Разработка расчетной модели радиального подшипника скольжения смазываемое расплавом

В.В. Василенко

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: В статье на основе уравнения течения несжимаемой смазочной жидкости, обладающей микрополярными свойствами для случая «тонкого слоя», уравнения неразрывности, Дарси и формулы скорости диссипации энергии для определения функции $\Phi(\theta)$, обусловленный расплавленной поверхностью подшипниковой втулки, покрытой легкоплавким металлическим расплавом несущего асимптотического решения по тепловому параметру *K*.

С помощью автомодельного решения для нулевого приближения, т.е. без учета расплава легкоплавкого металлического расплава и для первого приближения с учетом легкоплавкого металлического расплава определены поле скоростей и давлений в смазочном и пористых слоях, а также определены основные рабочие характеристики радиального подшипника скольжения.

Дана оценка характерных проницаемости пористого слоя и расплава поверхности подшипниковой втулки, покрытое легкоплавким металлическим расплавом на нагрузочную способность и силу трения.

Ключевые слова: легкоплавкий металлический расплав, проницаемость пористого слоя, смазочный материал, обладающий микрополярными свойствами, подшипник скольжения

Введение

Для увеличения удельной мощности современных двигателей при одновременном росте надежности и долговечности возникает необходимость совершенствования конструкции узлов трения, т.е. обеспечение жидкостному гидродинамическому режиму смазывания.

Одним из путей решения конструктивно-эксплуатационных задач является применение в качестве смазочного материала смазывание расплавом легкоплавкого металлического расплава, покрываемая поверхность подшипниковой втулки [1-8].

В публикации [9] исследована расчетная модель радиального подшипника, смазываемого расплавом с учетом зависимости вязкости смазочного материала от давления. В работе [10-13] рассмотрены расчетные модели радиальных и упорных подшипников скольжения, смазываемых расплавом легкоплавкого металлического расплава, покрытое поверхности подшипниковой втулки с учетом реологических свойств вязкоупругих и микрополярных смазочных материалов.

Особенностью данной работы является разработка расчетных моделей радиального подшипника скольжения с пористым покрытием шейки вала [14-15] и расплава легкоплавкого металлического покрытия на поверхности подшипниковой втулки с учетом реологических свойств микрополярного смазочного материала, обеспечивающей жидкостный гидродинамический режим трения.

Постановка задачи

Подшипниковая втулка, покрытая легкоплавким металлическим расплавом неподвижна, а вал покрыт пористым слоем, вращается с угловой скоростью Ω. Все тепло, которое выделяется при вращении вала, покрытое пористым слоем, идет на плавление поверхности подшипниковой втулки, покрытой лекоплавким металлическим расплавом.

Подшипниковая втулка с пористым покрытием шейки вала, имеющее полюс в центре вала (рис. 1) уравнение контура вала C_0, вала с пористым покрытием C_1, и подшипниковой втулки, покрытой легкоплавким металлическим расплавом C_2 запишется в виде:

$$C_0 : r' = r_0 - \tilde{H}\,;\ C_1 : r' = r_0\,;\ C_2 : r' = r_1\left(1+H\right)+\lambda' f\left(\theta\right), \tag{1}$$

где $H = \varepsilon\cos\theta - \frac{1}{2}\varepsilon^2\sin^2\theta + \ldots$, $\varepsilon = \frac{e}{r_0}$; r_0 – радиус вала с пористым покрытием; r_1 – радиус подшипника, покрытого легкоплавким расплавом; e – эксцентриситет; ε – относительный эксцентриситет; $\tilde{H}$ - толщина пористого слоя; $\lambda' f\left(\theta\right)$ – ограниченная функция при $\theta \in \left[0 \div 2\pi\right]$ подлежит определению.

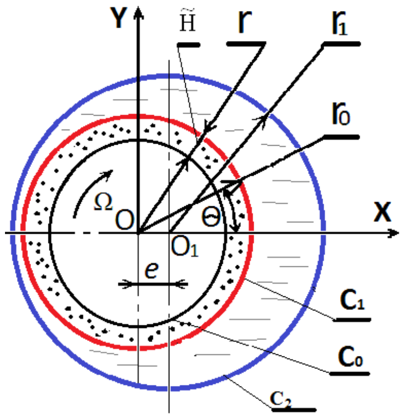

Рис. 1. Расчетная схема

Исходное уравнение - система уравнения движения микрополярного смазочного материала, закон Дарси и уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial^2 u'}{\partial r'^2}+N^2\frac{\partial \upsilon'}{\partial r'}=\frac{1}{\mu'}\frac{dp'}{d\theta},\quad \frac{\partial^2 \upsilon'}{\partial r'^2}=\frac{\upsilon'}{N_1}+\frac{1}{N_1}\frac{\partial u'}{\partial r'},\quad \frac{\partial u'}{\partial \theta}+\frac{\partial v'}{\partial r'}=0.$$

$$\frac{\partial^2 P'}{\partial r'^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial P'}{\partial r'}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 P'}{\partial \theta^2}=0 \qquad (2)$$

Где P' –давление в пористом слое; $v_\theta{}', v_{r'}{}'$ – составляющие вектора скорости смазочной среды; p' –давление в смазочном слое; μ' – динамический коэффициент вязкости;

Граничные условия в рассматриваемом случае запишется в виде:

$$v_\theta{}'=0,\quad v_{r'}{}'=0 \quad \text{при} \quad r'=r_1(1+H)+\lambda' f(\theta);$$

$$v'_{r'}=-\frac{k'}{\mu'}\frac{\partial P'}{\partial r'} \text{ при } r'=r_0,\ v'_\theta=\Omega r_0 \text{ при } r'=r_0,\ p'=P' \text{ при } r'=r_0;$$

$$\frac{\partial P'}{\partial r'}=0 \text{ при } r'=r_0-\tilde{H};\qquad p'(0)=p'(2\pi)=\frac{P_g}{P^*}, \qquad (3)$$

Для определения $\lambda' f(\theta)$, обусловленный расплавом поверхности подшипниковой втулки, используем формулу скорости диссипаций энергий.

$$\frac{d\lambda' f(\theta) r_0}{d\theta}\cdot \Omega L' = 2\mu' \int\limits_{r_1+\lambda' f(\theta)}^{r_0} \left(\frac{\partial v_\theta'}{\partial r'}\right)^2 dr', \qquad (4)$$

Связь между безразмерными и размерными величинами задается в виде:

$$r' = r_1 - \delta r,\ \delta = r_1 - r_0;\quad v' = \Omega r_0 v;\quad u' = \Omega\delta u;\quad p' = p^* p;\quad p^* = \frac{(2\mu+\kappa)\Omega r_0^2}{2\delta^2};\ \upsilon' = \upsilon;$$

$$\mu' = \mu;\qquad \kappa' = \kappa;\qquad \gamma' = \gamma;\quad N^2 = \frac{\kappa}{2\mu+\kappa},\quad N_1 = \frac{2\mu l^2}{\delta^2\kappa},\quad l^2 = \frac{\gamma}{4\mu}. \qquad (5)$$

Аналогично, в пористом слое: $P' = p^* P$, $r' = \tilde{H} r^*$ $k' = k^*$ (6)

Систему уравнений (1) и (4), с учетом (3), (5-6), запишем в виде:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + N^2\frac{\partial \upsilon}{\partial r} = \frac{dp}{d\theta},\quad \frac{\partial^2 \upsilon}{\partial r^2} = \frac{\upsilon}{N_1} + \frac{1}{N_1}\frac{\partial u}{\partial r},\quad \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} = 0.$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*}\frac{\partial P}{\partial r^*} + \frac{1}{r^{*2}}\frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} = 0,\qquad \frac{d\Phi(\theta)}{d\theta} = K\int\limits_{1+\eta\cos\theta+\Phi(\theta)}^{0}\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)^2 dr, \qquad (7)$$

где $K = \dfrac{2\mu\Omega r_0}{L'\delta}$, $\eta = \dfrac{e}{\delta}$; $\eta_1 = \dfrac{\lambda'}{\delta}$; $\Phi(\theta) = \eta_1 f(\theta)$.

Для уравнений (7) граничные условия примут следующий вид:

$$u = 0, v = 0, \upsilon = 0 \text{ при } r = 1 + \eta\cos\theta + \Phi(\theta),\ \upsilon(0) = 0\ u\big|_{r=0} = \tilde{M}\left.\frac{\partial P}{\partial r^*}\right|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}},$$

$$v(0) = 1,\ p = P \text{ при } r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}},\ \left.\frac{\partial P}{\partial r^*}\right|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}-1} = 0,$$

$$p(0) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}$$

где $\tilde{M} = -\dfrac{k^* r_0^2}{\tilde{H}\delta^3}$ (8)

С учетом малости зазора и $\upsilon = 0$ в уравнение (7) осредним по толщине смазочного слоя второе уравнение:

$$\frac{1}{h+\Phi}\int\limits_{-\Phi}^{h}\frac{\partial^2\upsilon}{\partial r^2}dr = \frac{1}{N_1(h+\Phi)}\int\limits_{-\Phi}^{h}\upsilon dr + \frac{1}{N_1(h+\Phi)}\int\limits_{-\Phi}^{h}\frac{\partial u}{\partial r}dr. \qquad (9)$$

Решение (9) ищем в виде:

$$\upsilon = A_1(\theta)r^2 + A_2(\theta)r + A_3(\theta). \qquad (10)$$

Тогда, с учетом (8) получим:

$$\upsilon = A_1(\theta)\cdot\left(r^2 - (h-\Phi)r - \Phi h\right). \qquad (11)$$

Решение (11) и (9), с точностью до $O\left(\frac{\Phi}{N_1}\right)$, $O\left(\frac{1}{N_1^2}\right)$, запишем в виде:

$$\upsilon = \frac{1}{2N_1h}\left(r^2 - rh\right), \qquad \frac{\partial\upsilon}{\partial r} = -\frac{1}{2N_1h}(2r-h), \quad A_1 = \frac{1}{2N_1h}. \qquad (12)$$

Тогда уравнение (7) с учетом (12) примет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{N^2}{2N_1h}(2r-h) = \frac{dp}{d\theta}, \qquad \upsilon = \frac{1}{2N_1h}\left(r^2 - rh\right), \quad \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial\theta} = 0,$$
$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*}\frac{\partial P}{\partial r^*} + \frac{1}{r^{*2}}\frac{\partial^2 P}{\partial\theta^2} = 0, \quad \frac{d\Phi(\theta)}{d\theta} = -K\int\limits_{-\Phi(\theta)}^{h(\theta)}\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)^2 dr. \qquad (13)$$

Функцию $\Phi(\theta)$ будем искать в виде ряда по малому параметру *K:*

$$\Phi(\theta) = K\Phi_1(\theta) + K^2\Phi_2(\theta) + K^3\Phi_3(\theta) + \ldots = H(\theta), \qquad (14)$$

На контуре $r = -\Phi(\theta)$ для компонентов скорости *u* и *v* граничные условия запишем в виде:

$$v\left(1+\eta\cos\theta + H(\theta)\right) = v\left(1+\eta\cos\theta\right) + \left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)_{r=1+\eta\cos\theta}\cdot H(\theta) + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2}\right)_{r=1+\eta\cos\theta}\cdot H^2(\theta) - \ldots = 0;$$

$$u\left(1+\eta\cos\theta+H(\theta)\right)=u\left(1+\eta\cos\theta\right)+\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)_{r=1+\eta\cos\theta}\cdot H(\theta)-\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}\right)_{r=1+\eta\cos\theta}\cdot H^2(\theta)-\ldots=0. \quad (15)$$

Асимптотическое решение (13) с учетом (8) и (15) ищем в виде:

$$v=v_0(r,\theta)+Kv_1(r,\theta)+K^2v_2(r,\theta)+\ldots;$$

$$u=u_0(r,\theta)+Ku_1(r,\theta)+K^2u_2(r,\theta)+\ldots;$$

$$\Phi(\theta)=-K\Phi_1(\theta)-K^2\Phi_2(\theta)-K^3\Phi_3(\theta)-\ldots;$$

$$p=p_0+Kp_1(\theta)+K^2p_2(\theta)+K^3p_3(\theta)\ldots \quad (16)$$

Подставляя (16) в (13) с учетом (8), получим:

– для нулевого приближения:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}+\frac{N^2}{2N_1h}(2r-h)=\frac{dp}{d\theta},\quad \frac{\partial v_0}{\partial r}+\frac{\partial u_0}{\partial\theta}=0\qquad \frac{\partial^2 P_0}{\partial r^{*2}}+\frac{1}{r^*}\frac{\partial P_0}{\partial r^*}+\frac{1}{r^{*2}}\frac{\partial^2 P_0}{\partial\theta^2}=0 \quad (17)$$

и граничных условий:

$$u_0=1,\upsilon=0,v_0=1,\quad \text{при}\quad r_0=0$$
$$\upsilon=0,v_0=0,\quad u_0=0\quad \text{при}\quad r=1+\eta\cos\theta; \quad (18)$$

$$u_0(0)=\tilde{M}\left.\frac{\partial P}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}},\ p_0=P_0,\text{при } r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}},\left.\frac{\partial P_0}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}-1}=0,$$

$$p_0(0)=p_0(2\pi)=\frac{p_g}{p^*}$$

– для первого приближения:

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial r^2}=\frac{1}{\mu}\frac{dp_1}{d\theta};\qquad \frac{\partial v_1}{\partial r}+\frac{\partial u_1}{\partial\theta}=0;\qquad \frac{\partial^2 P_1}{\partial r^{2*}}+\frac{1}{r^*}\frac{dP_1}{dr^*}+\frac{1}{r^{*2}}\frac{d^2P_1}{d\theta^2}=0$$
$$\frac{d\Phi_1(\theta)}{d\theta}=K\int\limits_{1+\eta\cos\theta}^{0}\left(\frac{\partial u_0}{\partial r}\right)^2dr \quad (19)$$

с граничных условий:

$$\upsilon_1=0,v_1=\left(\frac{\partial u_0}{\partial r}\right)_{r=0}\cdot\Phi_1(\theta);\qquad u_1=\left.\left(\frac{\partial u_0}{\partial r}\right)\right|_{r=0}\cdot\Phi_1(\theta);$$

$$\upsilon_1=0,v_1=0;\qquad u_1=0\quad \text{при}\quad r=1+\eta\cos\theta;,$$

$$u_1(0)=\tilde{M}\left.\frac{\partial P}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}},\; p_1=P_1 \text{ при } r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}},\; \left.\frac{\partial P_1}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}-1}=0$$

$$p_1(0)=p_1(2\pi)=0;\quad K\Phi_1(0)=K\tilde{\alpha},\quad \Phi(0)=\Phi(2\pi)=\tilde{\alpha}. \tag{20}$$

Для нулевого приближения найдем:

$$\begin{gathered}U_0=\frac{\partial\psi_0}{\partial r}+V_0(r,\theta);\quad V_0=-\frac{\partial\psi_0}{\partial\theta}+U_0(r,\theta);\\ \psi_0(r,\theta)=\tilde{\psi}_0(\xi);\quad \xi=\frac{r}{h(\theta)};\\ V_0(r,\theta)=\tilde{v}(\xi);\quad U_0(r,\theta)=-\tilde{u}_0(\xi)\cdot h'(\theta);\end{gathered} \tag{21}$$

Подставляя (21) в (17) с учетом (18), имеем:

$$\tilde{\psi}_0'''=\tilde{C}_2;\qquad \tilde{u}_0''=\tilde{C}_1-\frac{N^2}{2N_1}(2\xi-1),\quad \tilde{u}_0'(\xi)+\xi\tilde{v}_0'(\xi)=0;\quad \frac{dp_0}{d\theta}=\frac{\tilde{C}_1}{h^2(\theta)}+\frac{\tilde{C}_2}{h^3(\theta)}. \tag{22}$$

и соответственно граничные условия:

$$u_0\big|_{\xi=0}=\tilde{M}\left.\frac{\partial P}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}}\quad \tilde{\psi}_0'(0)=0,\quad \tilde{\psi}_0'(1)=0,\quad \tilde{u}_0(1)=0,\quad \tilde{v}_0(1)=0;\upsilon(0)=0,$$

$$\upsilon(1)=0,\tilde{u}_0(0)=0,\quad \tilde{v}_0(0)=1,\quad \int_0^1\tilde{v}_0(\xi)\,d\xi=0.\quad \left.\frac{\partial P}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}-1}=0$$

$$p_0=P_0 \text{ при } r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}} \tag{23}$$

Интегрируя (23), получим:

$$\tilde{\psi}_0'(\xi)=\frac{\tilde{C}_2}{2}(\xi^2-\xi);\quad \tilde{u}_0=\tilde{C}_1\frac{\xi^2}{2}-\frac{N^2}{2N_1}\left(\frac{\xi^3}{3}-\frac{\xi^2}{2}\right)-\left(\frac{N^2}{12N_1}+\frac{\tilde{C}_1}{2}+1\right)\xi+1;\quad \tilde{C}_1=6. \tag{24}$$

Из $p_0(0)=p_0(2\pi)=\dfrac{p_g}{p^*}$ получим:

$$\tilde{C}_2=-\tilde{C}_1 \tag{25}$$

Учитывая (25) для давления имеем:

$$p_0 = \tilde{C}_1 \eta \cos\theta + \frac{P_g}{P^*}. \tag{26}$$

Учитывая (26) давление смазочного материала пористого слоя ищем:

$$P\left(r^*,\theta\right) = R\left(r^*\right)\tilde{C}_1 \eta \sin\theta + \frac{p_g}{p^*}, \tag{27}$$

Подставляя (27) в (13) для $R(r^*)$, имеем:

$$R''(r^*) + \frac{R'}{r^*} - \frac{R}{r^{*2}} = 0 \tag{28}$$

И соответственно граничным условиям

$$\left.\frac{dR}{dr^*}\right|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}} - 1} = 0, \quad R\left(\frac{r_0}{\tilde{H}}\right) = 1 \tag{29}$$

Интегрируя уравнения (28) - (29) для функции $R(r^*)$ получим уравнения:

$$R(r^*) = \frac{r_0 \tilde{H} r^*}{2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2} + \frac{r_0(r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)}{\tilde{H}(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)r^*} \tag{30}$$

$$\tilde{M}\left.\frac{\partial P}{\partial r^*}\right|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}} = \int_0^1 \tilde{u}(\xi)d\xi \tag{31}$$

С учетом (31), (27) и (30) для $\tilde{C}_1$ получаем выражение:

$$\tilde{C}_1 \tilde{M} \eta \sin\theta \left[\frac{r_0 \tilde{H}}{2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2} - \frac{\left(r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2\right)\tilde{H}}{r_0\left(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2\right)}\right] = \left(-\frac{1}{12}\tilde{C}_1 + \frac{1}{2}\right)\eta\sin\theta \tag{32}$$

Решая уравнение (32) относительно $\tilde{C}_1$ будем иметь:

$$\tilde{C}_1 = \frac{6r_0\left(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2\right)}{12\tilde{H}^2\tilde{M}\left(r_0 - \tilde{H}\right) + r_0\left(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2\right)} \tag{33}$$

тогда p_0 имеем:

$$p_0 = \frac{6r_0\left(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2\right)}{12\tilde{H}^2\tilde{M}\left(r_0 - \tilde{H}\right) + r_0\left(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2\right)}\eta\sin\theta + \frac{p_g}{p^*}, \tag{34}$$

Для определения $\Phi_1(\theta)$ с учетом уравнения (24) придем к следующему уравнению:

$$\frac{d\Phi_1(\theta)}{d\theta} = h(\theta)\int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}_0''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_0'(\xi)}{h(\theta)} \right)^2 d\xi. \tag{35}$$

Интегрируем уравнению (35), получим:

$$\Phi_1(\theta) = \int_0^\theta \frac{\Delta_1 d\theta}{h^3(\theta)} + \int_0^\theta \frac{\Delta_2 d\theta}{h^2(\theta)} + \int_0^\theta \frac{\Delta_3 d\theta}{h(\theta)}, \tag{36}$$

где

$$\begin{aligned} &\Delta_1 = \int_0^1 \left(\tilde{\psi}''(\xi)\right)^2 d\xi = \frac{\tilde{C}_2^2}{12}; \ \Delta_2 = \int_0^1 2\tilde{\psi}''(\xi)\cdot\tilde{v}'(\xi)\, d\xi = \frac{1}{6}\tilde{C}_1\tilde{C}_2; \\ &\Delta_3 = \int_0^1 \left(\tilde{v}'(\xi)\right)^2 d\xi = 4 + \frac{N^4}{720 N_1^2}. \end{aligned} \tag{37}$$

Решение уравнений (36)–(37) с учетом $K\Phi_1(0) = K\tilde{\alpha},$:

$$\begin{aligned} \Phi_1(\theta) = {}& \frac{2}{\sqrt{1-\eta^2}} \operatorname{arctg}\left(\sqrt{\frac{1+\eta}{1-\eta}} \operatorname{tg}\frac{\theta}{2} \right) \left(\frac{\tilde{C}_1^{\,2}}{12} \frac{-5-4\eta+4\eta^2}{\left(1-\eta^2\right)^2} + \frac{\tilde{C}_1^{\,2}(1-3\eta)}{6\left(1-\eta^2\right)} + 4 + \frac{N^4}{720N_1^2} \right) + \\ &+ \frac{\operatorname{tg}\frac{\theta}{2}}{(1-\eta)\operatorname{tg}^2\frac{\theta}{2} + 1 + \eta} \left[\frac{\tilde{C}_1}{12} \frac{-28-31\eta+9\eta^2}{4(1-\eta^2)} + \frac{\tilde{C}_1^{\,1}}{6} \frac{1-3\eta}{1-\eta^2} \right] + \frac{\tilde{C}_1^{\,2}\left(-4-5\eta+3\eta^2\right)}{24\left(1-\eta^2\right)(1-\eta)} \frac{\operatorname{tg}\frac{\theta}{2}}{\left((1-\eta)\operatorname{tg}^2\frac{\theta}{2} + 1 + \eta\right)^2} + \tilde{\alpha}. \end{aligned} \tag{38}$$

Для первого приближения точное автомодельное решение:

$$\begin{aligned} &v_1 = -\frac{\partial \psi_1}{\partial r} + V_1(r,\theta); \quad u_1 = \frac{\partial \psi_1}{\partial \theta} + U_1(r,\theta); \\ &\psi_1(r,\theta) = \tilde{\psi}_1(\xi); \quad \xi = \frac{r}{h(\theta)}; \\ &V_1(r,\theta) = \tilde{v}(\xi); \quad U_1(r,\theta) = -\tilde{u}_1(\xi)\cdot h'(\theta); \end{aligned} \tag{39}$$

Подставим (39) в (19) с учетом (20), имеем следующие уравнение:

$$\tilde{\psi}_1''' = \tilde{\tilde{C}}_2; \quad \tilde{u}_1'' = \tilde{\tilde{C}}_1; \quad \tilde{u}_1'(\xi) + \xi\tilde{v}_1'(\xi) = 0; \frac{dp_1}{d\theta} = \frac{\tilde{\tilde{C}}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{\tilde{C}}_2}{h^3(\theta)}. \tag{40}$$

и условия:

$$\upsilon_1(0) = 0, \tilde{\psi}_1'(0) = 0, \quad \tilde{\psi}_1'(1) = 0, \quad \tilde{v}_1(1) = 0, \quad \tilde{v}_1(0) = 0; \left.\frac{\partial P_1}{\partial r^*}\right|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}} - 1} = 0$$

$$\upsilon_1(0)=0, u_1\Big|_{\xi=0}=\tilde{M}\frac{\partial P_1}{\partial r^*}\Bigg|_{r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}} \quad p_1=P_1 \text{ при } r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}} \; \tilde{u}_1(0)=M, \quad \int_0^1 \tilde{u}_1(\xi)\,d\xi=0. \tag{41}$$

Интегрируя (41), получим:

$$\tilde{\psi}_1'(\xi)=\frac{\tilde{\tilde{C}}_2}{2}\left(\xi^2-\xi\right),\quad \tilde{u}_1(\xi)=\tilde{\tilde{C}}_1\frac{\xi^2}{2}-\left(\frac{\tilde{\tilde{C}}_1}{2}+M\right)\xi+M, \tag{42}$$

Из $p_1(0)=p_1(2\pi)=0$ получим:

$$\tilde{C}_2=-M\,\tilde{C}_1, \tag{43}$$

где

$$M=\sup_{\theta\in[0:2\pi]}\frac{\partial u_0}{\partial r}\bigg|_{r=0}\cdot\Phi_1(\theta)=\sup_{\theta\in[0:2\pi]}\left\|\left(\frac{-\frac{\tilde{C}_1}{12}+\frac{1}{2}}{1+\eta\cos\theta}+\frac{N^2}{4N_1}(1+\eta\cos\theta)-\frac{1}{\mu}\tilde{C}_1\eta\sin\theta\frac{1+\eta\cos\theta}{2}\right)\right.\times$$

$$\left[\frac{2}{\sqrt{1-\eta^2}}\operatorname{arctg}\left(\sqrt{\frac{1+\eta}{1-\eta}}\operatorname{tg}\frac{\theta}{2}\right)\left(\frac{\tilde{C}_1^2}{12}\frac{-5-4\eta+4\eta^2}{\left(1-\eta^2\right)^2}+\frac{\tilde{C}_1^2(1-3\eta)}{6\left(1-\eta^2\right)}+4+\frac{N^4}{720N_1^2}\right)+\right.$$

$$\left.+\frac{\operatorname{tg}\frac{\theta}{2}}{(1-\eta)\operatorname{tg}^2\frac{\theta}{2}+1+\eta}\left[\frac{\tilde{C}_1}{12}\frac{-28-31\eta+9\eta^2}{4(1-\eta^2)}+\frac{\tilde{C}_1^1}{6}\frac{1-3\eta}{1-\eta^2}\right]+\frac{\tilde{C}_1^2\left(-4-5\eta+3\eta^2\right)}{24\left(1-\eta^2\right)(1-\eta)}\frac{\operatorname{tg}\frac{\theta}{2}}{\left((1-\eta)\operatorname{tg}^2\frac{\theta}{2}+1+\eta\right)^2}+\tilde{\alpha}\right]$$

С учетом (43) получим:

$$p_1=\frac{6Mr_0\left(2r_0^2-2\tilde{H}r_0+\tilde{H}^2\right)}{12\tilde{H}^2\tilde{M}\left(r_0-\tilde{H}\right)+r_0\left(2r_0^2-2\tilde{H}r_0+\tilde{H}^2\right)}\eta\sin\theta \tag{44}$$

Переходим к определению рабочих характеристик подшипника.

Учитывая (12), (14), (34) и (44) для силы трения и составляющей вектора поддерживающей силы, имеем:

$$R_y=\frac{\mu\Omega r_0^3}{\delta^2}\int_0^{2\pi}\left(p_0-\frac{P_g}{P^*}+Kp_1\right)\sin\theta d\theta=\frac{(2\mu+k)\Omega r_0^3\eta}{2\delta^2}\frac{Mr_0\left(2r_0^2-2\tilde{H}r_0+\tilde{H}^2\right)}{12\tilde{H}^2\tilde{M}\left(r_0-\tilde{H}\right)+r_0\left(2r_0^2-2\tilde{H}r_0+\tilde{H}^2\right)};$$

$$R_x=\frac{\mu\Omega r_0^3}{\delta^2}\int_0^{2\pi}\left(p_0-\frac{P_g}{P^*}+K\left(p_1\right)\right)\cos\theta d\theta=0.$$

$$L_{\text{тр}} = \int_0^{2\pi}\left[\left.\frac{\partial u_0}{\partial r}\right|_{r=0} + K\left.\frac{\partial u_1}{\partial r}\right|_{r=0}\right]d\theta = \frac{(2\mu + k)\Omega r_0^3}{\delta}\left[\frac{-\pi\left(\frac{\tilde{C}_1}{6} - 1\right)}{\sqrt{1-\eta^2}}(1+KM) + \frac{N^2\pi}{4N_1}\right]. \quad (45)$$

Для численных расчетов использованы следующие значения:

$\mu = 0{,}0608$ Нс/м^2; $\eta = 0{,}3\ldots1$ м; $r_0 = 0{,}019985\ldots0{,}04993$ м;

$\delta = 0{,}05 \cdot 10^{-3}\ldots0{,}07 \cdot 10^{-3}$; $K = 0{,}0000022\ldots0{,}00052$;

$L' = 3{,}9 \cdot 10^5$ Н/м^2; $M = 0{,}16 \ldots 25{,}6$; $\Omega = 100\ldots1800$ с$^{-1}$.

Графики основных рабочих характеристик (составляющей вектора поддерживающей силы и силы трения) представлены на рис. 2 – 4:

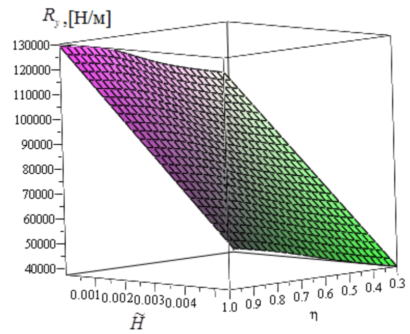

Рис. 2 - Зависимость компонентов поддерживающей силы (R_y) от толщины пористого слоя $\tilde{H}$ и конструктивного параметра η

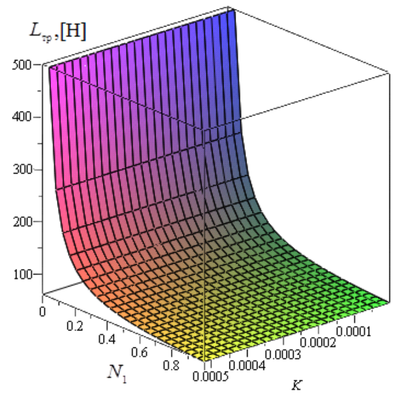

Рис. 3 - Зависимость силы трения от параметра K, обусловленного расплавом и параметра N_1, характеризующего размер молекул микрополярного смазочного материала

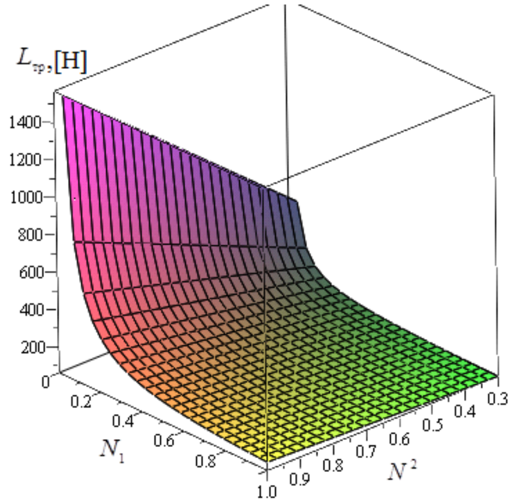

Рис. 4 - Зависимость силы трения от параметра N_1, характеризующего размер молекул смазочного материала и N^2 - параметра связи.

Выводы

1. Получены уточненные расчетные модели радиальных подшипников скольжения, работающих в условиях жидкого гидродинамического режима смазывания расплавом легкоплавкого покрытия и пористым покрытием шейки вала.

2. Показан значительный вклад конструктивного параметров K, обусловленного расплавом, N_1 - характеризующего размер молекул микрополярного смазочного материала, N^2 – параметра связи. С увеличением конструктивного параметра K (при $K = 0$ и $K \neq 0$) коэффициент трения уменьшается на 60 %, а несущая способность увеличивается на 20 %.

Зависимость коэффициента трения от конструктивного параметра K, обусловленного расплавом, близкая линейной в пределах 0,0009–0,0035.

Литература

1. Прокопьев, В.Н. Динамика сложнонагруженного подшипника, смазываемого неньютоновской жидкостью / В.Н. Прокопьев, А.К. Бояршинова, Е.А. Задорожная // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 6. – С. 108– 114.

2. Прокопьев В.Н., Задорожная Е.А., Караваев В.Г., Леанов И.Г. Совершенствование методики расчета сложнонагруженных подшипников скольжения, смазываемых неньютоновскими маслами// Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 1. – С. 63– 67.

3. Дерлугян Ф.П. Обоснование процесса получения композиционных антифрикционных самосмазывающихся материалов с заданными техническими характеристиками методом химического наноконструирования // Инженерный вестник Дона, 2010, №4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2010/287/.

4. Ахвердиев К.С. Расчетная модель гидродинамической смазки неоднородного пористого подшипника конечной длины, работающего в устойчивом нестационарном режиме трения при наличии принудительной подаче смазки // Инженерный вестник Дона, 2013, №3 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1765/.

5. Беретта Н. Подшипники скольжения, смазываемые собственным расплавом или продуктом сублимации / Беретта, Ниро, Сильвестри // Труды Амер. о-ва инж.-мех. – 1992. – № 1. – С. 86–90.

6. Приходько В.М., Котельницкая Л.И. Математическая модель гидродинамической смазки при плавлении опорной поверхности радиального подшипника // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 6. – С. 606–608.

7. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Василенко В.В. Гидродинамический расчет радиального подшипника, смазываемого

расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала// Вестник РГУПС. – 2017. – №2 (66). – С. 129-135.

8. Василенко В.В., Лагунова Е.О., Мукутадзе М.А. Гидродинамический расчет радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №5 (2017) URL://naukovedenie.ru/PDF/20TVN517.pdf

9. Ахвердиев К.С., Лагунова Е.О., Василенко В.В. Расчетная модель радиального подшипника, смазываемого расплавом, с учетом зависимости вязкости от давления // Вестник ДГТУ. – 2017. – №3 (90). – С. 27-37.

10. Lagunova, E.O. Wedge-Shaped Sliding Supports Operating on Viscoelastic Lubricant Material Due to the Melt, Taking Into Account the Dependence of Viscosity and Shear Modulus on Pressure // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 19 (2017) pp. 9120-9127.

11. Lagunova, E.O. Radial Plain Bearings Operating on Viscoelastic Lubricant Caused by the Melt, Taking into Account the Dependence of the Viscosity of the Lubricant and the Shear Modulus on the Pressure // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 19 (2017) pp. 9128-9137.

12. Vasilenko V.V., Lagunova E.O., Mukutadze M.A., Prikhodko V.M. Calculation Model of the Radial Bearing, Caused by the Melt, Taking into Account the Dependence of Viscosity on Pressure// International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 19 (2017) pp. 9138-9148.

13. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Василенко В.В. Клиновидные опоры скольжения, работающие на микрополярном смазочном

материале, обусловленные расплавом // Вестник РГУПС. – 2017. – №3 (67). – С. 8-15.

14. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Mukutadze A.M. Radial bearing with porous barrel // Proceedings of Academic World : International Conference, 28th of March, 2016, San Francisco, USA. – IRAG Research Forum : Institute of Research and Journals, 2016. – pp. 28–31.

15. Mukutadze M.A. Radial bearing with porous Elements // Procedia Engineering 150, 2016. – pp. 559-570.

References

1. Prokop'ev V.N. Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin, 2005, № 6, pp. 108– 114.

2. Prokop'ev V.N., Zadorozhnaya E.A., Karavaev V.G., Leanov I.G. Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin, 2010, № 1, pp. 63– 67.

3. Derlugjan F.P. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2010, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2010/287/.

4. Ahverdiev K.S. Inzhenernyj vestnik Dona, (Rus), 2013, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1765/.

5. Beretta N. Trudy Amer. o-va inzh.-meh, 1992, № 1, pp. 86–90.

6. Prihod'ko V.M. Trenie i iznos, 2001, T. 22, № 6, pp. 606–608.

7. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Vasilenko V.V. Vestnik RGUPS, 2017, №2 (66), pp. 129-135.

8. Vasilenko V.V. Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE» Tom 9, №5 (2017) URL: naukovedenie.ru/PDF/20TVN517.pdf

9. Ahverdiev, K.S. Vestnik DGTU, 2017, №3 (90), pp. 27-37.

10. Lagunova E.O. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 19 (2017) pp. 9120-9127.

11. Lagunova E.O. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 19 (2017), pp. 9128-9137.

12. Vasilenko V.V., Lagunova E.O., Mukutadze M.A., Prikhodko V.M. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 19 (2017), pp. 9138-9148.

13. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Vasilenko V.V. Vestnik RGUPS, 2017, №3 (67), pp. 8-15.

14. Akhverdiev K.S. Proceedings of Academic World: International Conference, 28th of March, 2016, San Francisco, USA. IRAG Research Forum: Institute of Research and Journals, 2016, pp. 28–31.

15. Mukutadze M.A. Procedia Engineering 150, 2016, pp. 559-570.