О. Разработка расчетной модели с учетом зависимости вязкости и проницаемости пористого слоя от давления трехслойной смазки упорного подшипника, обладающего повышенной несущей способностью и демпфирующими свойствами // Трение и смазка в машинах и механизмах, 2014. №3. С.10-16.

10 Ахвердиев К.С., Лагунова Е.О., Мукутадзе М.А., Черкасова Т.С. Расчетная модель с учетом зависимости вязкости от давления двухслойной гидродинамической смазки радиального подшипника с круговой опорной поверхностью // Изв. выс. учеб. зав. Сев.-Кав. Регион, 2014. № 1. С. 71-74.

11 Мукутадзе М.А. Расчетная модель с учетом зависимости вязкости и проницаемости пористого слоя от давления трехслойной гидродинамической смазки радиального подшипника, обладающего повышенной несущей способностью и демпфирующими свойствами // Инженерный вестник Дона. 2014, № 2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2324.

12 Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О. Разработка расчетной модели с учетом зависимости вязкости от давления двухслойной гидродинамической смазки упорного подшипника, обладающего повышенной несущей способностью и демпфирующими свойствами // Тр. VII Всерос. конф. по механике деформируемого твердого тела – Ростов н/Д : ЮФУ. НИИМиПМ им. И.И. Воровича, ЮНЦ РАН, 2013. – Т. 1. – С. 32–35.

13 Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О. Расчетная модель с учетом зависимости вязкости и проницаемости от давления двухслойной смазки радиального подшипника, обладающего повышенной несущей способностью // III Международная научно-практическая конференции Наука в современном информационном обществе: Noth Charleston, USA – 2014 г. - С. 92 – 98.

14 Мукутадзе М.А. Стратифицированные слои смазочного материала с различными физико-механическими свойствами // Инженерный вестник Дона, 2014. № 4 ч. 2 - URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2014/2746.

15 Мукутадзе М.А. Стратификация смазочного материала в радиальных подшипниках скольжения // Инженерный вестник Дона, 2015. № 1 - URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2735

References

1 Akhverdiev, K.S., P.A. Vorontsov and T.S. Cherkasova, 1998. *Gidrodinamicheskii raschet podshipnikov skol'zheniya s ispol'zovaniem modeley sloistogo techeniya vyazkoy i vyazkoplachnoy smazki* [Hydrodynamic calculation of bearings of sliding with use of models of a layered current of viscous and viscoplastic greasing]. *Trenie i iznos*, №6 (T.16): 698-707.

2 Akhverdiev, K.S., P.A. Vorontsov and T.S. Cherkasova. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. RAN, №3: 93-101.



3 Semenko, I.S. and E.E. Aleksandrova. Tr. VNPК «Transport-2009», ch. 2: 271-272.

4 Prokop'ev, V.N., V.G. Karavaev V.G. and E.A. Zadorozhnaya. Trudy mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma "Gidrodinamicheskaya teoriya smazki - 120 let", pp: 436-446.

5 William, C. and W.C. Gear, 1971 Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 59: 253.

6 Reynolds, O., 1886. Proceedings of the Royal Society of London, 40 (242-245), PP. 191-203.

7 Aleksandrova, E.E., 2011. Trudy RGUPS, 1(15): 14-21.

8 Akhverdiev, K.S., M.A. Mukutadze and E.O. Lagunova. Tez. dokl. VIII Vseros. shk.-sem. 27–31 maya 2013, pos. Divnomorsk,, pp: 13.

9 Akhverdiev, K.S., M.A. Mukutadze and E.O. Lagunova. Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmax, №3: 10-16.

10 Akhverdiev, K.S., E.O. Lagunova, M.A. Mukutadze and T.S. Cherkasova. Izv. vys. ucheb. zav. Sev.-Kav. region, 1: 71-74.

11 Mukutadze, M.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2324.

12 Akhverdiev, K.S., M.A. Mukutadze and E.O. Lagunova. Tr. VII Vseros. konf. po mekhanike deformiruemogo tverdogo tela – Rostov n/D : YuFU. NIIMiPM im. I.I. Vorovicha, YuNTs RAN, 1: 32-35.

13 Akhverdiev, K.S., M.A. Mukutadze and E.O. Lagunova III Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsii Nauka v sovremennom informatsionnom obshchestve, Noth Charleston, USA, pp: 92-98.

14 Mukutadze, M.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), №4 (2). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2014/2746.

15 Mukutadze, M.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2735.

