

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

Том 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/vol9-5.php>

URL статьи: <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN517.pdf>

Статья опубликована 07.10.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

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) <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN517.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» 2210370/22.12.2016 на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта

УДК 51:621.891

Василенко Владимир Владимирович

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону¹
Аспирант кафедры «Высшая математика»
E-mail: vvv_voen@rgups.ru

Лагунова Елена Олеговна

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону
Доцент кафедры «Высшая математика»
Кандидат технических наук
E-mail: lagunova@rambler.ru

Мукутадзе Мурман Александрович

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону
Доцент кафедры «Высшая математика»
Доктор технических наук
E-mail: murman1963@yandex.ru

Гидродинамический расчет радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала

Аннотация. В работе дается метод формирования точного автомодельного решения задачи гидродинамического расчета радиального подшипника, работающей при наличии смазочного материала и расплава поверхности подшипника.

На основе уравнения движения смазочного материала, обладающего микрополярированными свойствами, для «тонкого слоя» и выражения для скорости диссипации энергий получена аналитическая зависимость для профиля расплавленной поверхности подшипника. Кроме того, определены основные рабочие характеристики рассматриваемой пары трения.

Дана оценка влияния параметра, обусловленного расплавом поверхности подшипниковой втулки, на несущую способность и силу трения.

Ключевые слова: гидродинамика; радиальный подшипник; микрополярированный смазочный материал; расплавленная поверхность подшипниковой втулки

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

Введение

Известно, что устойчивая работа машин и механизмов зависит от конструкции опорных узлов. Новые машины, как правило, проектируются с учетом увеличения статических и ударных нагрузок, действующих на опоры скольжения. Это определяется задачами современной инженерной практики. Следует отметить, что одним из важнейших конструктивных элементов трибосистем является смазочная среда.

В качестве одного из методов решения конструктивно-эксплуатационных задач может использоваться смазывание расплавом легкоплавкого покрытия подшипников. Смазывание жидкими металлами применяют при температурах, при которых обычные смазочные среды претерпевают необратимые физико-химические изменения. Преимущество смазывания расплавом состоит в том, что смазочный материал образуется в области контакта, где это необходимо. Плавление доставляет достаточное количество смазочного материала в зону трения, механические и конструктивные сложности, связанные с его подачей, отсутствуют. Смазывание расплавом изучалось во многих прикладных задачах, в частности в процессах формоизменения и резания металлов [1-7]. Гидродинамическому расчету системы в условиях отсутствия смазочного вещества посвящено большое количество работ [8-14]. Существенным недостатком рассматриваемой пары трения, работающей на смазывании расплавом, является низкая несущая способность. Кроме того, процесс смазывания пластичного смазочного материала не является самоподдерживающимся.

Постановка задачи

Рассмотрим движение несжимаемого смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника, покрытого расплавом легкоплавкого покрытия.

Подшипниковая втулка, выполненная из материала с низкой температурой плавления, неподвижна, а шип вращается со скоростью Ω . Выделяющееся тепло при вращении вала идет на плавление поверхности материала подшипниковой втулки.

Исходные уравнения

В качестве исходных уравнений берется система безразмерных уравнений движения смазочного материала, обладающего микрополяльными свойствами, для случая «тонкого слоя», а также и уравнения неразрывности:

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

Здесь: u', v' – компоненты вектора скорости смазочной среды; p' – гидродинамическое давление в смазочном слое; μ' – коэффициент динамической вязкости.

В полярной системе координат (рис. 1) с полюсом в центре подшипниковой втулки уравнение контура вала расплавленной поверхности подшипниковой втулки и поверхности подшипниковой втулки, покрытой металлическим расплавом, запишем в виде:

$$r' = r_0(1 + H), \quad r' = r_1, \quad r' = r_1 + \lambda'f(\theta), \quad (2)$$

$$H = \varepsilon \cos \theta - \frac{1}{2} \varepsilon^2 \sin^2 \theta + \dots, \quad \varepsilon = \frac{e}{r_0};$$

где: r_0 – радиус вала; r_1 – радиус подшипниковой втулки, покрытой металлическим расплавом; e – эксцентриситет; ε – относительный эксцентриситет; $\lambda'f(\theta)$ – ограниченная функция при $\theta \in [0 \div 2\pi]$ подлежит определению.

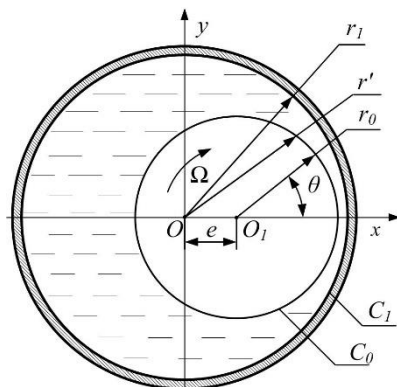


Рисунок 1. Расчетная схема (автор: Лагунова Е. О.)

Граничные условия в рассматриваемом случае с точностью до членов $O(\varepsilon^2)$ запишется в виде:

$$\begin{aligned} v' = 0, \quad u' = 0, \quad v' = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1 + \lambda'f(\theta); \\ v' = r_0\Omega, \quad u' = -\Omega e \sin \theta, \quad v' = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_0 + e \cos \theta; \\ p'(0) = p'(2\pi) = \frac{P_a}{P^*}, \quad \lambda'f(\theta) = \Phi(\theta). \end{aligned} \quad (3)$$

Для определения функции $\Phi(\theta) = \lambda'f(\theta)$, обусловленной расплавленной поверхностью подшипника, воспользуемся формулой скорости диссипаций энергий.

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

где L' – удельная теплота плавления на единицу объема.

Переход к безразмерным переменным реализуется на основе следующих формул:

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

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

Выполняя подстановку (5) в систему дифференциальных уравнений (1) и (4), а также в граничные условия (3), придем к следующей системе дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + N^2 \frac{\partial v}{\partial r} = \frac{dp}{d\theta},$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = \frac{v}{N_1} + \frac{1}{N_1} \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} = 0.$$
(6)

$$\frac{d\Phi(\theta)}{d\theta} = -K \int_{-\Phi(\theta)}^{h(\theta)} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 dr, \quad K = \frac{2\mu\Omega r_0}{L\delta}.$$
(7)

и граничным условиям

$$v = 1, \quad u = -\eta \sin \theta, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 - \eta \cos \theta = h(\theta);$$

$$v = 0, \quad u = 0, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad r = 0 - \Phi(\theta); \quad p(0) = p(2\pi) = \frac{P_a}{P^*};$$
(8)

где $\eta = \frac{e}{\delta}; \quad \eta_1 = \frac{\lambda'}{\delta}; \quad \Phi(\theta) = \eta_1 f(\theta).$

Учитывая малость зазора, а также равенство $v = 0$ на подвижных и неподвижных поверхностях, осредним второе уравнение системы (6) по толщине смазочного слоя, получим:

$$\frac{1}{h + \Phi} \int_{-\Phi}^h \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} dr = \frac{1}{N_1(h + \Phi)} \int_{-\Phi}^h v dr + \frac{1}{N_1(h + \Phi)} \int_{-\Phi}^h \frac{\partial u}{\partial r} dr.$$
(9)

Решение уравнения (9) будем искать в виде:

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

С учетом граничных условий (8) для v получим:

$$v = A_1(\theta) \cdot (r^2 - (h - \Phi)r - \Phi h).$$
(11)

Подставляя (11) в (9), с точностью до членов $O\left(\frac{\Phi}{N_1}\right), O\left(\frac{1}{N_1^2}\right)$ получим:

$$v = \frac{1}{2N_1 h} (r^2 - rh), \quad \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{1}{2N_1 h} (2r - h), \quad A_1 = \frac{1}{2N_1 h}.$$
(12)

С учетом (12) система уравнений (6)-(7) в принятом нами приближении имеет вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{N^2}{2N_1 h} (2r - h) = \frac{dp}{d\theta}, \quad v = \frac{1}{2N_1 h} (r^2 - rh),$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{d\Phi(\theta)}{d\theta} = -K \int_{-\Phi(\theta)}^{h(\theta)} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 dr.$$
(13)

В качестве малого параметра принимая K , обусловленный расплавом и скоростью диссипации энергии, будем искать функцию $\Phi(\theta)$ в виде:

$$\Phi(\theta) = -K\Phi_1(\theta) - K^2\Phi_2(\theta) - K^3\Phi_3(\theta) - \dots = H,$$
(14)

где $H = -K\Phi_1(\theta) - K^2\Phi_2(\theta) - K^3\Phi_3(\theta) - \dots$.

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

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

$$u(0 - H(\theta)) = u(0) - \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)_{r=0} \cdot H(\theta) - \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right)_{r=0} \cdot H^2(\theta) - \dots = 0.$$
(15)

Асимптотическое решение системы дифференциальных уравнений (13) с учетом граничных условий (8) и (15) находим в виде:

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

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

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

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

Выполняя подстановку (16) в систему дифференциальных уравнений (13) с учетом граничных условий (8) и (15), получим следующие уравнения:

- для нулевого приближения:

$$\frac{\partial^2 u_0}{\partial r^2} + \frac{N^2}{2N_1 h} (2r - h) = \frac{1}{\mu} \frac{dp_0}{d\theta}, \quad \frac{\partial v_0}{\partial r} + \frac{\partial u_0}{\partial \theta} = 0$$
(17)

с граничными условиями:

$$v_0 = 1, \quad u_0 = -\eta \sin \theta, \quad v_0 = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 - \eta \cos \theta;$$

$$v_0 = 0, \quad u_0 = 0, \quad v_0 = 0 \quad \text{при} \quad r = 0;$$

$$p_0(0) = p_0(2\pi) = \frac{P_a}{P^*};$$
(18)

- для первого приближения:

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial r^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp_1}{d\theta}; \quad \frac{\partial v_1}{\partial r} + \frac{\partial u_1}{\partial \theta} = 0;$$

$$\frac{d\Phi_1(\theta)}{d\theta} = -K \int_0^{1-\eta \cos \theta} \left(\frac{\partial u_0}{\partial r} \right)^2 dr \quad (19)$$

с граничными условиями:

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

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

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

Точное автомодельное решение

Точное автомодельное решение задачи для нулевого приближения будем искать в виде:

$$v_0 = \frac{\partial \Psi_0}{\partial r} + V_0(r, \theta); \quad u_0 = -\frac{\partial \Psi_0}{\partial \theta} + U_0(r, \theta);$$

$$\Psi_0(r, \theta) = \tilde{\Psi}_0(\xi); \quad \xi = \frac{r}{h(\theta)};$$

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

$$\frac{dp_0}{d\theta} = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(\theta)}; \quad h(\theta) = 1 - \eta \cos \theta. \quad (21)$$

Подставляя (21) в систему дифференциальных уравнений (17) с учетом граничных условий (18), получим следующую систему дифференциальных уравнений:

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

и граничные условия:

$$v(0) = 0, \quad \tilde{\Psi}'_0(0) = 0, \quad \tilde{\Psi}'_0(1) = 0, \quad \tilde{u}_0(1) = -\eta \sin \theta, \quad \tilde{v}_0(1) = 0;$$

$$v(1) = 0, \quad \tilde{u}_0(0) = 0, \quad \tilde{v}_0(0) = 1, \quad \int_0^1 \tilde{u}_0(\xi) d\xi = 0, \quad p_0(0) = p_0(2\pi) = \frac{P_a}{P^*}. \quad (23)$$

Непосредственным интегрированием получим:

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

Из условия $p_0(0) = p_0(2\pi) = \frac{P_a}{P^*}$ получим следующее выражение:

$$\tilde{C}_2 = -C_1 \frac{\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{h^2(\theta)}}{\int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{h^3(\theta)}} = -\frac{12(1-\eta^2)}{2+\eta^2}. \quad (25)$$

Определение гидродинамического давления

С учетом (25) для безразмерного гидродинамического давления получим:

$$p_0 = \tilde{C}_1 J_2(\theta) + \tilde{C}_2 J_3(\theta) + \frac{P_g}{P^*} = \frac{-6\sin\theta}{(2+\eta^2)(1-\eta\cos\theta)} \left[\eta + \frac{1}{(1-\eta\cos\theta)} \right] + \frac{P_a}{P^*}. \quad (26)$$

Общеизвестно, что в случае решения задачи плоской гидродинамической теории смазки давление определяется с точностью до произвольной постоянной. Значение этой постоянной \tilde{C}_2 устанавливается из условия отсутствия отрицательных значений давления в смазочном слое.

Для определения $\Phi_1(\theta)$ с учетом уравнения (19) приходим к следующему уравнению:

$$\frac{d\Phi_1(\theta)}{d\theta} = h(\theta) \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\Psi}''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{u}'(\xi)}{h(\theta)} \right)^2 d\xi. \quad (27)$$

Интегрируя уравнение (27), получим:

$$\Phi_1(\theta) = \int_0^\theta \frac{\Delta_1 d\theta}{h^3(\theta)} + \int_0^\theta \frac{\Delta_2 d\theta}{h^2(\theta)} + \int_0^\theta \frac{\Delta_3 d\theta}{h(\theta)}, \quad (28)$$

где

$$\Delta_1 = \int_0^1 (\tilde{\Psi}''(\xi))^2 d\xi = \frac{\tilde{C}_2^2}{12}; \quad \Delta_2 = \int_0^1 2\tilde{\Psi}''(\xi) \cdot \tilde{u}'(\xi) d\xi = \frac{1}{6} \tilde{C}_1 \tilde{C}_2; \quad (29)$$

$$\Delta_3 = \int_0^1 (\tilde{u}'(\xi))^2 d\xi = 4 + \frac{N^4}{720N_1^2}.$$

Решая уравнения (28)-(29) с учетом $K\Phi_1(0) = K\tilde{\alpha}$, получим:

$$\Phi_1(\theta) = \frac{1}{\sqrt{1-\eta^2}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{1+\eta}{1-\eta}} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) \left[\frac{-12}{2+\eta^2} + 8 + \frac{N^4}{360N_1^2} \right] + \quad (30)$$

$$+ \frac{6\eta\sin\theta}{(2+\eta^2)(1-\eta\cos\theta)} + \frac{6(1-\eta^2)\sin\theta}{(2+\eta^2)^2(1-\eta\cos\theta)^2} + \tilde{\alpha}.$$

Тогда для первого приближения получим:

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \frac{\partial \psi_1}{\partial r} + U_1(r, \theta); & v_1 &= -\frac{\partial \psi_1}{\partial \theta} + V_1(r, \theta); \\
 \psi_1(r, \theta) &= \tilde{\psi}_1(\xi); & \xi &= \frac{r}{1 - \eta \cos \theta}; \\
 V_1(r, \theta) &= \tilde{v}(\xi); & U_1(r, \theta) &= -\tilde{u}_1(\xi) \cdot h'(\theta); \\
 \frac{dp_1}{d\theta} &= \frac{\tilde{C}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(\theta)}; & h(\theta) &= 1 - \eta \cos \theta.
 \end{aligned} \tag{31}$$

Подставляя (31) в систему дифференциальных уравнений (19) с учетом граничных условий (20), получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\tilde{\psi}_1''' = \tilde{C}_2; \quad \tilde{u}_1'' = \tilde{C}_1; \quad \tilde{u}_1'(\xi) + \xi \tilde{v}_1'(\xi) = 0; \quad \frac{dp_1}{d\theta} = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(\theta)} \tag{32}$$

и граничные условия:

$$\begin{aligned}
 \tilde{\psi}_1'(0) &= 0, & \tilde{\psi}_1'(1) &= 0, & \tilde{u}_1(1) &= 0, & \tilde{v}_1(1) &= 0; & v_1(0) &= 0, \\
 v_1(1) &= 0, & \tilde{u}_1(0) &= M, & \tilde{v}_1(0) &= 0, & \int_0^1 \tilde{u}_1(\xi) d\xi &= 0, & p_1(0) &= p_1(2\pi) = 0.
 \end{aligned} \tag{33}$$

Непосредственным интегрированием получим:

$$\tilde{\psi}_1'(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2}(\xi^2 - \xi), \quad \tilde{u}_1(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} - \left(\frac{\tilde{C}_1}{2} + M \right) \xi + M, \quad \tilde{C}_1 = 6M. \tag{34}$$

Из условия $p_1(0) = p_1(2\pi) = 0$ получим:

$$\tilde{C}_2 = -\frac{12M(1 - \eta^2)}{2 + \eta^2}, \tag{35}$$

где

$$\begin{aligned}
 M &= \sup_{\theta \in [0; 2\pi]} \left. \frac{\partial u_0}{\partial r} \right|_{r=0} \cdot \Phi_1(\theta) = \sup_{\theta \in [0; 2\pi]} \left[\frac{-\eta \sin \theta}{1 - \eta \cos \theta} - \frac{N^2}{12N_1} + \frac{3}{(2 + \eta^2)} \left[\frac{\eta(\cos \theta - \eta)}{1 - \eta \cos \theta} + \frac{\cos \theta - \eta \cos^2 \theta - 2\eta \sin^2 \theta}{(1 - \eta \cos \theta)^2} \right] \right] \times \\
 &\times \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \eta^2}} \arctg \left(\sqrt{\frac{1 + \eta}{1 - \eta}} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) \left[\frac{-12}{2 + \eta^2} + 8 + \frac{N^4}{360N_1^2} \right] + \frac{6\eta \sin \theta}{(2 + \eta^2)(1 - \eta \cos \theta)} + \frac{6(1 - \eta^2) \sin \theta}{(2 + \eta^2)^2 (1 - \eta \cos \theta)^2} + \tilde{\alpha} \right). \\
 &= 11,59
 \end{aligned}$$

С учетом (35) получим:

$$p_1 = \tilde{C}_1 J_2(\theta) + \tilde{C}_2 J_3(\theta) = \frac{6M \sin \theta}{(2 + \eta^2)(1 - \eta \cos \theta)} \left[\eta + \frac{1}{(1 - \eta \cos \theta)} \right]. \tag{36}$$

Результаты исследований и их обсуждение

Перейдем к определению основных рабочих характеристик подшипника.

С учетом (17), (19), (26), (36) для составляющей вектора поддерживающей силы и силы трения получим:

$$R_y = \frac{(2\mu + \kappa)\Omega r_0^3}{\delta^2} \int_0^{2\pi} \left(p_0 - \frac{P_g}{P^*} + Kp_1 \right) \sin \theta d\theta = \frac{6\mu\Omega r_0^3 \pi \eta (1 - \eta^2) + 1}{\delta^2 (2 + \eta^2) \sqrt{(1 - \eta^2)^3}} (1 + KM);$$

$$R_x = \frac{(2\mu + \kappa)\Omega r_0^3}{\delta^2} \int_0^{2\pi} \left(p_0 - \frac{P_g}{P^*} + Kp_1 \right) \cos \theta d\theta = 0.$$

$$L_{тр} = \frac{(2\mu + \kappa)\Omega r_0^2}{\delta} \int_0^{2\pi} \left[\frac{\partial u_0}{\partial r} \Big|_{r=0} + K \frac{\partial u_1}{\partial r} \Big|_{r=0} \right] d\theta =$$

$$= \frac{(2\mu + \kappa)\Omega r_0^2}{\delta} \left[-\frac{N^2 \pi}{6N_1} - \frac{2MK}{1 + \eta} \arctg \frac{2\pi\sqrt{1 + \eta}}{\sqrt{1 - \eta}} + \frac{3(1 + KM)}{(2 + \eta^2)} \times \right. \tag{37}$$

$$\left. \times \left(2 \arctg \frac{2\pi\sqrt{1 + \eta}}{\sqrt{1 - \eta}} (1 - \eta) + \frac{8\eta}{\sqrt{1 - \eta^2}} \arctg \frac{2\pi\sqrt{1 + \eta}}{\sqrt{1 - \eta}} \right) \right].$$

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

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

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

$$L' = 3,9 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2; M = 0,16 \dots 25,6; \Omega = 100 \dots 1800 \text{ с}^{-1}.$$

По результатам численных расчетов построены графики, приведенные на рис. 2-5.

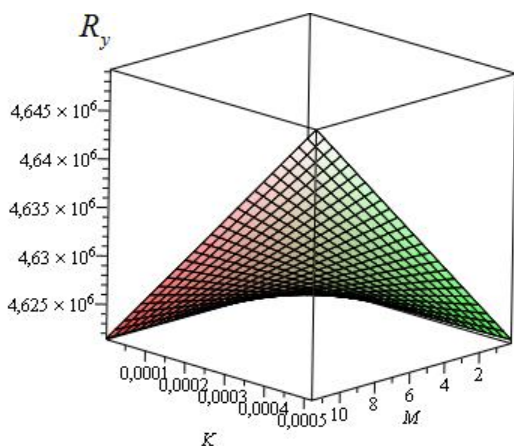


Рисунок 2. Зависимость составляющей вектора поддерживающей силы R_y от параметра K , характеризующего скорость диссипации механической энергии, и параметра M , характеризующего зависимость толщины расплавленной пленки

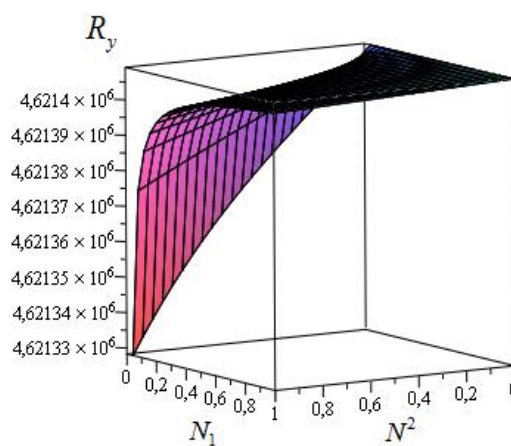


Рисунок 3. Зависимость составляющей вектора поддерживающей силы R_y от структурно-вязкостных параметров (N и N_1) микрополярного смазочного материала

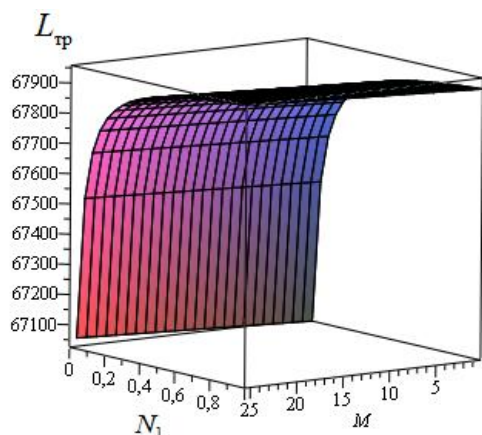


Рисунок 4. Зависимость силы трения от M , характеризующего зависимость толщины расплавленной пленки, и от структурно-вязкостного параметра N_1 микрополярного смазочного материала

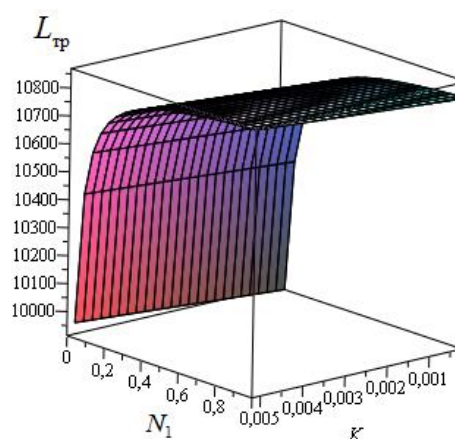


Рисунок 5. Зависимость силы трения от параметра K , характеризующего скорость диссипации механической энергии, и от структурно-вязкостного параметра N_1 микрополярного смазочного материала

Выводы

По результатам численного анализа построены графики (рис. 2-5), позволяющие сделать следующие выводы.

- Несущая способность радиального подшипника увеличивается незначительно с ростом параметра K , характеризующего скорость диссипации механической энергии, и параметра M , характеризующего зависимость толщины расплавленной пленки. При увеличении значений структурно-вязкостных параметров (N и N_1) микрополярного смазочного материала несущая способность резко увеличивается.
- В результате проведенных теоретических исследований выявлены основные закономерности влияния структурно-вязкостных параметров микрополярного смазочного материала (N и N_1) на несущую способность и силу трения.

Заключение. Полученные результаты в виде расчетных моделей могут быть использованы при разработке и проведении проверочных расчетах конструкций опор скольжения, работающих на микрополярных смазочных материалах с учетом структурно-вязкостных характеристик, которые обеспечивают значительное снижение влияния рабочих нагрузок на узлы трения, которые являются одним из перспективных направлений современной трибологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кропачев, Д. Ю. Способы оперативного измерения температуры расплава металлов для нужд машиностроительных предприятий / Д. Ю. Кропачев, А. А. Гришин, А. Д. Масло // Литье и металлургия. – 2012. – № 3(66). – С. 126-127.
2. Уилсон. Смазка с расплавом / Уилсон // Проблемы трения и смазки. – 1976. – № 1. – С. 19.
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. Физические величины. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Хавин, В. Я. Краткий химический справочник / В. Я. Хавин. – Л.: Химия, 1991.
6. Перельман, В. И. Краткий справочник химика / В. И. Перельман. – М.-Л.: Химия, 1964.
7. Справочник по пайке. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1984.
8. Котельницкая, Л. И. Расчет радиальных с эффективной работой на смазке с расплавом в турбулентном режиме / Л. И. Котельницкая, Н. Н. Демидова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2002. – № 2. – С. 18-23.
9. 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.
10. Ахвердиев, К. С. Об одном решении задачи о гидродинамической смазке жидкостью, образующейся при плавлении направляющей, при наличии принудительной смазки / К. С. Ахвердиев, Л. И. Котельницкая, Н. С. Воронин // Вестник Донского государственного технического университета. – 2002. – Т. 2, № 2(12). – С. 99-103.
11. Ахвердиев, К. С. Установившееся движение вязкоупругой жидкости между наклонным ползуном и направляющей с учетом сил инерции смазочной композиции / К. С. Ахвердиев, И. А. Журба // Трение и износ. – 2004. – Т. 25, № 6. – С. 567-576.
12. Мукутадзе, М. А. Разработка системы расчетных моделей подшипников скольжения на основе развития гидродинамической и реодинамической теории смазки: дис. ... д-ра техн. наук / М. А. Мукутадзе. – Ростов н/Д, 2015. – С. 363-383.

Vasilenko Vladimir Vladimirovich

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

Lagunova Elena Olegovna

Rostov state transport university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: lagunova@rambler.ru

Mukutadze Murman Aleksandrovich

Rostov state transport university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: murman1963@yandex.ru

Hydrodynamic calculation of the radial bearing, the lubricated melt coatig in the presence of a lubricant

Abstract. In this paper, a method of forming an exact self-similar solution of the problem of calculating the hydrodynamic radial bearings working in the presence of the lubricant and melt the surface of the bearing.

On the basis of the equation of the movement of the lubricant having micropolar properties for "a thin layer" and expression for the speed of dissipation of energy the analytical dependence for a profile of the melted surface of the bearing is received. In addition, to determine the basic operating characteristics of the friction pair.

The estimation of the impact parameter, determined by the melt surface of the bearing bushing, on the bearing capacity and friction force.

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