Расчетная модель с учетом зависимости вязкости и проницаемости пористого слоя от давления трехслойной гидродинамической смазки радиального подшипника, обладающего повышенной несущей способностью и демпфирующими свойствами

М.А. Мукутадзе

Введение.

Анализ существующих работ [1 – 11], посвященных расчету подшипников скольжения, показывает, что приведенные в основном здесь расчетные модели не полностью учитывают ряд факторов, влияющих на функционирование трибосистемы. Это прежде всего учет зависимости вязкости и проницаемости пористого слоя от давления; образование промежуточных слоев смазки разной вязкости.

Ниже приведем расчетную модель с учетом зависимости вязкости и проницаемости пористого слоя от давления трехслойной смазки радиального подшипника, обладающего повышенной несущей способностью и демпфирующими свойствами.

Постановка задачи. Рассматривается установившееся стратифицированное течение трехслойной смазки в зазоре радиального подшипника с адаптированным профилем опорной поверхности при наличии пористого слоя на рабочей поверхности вала. Предполагается, что пространство между подшипником и валом полностью заполнено трехслойной вязкой несжимаемой жидкостью. Вал вращается с угловой скоростью Ω, а подшипник неподвижен. Также предполагается, что зависимость вязкости и коэффициента проницаемости пористого слоя от давления выражается формулами:

$$\mu_i = \mu_{oi} e^{\tilde{\alpha}^* p'}, \quad k' = k_o e^{\tilde{\alpha}^* p'}, \; i = 1,2,3. \qquad (1)$$

Здесь $\tilde{\alpha}^*$ – экспериментальная постоянная; μ_{oi} – характерные значения динамического коэффициента смазочных слоев; k' – проницаемость пористого слоя; p' – гидродинамическое давление.

В полярной системе координат с полюсом в центре вала уравнение адаптированного контура опорной поверхности подшипника, границы раздела слоев и кругового шипа с пористым слоем на его рабочей поверхности можно записать в виде (рис. 1)

$$c_0 : r_1' = r_0 + H,\ \widetilde{c_0} : r' = r_0,\ c_1 : r' = r_0 + \delta\alpha + \delta\alpha e\cos\theta - \alpha A\sin\omega\theta;$$

$$c_2 : r = r_0 + \beta\delta + \beta e\cos\theta - \beta A\sin\omega\theta;\ c_3 : r' = r_3 + e\cos\theta - A\sin\omega\theta, \quad (2)$$

где $\alpha \in [0,1],\ \alpha \le \beta \le 1,\ H$ – толщина пористого слоя.

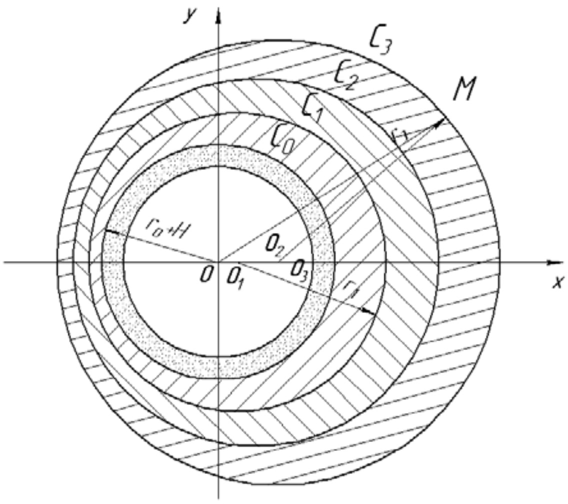

Рис. 1. Схематическое изображение шипа с пористым слоем на его рабочей поверхности в радиальном подшипнике, работающего на трехслойной смазочной композиции

Основные уравнения и граничные условия

В качестве исходных уравнений берутся безразмерная система уравнении движения вязкой несжимаемой жидкости с учетом вязкости от давления для случая «тонкого слоя», уравнение неразрывности, а также уравнение Дарси с учетом зависимости проницаемости от давления

$$\frac{\partial^2 \upsilon_i}{\partial r^2} = \Lambda_i e^{-\tilde{\alpha}p}\frac{dp}{d\theta},\ \ \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial \upsilon_i}{\partial\theta} = 0,\ i = 1,2,3;$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*}\frac{\partial P}{\partial r^*} + \frac{1}{r^{*2}}\frac{\partial^2 P}{\partial\theta^2} = 0, \quad (3)$$

где размерные величины $r', u_i', \upsilon_i', p', \mu_i'$ в смазочном слое связаны с безразмерными соотношениями

$$r' = r_0 + \delta r,\ \upsilon_i' = \Omega r_0 \upsilon_i,\ u_i' = \Omega\delta u_i,\ p' = p_g p,$$

$$\mu_i' = \mu_{0i}\mu_i,\ \ \Lambda_i = \delta^2 p_g / \mu_{0i}\Omega(r_0+H)^2,\ \ \delta = r_2 - r_0 - H. \qquad (4)$$

В пористом слое переход к безразмерным переменным осуществлен по формулам

$$r' = (r_0+H)r^*,\ \ p' = p_g P. \qquad (5)$$

Здесь u_i', υ_i' – компоненты вектора скорости; p_g – характерное давление.

Система уравнений (3) решается при следующих граничных условиях:

$$u_1\big|_{r=0} = -N\frac{\partial P}{\partial r^*}\Big|_{r^*=1},\ \ \frac{\partial P}{\partial r^*} = 0 \text{ при } r = \frac{r_0}{r_0+H},\ \ \upsilon_1\big|_{r=0} = 1;$$

$$u_3 = 0,\ \upsilon_3 = 0,\ \upsilon_3 = 0 \text{ при } r = h(\theta);$$

$$p = P\Big|_{r^*=1},\ \ p(0) = p(2\pi) = 1;\ \ u_2 = u_3,\ \upsilon_2 = \upsilon_3 \text{ при } r = \beta h;$$

$$u_1 = u_2,\ \upsilon_1 = \upsilon_2,\ \frac{\partial\upsilon_1}{\partial r} = \frac{\mu_{02}}{\mu_{01}}\frac{\partial\upsilon_2}{\partial r},\ \ \frac{u_1}{\upsilon_1} = \alpha h'(\theta) \text{ при } r = \alpha h(\theta);$$

$$\frac{u_2}{\upsilon_2} = \beta h'(\theta) \text{ при } r = \beta h;\ \frac{\partial\upsilon_2}{\partial r} = \frac{\mu_{03}}{\mu_{02}}\frac{\partial\upsilon_3}{\partial r} \text{ при } r = \beta h;$$

$$h(\theta) = 1 + \eta\cos\theta - \eta_1\sin\omega\theta,\ \ \eta = \frac{e}{\delta},\ \ \eta_1 = \frac{A}{\delta},\ \ N = \frac{k_o p_g}{\mu_{0i}\Omega\delta(r_0+H)}. \qquad (6)$$

Точное автомодельное решение задачи

Уравнение Дарси осредним по толщине смазочного слоя

$$\int_\gamma^1\left[\frac{\partial^2 p}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*}\frac{\partial P}{\partial r^*} + \frac{1}{r^{*2}}\frac{\partial^2 p}{\partial\theta^2}\right]dr^* = 0 \qquad (7)$$

и точное автомодельное решение системы уравнений (3), удовлетворяющее граничным условиям (6), будем искать в виде

$$u_i = -\frac{\partial\psi_i}{\partial\theta} + U_i(r,\theta),\ \ \upsilon_i = \frac{\partial\psi_i}{\partial r} + V_i(r,\theta),\ \ \psi_i = \widetilde{\psi}_i(\xi),$$

$$U_i = -\widetilde{u}_i(\xi)h'(\theta),\ \ V_i(r,\theta) = \widetilde{\upsilon}_i(\xi),\ \ \xi = \frac{r}{h(\theta)},\ \ i = 1,2,3,$$

$$\Lambda_1 e^{-\tilde{\alpha}p}\frac{dp}{d\theta} = \frac{\widetilde{c}_1}{h^2} + \frac{\widetilde{c}_2}{h^3},\ \ \Lambda_2 e^{-\tilde{\alpha}p}\frac{dp}{d\theta} = \frac{\approx{c}_1}{h^2} + \frac{\approx{c}_2}{h^3},\ \ \Lambda_3 e^{-\tilde{\alpha}p}\frac{dp}{d\theta} = \frac{\widetilde{c}_3}{h^2} + \frac{\widetilde{c}_4}{h^3},$$

$$P = A(\theta)\left(r^*-1\right)\left(r^*-\gamma\right)^2 + c^*\left(r^*-\gamma\right)^2\left(r^*-1\right)h'(\theta) + p,\ \ \gamma = \frac{r_0}{r_0+H}. \qquad (8)$$

Подставляя (8) в (3) и (6), будем иметь

$$\widetilde{\psi_1}''' = \widetilde{c_2},\ \ \widetilde{\upsilon_1}'' = \widetilde{c_1},\ \ \widetilde{u_1}' + \xi\widetilde{\upsilon_1}' = 0,\ \ \widetilde{\psi_2}''' = \widetilde{c_2},\ \ \widetilde{\upsilon_2}'' = \widetilde{\widetilde{c_1}},$$

$$\widetilde{u_2}' + \xi\widetilde{\upsilon_2}' = 0,\ \ \widetilde{\psi_3}''' = \widetilde{c_4},\ \ \widetilde{\upsilon_3}'' = \widetilde{c_3},\ \ \widetilde{u_3}' + \xi\widetilde{\upsilon_3}' = 0, \tag{9}$$

$$\widetilde{\psi_1}'(0) = 0,\ \widetilde{u_1}(0) = -Nc^*\left(\frac{H}{r_0 + H}\right)^2\beta^*,\ \ \upsilon_1(0) = 1,\ \widetilde{\psi_3}'(1) = 0,\ \widetilde{u_3}(1) = 0,$$

$$\widetilde{\upsilon_3}(1) = 0,\ \psi_1'(\alpha) = \widetilde{\psi_2}'(\alpha),\ \ \widetilde{\upsilon_1}(\alpha) = \widetilde{\upsilon_2}(\alpha),\ \ \widetilde{u_1}(\alpha) = \widetilde{u_2}(\alpha),\ \ \widetilde{\upsilon_1}'(\alpha) = \frac{\mu_2}{\mu_1}\widetilde{\upsilon_2}'(\alpha),$$

$$\widetilde{\psi_1}''(\alpha) = \frac{\mu_2}{\mu_1}\widetilde{\psi_2}''(\alpha),\ \ \widetilde{\upsilon_2}(\beta) = \widetilde{\upsilon_3}(\beta),\ \ \widetilde{u_2}(\beta) = \widetilde{u_3}(\beta),\ \ \widetilde{\psi_2}'(\beta) = \widetilde{\psi_3}'(\beta),$$

$$\widetilde{\psi_2}''(\beta) = \frac{\mu_3}{\mu_2}\widetilde{\psi_3}''(\beta),\ \ \widetilde{\upsilon_2}''(\beta) = \frac{\mu_3}{\mu_2}\widetilde{\upsilon_3}'(\beta),$$

$$\int_0^\alpha \widetilde{\upsilon_1}d\xi + \int_\alpha^\beta \widetilde{\upsilon_2}(\xi)d\xi + \int_\beta^1 \widetilde{\upsilon_3}(\xi)d\xi = \beta^*. \tag{10}$$

Решение задачи (9) – (10) находится непосредственным интегрированием. В результате будем иметь

$$\tilde{\psi}_1'(\xi) = \tilde{c}_2\frac{\xi^2}{2} + c_2\xi + c_3,\ \ \tilde{\psi}_2' = \tilde{\tilde{c}}_2\frac{\xi^2}{2} + c_4\xi + c_5,$$

$$\tilde{\upsilon}_1 = \tilde{c}_1\frac{\xi^2}{2} + c_6\xi + c_7,\ \ \ \tilde{\upsilon}_2 = \tilde{\tilde{c}}_1\frac{\xi^2}{2} + c_8\xi + c_9,$$

$$\tilde{u}_1 = -\tilde{c}_1\frac{\xi^3}{3} - c_6\frac{\xi^2}{2} + c_{10},\ \tilde{u}_2 = -\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\xi^3}{3} - c_8\frac{\xi^2}{2} + c_{11},$$

$$\tilde{\psi}_3' = \tilde{c}_4\frac{\xi^2}{2} + c_{12}\xi + c_{13},\ \ \ \tilde{\upsilon}_3 = \tilde{c}_3\frac{\xi^2}{2} + c_{14}\xi + c_{15},\ \ \tilde{u}_3 = -\tilde{c}_3\frac{\xi^3}{3} - c_{14}\frac{\xi^2}{2} + c_{16},$$

$$\Lambda_1 e^{-\tilde{\alpha}p} = \Lambda_1 e^{-\tilde{\alpha}} - \widetilde{\alpha}[J_2(\theta)\widetilde{c_1} + J_3(\theta)\widetilde{c_2}],\ \ \Lambda_2 e^{-\tilde{\alpha}p} = \Lambda_2 e^{-\tilde{\alpha}} - \widetilde{\alpha}[J_2(\theta)\widetilde{\widetilde{c_1}} + J_3(\theta)\widetilde{\widetilde{c_2}}],$$

$$\Lambda_3 e^{-\tilde{\alpha}p} = \Lambda_3 e^{-\tilde{\alpha}} - \widetilde{\alpha}[J_2(\theta)\widetilde{c_3} + J_3(\theta)\widetilde{c_4}],\ \ \ J_k(\theta) = \int_0^\theta \frac{d\theta}{h^k(\theta)}. \tag{11}$$

Для определения постоянных $\tilde{c}_i(i = 2, 3, ...16)$ $\tilde{c}_1, \tilde{c}_2, \tilde{\tilde{c}}_1, \tilde{\tilde{c}}_2, \tilde{c}_3$ и $\tilde{c}_4$ придем к следующей алгебраической системе уравнений:

$$c_7 = 1,\ c_{10} = 0,\ \ c_3 = 0,\ \ c_{13} = -\frac{\tilde{c}_4}{2} - c_{12},\ \ c_{15} = -\frac{\tilde{c}_3}{2} - c_{14},\ \ c_{16} = \frac{\tilde{c}_3}{3} + \frac{c_{14}}{2},$$

$$c_6 = k_1(\tilde{\tilde{c}}_1\alpha + c_8) - \tilde{c}_1\alpha,\ \ c_4 = k_2(\tilde{c}_4\beta + c_{12}) - \tilde{\tilde{c}}_2\beta,$$

$$c_2 = k_1 c_4,\ \ c_8 = k_2 c_{14},\ \ \ \tilde{c}_2\frac{\alpha^2}{2} + c_2\alpha + c_3 - \tilde{\tilde{c}}_2\frac{\alpha^2}{2} - c_4\alpha - c_5 = 0,$$

$$\tilde{c}_1\frac{\alpha^2}{2}+c_6\alpha+c_7-\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\alpha^2}{2}-c_8\alpha-c_9=0,$$

$$-\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\beta^3}{3}-c_8\frac{\beta^2}{2}+c_{11}+\tilde{c}_3\frac{\beta^3}{3}+c_{14}\frac{\beta^2}{2}-c_{16}=0,$$

$$\tilde{\tilde{c}}_2\frac{\beta^2}{2}+c_4\beta+c_5-\tilde{c}_4\frac{\beta^2}{2}-c_{12}\beta-c_{13}=0,$$

$$\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\beta^2}{2}+c_8\beta+c_9-\tilde{c}_3\frac{\beta^2}{2}-c_{14}\beta-c_{15}=0,$$

$$\tilde{c}_1\frac{\alpha^3}{6}+c_6\frac{\alpha^2}{2}+c_7\alpha+\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\beta^3}{6}+c_8\frac{\beta^2}{2}+c_9\beta-\tilde{\tilde{c}}_1\frac{\alpha^3}{6}-c_8\frac{\alpha^2}{2}-c_9\alpha+$$

$$+\frac{\tilde{c}_3}{6}+\frac{c_{14}}{2}+c_{15}-\tilde{c}_3\frac{\beta^3}{6}-c_{14}\frac{\beta^2}{2}-c_{15}\beta=\beta^*,$$

$$\tilde{c}_1=k_1\tilde{\tilde{c}}_1,\ \ \tilde{c}_2=k_1\tilde{\tilde{c}}_2,\ \ \tilde{\tilde{c}}_1=k_2\tilde{c}_3,\ \ \tilde{\tilde{c}}_2=k_2\tilde{c}_4,\ \ \tilde{c}_4=-\tilde{c}_3\frac{J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)}. \qquad (12)$$

Здесь $k_1={\mu_2}/{\mu_1}$, $k_2={\mu_3}/{\mu_2}$.

Решение системы (12) сводится к решению следующего матричного уравнения:

$$M\cdot\vec{x}=\vec{b}, \qquad (13)$$

где $\overline{x}=\left\{\tilde{c}_3;c_4;c_5;c_6;c_9;c_{11};c_{12};c_{14}\right\}$, $\overline{b}=\left\{0;0;0;-1;0;0;0;-6\alpha-6\beta^*\right\}$,

$$M=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -k_1k_2\\ \alpha_1 & \alpha_2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ \alpha_3 & 0 & 0 & \alpha & -1 & 0 & 0 & -k_2\alpha\\ \alpha_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \alpha_5\\ \alpha_6 & \beta & 1 & 0 & 0 & 0 & \alpha_7 & 0\\ \alpha_8 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \alpha_9\\ \alpha_{10} & 0 & 0 & 3\alpha^2 & \alpha_{11} & 0 & 0 & \alpha_{12}\end{bmatrix}. \qquad (14)$$

Здесь $\alpha_1=k_2\frac{\alpha_2}{2}\frac{J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)}(1-k_1)$; $\alpha_2=\alpha(k_1-1)$, $\alpha_3=k_2\frac{\alpha^2}{2}\left(k_1-1\right)$,

$$\alpha_4=\frac{1}{3}\left(\beta^3-k_2\beta^3-1\right);\ \ \alpha_5=\frac{1}{2}\left(\beta^2-\beta^2k_2-1\right);\ \ \alpha_6=\frac{1}{2}\frac{J_2(2\pi)}{J_3(2\pi)}\left(\beta^2-k_2\beta^2-1\right)$$

$$\alpha_7=1-\beta;\ \ \alpha_8=\frac{1}{2}\left(1-\beta^2+k_2\beta^2\right),\ \ \alpha_9=1+\beta k_2-\beta,$$

$$\alpha_{10}=-2-\beta^3+3\beta-k_2\alpha^3+k_2\beta^3+k_1k_2\alpha^3,\ \ \alpha_{11}=6(\beta-\alpha),$$

$$\alpha_{12}=6\beta+3\left(1-\beta^2-k_2\alpha^2+k_2\beta^2\right). \tag{15}$$

Решая матричное уравнение (13), получим:

$$\tilde{c}_3=\frac{3\alpha^2k_1k_2-\alpha_{12}-6\alpha^2k_2+6\alpha k_1k_2\beta^*+\alpha_{11}\alpha_9+6\alpha_9\alpha+6\alpha_9\alpha+6\alpha_9\beta^*-6k_2\alpha\beta^*}{\Delta},$$

$$\begin{aligned}\Delta=\alpha_{11}\alpha_8\alpha k_1k_2-\alpha_{11}\alpha_8k_2\alpha-\alpha_{10}\alpha k_1k_2-\alpha_{10}\alpha_9+\alpha_{10}k_2\alpha+3\alpha^2k_1k_2\alpha_8+\\+3\alpha^2k_1k_2\alpha_3-\alpha_{11}\alpha_9\alpha_3+\alpha_{12}\alpha_8+\alpha_{12}\alpha_3.\end{aligned} \tag{16}$$

Значения других констант, входящих в систему (13), ввиду громоздкости их выражений здесь не приводятся. Перейдём к определению основных рабочих характеристик подшипника.

Определение гидродинамического давления и основных рабочих характеристик подшипника

В принятом нами приближении для гидродинамического давления получим выражения, аналогичные (10). Безразмерные расходы Q_1, Q_2 и Q_3 трехслойной смазочной жидкости определяются выражениями

$$Q_1=\tilde{c}_2\frac{\alpha^3}{6}+c_2\frac{\alpha^2}{2}+c_3\alpha,\ \ Q_2=\tilde{\tilde{c}}_2\frac{\rho^3}{6}+c_4\frac{\beta^2}{2}+c_5\beta-\tilde{\tilde{c}}_2\frac{\alpha^3}{6}c_4\frac{\alpha^2}{2}-c_5\alpha,$$

$$Q_3=\tilde{c}_4\frac{1}{6}+c_{12}\frac{1}{2}+c_{13}-\tilde{c}_4\frac{\beta^3}{6}-c_{12}\frac{\beta^2}{2}-c_{13}\beta.$$

Для безразмерных компонент поддерживающей силы и безразмерного момента трения, получим выражения:

$$\tilde{R}_y=\frac{R_y}{p^*r_0}=\int_0^{2\pi}\frac{dp_1}{d\theta}\cos\theta d\theta=\tilde{c}_1\left\{\pi\eta+\frac{\eta_1}{2}\left[\frac{\cos(\omega-1)2\pi-1}{\omega-1}+\frac{\cos(\omega+1)2\pi-1}{\omega+1}\right]\right\}\left(1+\frac{\tilde{\alpha}}{2}\right),$$

$$\tilde{R}_x=-\frac{R_x}{p^*r_0}=-\int_0^{2\pi}\frac{dp}{d\theta}\sin\theta d\theta=-\frac{\tilde{c}_1\eta_1}{2}\left[\frac{\sin(\omega-1)2\pi}{\omega-1}-\frac{\sin(\omega+1)2\pi}{\omega+1}\right]\left(1+\frac{\tilde{\alpha}}{2}\right),$$

$$\tilde{L}_{\text{тр}}=\frac{L_{\text{тр}}\delta}{\mu_1\Omega r_0^3}=\int_0^{2\pi}\left(\frac{\tilde{\psi}_1''}{h^2}+\frac{\tilde{\upsilon}'}{h}\right)_{\xi=0}e^{\tilde{\alpha}p}d\theta. \tag{17}$$

Основные выводы

Результаты численного анализа, приведенные на рис. 2–3, показывают:

1 Безразмерная $\tilde{R}_y$ – составляющая вектора поддерживающей силы – существенно зависит от параметра $\tilde{\alpha}$, k_1 и k_2.

2 При значениях β, близких к единице, с увеличением значения вязкостного отношения $k_2 = \mu_3 / \mu_2$ несущая способность возрастает. Наиболее резкое возрастание несущей способности достигается при $k_2 \geq 3$.

3 При $k_1 \approx 1{,}1$, $k_2 \geq 3$наличие пористого слоя на рабочей поверхности вала способствует существенному снижению значения силы трения подшипника, при этом практически не влияет на его несущую способность, в этом случае подшипник обладает повышенной несущей способностью и минимальной силой трения.

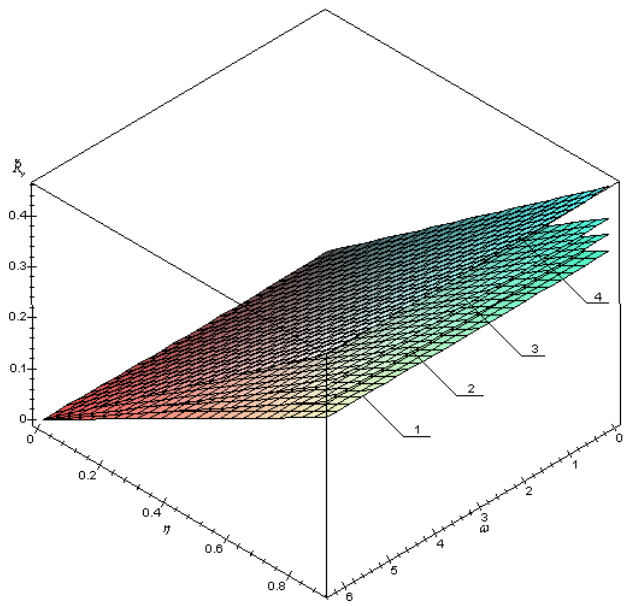

Рис. 2. Зависимость безразмерной несущей способности $\tilde{R}_y$от параметров η и ω, $k_1 = 1{,}1$:

$1 - \alpha = 0{,}1$; $k_2 = 1{,}2$; $2 - \alpha = 0{,}3$; $k_2 = 1{,}3$;

$3 - \alpha = 0{,}5$; $k_2 = 1{,}4$; $4 - \alpha = 0{,}9$; $k_2 = 1{,}5$

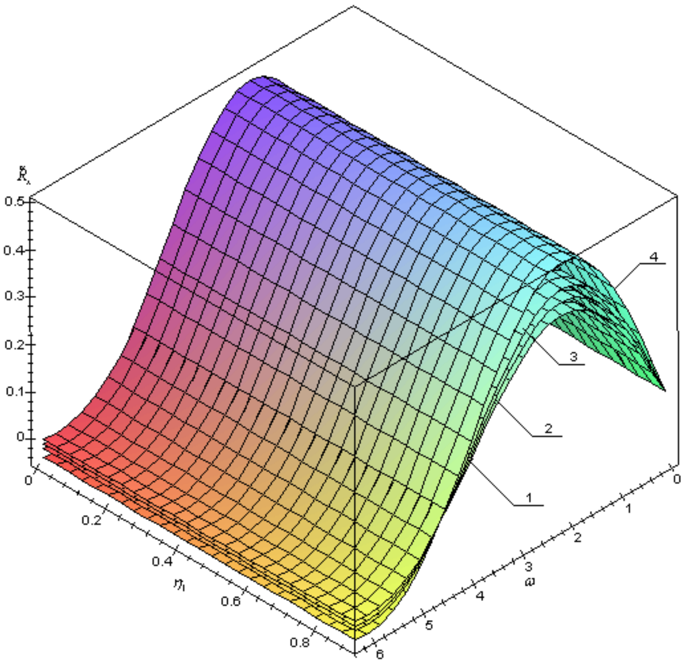

Рис. 3. Зависимость безразмерной несущей способности $\tilde{R}_x$ от параметров η_1 и ω,

$k_1 = 1{,}1$:

1 – $\alpha = 0{,}1$; $k_2 = 1{,}2$; *2* – $\alpha = 0{,}3$; $k_2 = 1{,}3$;

3 – $\alpha = 0{,}5$; $k_2 = 1{,}4$; *4* – $\alpha = 0{,}9$; $k_2 = 1{,}5$

Литература:

1. Коровчинский М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения. [Текст] М.: Машгиз, 1959, 404 с.

2. Ахвердиев К.С., Приходько В.М., Шевченко А.И., Казанчян О.Р. Математическая модель течения смазки в зазоре радиального подшипника конечной длины со слоистым пористым вкладышем переменной толщины [Текст] // Проблемы машиностроения. РАН М.: Наука - 2000 г. - № 6, - С. 85 – 91.

3. Ахвердиев К.С., Прянишникова Л.И., Пустовойт Ю.И. Гидродинамический расчет пористых подшипников с переменной проницаемостью вдоль оси с учетом нелинейных факторов. [Текст] // Трение и износ. – 1993 - Т. 14, № 5, - С. 813-821.

4. Савенкова С.С. Изучение несущей способности пористого подшипника – [Текст] // Изв. Сев.-Кавк. науч. Центра высш. школы. Сер. Техн. Науки - 1975 г. - № 3, - С. 56-57.

5. 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.

6. Ахвердиев К.С., Прянишникова Л.И. Об одном точном решении задачи о радиальном пористом подшипнике конечной длины [Текст] // Трение и износ. - 1993. - Т. 12, № 1, – С. 24-32.

7. Конри К., Кузано К. Об устойчивости пористых радиальных подшипников [Текст] // Конструирование и технология машиностроения. - 1974. - № 2. – С. 206-216.

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

9. Ахвердиев К.С. Мукутадзе М.А., Задорожная Н.С., Флек Б.М., Поляков Е.В., Расчетная модель гидродинамической смазки неоднородного пористого подшипника конечной длины, работающего в устойчивом нестационарном режиме трения при наличии принудительной подачи смазки [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013 г., № 3. – Режим доступа: http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1765 (доступ свободный) - Загл. С экрана. – Яз. Рус.

10. Gear C.W., Numarical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. - N.J., 1972.

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