Расчетная модель гидродинамической смазки неоднородного пористого подшипника конечной длины, работающего в устойчивом нестационарном режиме трения при наличии принудительной подачи смазки

М.А. Мукутадзе, Б.М. Флек, Н.С. Задорожная, Е.В. Поляков, А.М. Мукутадзе

Задача об устойчивости работы однослойных и двухслойных пористых подшипников конечной длины рассматривались в работах [1-7]. Существенным недостатком указанных работ является то, что в них проницаемость пористых слоев считается постоянной и, кроме того, не учитывается источник подачи смазки (рис. 1). В рассматриваемом случае трудно обеспечить жидкостный режим трения, так как подшипник работает за счет запаса смазки лишь в порах пористого слоя.

В настоящей работе нами, с учетом анизотропии проницаемости пористого слоя и наличия принудительной подачи смазки, приводится расчетная модель неоднородного пористого подшипника конечной длины, работающего в устойчивом нестационарном режиме трения. Здесь вначале рассматривается случай, когда смазка принудительно подается в направлении оси Oy, а затем в осевом направлении. Проницаемость задается в виде (1) (рис.1):

$$\kappa' = Ae^{\lambda\frac{y}{H}}. \tag{1}$$

Здесь A – заданная постоянная величина; H – толщина пористого слоя; λ– безразмерный параметр, характеризующий распределение проницаемости в направлении оси Oy.

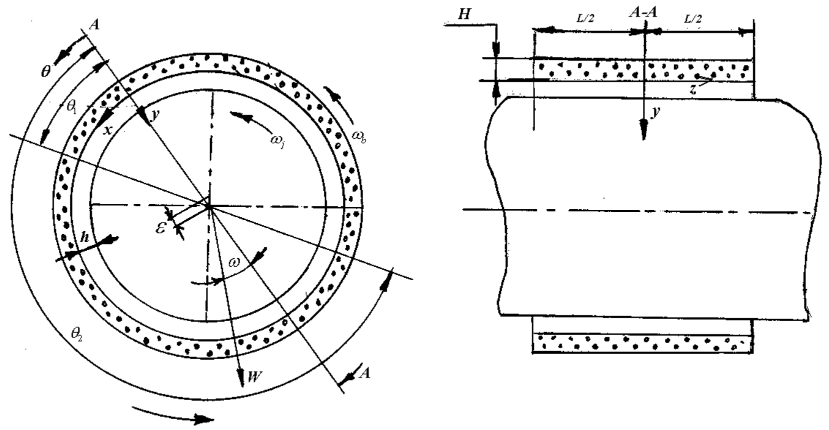

Рис. 1. Радиальный подшипник конечной длины с пористой обоймой

Гидродинамический расчет рассматриваемого подшипника нами будет производиться при следующих допущениях [1,2].

1. Толщина пористого слоя считается малой по сравнению с радиусом подшипника и в конечной модели используется короткий подшипник. Уравнение, определяющее течение смазки, в пористой матрице представляется в виде

$$\frac{\partial^2 p^*}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 p^*}{\partial z^2}+\frac{\lambda}{H}\frac{\partial p^*}{\partial y}=0, \qquad (2)$$

где y, z – прямоугольные координаты (рис.1), p^* – гидродинамическое давление в пористом слое.

2. Для определения распределения давления в пленке смазки между шипом и подшипником будем исходить из модифицированного уравнения Рейнольдса в рамках модели короткого подшипника [1] .

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(h^3\frac{\partial p}{\partial z}\right)=\varepsilon\mu\left(\left(\omega_b+\omega_j-2\omega_L-2\frac{d\varphi}{dt}\right)\frac{dh}{d\theta}+2\frac{de}{dt}\cos\theta\right)-12\mu v_0\big|_{y=0}, \qquad (3)$$

где $h=C(1+\varepsilon\cos\theta)$ – толщина пленки смазки, C – радиальный зазор, ε – относительный эксцентриситет, θ – угловая координата, p – давление в пленке смазки, μ – динамический коэффициент вязкости, $\omega_b,\omega_j,\omega_L$ – угловые скорости соответственно подшипника, шипа и нагрузки, φ – угол положения, t – время, v_0 – компонента скорости в направлении y на внутренней границе пористого слоя, прилегающая к зазору:

$$v_0 = -\frac{\kappa}{\mu}\left(\frac{\partial p^*}{\partial y}\right)\Bigg|_{y=0}, \qquad (4)$$

где κ – проницаемость материала пористого слоя.

Система уравнений (2)-(3) в случае подачи смазки через поры пористого слоя в направлении оси Oy решается при граничных условиях (рис. 1)

$$p^* = p \quad \text{при} \quad y = 0; \qquad -\frac{\kappa}{\mu}\frac{\partial p^*}{\partial y} = V_g \quad \text{при} \quad y = -H;$$

$$p^* = p = p_a \quad \text{при} \quad z = -\frac{L}{2}; \qquad p^* = p = p_a \quad \text{при} \quad z = \frac{L}{2} \qquad (5)$$

где V_g – скорость подачи смазки, p_a – атмосферное давление.

В случае подачи смазки в осевом направлении граничные условия запишутся в следующем виде (рис.2, начало координат в этом случае выбрано в левом конце подшипника)

$$p^* = p \quad \text{при} \quad y = 0; \qquad \frac{\partial p^*}{\partial y} = 0 \quad \text{при} \quad y = -H;$$

$$p^* = p = p_H \quad \text{при} \quad z = 0; \qquad p^* = p = p_K \quad \text{при} \quad z = L. \qquad (6)$$

Здесь p_H – давление в начальном сечении; p_K – в конечном сечении.

Переход к безразмерным переменным.

В дальнейшем предполагается, что $\omega_b = 0;\ \omega_L = 0$.

Перейдем к безразмерным величинам по формулам [1]:

$$P^* = \frac{p^* C^2}{\mu R_0^2 \omega_j},\ P = \frac{pC^2}{\mu R_0^2 \omega_j},\ Z = \frac{2z}{L},\ Y = \frac{y}{H};\ \varepsilon = \frac{e}{C},\ T = \omega_j t;\ \Phi = \frac{kH}{C^3}. \qquad (7)$$

Тогда уравнения (2) и (3) принимают следующий вид:

$$\frac{\partial^2 P^*}{\partial Y^2} + 4\left(\frac{H}{L}\right)^2 \frac{\partial^2 P^*}{\partial Z^2} + \lambda \frac{\partial P^*}{\partial Y} = 0; \qquad (8)$$

$$\frac{\partial^2 P^*}{\partial Z^2} = \frac{12(L/D)^2}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3}\left[\varepsilon\left(\dot{\varphi} - \frac{1}{2}\right)\sin\theta + \dot{\varepsilon}\cos\theta\right] + \frac{3\Phi}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3\left(\frac{H}{L}\right)^2}\left(\frac{\partial P^*}{\partial Y}\right)\Bigg|_{Y=0}, \qquad (9)$$

где $D = 2R$; точкой обозначено дифференцирование по T.

Граничные условия (5) и (6), соответственно, примут следующий вид

$$P^* = P \quad \text{при} \quad Y = 0; \qquad \frac{\partial P^*}{\partial Y} = -V_g \alpha \quad \text{при} \quad Y = -1;$$

$$P^* = P = \widetilde{P}_a \quad \text{при} \quad Z = -1; \qquad P^* = P = \widetilde{P}_a \quad \text{при} \quad Z = 1; \tag{10}$$

$$P^* = P \quad \text{при} \quad Y = 0; \qquad \frac{\partial P^*}{\partial Y} = 0 \quad \text{при} \quad Y = -1;$$

$$P^* = P = \widetilde{P}_H \quad \text{при} \quad Z = 0; \qquad P^* = P = \widetilde{P}_K \quad \text{при} \quad Z = 1, \tag{11}$$

где $\alpha = \dfrac{HC^2}{\kappa R^2 \omega_j}$, $\widetilde{P}_a = \dfrac{p_a C^2}{\mu R^2 \omega_j}$, $\widetilde{P}_H = \dfrac{p_H C^2}{\mu R^2 \omega_j}$, $\widetilde{P}_K = \dfrac{p_K C^2}{\mu R^2 \omega_j}$.

Перейдем к решению системы (8)-(9) с граничными условиями (10). Установим закон подачи смазки в виде

$$-V_g \alpha = C(Z). \tag{12}$$

Полагая толщину пористого слоя малой, уравнение (8) осредним по толщине смазочного слоя. Тогда уравнение (8) запишется в виде

$$\int_0^{-1} \left(\frac{\partial^2 P^*}{\partial Y^2} + 4\left(\frac{H}{L}\right)^2 \frac{\partial^2 P^*}{\partial Z^2} + \lambda \frac{\partial P^*}{\partial Y} \right) dY = 0. \tag{13}$$

Решение уравнения (13), удовлетворяющее граничным условиям (10), будем искать в виде

$$P^* = A_1 Y^3 + A_2 Y^2 + A_3 Y + \widetilde{P}_a + P_1(Z,0). \tag{14}$$

Подставляя (14) в (13), приходим к следующему уравнению

$$3A_1 - 2A_2 - \lambda A_1 + \lambda A_2 - \lambda A_3 + 4\left(\frac{H}{L}\right)^2 \left(\frac{A_1''}{4} - \frac{A_2''}{3} + \frac{A_3''}{2} - P_1'' \right) = 0. \tag{15}$$

Выполняя граничные условия (10), будем иметь:

$$A_3 = C(Z), \quad 3A_1 - 2A_2 = 0,$$

$$\frac{2}{3}\lambda A_2 - C(Z) + 4\left(\frac{H}{L}\right)^2 \left(-\frac{A_2''}{6} + \frac{C''}{2} - P_1'' \right) = 0. \tag{16}$$

Решение уравнения (16) можно найти после определения функции P_1, удовлетворяющей условию

$$\frac{\partial^2 P_1}{\partial Z^2} = \frac{12 (L/D)^2}{(1 + \varepsilon\cos\theta)^3} \left[\varepsilon \left(\dot{\varphi} - \frac{1}{2} \right) \sin\theta + \dot{\varepsilon} \cos\theta \right] + \frac{3\Phi C_2(Z)}{(1 + \varepsilon\cos\theta)^3 \left(\dfrac{H}{L}\right)^2}. \tag{17}$$

Уравнение решается при граничных условиях

$$P_1 = 0 \text{ при } \quad Z = \pm 1 \tag{18}$$

Полагая $C_2(Z) = A_0 \cos\frac{\pi Z}{2}$, с учетом граничных условий (18), для P_1 окончательно получим следующее выражение

$$P_1 = \frac{12(L/D)^2}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3}\left[\varepsilon\left(\dot{\varphi}-\frac{1}{2}\right)\sin\theta + \dot{\varepsilon}\cos\theta\right]\left(\frac{Z^2}{2}-\frac{1}{2}\right) - \frac{12A_0\cos\frac{\pi Z}{2}}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3\left(\frac{H}{L}\right)^2\pi^2}. \tag{19}$$

С учетом (19), уравнение (16) решается при граничных условиях

$$A_2 = 0 \qquad \text{при} \quad Z = \pm 1.$$

При определении основных рабочих характеристик явный вид функций A_1 и A_2 нам не понадобятся.

Перейдем к случаю осевой подачи смазки (рис. 2).

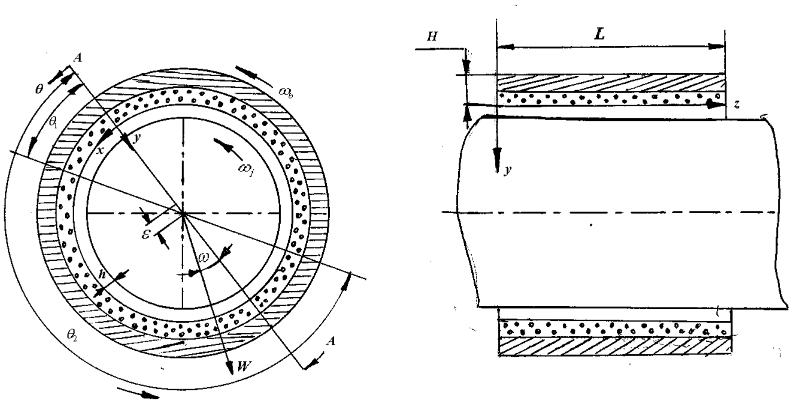

Рис. 2. Радиальный подшипник конечной длины с двухслойной пористой обоймой

Решение уравнений (9) и (13), удовлетворяющих граничным условиям (11), будем искать в виде

$$P = aZ + b + P_1(Z,0), \quad P^* = A_1Y^3 + A_2Y^2 + A_3Y + aZ + b + P_1. \tag{20}$$

С учетом граничных условий (11), для определения A_3 приходим к следующему уравнению

$$\frac{\lambda+6}{12\lambda}A_3'' - P_1'' = 0. \tag{21}$$

Функции A_1 и A_2 выражаются через функцию A_3 в виде

$$A_1 = A_3\left(1+\frac{2}{\lambda}\right), \qquad A_2 = A_3\left(2+\frac{3}{\lambda}\right). \tag{22}$$

Константы a и b определяются выражениями

$$a = \widetilde{P}_K - \widetilde{P}_H, \qquad b = \widetilde{P}_H. \tag{23}$$

Решая уравнение (21) с граничными условиями $A_3 = 0$, $P_1 = 0$ при $Z = 0$, $Z = 1$, для A_3 получим следующее выражение

$$A_3 = \frac{12\lambda}{\lambda+6}P_1(Z,\theta) = \Delta_1 P_1(Z,\theta). \tag{24}$$

С учетом (24), для определения уравнения $P_1(Z,\theta)$ приходим к следующему уравнению

$$\frac{\partial^2 P_1}{\partial Z^2} = \frac{12(L/D)^2}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3}\left[\varepsilon\left(\dot{\varphi}-\frac{1}{2}\right)\sin\theta + \dot{\varepsilon}\cos\theta\right] + \frac{3\Phi\Delta_1 P_1}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3\left(H/L\right)^2}. \tag{25}$$

Решая уравнение (25) с граничными условиями $P_1 = 0$ при $Z = 0$, $Z = 1$, для P_1 окончательно получим следующее выражение

$$P_1 = \frac{4\left(H/D\right)^2\left[\left(\dot{\varphi}-\frac{1}{2}\right)\sin\theta + \dot{\varepsilon}\cos\theta\right]}{\Phi\Delta_1}\left[\frac{e^{-\sqrt{\Delta_2}Z}}{e^{\sqrt{\Delta_2}}+1} + \frac{e^{\sqrt{\Delta_2}Z}}{e^{\sqrt{\Delta_2}}+1} - 1\right], \tag{26}$$

где $\Delta_2 = \dfrac{3\Phi\Delta_1}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3\left(H/L\right)^2}$, $\quad \Delta_1 = \dfrac{12\lambda}{\lambda+6}$.

Перейдем к определению усилий масляной пленки.

При неполном заполнении смазкой зазора область положительных давлений, ограниченная углами θ_1 и θ_2, определяются из условий

$$\dot{\varepsilon}\cos\theta_1 + \varepsilon\varphi\sin\theta_1 = 0;$$

$$\dot{\varepsilon}\sin\theta_2 - \varepsilon\varphi\cos\theta_1 > 0, \qquad \theta_2 = \theta_1 + \pi.$$

В случае подачи смазки в направлении перпендикулярной оси подшипника через поры пористого слоя с заданной скоростью, усилия масляной пленки вычисляются интегрированием по положительной области распределения давления, определяемые формулой

$$F^{(e)} = R\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}\int_{\theta_1}^{\theta_1+\pi} P\cos\theta d\theta dz = \frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\int_{-1}^{1}\int_{\theta_1}^{\theta_1+\pi}\left[\widetilde{P}_a + P_1\right]\cos\theta d\theta dZ = \frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\times$$

$$\times\int_{\theta_1}^{\theta_1+\pi}\left\{2\widetilde{P}_a - \frac{8(L/D)^2}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3}\left[\varepsilon\left(\dot{\varphi}-\frac{1}{2}\right)\sin\theta + \dot{\varepsilon}\cos\theta\right] - \frac{48A_0}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3\left(\frac{H}{L}\right)^2\pi^3}\right\}\cos\theta d\theta; \quad (27)$$

$$F^{(\varphi)} = R\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}\int_{\theta_1}^{\theta_1+\pi} P\sin\theta d\theta dZ = \frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\int_{-1}^{1}\int_{\theta_1}^{\theta_1+\pi}\left[\widetilde{P}_a + P_1\right]\sin\theta d\theta dZ = \frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\times$$

$$\times\int_{\theta_1}^{\theta_1+\pi}\left\{2\widetilde{P}_a - \frac{8(L/D)^2}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3}\left[\varepsilon\left(\dot{\varphi}-\frac{1}{2}\right)\sin\theta + \dot{\varepsilon}\cos\theta\right] - \frac{48A_0}{(1+\varepsilon\cos\theta)^3\left(\frac{H}{L}\right)^2\pi^3}\right\}\sin\theta d\theta; \quad (28)$$

В случае осевой модели смазки

$$F^{(e)} = R\int_{0}^{L}\int_{\theta_1}^{\theta_1+\pi} P\cos\theta d\theta dZ = \frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\int_{0}^{1}\int_{\theta_1}^{\theta_1+\pi}\left[(aZ+b) + P_1\right]\cos\theta d\theta dZ = \frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\times$$

$$\times\int_{\theta_1}^{\theta_1+\pi}\left\{\frac{a}{2} + b + \frac{4H^2\left[\left(\dot{\varphi}-\frac{1}{2}\right)\sin\theta + \dot{\varepsilon}\cos\theta\right]}{D^2\Phi\Delta_1}\left[\frac{2\left(e^{\sqrt{\Delta_2}}-1\right)}{\sqrt{\Delta_2}\left(e^{\sqrt{\Delta_2}}+1\right)} - 1\right]\right\}\cos\theta d\theta \quad . \quad (29)$$

$$F^{(\varphi)} = R\int_{0}^{L}\int_{\theta_1}^{\theta_1+\pi} P\sin\theta d\theta dZ = \frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\int_{0}^{1}\int_{\theta_1}^{\theta_1+\pi}\left[(aZ+b) + P_1\right]\sin\theta d\theta dZ = \frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\times$$

$$\times\int_{\theta_1}^{\theta_1+\pi}\left\{\frac{a}{2} + b + \frac{4H^2\left[\left(\dot{\varphi}-\frac{1}{2}\right)\sin\theta + \dot{\varepsilon}\cos\theta\right]}{D^2\Phi\Delta_1}\left[\frac{2\left(e^{\sqrt{\Delta_2}}-1\right)}{\sqrt{\Delta_2}\left(e^{\sqrt{\Delta_2}}+1\right)} - 1\right]\right\}\cos\theta d\theta \quad . \quad (30)$$

В случае полного заполнения смазкой зазора и подачи смазки в направлении оси Oy будем иметь

$$F^{(e)} = R\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}\int_{0}^{2\pi} P\cos\theta d\theta dZ = \frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\int_{-1}^{1}\int_{0}^{2\pi}\left(\widetilde{P}_a + P_1\right)\cos\theta d\theta dZ =$$

$$= \frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\int_{0}^{2\pi}\left\{2\widetilde{P}_a - \frac{8\left(L/D\right)^2}{\left(1+\varepsilon\cos\theta\right)^3}\left[\varepsilon\left(\dot{\varphi}-\frac{1}{2}\right)\sin\theta + \dot{\varepsilon}\cos\theta\right] - \frac{48}{\left(1+\varepsilon\cos\theta\right)^3\left(H/L\right)^2\pi^3}\right\}\cos\theta d\theta \quad ;(31)$$

$$F^{(\varphi)}=R\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}\int_{0}^{2\pi}P\sin\theta d\theta dZ=\frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\int_{-1}^{1}\int_{0}^{2\pi}\left(\widetilde{P}_a+P_1\right)\sin\theta d\theta dZ=$$

$$=\frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\int_{0}^{2\pi}\left\{2\widetilde{P}_a-\frac{8\left(L/D\right)^2}{\left(1+\varepsilon\cos\theta\right)^3}\left[\varepsilon\left(\dot{\varphi}-\frac{1}{2}\right)\sin\theta+\dot{\varepsilon}\cos\theta\right]-\frac{48A_0}{\left(1+\varepsilon\cos\theta\right)^3\left(H/L\right)^2\pi^3}\right\}\sin\theta d\theta \quad . (32)$$

Рассмотрим случай полного заполнения смазкой зазора и осевой подачи смазки. Используя формулу (26), будем иметь

$$F^{(e)}=R\int_{0}^{L}\int_{0}^{2\pi}P\cos\theta d\theta dZ=\frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\int_{0}^{1}\int_{0}^{2\pi}\left[(aZ+b)+P_1\right]\cos\theta d\theta dZ=\frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\times$$

$$\times\int_{0}^{2\pi}\left\{\frac{a}{2}+b+\frac{4H^2\left[\left(\dot{\varphi}-\frac{1}{2}\right)\sin\theta+\dot{\varepsilon}\cos\theta\right]}{D^2\Phi\Delta_1}\left[\frac{2\left(e^{\sqrt{\Delta_2}}-1\right)}{\sqrt{\Delta_2}\left(e^{\sqrt{\Delta_2}}+1\right)}-1\right]\right\}\cos\theta d\theta \quad ; \qquad (33)$$

$$F^{(\varphi)}=R\int_{0}^{L}\int_{0}^{2\pi}P\sin\theta d\theta dZ=\frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\int_{0}^{1}\int_{0}^{2\pi}\left[(aZ+b)+P_1\right]\sin\theta d\theta dZ=\frac{\mu R^3\omega_j}{C^2}\times$$

$$\times\int_{0}^{2\pi}\left\{\frac{a}{2}+b+\frac{4H^2\left[\left(\dot{\varphi}-\frac{1}{2}\right)\sin\theta+\dot{\varepsilon}\cos\theta\right]}{D^2\Phi\Delta_1}\left[\frac{2\left(e^{\sqrt{\Delta_2}}-1\right)}{\sqrt{\Delta_2}\left(e^{\sqrt{\Delta_2}}+1\right)}-1\right]\right\}\sin\theta d\theta \quad . \qquad (34)$$

Решение задачи на устойчивость

Безразмерные уравнения, определяющие движение шипа, записываются в следующем виде

$$\frac{d^2\varepsilon}{dT^2}=-\frac{F^e}{\omega_j MC}+\left(\frac{\omega_g}{\omega_j}\right)^2\cos\varphi+\varepsilon\left(\frac{d\varphi}{dT}\right)^2,$$
$$\frac{d^2\varphi}{dT^2}=\frac{F^\varphi}{\omega_j MC}-\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\omega_g}{\omega_j}\right)^2\sin\varphi-\frac{2}{\varepsilon}\left(\frac{d\varepsilon}{dT}\right)\left(\frac{d\varphi}{dT}\right), \qquad (35)$$

где M – масса ротора.

$F^{(e)}$ и $F^{(\varphi)}$ – усилия масляной пленки, в случае неполного заполнения смазкой зазора они определяются формулами (27), (28), когда смазка подается перпендикулярно оси подшипника, и формулами (29) и (30) в случае осевой подачи смазки. Для случая полного заполнения смазкой зазора эти усилия определяются, соответственно, формулами (31)-(34).

Уравнения (35), определяющие движение шипа, решаются численно с учетом полученных данных (27)-(34). Компоненты ускорения $\frac{d^2\varepsilon}{dT^2}$, $\frac{d^2\varphi}{dT^2}$ представляют собой явные функции параметров ε, φ, $\frac{d\varepsilon}{dT}$, $\frac{d\varphi}{dT}$, $\widetilde{V}_g$, $\widetilde{P}_H$, $\widetilde{P}_K$, Φ, λ, θ_1, α, $\widetilde{P}_a$.

Уравнения (31) записываются в стандартной форме первого порядка и решаются с помощью метода, разработанного Гиром [7].

После получения решения уравнений движения, устойчивость рассматриваемого движения определяется визуально по графику. При заданных значениях выше указанных параметров, области устойчивости приведены на рис. 3-4. Здесь все точки, которые лежат ниже кривых устойчивости, соответствуют устойчивому движению шипа, а все точки, которые лежат выше кривых, соответствуют неустойчивому движению $\left(\omega_j = \sqrt{g/C}\right)$, где g – ускорение силы тяжести.

Из зависимостей, приведенных на рис. 3 и 4, следует, что:

1. Пористый подшипник как при осевой подаче смазки, так и при подаче перпендикулярно оси, работает более устойчиво, чем пористый подшипник, работающий без подачи смазки.

2. Площадь области устойчивости, в случае подачи смазки в направлении перпендикулярной оси подшипника, расширяется в сравнении с подачей смазки в осевом направлении.

3. В случае полного заполнения смазкой зазора и учета анизотропии проницаемости пористого слоя подшипник работает более устойчиво, чем при частичном заполнении смазкой зазора и при $\kappa = const$.

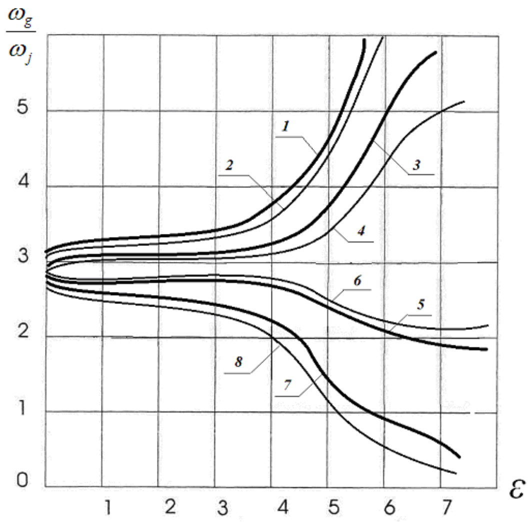

Рис. 3. Схематическое изображение границ области устойчивости.

Подача смазки в направлении оси Oy ($V_g = 0{,}01$; $\widetilde{P}_a = 0{,}02$; $\varepsilon = 0{,}5$; $\dot{\varepsilon} = 0$)

1 - Φ=0,03, λ=0,1; 2 - Φ=0,03, λ=0;

3 - Φ=0,03, λ=0,1 (неполное заполнение смазкой зазора);

4 - Φ=0,03, λ=0 (неполное заполнение смазкой зазора);

5 - Φ=0,01, λ=0,1; 6 - Φ=0, λ=0;

7 - Φ=0,01, λ=0,1 (неполное заполнение смазкой зазора);

8 - Φ=0,01, λ=0 (неполное заполнение смазкой зазора).

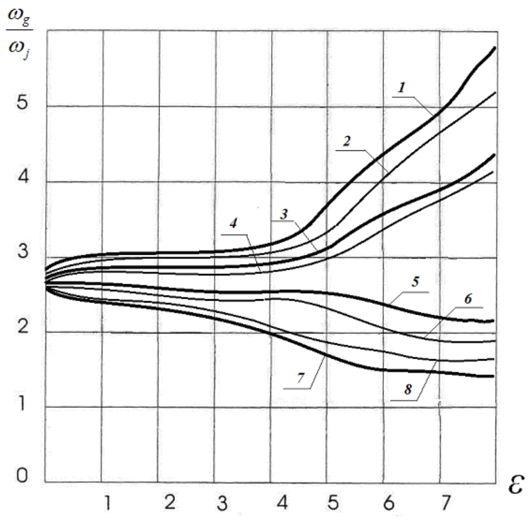

Рис. 4. Схематическое изображение границ области устойчивости

Осевая подача смазки ($\widetilde{P}_H$ =0,04; $\widetilde{P}_K$=0,03; ε=0,5; $\dot{\varepsilon}$=0)

1 - Φ=0,03, λ=0,1; 2 - Φ=0,03, λ=0;

3 - Φ=0,03, λ=0,1 (неполное заполнение смазкой зазора);

4 - Φ=0,03, λ=0 (неполное заполнение смазкой зазора);

5 - Φ=0,01, λ=0,1; 6 - Φ=0, λ=0;

7 - Φ=0,01, λ=0,1 (неполное заполнение смазкой зазора);

8 - Φ=0,01, λ=0 (неполное заполнение смазкой зазора).

Литература:

1. **Конри**, Об устойчивости пористых радиальных подшипников. Конструирование и технология машиностроения / Конри, Кузано // Вестник Машиностроения.- 1974. - № 2. - С. 206-216.

2. **Ахвердиев, К.С.**,Об устойчивости двухслойных пористых радиальных подшипников / К.С. Ахвердиев, О.В. Муленко // Вестник РГУПС. - 2002. - № 3. – С. 5-7.

3. **Кузано,** Исследование коэффициента передачи упругой опоры качения в демпфере со сдавливаемой пленкой и пористой обоймой. / Кузано, Р.Е. Франк // Проблемы трения и смазки. - изд-во «Мир». – 1974. - № 1, - С. 54.

4. **Ахвердиев, К.С.** Разработка математической модели гидродинамического расчета конических подшипников. / К.С. Ахвердиев**,** Б.Е. Копотун // – Вестник РГУПС. - 2005. - № 3. - С 5-9.

5. **Ахвердиев, К.С.** Нестационарная математическая модель гидродинамической смазки сложнонагруженного составного конического подшипника с пористым слоем на его рабочей поверхности с учетом его конструктивной особенности. / К.С. Ахвердиев, С.Ф. Кочетова, М.А. Мукутадзе // - Вестник РГУПС. - 2009 - № 1. – С. 135-143.

6. **Ахвердиев, К.С.** Устойчивость движения шипа в коническом подшипнике с пористым слоем на рабочей поверхности. / К.С. Ахвердиев, Б.Е. Копотун, М.А. Мукутадзе // - Трение и износ. – 2007. – Т. 28. - № 4. – С. 361-366.

7. **Gear C.W.**, Numarical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations / C.W. Gear. - Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. - N.J., 1972. – C. 52.

8. **Майба, И.А., Глазунов, Д.В.** Теоретическое обоснование механизма смешанной (полужидкостной) смазки в контакте «твердый оболочечный смазочный стержень-колесо-рельс» [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012 г., №1 – Режим доступа: http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/664 (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

9. **Дерлугян Ф.П., Щербаков И.Н.** Обоснование процесса получения композиционных антифрикционных самосмазывающихся материалов с заданными техническими характеристиками методом химического наноконструирования. [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2010 г., №4 – Режим доступа: http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2010/287 (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

10. Reynolds, O. On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp Tower"s experiments / O. Reynolds. – Phil. Trans. Roy. Soc. London, 1886, vol. 177, pt. 1.