

THE INTERNATIONAL
SCIENTIFIC
JOURNAL

*Problems of
Tribology*

*Проблеми
трибології*

МІЖНАРОДНИЙ
НАУКОВИЙ
ЖУРНАЛ

3,4' 2002

Шевчук А.І.,
Федотов В.О.,
Савуляк В.В.

Вінницький державний технічний
університет, м. Вінниця, Україна

СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КІНЧНОГО ГАЗОВОГО ПІДВІСУ З ПОЗДОВЖНИМИ КАНАВКАМИ ПРИ ДОВІЛЬНИХ ЗМІЩЕННЯХ ВАЛА

У роботі розглядаються кінчні газові підвіси, що відносяться до газостатичних опор або підшипників, у яких стиснутий газ від зовнішнього джерела (компресора) подається безпосередньо або через спеціальні конструктивні елементи (отвори малого діаметра, щілини, капіляри) в робочий зазор між валом та втулкою для забезпечення їх безконтактної роботи при довільній відносній швидкості поверхонь. Такі опори досить технологічні, прості за конструкцією і є перспективними для використання в прецизійних верстатах [1-3]. Але їх використання стримується недостатньою кількістю досліджень кінчних газостатичних опор. Так, в монографії [4] питання про розрахунок кінчних газових підшипників взагалі відсутнє. За останні роки з'явилися небагаточисельні відомості в наукових часописах про дослідження статичних [5-7] та динамічних характеристик кінчних газових підвісів [8,9] при малих значеннях відносного радіального ϵ та кутового θ зміщень вала.

Дослідимо залежність статичних характеристик від ϵ та θ для кінчного газового підвісу з поздовжніми канавками (рис. 1), у якого газ під тиском P_H подається безпосередньо в робочий зазор.

Задача статичного розрахунку кінчного газового підвісу (рис. 1) зводиться до визначення осевої F_z та радіальної F_r сили, відновлювального моменту M_θ газового шару, витрат газу (повітря) Q при компланарній неспіввісності. Для розв'язання цієї задачі необхідно знайти розподіл тиску в робочому газовому шарі при довільних значеннях відносного радіального ϵ та кутового θ зміщень вала.

Введемо безрозмірні величини геометрії кінчного підвісу та зміщень вала: $\aleph = \frac{\varphi_1}{(\varphi_1 + \varphi_2)}$ -

відносна ширина канавки; $\aleph_0 = \frac{\aleph}{(1 - \aleph)}$; $\lambda = \frac{l_{01} + l_{02}}{2R_0}$ - відносна довжина підвісу; $\nu = \frac{c}{c + \sigma}$ -

параметр зрни, профільованої поздовжніми канавками (c - зазор між валом та втулкою при збіганні їх осей; $e=0$, $e_1=0$, $e_2=0$); $\chi = \frac{R}{R_0}$ - безрозмірний радіус; $\epsilon = \frac{e}{c} \cos \alpha$ - відносне радіальне зміщення

вала; $\theta = \frac{e_1}{c} \cos \alpha$ - відносне кутове зміщення вала; $\xi = \frac{2z \cos \alpha}{(l_{01} + l_{02})}$ - відносна променева координата;

$h_q = ch_q$ - зазор між валом та втулкою по виступу канавки, $h_v = 1 - (\epsilon + \theta \xi) \cos \varphi$; $h_k = (c + \sigma) h_q$ - зазор між валом та втулкою у канавці, $h_q = 1 - \nu(\epsilon + \theta \xi) \cos \varphi$.

Диференціальне рівняння розподілу тиску в профільованій зоні кінчного газового підвісу запишеться [10]:

$$\chi^2 \left[\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \left(\frac{1}{\chi \gamma} - \frac{3\theta \nu \beta_4}{\beta_1 h_q} \cos \varphi \right) \frac{\partial u}{\partial \xi} \right] + \frac{9\nu^3 h^3}{(1 - \chi)^2} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{3(\epsilon + \theta \xi)}{\beta_1 h h_q} \sin \varphi \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right] = 0, \quad (1)$$

$$\text{де } \chi = 1 + \xi \lambda \operatorname{tg} \alpha, \quad h = \frac{h_v}{h_q}, \quad \gamma = 1 + \lambda \operatorname{tg} \alpha, \quad \beta_1 = \aleph_0 + \nu^3 h^3, \quad \vartheta = \frac{\nu^3}{\cos^2 \alpha},$$

$$\beta_2 = 1 + \aleph_0 \nu^3 h^3, \quad \beta_3 = 1 + \aleph_0 \nu^4 h^4, \quad \beta_4 = \aleph_0 + \nu^2 h^2, \quad u = p^2,$$

$$p = \frac{P}{P_a}, \quad P_a - \text{атмосферний тиск.}$$

Для визначення тиску газу в непрофільованих зонах 2, 4 (рис. 1) кінчної газової опори достатньо в диференціальному рівнянні (1) прийняти ширину G канавки рівною нулю ($\aleph = 0$, $\nu = 1$).

Розв'язання диференціального рівняння (1) для чотирьох ділянок газового шару кінцевого підвісу (рис.1) будемо шукати методом сплайнів [11,12]. Апроксимуємо функцію квадрата безрозмірного тиску u_i ($i=1,2,3,4$) по координаті ξ кубічними поліномами:

$$\begin{aligned} u_1 &= A_1 + B_1\xi + C_1\xi^2 + D_1\xi^3, \quad 0 \leq \xi \leq \alpha_{12}. \\ u_2 &= A_2 + B_2(\xi - \alpha_{12}) + C_2(\xi - \alpha_{12})^2 + D_2(\xi - \alpha_{12})^3, \quad \alpha_{12} \leq \xi \leq \alpha_{20}. \\ u_3 &= A_3 + B_3\xi + C_3\xi^2 + D_3\xi^3, \quad \alpha_{34} \leq \xi \leq 0. \\ u_4 &= A_4 + B_4(\xi - \alpha_{34}) + C_4(\xi - \alpha_{34})^2 + D_4(\xi - \alpha_{34})^3, \quad \alpha_{40} \leq \xi \leq \alpha_{34}. \end{aligned} \quad (2)$$

де $\alpha_{12} = \frac{2l_2}{l_{01} + l_{02}} \cos \alpha$, $\alpha_{20} = \frac{2l_{02}}{l_{01} + l_{02}}$, $\alpha_{34} = -\frac{2l_1}{l_{01} + l_{02}} \cos \alpha$, $\alpha_{40} = \frac{-2l_{01}}{l_{01} + l_{02}}$.

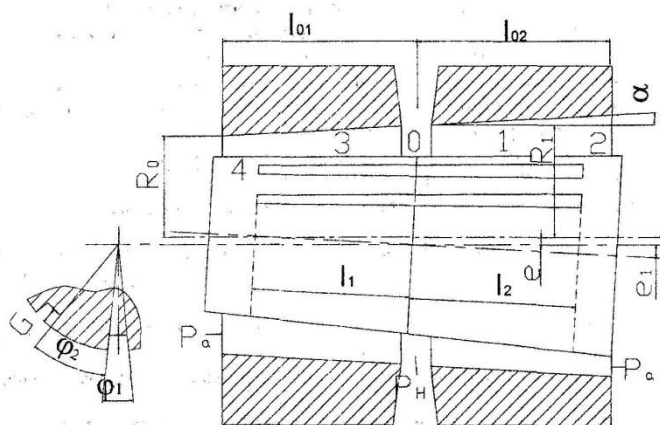


Рис. 1 - Схема газового підвісу

Для визначення невідомих функцій A_i, B_i, C_i, D_i ($i=1, 2, 3, 4$), що залежать від координати φ , необхідно шістьнадцять рівнянь. Граничні умови для квадрата безрозмірного тиску в газовому шарі підвісу:

$$\begin{aligned} u_1(0, \varphi) = p_H^2, \quad u_1(\alpha_{12}, \varphi) = u_2(\alpha_{12}, \varphi), \quad u_2(\alpha_{20}, \varphi) = 1, \\ u_3(0, \varphi) = p_H^2, \quad u_3(\alpha_{34}, \varphi) = u_4(\alpha_{34}, \varphi), \quad u_4(\alpha_{40}, \varphi) = 1. \end{aligned} \quad (3)$$

де $p_H = \frac{P_H}{P_a}$, P_H – тиск газу, що подається в робочий зазор підвісу.

На лінії надуву ($\xi=0$) та на відкритих ділянках підвісу ($\xi = \alpha_{20}$, $\xi = \alpha_{40}$) тиск газу не залежить від координати φ .

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1(0, \varphi)}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial^2 u_1(0, \varphi)}{\partial \varphi^2} = 0. \\ \frac{\partial u_{31}(0, \varphi)}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial^2 u_3(0, \varphi)}{\partial \varphi^2} = 0. \\ \frac{\partial u_2(\alpha_{20}, \varphi)}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial^2 u_2(\alpha_{20}, \varphi)}{\partial \varphi^2} = 0. \\ \frac{\partial u_4(\alpha_{40}, \varphi)}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial^2 u_4(\alpha_{40}, \varphi)}{\partial \varphi^2} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

З умови нерозривності потоку газу (повітря) на границях ділянок 1, 2 та 3, 4 (рис. 1) отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_{\xi_1}(\alpha_{12}, \varphi) &= \Delta Q_{\xi_2}(\alpha_{12}, \varphi), \\ \Delta Q_{\xi_3}(\alpha_{34}, \varphi) &= \Delta Q_{\xi_4}(\alpha_{34}, \varphi), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де ΔQ_{ξ_i} – локальні масові втрати газу в напрямку координати ξ .

Останні чотири рівняння для визначення невідомих функцій A_i, B_i, C_i, D_i ($i=1, 2, 3, 4$) отримаємо, записавши рівняння (1) при $\xi = \alpha_{12}, \xi = \alpha_{34}$, враховуючи вирази (2), для чотирьох ділянок конічного газового підвісу.

Оскільки газ під тиском P_H подається безпосередньо в робочий зазор, то ділянки 1, 2 та 3, 4 конічного газового підвісу незалежні і система (2) розпадається на дві системи по вісім рівнянь:

$$\begin{aligned} (1 + b_{01}) \frac{d^2 A_2}{d\varphi^2} + (b_{02} + b_{12}) \frac{dA_2}{d\varphi} + \frac{\chi_1 (3a_{01}a_{12} + a_{11}a_{02})}{\lambda^2 \vartheta (a_{12} + a_{02})} A_2 &= f_{20} \cdot a_{20}, \\ B_1 &= \frac{\lambda^2 \vartheta}{\chi_1 \cdot a_{02}} \left(b_{01} \frac{d^2 A_2}{d\varphi^2} + b_{02} \frac{dA_2}{d\varphi} \right) + \frac{3a_{01}}{a_{02}} A_2, \\ A_1 &= P_H, \quad C_1 = -a_1 B_1, \quad B_2 = b_1 \left[\frac{3A_2}{\alpha_{21}} - (2 - a_2 \alpha_{21}) B_1 \right], \\ C_2 &= -b_5 A_2 + b_6 B_1 + \frac{(b_3 - \alpha_{21})}{\alpha_{22} b_3}, \quad D_1 = \frac{[A_2 - \alpha_{21} (1 - a_2 \alpha_{21}) B_1]}{\alpha_{21}^3}, \\ D_2 &= - \frac{[C_2 + a_2 (B_2 + 2\alpha_{22} C_2)]}{[3\alpha_{22} (1 + a_2 \alpha_{22})]}. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{де } h_{q0} = 1 - \varepsilon \nu \cos \varphi, \quad \beta_{10} = \aleph_0 + \nu^3 h_0^3, \quad h_0 = \frac{1 - \varepsilon \cos \varphi}{h_{q0}}, \quad \alpha_1 = \frac{R_1}{R_0},$$

$$h_{v2} = 1 - (\varepsilon + \theta \alpha_{20}) \cos \varphi, \quad a_1 = \frac{\lambda \operatorname{tg} \alpha \left[1 - \frac{3\nu \theta \gamma \alpha_{22} (\nu^2 h_0^2 + \aleph) \cos \varphi}{\beta_{10} h_{q0}} \right]}{2\alpha_1},$$

$$a_2 = \frac{\frac{1}{2} \cdot \lambda \operatorname{tg} \alpha \left[1 - \frac{3\nu \theta \gamma (\alpha_1 + \lambda \alpha_{20} \operatorname{tg} \alpha) \cos \varphi}{h_{q0}} \right]}{\alpha_1 + \lambda \alpha_{20} \operatorname{tg} \alpha}, \quad b_1 = \frac{(1 - \aleph) (\aleph_0 h_{q2}^3 + \nu^3 h_{v2}^3)}{\nu^3},$$

$$\alpha_{22} = \alpha_{20} - \alpha_{12}, \quad h_{q2} = 1 - \nu (\varepsilon + \theta \alpha_{20}) \cos \varphi, \quad b_3 = 1 - \frac{3\alpha_{22} (1 + \alpha_{22})}{1 + 2a_2 \alpha_{22}},$$

$$b_4 = \frac{a_2}{1 + 2a_2 \alpha_{22}} - \frac{1}{\alpha_{12}}, \quad b_5 = \frac{\left(\frac{1}{\alpha_{22}} + \frac{3b_1}{\alpha_{12}} \right)}{\alpha_{22}} + \frac{\left(\frac{3b_4 b_1}{\alpha_{12}} - \frac{1}{\alpha_{22}^2} \right)}{b_3},$$

$$b_6 = \left(\frac{b_1}{\alpha_{22}} + \frac{b_4 b_5 \alpha_{22}}{b_3} \right) (2 - a_1 \alpha_{12}), \quad h_{q1} = 1 - \nu (\varepsilon + \theta \alpha_{12}) \cos \varphi,$$

$$h_{v1} = 1 - (\varepsilon + \theta \alpha_{12}) \cos \varphi, \quad \beta_{12} = \aleph_0 + \nu^3 h_1^3, \quad h_1 = \frac{h_{q1}}{h_{v1}}, \quad \beta_{22} = 1 + \aleph_0 \nu^3 h,$$

$$\beta_{32} = 1 + \varkappa_0 v^4 h_1^4, \quad \chi_1 = \alpha_1 + \lambda \alpha_{12} \operatorname{tg} \alpha, \quad a_3 = \frac{\lambda \operatorname{tg} \alpha \left[1 - \frac{3v\theta\gamma \varkappa_1 (v^2 h_1^2 + \varkappa_0) \cos \varphi}{\beta_1 h_{q1}} \right]}{\alpha_{12}},$$

$$a_{01} = a_3 + \frac{2\chi_1}{\alpha_{12}}, \quad a_{02} = \frac{\chi_1 (1 + a_1 \alpha_{12})}{\alpha_{12}} - \alpha_{12} a_3 (a_1 \alpha_{12} - 2), \quad b_{01} = \frac{h_1^3}{[\beta_{32} \beta_{22} (1 - \varkappa)^2]}$$

$$b_{02} = \frac{3h_1^2 (\varepsilon + \theta \alpha_{12}) \sin \varphi}{\beta_{22}^2 h_{q1} (1 - \varkappa)^2}, \quad a_{11} = \frac{3b_1 a_4}{\alpha_{12}} - 2b_5 \chi_1, \quad a_{12} = 2\chi_1 b_6 - a_4 (2 - a_1 \alpha_{12}),$$

$$b_{12} = \frac{3(\varepsilon + \theta \alpha_{12}) \sin \varphi}{h_{v2}}, \quad f_{20} = \frac{2\chi_1^2 (\alpha_{12} - b_3)}{b_3 \alpha_{12}^2}.$$

$$(1 + b_{31}) \frac{\partial^2 A_4}{\partial \varphi^2} + (b_{32} + b_{33}) \frac{\partial A_4}{\partial \varphi} + \chi_3 \frac{3a_{31} a_{42} + a_{41} a_{32}}{\lambda^2 \vartheta (a_{42} + a_{32})} A_4 = f_{40} a_{32}. \quad (7)$$

$$B_3 = \frac{\lambda^2 \vartheta \left(b_{31} \frac{\partial^2 A_4}{\partial \varphi^2} + b_{32} \frac{\partial A_4}{\partial \varphi} \right) + \frac{3a_{31} A_4}{a_{32}}, \quad A_3 = p_H^2, \quad C_3 = -a_{51} B_3,$$

$$D_3 = \frac{[A_4 - \alpha_{34} B_3 (1 - \alpha_{34} a_{51})]}{\alpha_{34}^2}, \quad B_4 = b_{51} \left[\frac{3A_4}{\alpha_{34}} - (2 - a_{51} \alpha_{34}) B_3 \right],$$

$$C_4 = -b_{53} A_4 + b_{63} B_3 + \frac{(b_{35} - \alpha_{34})}{b_{35} \alpha_{44}^2}, \quad D_4 = \frac{A_4 (3\alpha_{44} b_{45} b_{51} - \alpha_{34})}{\alpha_{44}^2 \alpha_{34} b_{36}} -$$

$$- \frac{b_{45} b_{51} B_3 (2 - \alpha_{34} a_{51})}{b_{35}} + \frac{1}{\alpha_{44}^2 b_{35}},$$

де $\chi_3 = \alpha_1 + \xi \lambda \operatorname{tg} \alpha_1$, $h_{q3} = 1 - v(\varepsilon - \theta \alpha_{34}) \cos \varphi$, $h_{03} = 1 - (\varepsilon - \theta \alpha_{34}) \cos \varphi$,

$$h_{13} = \frac{h_{q3}}{h_{v3}}, \quad \beta_{52} = 1 + \varkappa_0 v^3 h_{13}^3, \quad \beta_{53} = 1 + \varkappa_0 v^4 h_{13}^2, \quad \beta_{51} = \varkappa_0 + v^3 h_0^3,$$

$$h_{v5} = 1 - (\varepsilon - \theta \alpha_{40}) \cos \varphi, \quad h_{q5} = 1 - v(\varepsilon - \theta \alpha_{40}) \cos \varphi,$$

$$b_{51} = \frac{(1 - \varkappa) (\varkappa_0 h_{q5}^3 + v^3 h_{v5}^2)}{v^3}, \quad \alpha_{44} = \alpha_{40} - \alpha_{34}, \quad b_{35} = 1 - \frac{3\alpha_{44} (1 + \alpha_{44})}{1 + 2a_{52} \alpha_{44}},$$

$$a_{52} = \frac{\lambda \operatorname{tg} \alpha \left[1 + \frac{3\theta\gamma}{h_{v5}} (\alpha_1 - \lambda \alpha_{40} \operatorname{tg} \alpha) \cos \varphi \right]}{2(\alpha_1 + \lambda \alpha_{40} \operatorname{tg} \alpha)}, \quad b_{45} = \frac{a_{52}}{1 + 2\alpha_{44} a_{52}} - \frac{1}{\alpha_{34}},$$

$$b_{53} = \frac{\left(\frac{1}{\alpha_{44}} + \frac{3b_{51}}{\alpha_{34}} \right) \alpha_{44} \left(\frac{3b_{45} b_{51}}{\alpha_{34}} - \frac{1}{\alpha_{44}^2} \right)}{\alpha_{44} b_{35}},$$

$$b_{63} = \left(\frac{b_{51}}{\alpha_{44}} + \frac{b_{51} b_{45} \alpha_{44}}{b_{35}} \right) (2 - a_{51} \alpha_{34}),$$

$$a_{53} = \frac{\lambda \operatorname{tg} \alpha \left[1 + \frac{3v\theta\gamma \chi_3 (v^2 h_{13}^2 + \varkappa_0) \cos \varphi}{\beta_{13} h_{13}} \right]}{\alpha_{34}}, \quad b_{33} = \frac{3(\varepsilon - \theta \alpha_{34}) \sin \varphi}{h_{v4}},$$

Практичне використання [2] кінцевої газової опори з поздовжніми канавками та лінійний статичний аналіз [10] показали, що найбільш прийнятно в опорах з поздовжніми канавками приймати відносну глибину $\nu=0,4$ та ширину канавки $N=0,25$. Інші конструктивні параметри кінцевої газової

опори знаходилися із умови максимуму цільової функції $\Phi = \frac{K_{\theta\theta}^*}{Q^*}$ ($K_{\theta\theta}^* = \frac{dF_{\theta}^*}{d\theta}$ – безрозмірна радіальна

жорсткість). Результати розрахунків характеристик кінцевого газового підвісу з поздовжніми канавками приведені на рис. 2-4 при $P_H = 5$, $\nu = 0,4$, $N = 0,25$. Інші конструктивні безрозмірні параметри опори: крива 1 – $\alpha = 2^\circ$, $\lambda = 4$, $\alpha_{12} = 1,156$, $\alpha_{20} = 0,74$, $\alpha_{34} = -0,88$, $\alpha_{40} = -1,12$; крива 2 – $\alpha = 2^\circ$, $\lambda = 2$, $\alpha_{12} = 1,073$, $\alpha_{20} = 0,82$, $\alpha_{34} = -0,96$, $\alpha_{40} = -1,04$; крива 3 – $\alpha = 8^\circ$, $\lambda = 2$, $\alpha_{12} = 1,498$, $\alpha_{20} = 0,7$, $\alpha_{34} = -0,88$, $\alpha_{40} = -1,04$; крива 4 – $\alpha = 8^\circ$, $\lambda = 4$, $\alpha_{12} = 0,62$, $\alpha_{20} = 0,74$, $\alpha_{34} = -1,06$, $\alpha_{40} = -1,26$.

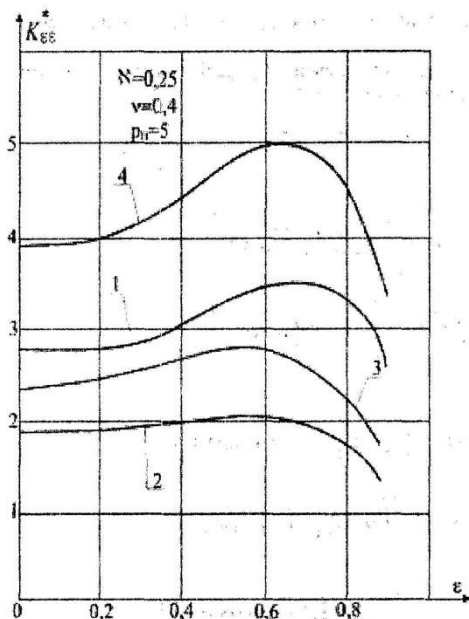


Рис. 2 - Залежність безрозмірної кутової жорсткості підвісу $K_{\epsilon\epsilon}^*$ від відносного кутового з'міщення вала

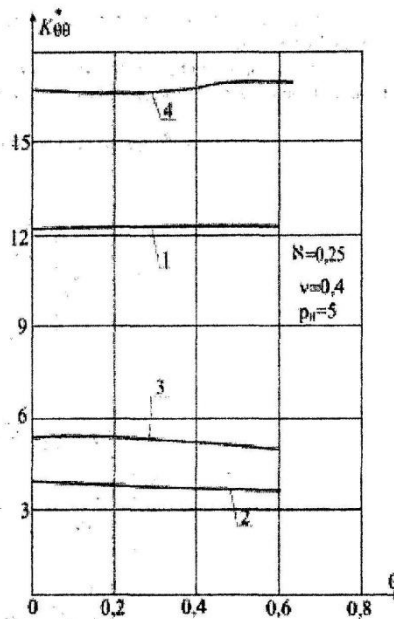


Рис. 3 - Залежність безрозмірної радіальної жорсткості $K_{\theta\theta}^*$ від відносного ексцентриситету θ з'міщення вала

При оптимальній довжині поздовжньої канавки у кінцевого газового підвісу безрозмірна радіальна жорсткість $K_{\theta\theta}^*$ зростає із збільшенням ϵ (рис. 2) і досягає максимуму при $\epsilon = 0,6$ для $\lambda = 2$ та $\epsilon = 0,7$ при $\lambda = 4$ незалежно від кута α . Зменшення $K_{\theta\theta}^*$ пояснюється тим, що при $\epsilon \geq 0,5$ збільшується негативний вплив перетікання газу по координаті ϕ із зони з мінімальним зазором. В межах реальних кутових переміщень вала ($\theta \leq 0,6$), безрозмірний відновлюючий момент M^* газового шару лінійно

залежить від θ , тобто безрозмірна кутова жорсткість $K_{\theta\theta}^* = \frac{dM^*}{d\theta}$ є майже сталою величиною (рис. 3).

Таким чином, результати роботи [7] по визначенню F_{ϵ}^* та M^* можна використовувати в реальному діапазоні відносних кутових θ з'міщень вала та при $\epsilon \leq 0,3$.

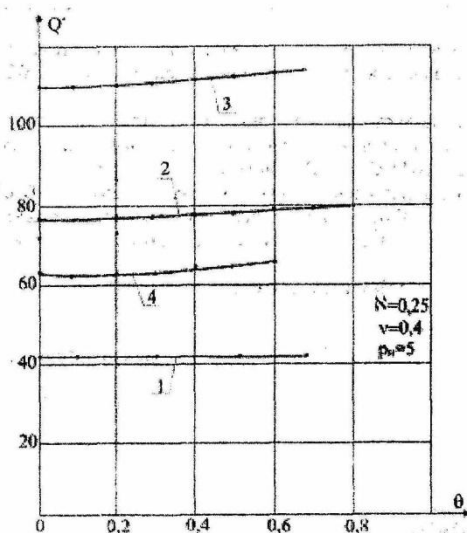


Рис. 4 - Залежність безрозмірних витрат газу Q^* через конічний підвіс від відносного кутового зміщення θ вала

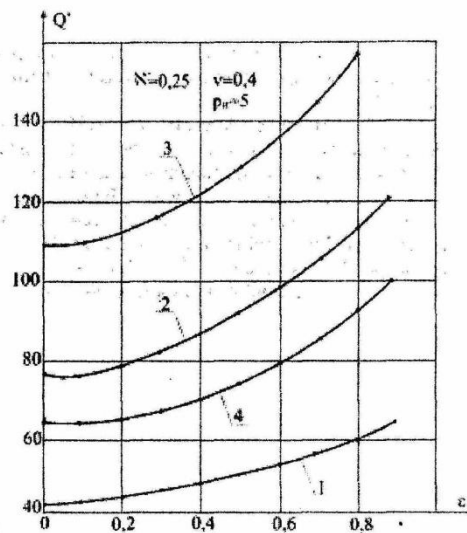


Рис. 5 - Залежність безрозмірних витрат газу Q^* через конічну опору від відносного ексцентриситету ϵ

Безрозмірні витрати газу Q^* майже не залежать від відносного кутового зміщення θ вала (рис. 4) та значно залежать від відносного ексцентриситету ϵ (рис. 5). Для інженерних розрахунків безрозмірні витрати газу через конічний підвіс можна розраховувати за формулою:

$$Q^* = Q_0^* (1 + 0,6\epsilon),$$

де Q_0^* – безрозмірні витрати газу при $\epsilon = 0$ [7].

Автори щиро вдячні В.І. Степанчуку за допомогу при розрахунках.

Література

- 1 US Patent №3476451. СІ. 308-122.1969.
- 2 Пневмошпиндель на газостатических подшипниках АРЩ – 16. Рекламный проспект / ВПИ. – Винница, 1985.
- 3 Шнайдер А.Г., Сокол В.М. Сравнительные характеристики бесконтактных опор для электромашиностроения // Вестник машиностроения. – 1987. – №7. – С. 18-22.
- 4 Пинегин С.В. и др. Статические и динамические характеристики газостатических опор. – М.: Наука, 1982. – 265 с.
- 5 Деркач Н.А. Теория конического воздушного подвеса с прямолинейными канавками при наложении осевых, радиальных и нутационных смещений. – К.: КГУ им. Т.Г. Шевченко, 1987. – 29 с. (Рукопись деп. в УКРНИИ НТИ 08.06.1987 г.)
- 6 Шнайдер А.Г. и др. Расчет статической реакции газового слоя в радиально-упорных мотор-подшипниках с целью наддува // Вестник машиностроения. – 1991. – №12. – С. 27-29.
- 7 Степанчук В.І., Федотов В.О. Лінійний статичний аналіз газостатичних конічних підвісок, профільованих поздовжніми канавками // Вісник ВПІ. – 1994. – №3 (4) – С. 57-61.
- 8 Степанчук В.І. Лінійний динамічний аналіз газостатичних конічних підвісок, профільованих поздовжніми канавками // Вісник ВПІ. – 1994. – №3. – С. 57-64.
- 9 Степанчук В.І., Федотов В.О. Лінійний аналіз явища самозбудження осьових коливань в шпинделях на конічних підвісках, профільованих поздовжніми канавками // Вісник ВПІ. – 1998. – №2. – С. 90-92.

10 Табачников Ю.Б. и др. Исследование и оптимизация радиальных газостатических подшипников с продольными канавками с учетом угловой жесткости // *Машиноведение*. – 1981. – №2. – С. 97-104.

11 Емельянов А. В., Шевчук А.И. Метод корректирующих сплайнов и его приложение к теории газовых подвесов // В сб.: *Исследование и приложение опор скольжения с газовой смазкой. Тезисы доклада на Всесоюзном координационном совещании.*: АН СССР. – Винница, 1983. – С. 47-48.

12 Степанчук В.И. и др. Применение метода сплайнов к расчету газовых подвесов // В сб.: *Совершенствование методики преподавания и научные работы по теоретической и прикладной механике в условиях перестройки высшей школы. Тезисы доклада XIV межвузовского научно-технического семинара.*: Хмельницкий: ХТИБО, 1988. – С. 101-102.

13 Самарский А.А. *Теория разностных схем.* – М.: Наука, 1977. – 656 с.

Надійшла 10.09.2002



ЧИТАЙТЕ
журнал
“Problems of Tribology”
во всемирной сети
INTERNET !

<http://www.tup.km.ua>

ИЛИ

<http://www.r-style.kiev.ua/tribology/journal.htm>