



Расчетная модель радиального подшипника скольжения на основе нелинейного реологического уравнения Максвелла, с учетом существования предельного напряжения сдвига

К.С. Ахвердиев, Е.О. Лагунова, К.С. Солоп

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: В работе дается метод гидродинамического расчета радиального подшипника скольжения, работающего на смазочном материале, обладающем одновременно вязкоупругопластичными свойствами. При разработке расчетной модели в качестве исходных уравнений используется нелинейная модель Максвелла с учетом существования предельного напряжения сдвига. Асимптотическое решение рассматриваемой задачи найдено по четным степеням параметра, обусловленного наличием предельного напряжения сдвига смазочного материала. Найдено поле скоростей и давлений в смазочном слое, получено аналитическое выражение для несущей способности подшипника. Дана оценка влияния параметров, характеризующих упругие свойства смазочного материала (число Дебора) и безразмерного параметра, характеризующего вязкопластичные свойства смазочного материала (параметр пластичности) на несущую способность радиального подшипника.

Ключевые слова: радиальный подшипник, несущая способность, предельное напряжение сдвига, параметр пластичности, деформация.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

Рассмотрим стационарное движение смазочной жидкости с вязкоупругопластичными свойствами в зазоре радиального подшипника бесконечной длины. Подшипник считается неподвижным, а шип вращается с угловой скоростью Ω . В полярной системе координат (r, θ) с полюсом в центре шипа уравнение контура шипа и подшипника (рис. 1) запишется в виде:

$$r' = r_0, \quad r' = r_1 + e \cos \theta \quad (1)$$

где r_0 - радиус шипа; r_1 - радиус подшипника; e - эксцентриситет.

Реологическое уравнение движения смазочной жидкости в рассматриваемом случае запишется в виде:

$$\frac{\partial v'_\theta}{\partial r'} = \frac{\tau_0}{\mu} sh \frac{\tau'}{\tau_0} + \frac{1}{G} \frac{\partial \tau'}{\partial t'} \quad (2)$$

Здесь G - модуль упругости; μ - динамический коэффициент вязкости; τ_0 - предельное напряжение сдвига; t' - время; v'_θ - компонента вектора скорости в окружном направлении; $\frac{\mu}{G} = \lambda$ - характеризует время релаксации жидкости; τ' - касательное напряжение.

В случае установившегося движения жидкости (в рассматриваемом случае) производная $\frac{\partial}{\partial t'}$ в уравнении (2) может быть заменена производной

$$\omega \frac{\partial}{\partial \theta}.$$

Уравнение (2) примет вид:

$$\frac{\partial v'_\theta}{\partial r'} = \frac{\tau_0}{\mu} sh \frac{\tau'}{\tau_0} + \frac{\omega}{G} \frac{\partial \tau'}{\partial \theta} \quad (3)$$

При вышеуказанных допущениях рассматриваемое равновесие элемента жидкости, находящейся между поверхностями ползуна, приводит к следующему уравнению:

$$\frac{\partial \tau'}{\partial r'} = \frac{1}{r_0} \frac{dp'}{d\theta} \quad (4)$$

где p' гидродинамическое давление в смазочном слое.

Интегрируя уравнение (4) будем иметь:

$$\tau' = \frac{1}{r_0} \frac{dp'}{d\theta} r' + c'(\theta) \quad (5)$$

С учетом (5) уравнение (3) приводится к виду:

$$\frac{\partial v'_\theta}{\partial r'} = \frac{\tau_0}{\mu} sh \left[\frac{1}{\tau_0} \left(\frac{1}{r_0} \frac{dp'}{d\theta} r' + c'(\theta) \right) \right] + \frac{\Omega}{G} \left[\frac{1}{r_0} \frac{d^2 p'}{d\theta^2} r' + \frac{dc'}{d\theta} \right] \quad (6)$$

Дифференцируя это уравнение по r' , получим:

$$\frac{\partial^2 v'_\theta}{\partial r'^2} = \frac{1}{\mu r_0} \frac{dp'}{d\theta} ch \left[\frac{1}{\tau_0} \left(\frac{1}{r_0} \frac{dp'}{d\theta} r' + c'(\theta) \right) \right] + \frac{\Omega}{G} \frac{1}{r_0} \frac{d^2 p'}{d\theta^2} \quad (7)$$

При анализе рассматриваемой системы за исходное берется уравнение (7) и уравнение неразрывности.

$$\frac{\partial}{\partial r'} (r' v'_r) + \frac{\partial v'_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (8)$$

Система уравнения (7) (8) решается при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} v'_\theta &= \Omega r_0, \quad v'_r = 0 \quad \text{при } r' = r_0, \\ v'_\theta &= 0, \quad v'_r = 0 \quad \text{при } r' = 1 + \eta \cos \theta \\ p'(\alpha_1) &= p'(\alpha_2) = 0, \quad \frac{dp'}{d\theta}(\alpha_1) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

где α_1 и α_2 соответственно координаты начала и конца свободной поверхности. Кроме граничных условий (9) для гидродинамического давления получаем дополнительные условия в предположении

существования определенного состояния жидкости в момент вхождения в подшипник.

В случае, когда смазка находится в ненапряженном состоянии и внезапно подвергается сдвигу с определенной скоростью в момент ее поступления в подшипник будем иметь:

$$c' = 0, \quad \frac{dp'}{d\theta'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = \alpha \quad (10)$$

Для случая, когда смазка поступает в подшипник при полной релаксации упругого компонента деформации, дополнительные условия запишутся в виде:

$$\frac{dc'}{d\theta} = 0, \quad \frac{d^2 p'}{d\theta^2} = 0 \quad \text{при} \quad r' = \alpha \quad (11)$$

Перейдем к безразмерным переменным по формулам:

$$v'_r = \Omega \delta u, \quad v'_\theta = \Omega r_0 v, \quad r' = r_0 + \delta r, \quad v = r_1 - r_0$$
$$p' = p^* p, \quad p^* = \frac{\mu \Omega r_0^2}{\delta^2}, \quad c' = c^* c, \quad c^* = \frac{\mu \Omega r_0^2}{\delta^2 \tau_0} \quad (12)$$

Подставляя (12) в (7), (8), (9) и (10) с точностью до членов $o\left(\frac{\delta}{r_0}\right)$ будем

иметь:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = \frac{dp}{d\theta} ch \left(\frac{dp}{d\theta} A + AC \right) + \beta \frac{d^2 p}{d\theta^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial v}{\partial r} = \frac{r_0}{A\delta} sh \left(A \frac{dp}{d\theta} + AC \right) + \beta \frac{d^2 p}{d\theta^2} + \beta \frac{dc}{d\theta} \quad (14)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0$$

Здесь $A = \frac{\mu \Omega r_0^2}{\tau_0 \delta^2}$, $\beta = \frac{\mu \Omega r_0}{G \delta}$

Граничные условия (10) запишем в виде:

$$\begin{aligned}u &= 0, \quad v = 1 \quad \text{при} \quad r = 0; \\u &= 0, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 + \eta \cos \theta; \\p(\alpha_1) &= p(\alpha_2) = 0, \quad \left. \frac{dp}{d\theta} \right|_{\theta=\alpha_1} = 0, \quad \eta = \frac{e}{\delta}\end{aligned}\quad (15)$$

Полагая $A \ll 1$ и воспользуемся разложением chx и shx , то асимптотическое решение системы уравнений (16), удовлетворяющее граничным условиям (15) будем иметь в виде рядов по четным степеням малого параметра A :

$$\begin{aligned}v &= v_0 + A^2 v_1 + A^4 v_2 + \dots, \\u &= u_0 + A^2 u_1 + A^4 u_2 + \dots, \\p &= p_0 + A^2 p_1 + A^4 p_2 + \dots, \\c &= c_0 + A^2 c_1 + A^4 c_2 + \dots;\end{aligned}\quad (16)$$

Подставляя (16) в (14) и (15) с учетом асимптотического разложения функций chx и shx для коэффициентов разложения с точностью до членов $O(A^2)$ включительно, приходим к следующей системе уравнений и граничных условий к ним:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 v_0}{\partial r^2} &= \frac{dp_0}{d\theta} + \beta \frac{d^2 p_0}{d\theta^2} \\ \left. \frac{\partial v_0}{\partial r} \right|_{r=0} &= \frac{c_0 \cdot r_0}{\delta} + \beta \frac{dc_0}{d\theta} + \beta \frac{d^2 p_0}{d\theta^2} + \frac{r}{\delta} \frac{dp_0}{d\theta} \\ \frac{\partial v_0}{\partial \theta} + \frac{\partial u_0}{\partial r} &= 0\end{aligned}\quad (17)$$

$$\begin{aligned}u_0 &= 0, \quad v_0 = 1 \quad \text{при} \quad r = 0; \\u_0 &= 0, \quad v_0 = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 + \eta \cos \theta;\end{aligned}$$

$$p_0(\alpha_1) = p_0(\alpha_2) = 0, \quad \left. \frac{dp_0}{d\theta} \right|_{\theta=\alpha_1} = 0, \quad c_0|_{\theta=\alpha_1} = 0\quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial r^2} = \frac{dp_1}{d\theta} + \beta \frac{d^2 p_1}{d\theta^2} + \frac{1}{2} c_0^2 \frac{dp_0}{d\theta},$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_1}{\partial r} = & \frac{r_0}{G\delta} c_0^3 + \frac{r_0}{G\delta} \left(\frac{dp_0}{d\theta} \right)^3 + c_0 \left(\frac{dp_0}{d\theta} \right)^2 \frac{1}{2} + c_0^2 \frac{dp_0}{d\theta} \frac{1}{2} + \\ & + \beta \frac{d^2 p_1}{d\theta^2} + \beta \frac{dc_1}{d\theta} + \frac{r_1}{\delta} c_1 + \frac{r_1}{\delta} \frac{dp_1}{d\theta} \\ & \frac{\partial v_1}{\partial \theta} + \frac{\partial u_1}{\partial r} = 0; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} u_1 = 0, \quad v_1 = 0 \quad \text{при} \quad r = 0; \\ u_1 = 0, \quad v_1 = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 + \eta \cos \theta; \end{aligned}$$

$$p_1(\alpha_1) = p_1(\alpha_2) = 0, \quad \left. \frac{dp_1}{d\theta} \right|_{\theta=\alpha_1} = 0, \quad c_1|_{\theta=\alpha_1} = 0 \quad (20)$$

Точное автомодельное решение задачи (17) - (18) будем иметь в виде:

$$\begin{aligned} v_0 = \frac{\partial \psi_0}{\partial r} + V_0(r, \theta), \quad u_0 = -\frac{\partial \psi_0}{\partial \theta} + U_0(r, \theta), \\ \psi_0 = \tilde{\psi}_0(\xi), \quad V_0(r, \theta) = \tilde{v}_0(\xi), \quad U_0(r, \theta) = \tilde{u}_0(\xi) h'_0, \\ \xi = \frac{r}{1 + \eta \cos \theta}, \quad c_0 = c_0(\theta), \quad \beta \frac{d^2 p_0}{d\theta^2} + \frac{dp_0}{d\theta} = \frac{\tilde{c}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{c}_2}{h^3(\theta)} \end{aligned} \quad (21)$$

Подставляя (21) в (17) и (18) приходим к следующей системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_0''' = \tilde{c}_2, \quad \tilde{v}_0'' = \tilde{c}_1, \\ u_0 + \xi \tilde{v}_0' = 0 \\ \beta \frac{d^2 p_0}{d\theta^2} + \frac{dp_0}{d\theta} = \frac{\tilde{c}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{c}_2}{h^3(\theta)} = \Phi_0(\theta) \\ \beta \frac{dc_0}{d\theta} + c_0 \frac{r_0}{\delta} = \frac{\tilde{\psi}_0''(0)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_0'(\theta)}{h(\theta)} - \beta \frac{d^2 p_0}{d\theta^2} - \frac{r_0}{\delta} \frac{dp_0}{d\theta} = F_1(\theta) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \tilde{u}_0(1) = 0, \quad \tilde{v}_0(1) = 0, \quad \tilde{\psi}_0(0) = 0, \quad \tilde{\psi}_0(1) = 0; \\ \tilde{u}_0(0) = 0, \quad \tilde{v}_0(0) = 1, \quad \int_0^1 \tilde{v}_0(\xi) d\xi = 0; \end{aligned}$$

$$c_0|_{\theta=\alpha_1} = 0, \quad \left. \frac{dp_0}{d\theta} \right|_{\theta=\alpha_1} = 0, \quad p_0(\alpha_1) = p_0(\alpha_2) = 0. \quad (23)$$

Решение рассматриваемой задачи, связанной с определением поля скоростей, находим непосредственным интегрированием.

$$\tilde{\psi}'_0(\xi) = \frac{\tilde{c}_2}{2}(\xi^2 - \xi), \quad \tilde{v}_0(\xi) = \tilde{c}_1 \frac{\xi^2}{2} + \left(-1 - \frac{\tilde{c}_1}{2}\right)\xi + 1 \quad (24)$$

где $\tilde{c}_1 = 6$, \tilde{c}_2 в дальнейшем определяется из условия $p_0(\alpha_1) = p_0(\alpha_2) = 0$

Функцию $\Phi_0(\theta)$ представим в виде ряда Тейлора

$$\Phi_0(\theta) = \Phi_0(\alpha_1) + \Phi'_0(\alpha_1)(\theta - \alpha_1) + \Phi''_0(\alpha_1)(\theta - \alpha_1)^2 \cdot \frac{1}{2!} + \dots \quad (25)$$

где $\Phi(\alpha_1) = \frac{6}{(1 + \eta \cos \alpha_1)^2} + \frac{\tilde{c}_2}{(1 + \eta \cos \alpha_1)^3}$,

$$\Phi'(\alpha_1) = \frac{12\eta \sin \alpha_1}{(1 + \eta \cos \alpha_1)^3} + \frac{3\tilde{c}_2 \eta \sin \alpha_1}{(1 + \eta \cos \alpha_1)^4},$$

$$\begin{aligned} \Phi''(\alpha_1) = & \frac{12\eta \cos \alpha_1 (1 + \eta \cos \alpha_1) + 36\eta^2 \sin^2 \alpha_1}{(1 + \eta \cos \alpha_1)^4} + \\ & + \frac{3\tilde{c}_2 \eta \cos \alpha_1 (1 + \eta \cos \alpha_1) + 12\eta^2 \sin^2 \alpha_1}{(1 + \eta \cos \alpha_1)^5}. \end{aligned} \quad (26)$$

С учетом (26) для определения функции p_0 приходим в принятом нами приближении к следующему уравнению:

$$\beta \frac{d^2 p_0}{d\theta^2} + \frac{dp_0}{d\theta} = \Phi_0(\alpha_1) + \Phi'_0(\alpha_1)(\theta - \alpha_1) + \Phi''_0(\alpha_1)(\theta - \alpha_1) \cdot \frac{1}{2!} \quad (27)$$

Решение уравнения (27) будем искать в виде:

$$p_0 = P_0 + P_r \quad (28)$$

где P_0 - общее решение этого уравнения без правой части; P_r - частное решение с правой частью.

$$P_0 = D_1 + D_2 e^{\frac{\theta}{\beta}} \quad (29)$$

где D_1 и D_2 - постоянные интегрирования.

Функцию P_r будем иметь в виде:

$$P_r = D_3(\theta - \alpha_1) + D_4(\theta - \alpha_1)^2 + D_5(\theta - \alpha_1)^3 \quad (30)$$

Подставляя (30) в уравнение (27) для определения D_i ($i = 3, 4, 5$) приходим к следующей алгебраической системе уравнений.

$$\begin{cases} 2\beta D_4 + D_3 = \Phi_0(\alpha_1), \\ 6\beta D_5 + 2D_4 = \Phi_0'(\alpha_1), \\ 3D_5 = \frac{\Phi_0''(\alpha_1)}{2} \end{cases} \quad (31)$$

Решая систему (31), получим:

$$\begin{aligned} D_5 &= \Phi_0''(\alpha_1) \cdot \frac{1}{6}; & D_4 &= \frac{1}{2}\Phi_0'(\alpha_1) - \frac{\beta\Phi_0''(\alpha_1)}{2}; \\ D_3 &= \Phi_0(\alpha_1) - \beta\Phi_0'(\alpha_1) + \beta^2\Phi_0''(\alpha_1). \end{aligned} \quad (32)$$

Используем граничные условия:

$$P_0(\alpha_1) = 0, \quad P_0'(\alpha_1) = 0$$

для D_1 и D_2 будем иметь:

$$D_1 = -D_2 e^{-\frac{\alpha_1}{\beta}}, \quad D_2 = \beta D_3 e^{\frac{\alpha_1}{\beta}} \quad (33)$$

Константа \tilde{c}_2 определяется из условия:

$$P_0(\alpha_2) = 0$$

Из этого условия следует, что:

$$D_1 + D_2 e^{-\frac{\alpha_2}{\beta}} + D_3(\alpha_2 - \alpha_1) + D_4(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + D_5(\alpha_2 - \alpha_1)^3 = 0 \quad (34)$$

С учетом (34), (33), (32), и (26) получим \tilde{c}_2 . В виду громоздкости явный вид выражение для \tilde{c}_2 в статье не приводим.

Для определения функции c_0 имеем:

$$\beta \frac{dc_0}{d\theta} + c_0 \frac{\delta}{r_0} = F_1(\theta) \quad (35)$$

Здесь $F_1(\theta)$ известная функция от θ .

Приведем решение уравнения (35) для случая экстремального значения $F_1(\theta)$.

Введем обозначения:

$$\max_{\theta \in [0, 2\pi]} F(\theta) = F_i^* \Big|_{\beta^{-1} = \beta_i^{-1}} \quad (36)$$

$$\beta^{-1} = \beta_i^{-1} (\beta_1^{-1} = 40, \quad \beta_2^{-1} = 100, \quad \beta_3^{-1} = 200, \quad \beta_4^{-1} = 500, \quad \beta_5^{-1} = 1000)$$

Обозначим $T = F_i^* \Big|_{\beta^{-1} = \beta_i^{-1}}$

Решение уравнения (35) с учетом (36) удовлетворяет граничным условиям $c_0(\alpha_1) = 0$ запишем в виде:

$$c_0 = \frac{r_0 T}{\delta} + e^{-\frac{\delta \theta}{r_0 \beta}} \cdot C_3, \quad \text{где} \quad C_3 = -\frac{r_0 T}{e^{-\frac{\delta \theta}{r_0 \beta}} \delta} \quad (37)$$

Перейдем к решению задачи для первого приближения. В системе уравнений (19) нелинейные слагаемые заменим их максимальным значением.

Пусть

$$B = \max_{x \in [\alpha_1, \alpha_2]} \frac{dp_0}{d\theta} c_0^2 \quad (38)$$

Точное автомодельное решение этой задачи будем искать в виде

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{\partial \psi_1}{\partial r}, \quad u_1 = -\frac{\partial \psi_1}{\partial \theta}, \\ \psi_1 &= \tilde{\psi}_1(\xi), \quad \xi = \frac{r}{h(\theta)}, \quad c_1 = c_1(\theta) \\ \beta \frac{d^2 p_1}{d\theta^2} + \frac{dp_1}{d\theta} + \frac{1}{2} B &= \frac{c^*}{h^3} \end{aligned} \quad (39)$$

Подставляя (39) в (19)–(20), приходим к следующему дифференциальному уравнению с граничными условиями:

$$\tilde{\psi}_1''' = c^*, \quad \tilde{\psi}_1'(\alpha_1) = 0, \quad \tilde{\psi}_1'(\alpha_2) = 0. \quad (40)$$

Решая задачу (41) для $\tilde{\psi}_1'$ будем иметь:

$$\tilde{\psi}_1' = \frac{c^*}{2} (\xi^2 - \xi).$$

Для определения безразмерного гидродинамического давления p_1 будем исходить из уравнения и граничных условий:

$$\beta \frac{d^2 p_1}{d\theta^2} + \frac{dp_1}{d\theta} + \frac{1}{2} B = \frac{c^*}{h^3} \quad (41)$$

$$p_1(\alpha_1) = p_1(\alpha_2) = 0, \quad \left. \frac{dp_1}{d\theta} \right|_{\theta=\alpha_1} = 0, \quad c_1|_{\theta=\alpha_1} = 0 \quad (42)$$

Интегрируя уравнение (41) с граничными условиями (42) с точностью до членов $O(\eta^2)$, получим:

$$\begin{aligned} p_1 = & \frac{1}{8} \frac{1}{(1+\eta)^5} (-8C4(1+\eta)^5 \beta e^{-\frac{\theta}{\beta}} - 4B\eta^5\theta - 20B\eta^4\theta - 40B\eta^3\theta + \\ & + \eta^2 (c^* \left(\frac{11}{5}\theta^5 - 11\beta\theta^4 + \frac{1}{3}(12+132\beta^2)\theta^3 + \frac{1}{2}(-24\beta - 264\beta^3)\theta^2 + \right. \\ & \left. 8\theta + 24\theta\beta^2 + 264\theta\beta^4) - 40B\theta) + \eta (c^* \left(-\frac{1}{5}\theta^5 + \beta\theta^4 + \frac{1}{3}(12-12\beta^2)\theta^3 + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{2}(-24\beta + 24\beta^3)\theta^2 + 16\theta - 24\beta^4\theta + 24\beta^2\theta - 20B\theta) - 4B\theta + 8c^*\theta) + C_5 \end{aligned} \quad (43)$$

Константа интегрирования \tilde{c}_4 и \tilde{c}_5 не посредственно находятся из граничного условия (42). В виду громоздкости их выражения в статье не приводим.

Найдем безразмерную несущую способность:

$$W = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (p_0 + Ap_1) d\theta \quad (44)$$

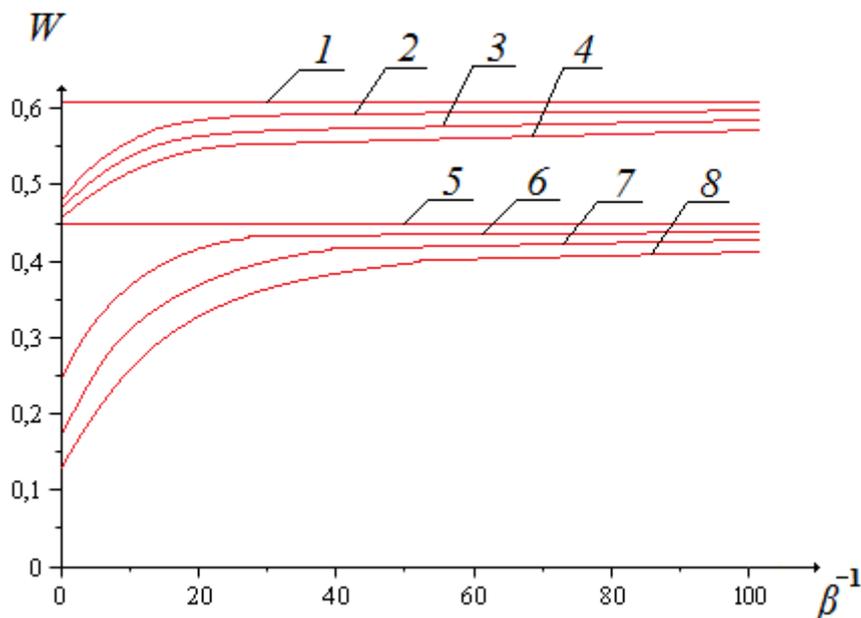


Рис. 1. - Зависимость безразмерной несущей способности W от параметра β^{-1}

1 – $A = 1,5$, $\beta = 0$ – истинно вязкопластичный смазочный материал;

2 – $A = 0,1$; 3 – $A = 0,7$; 4 – $A = 0,9$.

5 – $A = 0$, $\beta = 0$ – истинно вязкий смазочный материал;

6 – $\eta = 0,1$; 7 – $\eta = 0,3$; 8 – $\eta = 0,5$;

Выводы

1. Несущая способность, полученная на основе нелинейного уравнения Максвелла, учитывающее нелинейный фактор (т.е. одновременно случай, когда смазочный материал обладает вязкоупругими и вязкопластичными свойствами) существенно отличается от несущей способности, полученной на основе линейного уравнения Максвелла, соответствующая случаю вязкоупругого смазочного материала.

2. В случае вязкоупругого смазочного материала с увеличением параметра β^{-1} , несущая способность увеличивается и при $\beta^{-1} \rightarrow \infty$ стремится к случаю, соответствующему истинно вязкому смазочному материалу,

оставаясь при этом меньше этого значения. Наиболее резкое увеличение несущей способности наблюдается при малых значениях параметра $\beta^{-1} < 10$.

3. В случае, когда смазочный материал является вязкопластичным, несущая способность на 15 % больше случая истинно вязкого смазочного материала.

4. В случае, когда смазочный материал обладает вязкоупругопластичными свойствами, с увеличением параметра β^{-1} несущая способность увеличивается и при $\beta^{-1} \rightarrow \infty$ стремится к случаю истинно вязкопластичного смазочного материала, при этом оставаясь меньше этого значения.

Литература

1. Ахвердиев К.С., Яковлев М.В., Журба И.А. Гидродинамический расчет подшипников скольжения с учетом сил инерции смазочной жидкости, обладающей вязкоупругими свойствами // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 2. – С. 121–125.

2. 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.

3. Ахвердиев К.С., Колесников И.В., Мукутадзе М.А., Семенко И.С. Математическая модель микрополярной смазки подшипников скольжения с податливой опорной поверхностью // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2012. – № 6, – С. 22–25.

4. Ахвердиев К.С., Журба И.А. Об устойчивости движения направляющей при неустановившемся течении вязкоупругой смазки в системе «ползун-направляющая» // Вестник РГУПС. – 2005. – № 1. – С. 5–11.

5. 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/magazine/archive/n4y2013/2201

6. Буяновский И.А., Хрущов М.М. Трибологические методы испытаний смазочных материалов // Вестник машиностроения. – 2002. – № 2. – С. 17.

7. Задорожная Е.А., Мухортов И.В., Леванов И.Г. Применение неньютоновских моделей смазочных жидкостей при расчете сложнонагруженных узлов трения поршневых и роторных машин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – № 7. – С. 22–30.

8. Павлик Б.Б., Фельдмане Э.Г. Об учете вязкоупругопластических свойствах смазки при расчете коэффициента трения линейного УГД контакта.– Рига: Риж. политехн. ин-т, 1988. – С. 5–14.

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/magazine/archive/n4y2013/2200

References

1. Akhverdiyev K.S., Yakovlev M.V., Zhurba I.A. *Trenie i iznos*. 2003. T. 24, № 2. pp. 121–125.
2. Akhverdiyev K.S., Vorontsov P.A., Cherkasova T.S. *Trenie i iznos*. 1998. T. 16, № 6. pp. 698–707.
3. Akhverdiyev K.S., Kolesnikov I.V., Mukutadze M.A., Semenko I.S. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmax*. 2012. № 6. pp. 22–25.
4. Akhverdiyev K.S., Zhurba I.A. *Vestnik RGUPS*. 2005. № 1. pp. 5–11.



5. Akhverdiyev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, No 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2201
6. Buyanovsky I.A., Hrushchov M.M. Vestnik mashinostroeniya. 2002. № 2. pp. 17.
7. Zadorozhny E.A., Mukhortov I.V., Levanov I.G. Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmax. 2011. № 7. pp. 22–30.
8. Pavlik B.B., Feldman E.G. Rzh. politekhn. in-t, 1988. pp. 5–14.
9. Akhverdiyev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013. No. 4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2200