

Метод гидродинамического расчета упорного подшипника с учетом зависимости вязкости слоистой смазочной жидкости от температуры

К.С. Ахвердиев, И.В. Колесников, С.В. Митрофанов, Б.Е. Копотун

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: В работе дается метод гидродинамического расчета упорного подшипника скольжения работающего на двухслойной смазке, с учетом зависимости вязкости смазочной жидкости от температуры. Найдено поле скоростей и давлений в смазочных слоях и с использованием выражения для скорости диссипации энергии получены аналитические выражения для вязкостей смазочных слоев. Дана оценка влияния параметров, характеризующих адаптированный к условиям трения опорного профилем подшипника, а также температурного параметра, вязкостного отношения стратифицированных слоев и их протяженностей на рабочие характеристики рассматриваемого подшипника слоистых смазочных материалах. Установлены оптимальные значения этих параметров, обеспечивающих их устойчивый жидкостный режим смазывания и повышенную несущую способность рассматриваемого упорного подшипника.

Ключевые слова: адаптированный профиль, стратифицированное течение, несущая способность, сила трения, течение Куэтта.

Введение. Гидродинамическому расчету упорных и радиальных подшипников скольжения, работающих на слоистых смазочных материалах, посвящено большое количество работ [1-6]. Анализ работ в показывает, что практически во всех этих работах вязкость смазочного материала считается постоянной или зависящей только лишь от давления. Общеизвестно, информативность и практическая ценность гидродинамических расчетов узлов трения, работающих на слоистых смазочных материалах существенно зависит от адекватности используемой в ней физической модели смазочного материала [7-9]. Учет зависимости вязкости от температуры является одним из необходимых факторов, определяющих надежное функционирование трибосистем [10-12]. Основной целью данной работы является разработка расчетной модели подшипников скольжения, работающих на слоистых смазочных материалах, учитывающей вышеуказанный фактор.

Постановка задачи. Рассматривается установившееся стратифицированное течение двухслойного вязкого несжимаемого смазочного материала в зазоре

упорного подшипника (система «ползун-направляющая») с адаптированным к условным трениям опорного профиля [5].

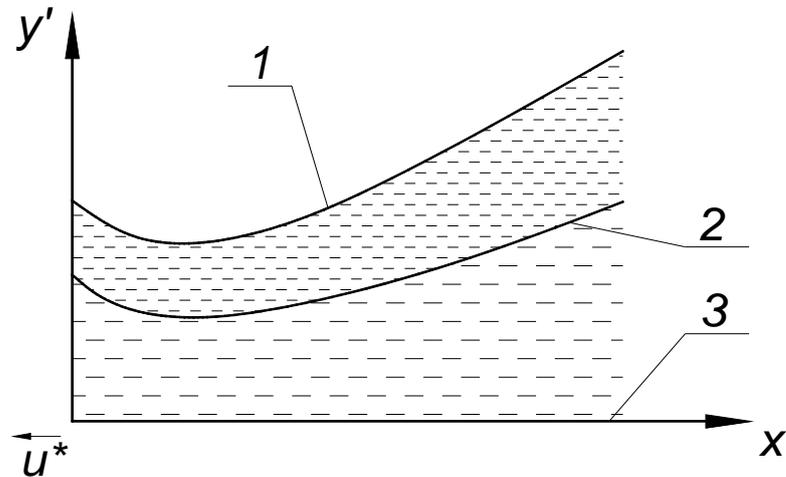


Рис. 1 – Расчетная схема двухслойной стратификации упругодеформируемого подшипника:

1 – контур ползуна, прилегающий к смазочному слою; 2 – граница раздела смазочных слоев; 3 – направляющая

Предполагается, что ползун неподвижен, а направляющая движется в сторону сужения зазора со скоростью u^* (рис. 1). Также предполагается, что вязкость смазочных слоев зависит от температуры. В декартовой системе координат $x'O'y'$ уравнение адаптированного контура ползуна, границы раздела, а также направляющей можно записать в виде [8]

$$y' = h_0 + x'tg\alpha' - a' \sin \omega'x' = h'(x'), \quad y' = \alpha h'(x'), \quad y' = 0.$$

(1)

Здесь $\alpha \in [0, 1]$, h_0 – начальный зазор, $tg\alpha'$ – угловой коэффициент линейного контура, a' и ω' соответственно амплитуда и частота контурных возмущений. Предполагается, что $tg\alpha'$ и a' одного порядка малости, $\omega = \omega'l$ в дальнейшем определяется из условия максимума несущей способности подшипника [5].

Для получения аналитических решений сделаем ряд предположений и упрощений.

1. Зависимость вязкости смазки от температуры можно представить в виде

$$\mu'_i = \mu_{0i} \exp[-\sigma(T'_i - T_0)], \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

где μ_{0i} – характерная вязкость в смазочных слоях, T_0 – характерная температура, σ – экспериментальная постоянная величина, T_i – температура в смазочных слоях.

2. Количество утечки смазки пренебрежимо мало. Это соответствует отношению ширины вкладыша к его длине не более 1,5.

3. Пренебрегаем концевыми утечками.

4. Пленка смазки является адиабатической.

5. Рассматриваются только течения Куэтта.

6. Инерционные эффекты жидкости не учитываются.

Исходные уравнения и граничные условия

Исходные уравнения, описывающие движение вязкой несжимаемой жидкости в приближении «тонкого слоя», для безразмерных переменных с учетом зависимости вязкости от температуры и уравнение неразрывности.

$$\frac{\partial^2 v_i}{\partial y^2} = \frac{1}{e^{-\sigma T_0(T_i-1)}} \frac{dp_i}{dx}, \quad \frac{\partial u_i}{\partial y} + \frac{\partial v_i}{\partial x} = 0, \quad (i = 1, 2). \quad (3)$$

Размерные величины $x', y', v'_i, u'_i, p'_i, \mu'_i, T'_i$ связаны с безразмерными $x, y, v_i, u_i, p_i, \mu_i, T_i$ следующими соотношениями

$$y' = h_0 y, \quad x' = l \cdot x, \quad v'_i = u^* v_i, \quad u'_i = \frac{h_0}{l} u_i, \quad p'_i = p_i^* p_i, \quad p_i^* = \frac{l \mu_{0i} u^*}{h_0^2}, \quad \mu'_i = \mu_{0i} \mu_i, \quad T'_i = T_0 \cdot T_i. \quad (4)$$

Где u'_i, v'_i – компоненты вектора скорости смазочной среды, p'_i – гидродинамическое давление в смазочных слоях, μ'_i – коэффициент динамической вязкости смазочных слоев.

Граничные условия на поверхности ползуна и направляющей записываются в виде

$$u_1|_{y=0} = 0, \quad v_1|_{y=0} = 1, \quad p_i(0) = p_i(1) = 0, \quad u_2|_{y=h(x)} = 0, \quad v_2|_{y=h(x)} = 0. \quad (5)$$

На границе раздела слоев граничные условия записываются в виде:

$$u_1|_{y=ah} = u_2|_{y=ah}, \quad v_1|_{y=ah} = v_2|_{y=ah}, \quad \frac{\partial v_1}{\partial y}|_{y=ah} = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}} \frac{\partial v_2}{\partial y}|_{y=ah}, \quad p_1 = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}} p_2, \\ -\frac{u_1}{v_1} = \alpha h'(x), \quad h(x) = 1 + \eta x - \eta_1 \sin \omega x, \quad \eta = \frac{ltg\alpha'}{h_0}, \quad \eta_1 = \frac{a'}{h_0}, \quad \omega = \omega' l. \quad (6)$$

Граничные условия (5) означают прилипание смазки к поверхности ползуна и направляющей. Граничные условия (6) означают: равенство скоростей, касательных и нормальных напряжений на границе раздела слоев, а также условие 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 задачи.

Формирование точного автомодельного решения системы дифференциальных уравнений (3), соответствующих граничным условиям (5) и (6) будем искать с помощью функции тока

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

$$V_i(x, y) = \tilde{v}_i(\xi), \quad \xi = \frac{y}{h}, \quad \frac{1}{\mu_1} \frac{dp_1}{dx} = \frac{\tilde{c}_1}{h^2} + \frac{\tilde{c}_2}{h^3}, \quad \frac{1}{\mu_2} \frac{dp_2}{dx} = \frac{\tilde{c}_1}{h^2} + \frac{\tilde{c}_2}{h^3}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (3) в (5) и (6), получим

$$\tilde{\Psi}_1''' = \tilde{c}_2, \quad \tilde{v}_1'' = \tilde{c}_1, \quad \tilde{u}_1' + \xi \tilde{v}_1' = 0, \quad \tilde{\Psi}_2''' = \tilde{c}_2, \quad \tilde{v}_2 = \tilde{c}_1, \quad \tilde{u}_2' + \xi \tilde{v}_2' = 0 \quad (8)$$

$$\tilde{\Psi}_1'(0) = 0; \quad \tilde{u}_1(0) = 0, \quad \tilde{v}_1(0) = 1, \quad \tilde{\Psi}_2'(1) = 0, \quad \tilde{u}_2(1) = 0,$$

$$\tilde{v}_2(1) = 0, \quad \tilde{\Psi}_1'(\alpha) = \tilde{\Psi}_2'(\alpha), \quad \tilde{v}_1(\alpha) = \tilde{v}_2(\alpha), \quad \tilde{u}_1(\alpha) = \tilde{u}_2(\alpha),$$

$$\tilde{v}_1'(\alpha) = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}} \tilde{v}_2'(\alpha), \quad \tilde{\Psi}_1''(\alpha) = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}} \tilde{\Psi}_2''(\alpha), \quad p_1 = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}} p_2, \quad \int_0^\alpha \tilde{v}_1(\xi) d\xi + \int_\alpha^1 \tilde{v}_2(\xi) d\xi = 0. \quad (9)$$

Учитывая, что расслоение смазочного материала происходит вблизи неподвижной твердой поверхности, т.е. при значениях α , близких к единице,

условие раздельного течения $\frac{-h'u_i(\alpha)}{v_2(\alpha)} = \alpha h'$ в принятом нами приближении удовлетворяется. На самом деле из граничного условия

$$\tilde{u}_2(\alpha) + \alpha \tilde{v}_2(\alpha) + \int_\alpha^1 \tilde{v}_2(\xi) d\xi = 0$$

следует

$$\tilde{v}_2(\alpha) \left[\frac{\tilde{u}_2(\alpha)}{\tilde{v}_2(\alpha)} + \alpha + \int_\alpha^1 \frac{\tilde{v}_2(\xi) d\xi}{\tilde{v}_2(\alpha)} \right] = 0.$$

Используем теорему о среднем значении,

$$\tilde{v}_2(\alpha) \left[\frac{\tilde{u}_2(\alpha)}{\tilde{v}_2(\alpha)} + \alpha + \frac{\tilde{v}_2(\alpha^*)}{\tilde{v}_2(\alpha)} (1 - \alpha) \right], \quad \alpha^* \in (\alpha, 1).$$

Исходя $\tilde{v}_2(\alpha^*) < \tilde{v}_2(\alpha)$, $(1-\alpha) \ll 1$, с точностью до членов $O\left(\frac{\tilde{v}_2(\alpha^*)}{\tilde{v}_2(\alpha)}(1-\alpha)\right)$,

получим $\int_0^\alpha \tilde{v}_1(\xi) d\xi \approx 0$, $\int_\alpha^1 \tilde{v}_2(\xi) d\xi \approx 0$.

Интегрируя уравнения (8) – (9) получим:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}'_1 &= \tilde{c}_2 \frac{\xi^2}{2} + c_2 \xi + c_3, & \tilde{v}_1 &= \tilde{c}_1 \frac{\xi^2}{2} + c_6 \xi + c_7, & \tilde{\Psi}'_2 &= \tilde{c}_2 \frac{\xi^2}{2} + c_4 \xi + c_5, & \tilde{v}_2 &= \tilde{c}_1 \frac{\xi^2}{2} + c_8 \xi + c_9, \\ \tilde{u}_1 &= -\tilde{c}_1 \frac{\xi^3}{3} - c_6 \frac{\xi^2}{2} + c_{10}, & \tilde{u}_2 &= -\tilde{c}_1 \frac{\xi^3}{3} - c_8 \frac{\xi^2}{2} + c_{11}, \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\mu_1^*} p_1 = \tilde{c}_1 J_2(x) + \tilde{c}_2 J_3(x), \quad \frac{1}{\mu_2^*} p_2 = \tilde{c}_1 J_2(x) + \tilde{c}_2 J_3(x),$$

$$J_k(x) = \int_0^x \frac{dx}{(1 + \eta x - \eta_1 \sin \omega x)^k}.$$

(10)

Нахождение постоянных $c_i (i=2,3,\dots,13)$, $\tilde{c}_1, \tilde{c}_2, \tilde{c}_1, \tilde{c}_2$ приводит к системе с 16 неизвестными:

$$\begin{aligned} c_7 &= 1, \quad c_{10} = 0, \quad c_3 = 0, \quad -\tilde{c}_1 \frac{1}{3} - c_8 \frac{1}{2} + c_{11} = 0, \quad \tilde{c}_1 \frac{1}{2} + c_8 + c_9 = 0, \\ \tilde{c}_2 \frac{1}{2} + c_4 + c_5 &= 0, \quad \tilde{c}_1 = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}} \tilde{c}_1, \quad \tilde{c}_2 = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}} \tilde{c}_2, \quad \tilde{c}_2 = -\frac{\tilde{c}_1 J_2(1)}{J_3(1)}, \\ \tilde{c}_1 \alpha + c_6 &= \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}} (\tilde{c}_1 \alpha + c_8), \quad \tilde{c}_2 \alpha + c_2 = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}} (\tilde{c}_2 \alpha + c_4), \\ \tilde{c}_2 \frac{\alpha^2}{2} + c_2 \alpha + c_3 - \tilde{c}_2 \frac{\alpha^2}{2} - c_4 \alpha - c_5 &= 0; \quad \tilde{c}_1 \frac{\alpha^2}{2} + c_6 \alpha + c_7 - \tilde{c}_1 \frac{\alpha^2}{2} - c_8 \alpha - c_9 = 0, \\ \tilde{c}_1 \frac{\alpha^3}{6} + c_6 \frac{\alpha^2}{2} + c_7 \alpha - \tilde{c}_1 \frac{\alpha^3}{6} - c_8 \frac{\alpha^2}{2} - c_9 \alpha + \tilde{c}_1 \frac{1}{6} + c_8 \frac{1}{2} + c_9 &= 0. \end{aligned}$$

(11)

Полученную систему (11) решим матричным способ

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

(12)

где $\vec{x} = \{\tilde{c}_1; c_4; c_5; c_8; c_9\}$, $\vec{b} = \{0; 0; -6\alpha; 0; -2\}$,

$$M = \begin{vmatrix} -\frac{J_2(1)}{J_3(1)} & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 2 \\ k\alpha^3 - \alpha^3 + 1 & 0 & 0 & 3k\alpha^2 - 3\alpha^2 + 3 & 6 - 6\alpha \\ (1-k)\alpha^2 \frac{J_2(1)}{J_3(1)} & 2\alpha(k-1) & -2 & 0 & 0 \\ \alpha^2(k-1) & 0 & 0 & 2\alpha(k-1) & -2 \end{vmatrix}.$$

В результате имеем:

$$\tilde{c}_1 = \frac{6 + 6k\alpha^2 - 6\alpha^2}{\Delta}, \quad c_4 = \frac{\frac{J_2(1)}{J_3(1)}(3 - 6\alpha^2 + 3\alpha^4 + 3k^2\alpha^4 - 6k\alpha^4)}{(\alpha k - \alpha + 1)\Delta},$$

$$c_5 = \frac{-\frac{J_2(1)}{J_3(1)}\alpha(-3\alpha^2 - 3\alpha + 3\alpha^3 + 3 + 6k\alpha^2 - 3k + 3\alpha^3k^2 - 6\alpha^2k^2 - 12k\alpha^3 + 6\alpha k)}{(\alpha k - \alpha + 1)\Delta},$$

$$c_8 = \frac{4 - 4\alpha^3 + 4k\alpha^3}{\Delta}, \quad c_9 = \frac{-4\alpha^3 + 4k\alpha^3 - 3k\alpha^2 + 3\alpha^2 + 1}{\Delta}, \quad c_2 = kc_4, \quad c_6 = kc_8,$$

$$\Delta = -4\alpha^3 + 1 + \alpha^4 - 6k\alpha^2 + 4k\alpha^3 + k^2\alpha^4 + 4k\alpha - 2k\alpha^4 - 4\alpha + 6\alpha^2,$$

$$\frac{J_2(1)}{J_3(1)} = 1 + \frac{1}{2}\eta + \frac{\eta_1}{\omega}(\cos \omega - 1), \quad \tilde{c}_2 = -\tilde{c}_1 \left(1 + \frac{1}{2}\eta + \frac{\eta_1}{\omega}(\cos \omega - 1) \right),$$

$$\tilde{c}_1 = k\tilde{c}_1, \quad \tilde{c}_2 = -\tilde{c}_1 \left(1 + \frac{1}{2}\eta + \eta_1(\cos \omega - 1) \right), \quad k = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}}.$$

(13)

Для определения безразмерного гидродинамического давления P_i в смазочных слоях, вязкость μ_i заменим ее средним арифметическим

значением соответствующим начальному и конечному сечению, т.е. $\mu_i = (\mu_i(0) + \mu_i(1)) / 2$. Для этого необходимо определить безразмерную вязкость μ_i как функцию от x . Воспользовавшись выражением для скорости диссипации энергии под действием сил сдвига, будем иметь:

$$\begin{aligned} \frac{dH_1}{dx} &= \frac{2\mu_{01}\mu_1lh}{h_0} \int_0^\alpha \left(\frac{\tilde{\psi}_1''(\xi)}{h^2} + \frac{\tilde{v}_1'(\xi)}{h} \right) d\xi, \\ \frac{dH_2}{dx} &= \frac{2\mu_{02}\mu_2lh}{h_0} \int_\alpha^1 \left(\frac{\tilde{\psi}_2''(\xi)}{h^2} + \frac{\tilde{v}_2'(\xi)}{h} \right) d\xi. \end{aligned} \quad (14)$$

Для определения повышенной температуры получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \frac{dT_1'}{dx} &= \frac{dH_1}{c_p Q_1 dx} = \frac{1}{c_p Q_1} \frac{2\mu_{01}\mu_1lh}{h_0} \int_0^\alpha \left(\frac{\tilde{\psi}_1''(\xi)}{h^2} + \frac{\tilde{v}_1'(\xi)}{h} \right) d\xi, \\ \frac{dT_2'}{dx} &= \frac{dH_2}{c_p Q_2 dx} = \frac{1}{c_p Q_2} \frac{2\mu_{02}\mu_2lh}{h_0} \int_\alpha^1 \left(\frac{\tilde{\psi}_2''(\xi)}{h^2} + \frac{\tilde{v}_2'(\xi)}{h} \right) d\xi, \end{aligned} \quad (15)$$

где Q_i – расход смазочного материала в единицу времени; c_p – теплоемкость при постоянном давлении

$$Q_1 = u^* h_0 \int_0^\alpha \tilde{\psi}_1'(\xi) d\xi, \quad Q_2 = u^* h_0 \int_\alpha^1 \tilde{\psi}_2'(\xi) d\xi \quad (16)$$

Интегрируя $\mu_i = e^{-\sigma T_0(T_i-1)}$ по x

$$\frac{d\mu_i}{dx} = -\sigma T_0 \mu_i \frac{dT_i}{dx} \quad (17)$$

Комбинируя (15) и (17) с учетом (16) будем иметь

$$\frac{d\mu_1}{dx} = \frac{-2\mu_{01}u^* \sigma \mu_1^2 \int_0^\alpha \left(\frac{\tilde{\psi}_1''(\xi)}{h^2} + \frac{\tilde{v}_1'(\xi)}{h} \right) d\xi}{h_0^2 c_p \int_0^\alpha \tilde{\psi}_1'(\xi) d\xi},$$

$$\frac{d\mu_2}{dx} = \frac{-2\mu_{02}u^* \sigma \mu_2^2 \int_\alpha^1 \left(\frac{\tilde{\psi}_2''(\xi)}{h^2} + \frac{\tilde{v}_2'(\xi)}{h} \right) d\xi}{h_0^2 c_p \int_\alpha^1 \tilde{\psi}_2'(\xi) d\xi}.$$

(18)

Обозначим

$$K_1 = \frac{2\sigma\mu_{01}u^*}{h_0^2 c_p \int_0^\alpha \tilde{\psi}_1'(\xi) d\xi}, \quad K_2 = \frac{2\sigma\mu_{02}u^*}{h_0^2 c_p \int_\alpha^1 \tilde{\psi}_2'(\xi) d\xi}, \quad \Delta_1 = \int_0^\alpha (\tilde{\psi}_1''(\xi))^2 d\xi; \quad \Delta_2 = \int_0^\alpha 2\tilde{\psi}_1''\tilde{v}_1'(\xi) d\xi;$$

$$\Delta_3 = \int_0^\alpha (\tilde{v}_1'(\xi))^2 d\xi; \quad \tilde{\Delta}_1 = \int_\alpha^1 (\tilde{\psi}_2''(\xi))^2 d\xi; \quad \tilde{\Delta}_2 = \int_\alpha^1 2\tilde{\psi}_2''\tilde{v}_2'(\xi) d\xi; \quad \tilde{\Delta}_3 = \int_\alpha^1 (\tilde{v}_2'(\xi))^2 d\xi.$$

(19)

С учетом (18) и (19) для μ_1 и μ_2 получим:

$$\frac{1}{\mu_1^2} \frac{d\mu_1}{dx} = -k_1 \left(\frac{\Delta_1}{h^3} + \frac{\Delta_2}{h^2} + \frac{\Delta_3}{h} \right); \quad \frac{1}{\mu_2^2} \frac{d\mu_2}{dx} = -k_2 \left(\frac{\tilde{\Delta}_1}{h^3} + \frac{\tilde{\Delta}_2}{h^2} + \frac{\tilde{\Delta}_3}{h} \right);$$

(20)

$$\mu_1(0) = \mu_2(0) = 1.$$

(21)

Решая уравнения (20) с граничными условиями (21) получим

$$\mu_1 = \frac{1}{1 + K_1 (\Delta_1 J_3(x) + \Delta_2 J_2(x) + \Delta_3 J_1(x))},$$

$$\mu_2 = \frac{1}{1 + K_2 (\tilde{\Delta}_1 J_3(x) + \tilde{\Delta}_2 J_2(x) + \tilde{\Delta}_3 J_1(x))}.$$

(22)

Используя формулы (22) для μ_i^* будем иметь

$$\mu_i^* = \frac{\mu_i(0) + \mu_i(1)}{2},$$

где

$$\begin{aligned} \mu_1^* &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 + K_1(\Delta_1 J_3(1) + \Delta_2 J_2(1) + \Delta_3 J_1(1))}, \\ \mu_2^* &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 + K_2(\tilde{\Delta}_1 J_3(x) + \tilde{\Delta}_2 J_2(x) + \tilde{\Delta}_3 J_1(x))}. \end{aligned} \quad (23)$$

С учетом (23) для определения безразмерного гидродинамического давления в смазочном слое, прилегающем к подвижной поверхности подшипника будем исходить из уравнения

$$\frac{dp_1}{dx} = \mu_1^* \left(\frac{\tilde{c}_1}{h^2(x)} + \frac{\tilde{c}_2}{h^3(x)} \right). \quad (24)$$

Для определения постоянной интегрирования и константы \tilde{c}_2 воспользуемся граничными условиями

$$p_1(0) = p_1(1) = 0. \quad (25)$$

Решение задачи (24) – (25) с точностью до членов $O(\eta^2)$ и $O(\eta_1^2)$ запишем в виде

$$p_1 = \mu_1^* \tilde{c}_1 \left[\frac{1}{2} \eta x^2 - \frac{1}{2} \eta x + \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega x - 1) - \frac{\eta_1 x}{\omega} (\cos \omega - 1) \right]. \quad (26)$$

Из полученных формул (23) и (26) следует, что безразмерная вязкость каждого смазочного слоя μ_i и безразмерное гидродинамическое давление p_i существенно зависит от теплового параметра K_i . С увеличением значения

этого параметра значение безразмерного коэффициента вязкости и безразмерного гидродинамического давления в смазочном слое, прилегающем к подвижной поверхности направляющей резко уменьшаются.

С учетом (26) и (10) для несущей способности и силы трения получим:

$$\tilde{R}_y = \frac{R_y}{p^* l} = - \int_0^1 p_1(x) dx = -\mu_1^* \tilde{c}_1 \left[\frac{1}{6} \eta - \frac{1}{4} \eta - \frac{\eta_1}{2\omega} (\cos \omega - 1) + \frac{\eta_1}{\omega^2} \sin \omega - \frac{\eta_1}{\omega} \right], \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \tilde{L}_{\text{тр}} &= \frac{L_{\text{тр}} h_0}{\mu_{01} u^* l} = \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}''(0)}{h^2(x)} + \frac{\tilde{\upsilon}'(0)}{h(x)} \right) \mu_1^* dx = \\ &= \mu_1^* \left[kc_4 \left(1 - \eta - \frac{2\eta_1}{\omega} (\cos \omega - 1) \right) + kc_8 \left(1 - \frac{\eta}{2} - \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega - 1) \right) \right]. \end{aligned} \quad (28)$$

Для проведения численного анализа полученных аналитических выражений для $\mu_i(x)$, \tilde{R}_y и $\tilde{L}_{\text{тр}}$ с учетом формул (10), (19) найдем в принятом нами приближении выражения для Δ_i , ($i = 1, 2, 3$) и для $J_i(x)$, ($i = 1, 2$)

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \frac{\tilde{c}_2^2 \alpha^3}{3} + c_2 \tilde{c}_2 \alpha^2 + c_2^2 \alpha; \quad \Delta_2 = 2 \left[\frac{\tilde{c}_2 \tilde{c}_1 \alpha^3}{3} + \frac{\tilde{c}_2 c_6 \alpha^2}{2} + \frac{c_2 \tilde{c}_1 \alpha^2}{2} + c_2 c_6 \alpha \right]; \\ \Delta_3 &= \tilde{c}_1^2 \frac{\alpha^3}{3} + \tilde{c}_1 c_6 \alpha^2 + c_6^2 \alpha; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_1(x) &= x - \eta \frac{x^2}{2} - \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega x - 1); \quad J_1(1) = 1 - \frac{\eta}{2} - \frac{\eta_1}{\omega} (\cos \omega - 1); \\ J_2(x) &= x - \eta x^2 - \frac{2\eta_1}{\omega} (\cos \omega x - 1); \quad J_2(1) = 1 - \eta - \frac{2\eta_1}{\omega} (\cos \omega - 1); \\ J_3(x) &= x - \frac{3}{2} \eta x^2 - \frac{3\eta_1}{\omega} (\cos \omega x - 1); \quad J_3(1) = 1 - \frac{3}{2} \eta - \frac{3\eta_1}{\omega} (\cos \omega - 1). \end{aligned}$$

Численный анализ проводился при следующих значениях параметров:

$$\eta = \eta_1 = 0.01; 0.05; 0.08; \quad \alpha = 0.95; 0.96; 0.97; 0.98; \quad \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}} = 0.5; 0.8; 1.1; 1.5; 2;$$

$\omega = 1; 1.5; 2; 2.5; 3; 3.5; 4; 4.5; 5; K_1 = 0.5; 0.8; 1.5; k = 1.5.$

Результаты численного анализа приведены на рис. 2–4.

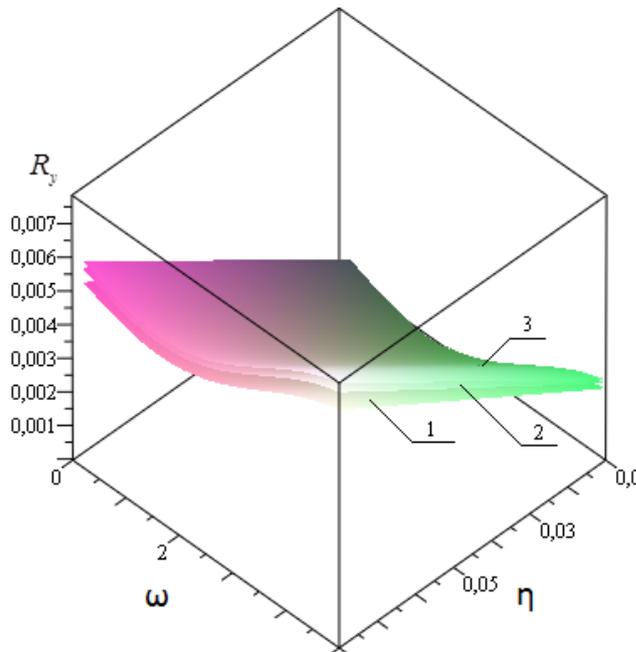


Рис. 2 – Зависимость безразмерной несущей способности от параметров ω и η

$\eta_1 = \eta; \alpha = 0.95; k = 1.5;$
1 – $K_1 = 1.5;$ 2 – $K_1 = 0.8;$ 3 –
 $K_1 = 0.5$

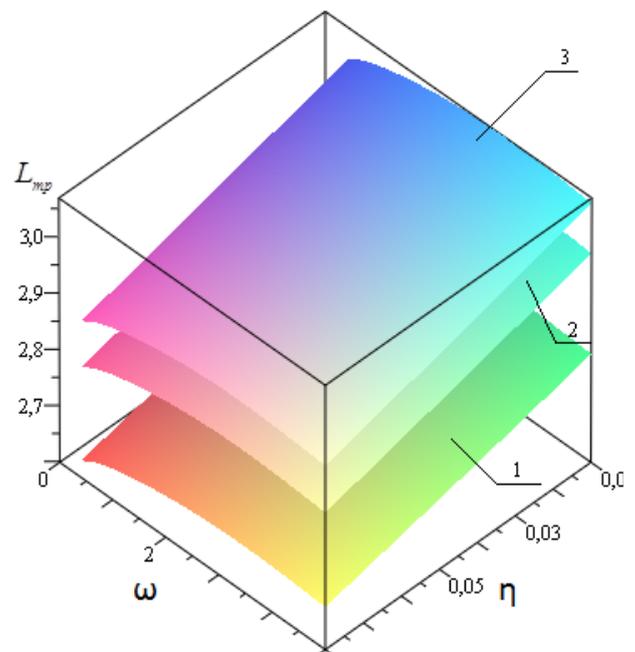


Рис. 3 – Зависимость безразмерной силы трения от параметров ω и η

$\eta_1 = \eta; \alpha = 0.95; k = 1.5;$
1 – $K_1 = 1.5;$ 2 – $K_1 = 0.8;$ 3 –
 $K_1 = 0.5$

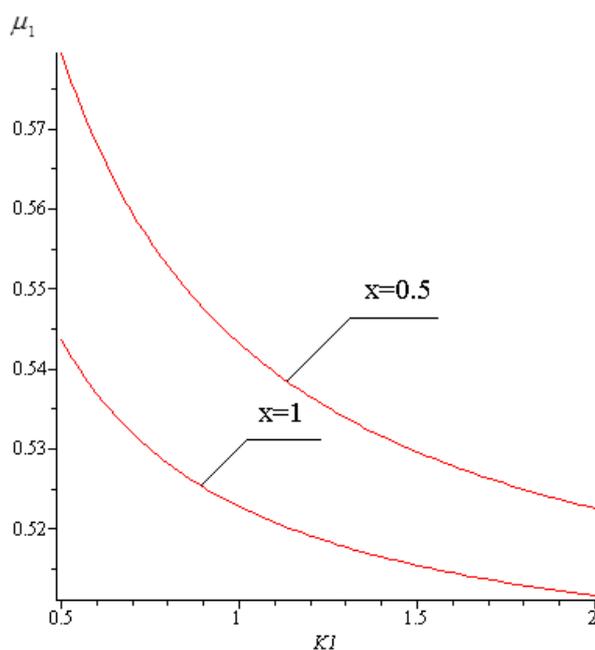


Рис. 4 – Зависимость вязкости от температурного параметра при $x = 0.5$ и $x = 1$

Полученные аналитические выражения их графики позволяют сделать ряд выводов:

1. Рабочие характеристики подшипника зависят от вязкостных отношений слоев и их протяженности, вязкостного параметра α ; параметра адаптированного профиля и температурного параметра K .

2. При $\omega = \frac{3}{2}\pi$ нагрузочная способность подшипника увеличивается примерно в 2 раза по сравнению со значением $\omega=0$.

3. С увеличением значения температурного параметра K несущая способность и сила трения снижаются.

4. С увеличением значения температурного параметра K вязкость смазочной жидкости снижается, особенно резкое снижение наблюдается при значениях $K \in [0.5, 1]$.

Литература

1. Ахвердиев К.С., Александрова Е.Е., Кручинина Е.В., Мукутадзе М.А. Стратифицированное течение двухслойной смазки в зазоре упорного подшипника, обладающего повышенной несущей способностью // Вестник Донского государственного технического университета, 2010. – Т.10. - №2(45) – С. 217-222.
 2. 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 Ростовского государственного университета путей сообщения, 2010. - №1(10). - С. 132-137.
 3. К.С. Ахвердиев, М.А. Мукутадзе, Е.Е. Александрова, А.Ч. Эркенов Математическая модель стратифицированного течения двухслойной смазочной композиции в радиальном подшипнике с повышенной несущей способностью с учетом теплообмена // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, 2011. №1(41). – С. 160-165.
 4. Мукутадзе, М.А. Стратификация смазочного материала в радиальных подшипниках скольжения // Инженерный вестник Дона, 2015, №1 – Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2735>.
 5. Мукутадзе, М.А. Поведение стратифицированных смазочных материалов в упорных подшипниках скольжения // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, 2015. №1 – С. 140-146.
 6. Мукутадзе, М.А. Стратификация смазочного материала в радиальных подшипниках при его осевой подаче и зависимости вязкости от давления // Вестник Донского государственного технического университета, 2015. Т.15, №1 (80) – С. 103-113.
-

7. 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.

8. К.С. Ахвердиев, М.А. Мукутадзе, Е.О. Лагунова, К.С. Солоп Расчетная модель упорного подшипника скольжения с повышенной несущей способностью, работающего на неньютоновских смазочных материалах с адаптированной опорной поверхностью // Инженерный вестник Дона, 2013. - №4. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2200>.

9. Мукутадзе, М.А. Стратифицированные слои смазочного материала с различными физико-механическими свойствами // Инженерный вестник Дона, 2014. №4 – Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2014/2746>.

10. Уилкок Д.Ф. Расчет упорных подшипников с эффективной работой в турбулентном режиме // Проблемы трения и смазки: Труды Американского общества инженеров-механиков. - 1977. - №1. - С. 118-126.

11. Задорожная Е.А., Караев В.Г. Расчет теплонапряженности сложнагруженного подшипника с учетом неньютоновских свойств смазочного материала // Трибология и надежность: сб. науч. тр. XI Междунар. науч. конф. СПб. - 2011. - С. 226-240.

12. Задорожная Е.А., Караев В.Г. Оценка теплового состояния сложнагруженного подшипника с учетом реологических свойств смазочного материала // Двигатели внутреннего сгорания. Всеукраинский научно-исследовательский журнал. Харьков: Изд-во «Харьковский Политехнический Институт». - 2012. - №2. - С. 66-73.

References

1. Akhverdiev K.S., Aleksandrova E.E., Kruchinina E.V., Mukutadze M.A. Vestnik DGTU. 2010. T.10. №2 (45). pp. 217-222.



2. Akhverdiev K.S. Aleksandrova E.E., Mukutadze M.A. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. 2010. №1 (10). pp. 132-137.
3. K.S. Akhverdiev, M.A. Mukutadze, E.E. Aleksandrova, A.Ch. Erkenov. Vestnik. 2011. №1 (41). pp. 160-165.
4. Mukutadze, M.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2735.
5. Mukutadze, M.A. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. 2015. №1. pp. 140-146.
6. Mukutadze, M.A. Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2015. T.15, №1 (80). pp.103-113.
7. Mukhortov I.V., Usol'tsev, N.A., Zadorozhnaya E.A., Levanov I.G. Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh. 2010. №5. pp. 8-19.
8. Akhverdiev, K.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2200.
9. Mukutadze, M.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2014/2746.
10. Uilkok D.F. Problemy treniya i smazki: Trudy Amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. 1977. №1. pp. 118-126.
11. Zadorozhnaya E.A., Karaev V.G. Tribologiya i nadezhnost': sb. nauch. tr. XI Mezhdunar. nauch. konf. SPb. 2011. pp. 226-240.
12. Zadorozhnaya E.A., Karaev V.G. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Vseukrainskiy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. Khar'kov: Izd-vo «Khar'kovskiy Politekhnicheskij Institut». 2012. №2. pp. 66-73.