

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <https://naukovedenie.ru/>

Том 9, №6 (2017) <https://naukovedenie.ru/vol9-6.php>

URL статьи: <https://naukovedenie.ru/PDF/156TVN617.pdf>

Статья опубликована 28.02.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Мукутадзе М.А., Василенко В.В. Гидродинамический расчет, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала и пористого покрытия на шейке вала // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №6 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/156TVN617.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 51:621.891

Мукутадзе Мурман Александрович

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону¹
Профессор кафедры «Высшая математика»
Доктор технических наук, доцент
E-mail: Murman1963@yandex.ru.ru

Василенко Владимир Владимирович

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону
Аспирант кафедры «Высшая математика»
E-mail: Vvv_voen@rgups.ru

**Гидродинамический расчет, смазываемого
расплавом легкоплавкого покрытия при наличии
смазочного материала и пористого покрытия
на шейке вала**

Аннотация. В работе автором разработан метод формирования точного автоматического решения задачи гидродинамического расчета радиального подшипника, работающей при наличии смазочного материала и расплава поверхности подшипниковой втулки, покрытой легкоплавким металлическим расплавом, и пористого слоя на поверхности шейки вала.

Автором на основе уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости для «тонкого слоя», неразрывности, Дарси и выражения для скорости диссипации энергии найдено асимптотическое решение системы дифференциальных уравнений по малому параметру K , обусловленный расплавом и скоростью диссипации энергии для нулевого приближения без учета расплава поверхности подшипниковой втулки, покрытой легкоплавким металлическим расплавом, и для первого приближения с учетом расплава поверхности подшипниковой втулки, покрытой легкоплавким металлическим расплавом.

На основе точного автоматического решения для нулевого и первого приближения автором определено поле скоростей и давлений в смазочном и пористых слоях, а также функцию $\Phi_1(\theta)$, обусловленное расплавом поверхности подшипниковой втулки. Кроме того, определены основные рабочие характеристики: несущая способность и сила трения. А также автором установлено влияние параметров K – обусловленный расплавом легкоплавкого

¹ 344038, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2

металлического расплава, \tilde{H} – толщины пористого слоя, η – конструктивного параметра на несущую способность и силу трения.

Ключевые слова: гидродинамика; радиальный подшипник; вязкий несжимаемый жидкий смазочный материал; расплавленная поверхность подшипниковой втулки; демпфирующая способность

Введение

Как известно, новые машины проектируются при учете увеличений статических и ударных нагрузок, которое определяется задачей современных инженерных исследований. Одной из важнейших элементов опор скольжения является смазочная среда.

Одним из методов решения эксплуатационных задач, на наш взгляд, является использование в качестве смазочного материала легкоплавкого металлического расплава, покрытое поверхности подшипниковой втулки.

Использование расплава в качестве смазочного материала рассматривались в работах [1-6]. Гидродинамическому расчету опор скольжения с учетом демпфирующих свойств и зависимости вязкости от давления, а также с учетом неньютоновских свойств смазочных материалов посвящено большое количество работ [7-13].

Однако в этих работах отсутствует одновременный учет зависимости вязкости применяемого смазочного материала от давления, а также учет проницаемости пористого слоя.

Данная работа посвящена разработке расчетной модели радиального подшипника скольжения при учете расплава поверхности подшипниковой втулки, покрытой легкоплавким металлическим расплавом и пористым покрытием шейки вала.

Постановка задачи

Рассмотрим движение смазочного материала в зазоре подшипника, покрытое расплавом легкоплавкого металлического покрытия подшипниковой втулки и шейки вала пористым слоем.

Подшипниковая втулка, выполненная из материала с низкой температурой плавления, неподвижна, а вал, покрытый пористым слоем, вращается со скоростью Ω . Все тепло при вращении идет на плавление поверхности материала подшипниковой втулки, покрытое легкоплавким металлическим расплавом.

В полярной координатной системе (рис. 1) уравнение контура вала, уравнение контура вала с пористым покрытием C_1 , уравнение поверхности подшипниковой втулки, запишется в виде:

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

где: $H = \varepsilon \cos \theta - \frac{1}{2} \varepsilon^2 \sin^2 \theta + \dots$, $\varepsilon = \frac{e}{r_0}$; r_0 – радиус вала; r_1 – радиус подшипниковой втулки, покрытой легкоплавким металлическим расплавом; e – эксцентриситет; ε – относительный эксцентриситет; \tilde{H} – толщина пористого слоя; $\lambda'f(\theta)$ – функция при $\theta \in [0 \div 2\pi]$ необходимо определить.

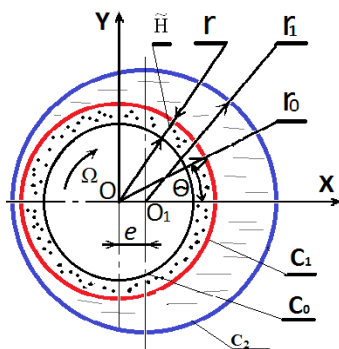


Рисунок 1. Рабочая схема (автор рисунка Василенко В. В.)

Исходные уравнения

Для описания течения смазочного материала между валом и подшипниковой втулкой воспользуемся уравнениями течения несжимаемой жидкости «для тонкого слоя» и неразрывности и Дарси:

$$\mu' \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r'^2} = \frac{dp'}{d\theta}, \quad \frac{\partial v_r}{\partial r'} + \frac{v_r}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 P'}{\partial r'^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P'}{\partial r'} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 P'}{\partial \theta^2} = 0. \quad (2)$$

Здесь: v'_θ, v'_r – составляющие вектора скоростей для смазочной среды; P' – гидродинамическое давление в жидком смазочном материале; μ' – динамический коэффициент вязкости; P' – гидродинамическое давление в пористом слое.

Граничные условия в рассматриваемом случае запишется в виде:

$$\begin{aligned} v'_\theta = 0, \quad v'_r = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1(1+H) + \lambda'f(\theta); \\ v'_{r'} = -\frac{k' \partial P'}{\mu' \partial r'} \quad \text{при} \quad r' = r_0; \quad v'_\theta = \Omega r_0 \quad \text{при} \quad r' = r_0; \quad p' = P' \quad \text{при} \quad r' = r_0; \\ \frac{\partial P'}{\partial r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_0 - \tilde{H}; \quad p'(0) = p'(2\pi) = \frac{P_s}{P^*}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для того, чтобы найти функцию $\lambda'f(\theta)$, обусловленный расплавом поверхности подшипниковой втулки, используем формулу для скорости диссипаций энергий.

$$\frac{d\lambda'f(\theta)r_0}{d\theta} \cdot \Omega L' = 2\mu' \int_{r_1 + \lambda'f(\theta)}^{r_0} \left(\frac{\partial v'_\theta}{\partial r'} \right)^2 dr', \quad (4)$$

где: L' – удельная теплота плавления на единицу объема.

Безразмерные и размерные величины связаны:

$$v'_{r'} = \Omega \delta u; \quad v'_\theta = \Omega r_0 v, \quad r' = r_0 + \delta r, \quad \delta = r_1 - r_0, \quad p' = p^* P; \quad p^* = \frac{\mu \Omega r_0^2}{\delta^2}, \quad \mu' = \mu, \quad (5)$$

Аналогично, в пористом слое:

$$P' = p^* P, \quad r' = \tilde{H} r^*, \quad k' = k^*. \quad (6)$$

С учетом (3), (5) и (6) система уравнений (1) и (4) с точностью до членов $O(\varepsilon^2)$ запишется в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = \frac{dp}{d\theta}; \quad \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0; \quad \frac{\partial^2 P}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial P}{\partial r^*} + \frac{1}{r^{*2}} \frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} = 0;$$

$$\frac{d\Phi(\theta)}{d\theta} = K \int_{1+\eta \cos \theta + \Phi(\theta)}^0 \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 dr, \quad (7)$$

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

Граничные условия для уравнения (7) примут следующий вид:

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

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

$$p(0) = p(2\pi) = \frac{P_g}{p^*}, \quad (8)$$

где: $\tilde{M} = -\frac{k^* r_0^2}{\tilde{H}\delta^3}$.

Принимая в качестве малого параметра K , обусловленной расплавом, функцию $\Phi(\theta)$ ищем:

$$\Phi(\theta) = K\Phi_1(\theta) + K^2\Phi_2(\theta) + K^3\Phi_3(\theta) + \dots = H(\theta), \quad (9)$$

Граничные условия компонентов скорости u и v на контуре $r = -\Phi(\theta)$ ищем в виде:

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

$$u(1 + \eta \cos \theta + H(\theta)) = u(1 + \eta \cos \theta) + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)_{r=1+\eta \cos \theta} \cdot H(\theta) - \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right)_{r=1+\eta \cos \theta} \cdot H^2(\theta) - \dots = 0. \quad (10)$$

Асимптотическое решение (6)-(7) с учетом (8) и (10):

$$v = v_0(r, \theta) + K v_1(r, \theta) + K^2 v_2(r, \theta) + \dots;$$

$$u = u_0(r, \theta) + K u_1(r, \theta) + K^2 u_2(r, \theta) + \dots;$$

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

$$p = p_0 + K p_1(\theta) + K^2 p_2(\theta) + K^3 p_3(\theta) \dots \quad (11)$$

Подставляя (11) в (6)-(7) с учетом (8), получим:

- для нулевого приближения:

$$\frac{\partial^2 v_0}{\partial r^2} = \frac{dp_0}{d\theta}, \quad \frac{\partial v_0}{\partial \theta} + \frac{\partial u_0}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial^2 P_0}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial P_0}{\partial r^*} + \frac{1}{r^{*2}} \frac{\partial^2 P_0}{\partial \theta^2} = 0 \quad (12)$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned} v_0 = 1, \quad \text{при } r_0 = 0 \\ v_0 = 0, \quad u_0 = 0 \quad \text{при } r = 1 + \eta \cos \theta; \end{aligned} \quad (13)$$

$$u_0|_{r=0} = \tilde{M} \frac{\partial P}{\partial r^*} \Big|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}}, \quad p_0 = P_0 \text{ при } r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}, \quad \frac{\partial P_0}{\partial r^*} \Big|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}} - 1} = 0,$$

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

- для первого приближения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 v_1}{\partial r^2} = \frac{dp_1}{d\theta}; \quad \frac{\partial v_1}{\partial \theta} + \frac{\partial u_1}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial^2 P_1}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial P_1}{\partial r^*} + \frac{1}{r^{*2}} \frac{\partial^2 P_1}{\partial \theta^2} = 0 \\ \frac{d\Phi_1(\theta)}{d\theta} = K \int_{1+\eta \cos \theta}^0 \left(\frac{\partial v_0}{\partial r} \right)^2 dr \end{aligned} \quad (14)$$

с граничными условиями:

$$v_1 = \left(\frac{\partial v_0}{\partial r} \right)_{r=0} \cdot \Phi_1(\theta); \quad u_1 = \left(\frac{\partial u_0}{\partial r} \right)_{r=0} \cdot \Phi_1(\theta);$$

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

$$u_1|_{r=0} = \tilde{M} \frac{\partial P}{\partial r^*} \Big|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}}, \quad p_1 = P_1 \text{ при } r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}, \quad \frac{\partial P_1}{\partial r^*} \Big|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}} - 1} = 0$$

$$p_1(0) = p_1(2\pi) = 0; \quad K\Phi_1(0) = K\tilde{\alpha}, \quad \Phi(0) = \Phi(2\pi) = \tilde{\alpha}. \quad (15)$$

Точное решение

Точное решение для нулевого приближения ищем:

$$\begin{aligned} v_0 = \frac{\partial \Psi_0}{\partial r} + V_0(r, \theta); \quad u_0 = -\frac{\partial \Psi_0}{\partial \theta} + U_0(r, \theta); \\ \Psi_0(r, \theta) = \tilde{\Psi}_0(\xi); \quad \xi = \frac{r}{h(\theta)}; \end{aligned} \quad (16)$$

$$V_0(r, \theta) = \tilde{v}(\xi); \quad U_0(r, \theta) = -\tilde{u}_0(\xi) \cdot h'(\theta);$$

Подставим (16) в (12)-(13), имеем:

$$\tilde{\Psi}_0''' = \tilde{C}_2; \quad \tilde{v}_0'' = \tilde{C}_1; \quad \tilde{u}_0'(\xi) + \xi \tilde{v}_0'(\xi) = 0; \quad \frac{dp_0}{d\theta} = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(\theta)}. \quad (17)$$

и граничные условия:

$$\begin{aligned}
 u_0|_{\xi=0} = \tilde{M} \frac{\partial P}{\partial r^*} \Big|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}}, \quad \tilde{\psi}'_0(0) = 0, \quad \tilde{\psi}'_0(1) = 0, \quad \tilde{u}_0(1) = 0, \quad \tilde{v}_0(1) = 0; \\
 \tilde{u}_0(0) = 0, \quad \tilde{v}_0(0) = 1, \quad \int_0^1 \tilde{v}_0(\xi) d\xi = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial r^*} \Big|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}} - 1} = 0, \\
 p_0 = P_0 \text{ при } r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}.
 \end{aligned} \tag{18}$$

Интегрируя (18), имеем:

$$\tilde{\psi}'_0(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2}(\xi^2 - \xi), \quad \tilde{v}_0(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} - \left(1 + \frac{\tilde{C}_1}{2}\right)\xi + 1, \tag{19}$$

Из $p_0(0) = p_0(2\pi) = \frac{P_g}{P^*}$ получены следующие выражения:

$$\tilde{C}_2 = -\tilde{C}_1 \tag{20}$$

Определение гидродинамического давления

Для гидродинамического давления имеем:

$$p_0 = \tilde{C}_1 \eta \cos \theta + \frac{P_g}{P^*}. \tag{21}$$

С учетом (21) давление ищем:

$$P(r^*, \theta) = R(r^*) \tilde{C}_1 \eta \sin \theta + \frac{P_g}{P^*}. \tag{22}$$

Подставляя (22) в уравнение Дарси для определения функции $R(r^*)$ перейдем к следующему дифференциальному уравнению и граничным условиям:

$$R''(r^*) + \frac{R'}{r^*} - \frac{R}{r^{*2}} = 0 \tag{23}$$

и граничным условиям

$$\frac{dR}{dr^*} \Big|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}} - 1} = 0, \quad R\left(\frac{r_0}{\tilde{H}}\right) = 1 \tag{24}$$

непосредственное интегрирование уравнения (23) с учетом (24) для функции $R(r^*)$ позволяет получить уравнение:

$$R(r^*) = \frac{r_0 \tilde{H} r^*}{2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2} + \frac{r_0(r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)}{\tilde{H}(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)r^*}. \tag{25}$$

С учетом

$$\tilde{M} \frac{\partial P}{\partial r^*} \Big|_{r^*=\frac{r_0}{\tilde{H}}} = \int_0^1 \tilde{v}(\xi) d\xi \quad (26)$$

Для выражения:

$$\tilde{C}_1 \tilde{M} \eta \sin \theta \left[\frac{r_0 \tilde{H}}{2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2} - \frac{(r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2) \tilde{H}}{r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)} \right] = \left(-\frac{1}{12} \tilde{C}_1 + \frac{1}{2} \right) \eta \sin \theta \quad (27)$$

Решая уравнение (27) относительно \tilde{C}_1 будем иметь:

$$\tilde{C}_1 = \frac{6r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)}{12\tilde{H}^2\tilde{M}(r_0 - \tilde{H}) + r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)} \quad (28)$$

тогда P_0 получим:

$$P_0 = \frac{6r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)}{12\tilde{H}^2\tilde{M}(r_0 - \tilde{H}) + r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)} \eta \sin \theta + \frac{P_g}{P^*} \quad (29)$$

Для $\Phi_1(\theta)$ имеем:

$$\frac{d\Phi_1(\theta)}{d\theta} = h(\theta) \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\Psi}''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}'(\xi)}{h(\theta)} \right)^2 d\xi, \quad (30)$$

или:

$$\Phi_1(\theta) = \int_0^\theta \frac{\Delta_1 d\theta}{h^3(\theta)} + \int_0^\theta \frac{\Delta_2 d\theta}{h^2(\theta)} + \int_0^\theta \frac{\Delta_3 d\theta}{h(\theta)}, \quad (31)$$

где:

$$\Delta_1 = \int_0^1 (\tilde{\Psi}''(\xi))^2 d\xi = \frac{\tilde{C}_2^2}{12}; \quad \Delta_2 = \int_0^1 2\tilde{\Psi}''(\xi) \cdot \tilde{v}'(\xi) d\xi = \frac{1}{6} \tilde{C}_1 \tilde{C}_2; \quad \Delta_3 = \int_0^1 (\tilde{v}'(\xi))^2 d\xi = 4. \quad (32)$$

С учетом $K\Phi_1(0) = K\tilde{\alpha}$, получим:

$$\begin{aligned} \Phi_1(\theta) = & \frac{2}{\sqrt{1-\eta^2}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{1+\eta}{1-\eta}} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) \left(\frac{\tilde{C}_1^2}{12} \frac{2+\eta^2}{(1-\eta^2)^2} + \frac{\tilde{C}_1^2}{3(1-\eta^2)} + 8 \right) + \\ & + \frac{\eta \tilde{C}_1^2}{1-\eta^2} \frac{\sin \theta}{1-\eta \cos \theta} \left[\frac{1}{8(1-\eta^2)} + \frac{1}{6} \right] + \frac{\tilde{C}_1^2}{24(1-\eta^2)} \frac{\sin \theta}{(1-\eta \cos \theta)^2} + \tilde{\alpha}. \end{aligned} \quad (33)$$

Решение первого приближения ищем:

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{\partial \Psi_1}{\partial r} + V_1(r, \theta); \quad u_1 = -\frac{\partial \Psi_1}{\partial \theta} + U_1(r, \theta); \\ \Psi_1(r, \theta) &= \tilde{\Psi}_1(\xi); \quad \xi = \frac{r}{h(\theta)}; \\ V_1(r, \theta) &= \tilde{v}(\xi); \quad U_1(r, \theta) = -\tilde{u}_1(\xi) \cdot h'(\theta); \end{aligned} \quad (34)$$

Подставим (34) в (14)-(15), получим:

$$\tilde{\Psi}_1''' = \tilde{C}_2; \quad \tilde{v}_1'' = \tilde{C}_1; \quad \tilde{u}_1'(\xi) + \xi \tilde{v}_1'(\xi) = 0; \quad \frac{dp_1}{d\theta} = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(\theta)} \quad (35)$$

и граничные условия:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}_1'(0) = 0, \quad \tilde{\Psi}_1'(1) = 0, \quad \tilde{u}_1(1) = 0, \quad \tilde{v}_1(1) = 0; \quad \left. \frac{\partial P_1}{\partial r^*} \right|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}} \\ u_1 \Big|_{\xi=0} = \tilde{M} \left. \frac{\partial P_1}{\partial r^*} \right|_{r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}} \quad p_1 = P_1 \quad \text{при} \quad r^* = \frac{r_0}{\tilde{H}}, \quad \tilde{u}_1(0) = 0, \quad \tilde{v}_1(0) = M, \quad \int_0^1 \tilde{v}_1(\xi) d\xi = 0. \end{aligned} \quad (36)$$

Интегрируя (36), имеем:

$$\tilde{\Psi}_1'(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2}(\xi^2 - \xi), \quad \tilde{v}_1(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} - \left(\frac{\tilde{C}_1}{2} + M \right) \xi + M, \quad (37)$$

Из $p_1(0) = p_1(2\pi) = 0$ получим:

$$\tilde{C}_2 = -M \tilde{C}_1, \quad (38)$$

где

$$\begin{aligned} M = \sup_{\theta \in [0; 2\pi]} \left. \frac{\partial v_0}{\partial r} \right|_{r=0} \cdot \Phi_1(\theta) = \sup_{\theta \in [0; 2\pi]} \left[-\frac{1}{1 + \eta \cos \theta} - \frac{3r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)}{12\tilde{H}^2 \tilde{M}(r_0 - \tilde{H}) + r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)} \eta \cos \theta \right] \times \\ \times \left(\frac{2}{\sqrt{1 - \eta^2}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{1 + \eta}{1 - \eta}} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) \left(\frac{\tilde{C}_1^2}{12} \frac{2 + \eta^2}{(1 - \eta^2)^2} + \frac{\tilde{C}_1^2}{3(1 - \eta^2)} + 8 \right) + \frac{\eta \tilde{C}_1^2}{1 - \eta^2} \frac{\sin \theta}{1 - \eta \cos \theta} \left[\frac{1}{8(1 - \eta^2)} + \frac{1}{6} \right] + \right. \\ \left. + \frac{\tilde{C}_1^2}{24(1 - \eta^2)} \frac{\sin \theta}{(1 - \eta \cos \theta)^2} + \tilde{\alpha} \right) \end{aligned}$$

Окончательно:

$$p_1 = \frac{6Mr_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)}{12\tilde{H}^2 \tilde{M}(r_0 - \tilde{H}) + r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)} \eta \sin \theta \quad (39)$$

Результаты исследований

$$R_y = \frac{\mu \Omega r_0^3}{\delta^2} \int_0^{2\pi} \left(p_0 - \frac{P_g}{P^*} + K p_1 \right) \sin \theta d\theta = \frac{3\mu \Omega r_0^3 \eta}{\delta^2} \frac{Mr_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)}{12\tilde{H}^2 \tilde{M}(r_0 - \tilde{H}) + r_0(2r_0^2 - 2\tilde{H}r_0 + \tilde{H}^2)};$$

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

$$L_{\text{тр}} = \frac{\mu\Omega r_0^3}{\delta} \int_0^{2\pi} \left[\frac{\partial v_0}{\partial r} \Big|_{r=0} + K \frac{\partial v_1}{\partial r} \Big|_{r=0} \right] d\theta = \frac{\mu\Omega r_0^3}{\delta} \left[-2\pi(\tilde{C}_1 + 1)(1 + KM) \right]. \quad (40)$$

Для проверочных расчетов на основе полученных теоретических моделей использованы следующие значения:

$$\mu = 0,0608 \text{ Нс/м}^2; \eta = 0,3 \dots 1 \text{ м}; r_0 = 0,019985 \dots 0,04993 \text{ м};$$

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

$$L' = 3,9 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2; \Omega = 100 \dots 1800 \text{ с}^{-1}.$$

По результатам построены графики, приведенные на рис. 2-3.

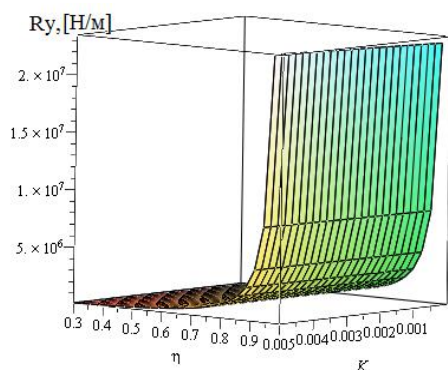


Рисунок 2. Зависимость компонент поддерживающей силы (R_y) от параметра K , обусловленного расплавом и скоростью диссипации энергии и от конструктивного параметра η (автор рисунка Василенко В. В.)

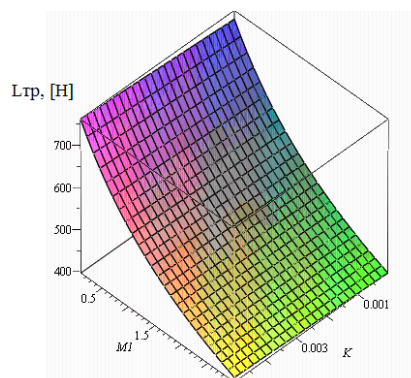


Рисунок 3. Зависимость силы трения от параметра K , обусловленного расплавом и скоростью диссипации энергии и от конструктивного параметра η (автор рисунка Василенко В. В.)

Выводы

Анализ расчетных моделей и графиков позволили сделать следующие выводы:

1. Получен уточненный расчет подшипника скольжения в условиях гидродинамического смазывания расплавом легкоплавкого металлического покрытия.
2. Показан значительный вклад конструктивного параметра K , обусловленного расплавом. 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, близка линейной в пределах 0,0009-0,0035.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Совершенствование методики расчета сложнагруженных подшипников скольжения, смазываемых неньютоновскими маслами / В. Н. Прокопьев, Е. А. Задорожная, В. Г. Караваяев, И. Г. Леанов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 1. – С. 63-67.
3. Беретта. Подшипники скольжения, смазываемые собственным расплавом или продуктом сублимации / Беретта, Ниро, Сильвестри // Труды Америк. о-ва инж.-мех. – 1992. – № 1. – С. 86-90.
4. Приходько, В. М. Математическая модель гидродинамической смазки при плавлении опорной поверхности радиального подшипника / В. М. Приходько, Л. И. Котельницкая // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 6. – С. 606-608.
5. Гидродинамический расчет радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, Е. О. Лагунова, В. В. Василенко // Вестник РГУПС. – 2017. – №2 (66). – С. 129-135.
6. Василенко, В. В. Гидродинамический расчет радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала / В. В. Василенко, Е. О. Лагунова, М. А. Мукутадзе // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN517.pdf>.
7. Лагунова Е. О. Расчетная модель радиального подшипника скольжения на электропроводящем смазочном материале, обусловленного расплавом // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/92TVN517.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
8. Ахвердиев, К. С. Расчетная модель радиального подшипника, смазываемого расплавом, с учетом зависимости вязкости от давления / К. С. Ахвердиев, Е. О. Лагунова, В. В. Василенко // Вестник ДГТУ. – 2017. – №3 (90). – С. 27-37.
9. 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 / E. O. Lagunova // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 19 (2017) pp. 9120-9127.
10. 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 / E. O. Lagunova // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 19 (2017) pp. 9128-9137.
11. Calculation Model of the Radial Bearing, Caused by the Melt, Taking into Account the Dependence of Viscosity on Pressure / V. V. Vasilenko, E. O. Lagunova, M. A. Mukutadze, V. M. Prikhodko // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 19 (2017) pp. 9138-9148.
12. Клиновидные опоры скольжения, работающие на микрополярном смазочном материале, обусловленные расплавом / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, Е. О. Лагунова, В. В. Василенко // Вестник РГУПС. – 2017. – №3 (67). – С. 8-15.
13. Akhverdiev, K. S. Radial bearing with porous barrel / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, A. M. Mukutadze // Proceedings of Academic World: International Conference, 28th of March, 2016, San Francisco, USA. – IRAG Research Forum: Institute of Research and Journals, 2016. – P. 28-31.
14. Mukutadze, M. A. Radial bearing with porous Elements / M. A. Mukutadze // Procedia Engineering 150, 2016. – P. 559-570.

Mukutadze Murman Aleksandrovich

Rostov state transport university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: Murman1963@yandex.ru.ru

Vasilenko Vladimir Vladimirovich

Rostov state transport university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: Vvv_voen@rgups.ru

Hydrodynamic calculation, lubricated melting of light-fuel coating when lubricant is available and porous coating is on the shaft sheave

Abstract. In the paper the author developed a method for forming an exact self-similar solution for the problem of hydrodynamic calculation of a radial bearing operating in the presence of a lubricant and a melt of the surface of a bearing bush covered with a low-melting metallic melt and a porous layer on the surface of the journal's neck.

The author, on the basis of the equation of motion of a viscous incompressible fluid for a "thin layer", the continuity of Darcy, and the expression for the dissipation rate of energies, found an asymptotic solution of a system of differential equations with respect to a small parameter K , due to the melt and energy dissipation rate for zero approximation without taking into account the melt of the surface of the bearing bush, covered with a low-melting metallic melt, and for the first approximation taking into account the melt of the surface of the bearing bush covered with fusible metal m melt.

Based on the exact self-similar solution for zero and first approximation, the author defines the velocity and pressure field in the lubricating and porous layers, as well as the function due to the melt of the surface of the bearing bushing. In addition, the main operating characteristics are determined: the bearing capacity and the frictional force. And also the author established the influence of the parameters K – the melted metal melt due to the melt, – the thickness of the porous layer, – the structural parameter for the bearing capacity and the frictional force.

Keywords: hydrodynamics; radial bearing; viscous; incompressible liquid lubricant; the melted surface of the bearing sleeve

REFERENCES

1. Prokopiev, V. N. Dynamics of a complex loaded bearing lubricated by a non-Newtonian fluid. Prokopyev, A. K. Boyarshinova, E. A. Zadorozhnaya // Problems of machine building and machine reliability. – 2005. – No. 6. – P. 108-114.
2. Perfection of the calculation technique for complex loaded sliding bearings lubricated with non-Newtonian oils / V. N. Prokopiev, E. A. Zadorozhnaya, V. G. Karavaev, I. G. Leanov // Problems of machine building and machine reliability. – 2010. – No. 1. – P. 63-67.
3. Beretta. Plain bearings, lubricated by their own melt or a product of sublimation / Beretta, Niro, Silvestri // Proceedings of Amer. islands inzh-fur. – 1992. – No. 1. – P. 86-90.
4. Prikhodko, V. M. Mathematical model of hydrodynamic lubrication during melting of the bearing surface of a radial bearing / B. M. Prikhodko, L. I. Kotelnitskaya // Friction and wear. – 2001. – P. 22, No. 6. – P. 606-608.

5. Hydrodynamic calculation of a radial bearing lubricated by a melt of a low-melting coating in the presence of a lubricant / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, E. O. Lagunova, V. V. Vasilenko // Bulletin of the RSTU. – 2017. – 2 (66). – P. 129-135.
6. Vasilenko, V. V. Hydrodynamic calculation of a radial bearing lubricated by a melt of a low-melting coating in the presence of a lubricant / V. V. Vasilenko, E. O. Lagunova, M. A. Mukutadze // Internet-journal "Naukovedenie" Volume 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN517.pdf>.
7. Lagunova E. O. Raschetnaya model' radial'nogo podshipnika skol'zheniya na elektroprovodyashchem smazochnom materiale, obuslovlennogo rasplavom // Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE» Tom 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/92TVN517.pdf> (dostup svobodnyy). Zagl. s ekrana. Yaz. rus., angl.
8. Akhverdiev, K. S. Calculation model of the radial bearing lubricated by the melt, taking into account the dependence of viscosity on pressure. Akhverdiev, E. O. Lagunova, V. V. Vasilenko // Bulletin of the DGTU. – 2017. – No. 3 (90). – P. 27-37.
9. 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 / E. O. Lagunova // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 19 (2017) pp. 9120-9127.
10. 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 / E. O. Lagunova // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 19 (2017) pp. 9128-9137.
11. Calculation Model of the Radial Bearing, Caused by the Melt, Taking into Account the Dependence of Viscosity on Pressure / V. V. Vasilenko, E. O. Lagunova, M. A. Mukutadze, V. M. Prikhodko // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 19 (2017) pp. 9138-9148.
12. Wedge-shaped sliding supports operating on a micropolar lubricant, caused by a melt / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, E. O. Lagunova, V. V. Vasilenko // Bulletin of the RSTU. – 2017. – No. 3 (67). – P. 8-15.
13. Akhverdiev, K. S. Radial bearing with porous barrel / K. S. Akhverdiev, M. A. Mukutadze, A. M. Mukutadze // Proceedings of Academic World: International Conference, 28th of March, 2016, San Francisco, USA. – IRAG Research Forum: Institute of Research and Journals, 2016. – P. 28-31.
14. Mukutadze, M. A. Radial bearing with porous Elements / M. A. Mukutadze // Procedia Engineering 150, 2016. – P. 559-570.