

УДК 621.822.57

В. О. Федотов, к. т. н., доц.; І. В. Федотова

## ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНІЧНИХ ГАЗОВИХ ПІДВІСОК З ПОЗДОВЖНИМИ КАНАВКАМИ ЗМІННОЇ ГЛИБИНИ

Для конічної підвіски з поздовжніми канавками, глибина яких зменшується по ходу течії газу, знайдено безрозмірні конструктивні параметри канавок, що забезпечують їй збільшення радіальної жорсткості та радіальної підйомної сили у порівнянні з конічною підвіскою з оптимальними параметрами канавок сталої глибини за майже однакових енергетичних витрат.

### Вступ

Використання конічних газових підвісок з поздовжніми канавками сталої глибини та ширини в шпindelних вузлах свердильних, шліфувальних верстатах та технологічного обладнання з обробки кристалів обумовлено простотою конструкції, технологічністю їх виготовлення та високою надійністю в роботі. У низці наукових праць, наприклад [1–5], досліджуються такі підвіски, у яких стиснутий газ (суміш газів – повітря) від зовнішнього джерела (компресора) подається безпосередньо в робочий зазор між конічними поверхнями вала і втулки, причому, в роботі [5] знайдені характеристики конічної підвіски при довільних зміщеннях вала; умови «статичної стійкості» досліджені в роботах [2, 4] і в [4] проведений лінійний динамічний аналіз. Оптимізація параметрів шпindelних вузлів на конічних підвісках виконана в роботі [6], а в [7] проаналізовані самозбуджені осьові коливання вала, що виникають в них. Але підвіски з поздовжніми канавками постійної ширини та глибини поступаються за своїми силовими та економічними характеристиками підвісам з регуляторами тиску поза робочим зазором.

### Постановка задачі

У роботі [4] показано, що канавки змінної глибини та ширини можуть, в принципі, поліпшити характеристики конічної підвіски, тобто зменшити витрати стиснутого повітря і збільшити радіальну, осьову підйомну силу та відновлювальний момент газового шару. Дослідження радіальної підвіски з поздовжніми канавками змінної глибини [8] показали, що витрати газу не залежать від напрямку нахилу поздовжніх канавок, а радіальна жорсткість у підвіски із зменшенням глибини канавки по ходу течії газу значно вище у порівнянні з підвіскою зі зворотним нахилом канавок. Крім того, у радіальній підвіски, у якій глибина поздовжніх канавок збільшується по ходу течії газу, виявлені параметри за яких радіальна підвіска втрачає статичну стійкість [8].

А через те, що конічні газові підвіски більше схильні до втрати стійкості в порівнянні з радіальними, то проведемо дослідження конічної опори з поздовжніми канавками, глибина яких зменшується по ходу течії газу. *Метою роботи* є підвищення радіальної жорсткості, радіальної підйомної сили конічної підвіски з поздовжніми канавками без збільшення енергетичних витрат.

### Визначення характеристик конічної підвіски

У конічній газовій підвісці (рис. 1) газ, що під тиском  $P_n$  подається безпосередньо в робочий зазор між валом та втулкою, протікає через ділянки 1 і 3, профільовані канавками змінної глибини, гладенькі ділянки 4 і 5 та витікає на відкритих границях підвіски в навколишнє середовище з тиском  $P_a$ . Під дією сили  $\bar{F}$  вісь вала зміщується із співвісного із втулкою положення (розглядається випадок компланарної неспіввісності вала та втулки).

Якщо глибина поздовжніх канавок зменшується на ділянках 1 та 3 по ходу течії газу за лінійним законом (рис. 2), зазор в канавці  $h_k$  і на виступі  $h_v$  знайдемо за формулами (кут  $\varphi$  утворюється площинами, що проходять через осі вала та втулки у зоні мінімального значення зазору):

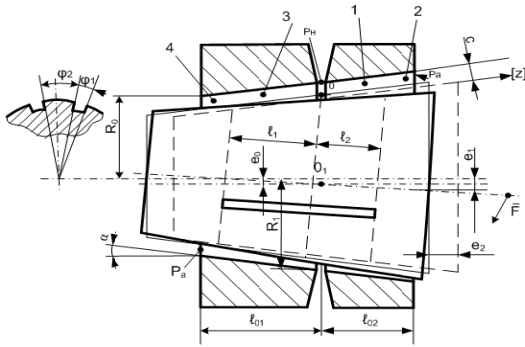


Рис. 1. Конічна підвіска з поздовжніми канавками

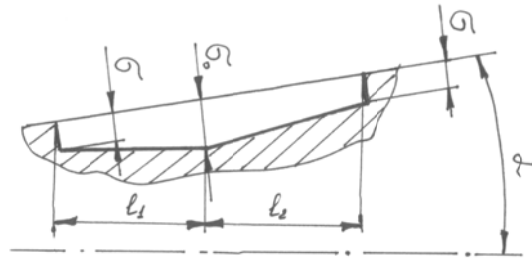


Рис. 2. Профіль поздовжніх канавок змінної глибини конічної підвіски

$$h_k = (c + \sigma_0) h_q; \quad h_b = c h_v;$$

$$h_g = 1 - v\zeta - v(\varepsilon + \theta\xi) \cos \varphi - 1(1 - v - \beta)\xi,$$

$$h_v = 1 - \zeta - (\varepsilon + \theta\xi) \cos \varphi$$

де  $c$  — зазор між валом та втулкою у разі їх співвісного положення;  $e_0$  — радіальне переміщення вала;  $e_1$  — абсолютна величина якою враховується кутове переміщення вала;  $e_2$  — абсолютне осьове переміщення вала;  $\varepsilon = \frac{e_0}{c} \cos \alpha$  — відносне радіальне переміщення

вала;  $\theta = \frac{e_1}{c} \cos \alpha$  — відносне кутове переміщення вала;  $\zeta = \frac{e_2}{c} \sin \alpha$  — відносне осьове

зміщення вала;  $\xi = \frac{2z}{l_{01} + l_{02}} \cos \alpha$  — відносна променева координата;  $v = \frac{c}{c + \sigma_1}$  — пара-

метр плавності газового шару;  $\beta = \frac{\sigma}{c + \sigma_0}$  — параметр канавки змінної глибини.

З використанням метода, описаного в роботі [9], отримаємо диференціальне рівняння розподілу тиску газу в першій та третій ділянках (див. рис. 1) робочого газового шару, профільованих поздовжніми канавками змінної глибини

$$x \frac{\partial}{\partial \xi} \left( x \left( \kappa_0 h_g^3 + v^3 h_v^3 \right) \frac{\partial u_i}{\partial \xi} \right) + \frac{v_1^3 \lambda^2}{(1 - \kappa)^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{h_g^3 h_v^3}{\kappa_0 v^3 h_v^3 + h_g^3} \frac{\partial u_i}{\partial \varphi} \right) = 0, \quad (1)$$

де  $u_i = \frac{P_i^2}{P_a^2}$ ,  $P_i$  — тиск в газовому шарі

$$\left( \text{для ділянки один } i = 1, \quad 0 \leq \xi \leq \alpha_{22}, \quad \alpha_{22} = 2l_2 \frac{2l_2}{(l_{01} + l_{02})}; \right.$$

$$\left. \text{для ділянки три } i = 3, \quad -\alpha_{11} \leq \xi \leq 0, \quad \alpha_{11} = 2l_1 \frac{2l_2}{(l_{01} + l_{02})}; \quad \chi = \alpha_1 + \lambda \xi \operatorname{tg} \alpha; \quad \alpha_1 = \frac{R_1}{R_0}; \right.$$

$$\lambda = \frac{l_{01} + l_{02}}{2R_0} \quad \text{— відносна довжина підвіски; } \quad \kappa = \frac{\varphi_1}{\varphi_1 + \varphi_2} \quad \text{— відносна ширина канавки;}$$

$$\kappa_0 = \frac{\kappa}{1 - \kappa}; \quad v_1 = \frac{v}{\cos \alpha}.$$

Для  $\kappa_0 = 0$ ,  $v = 1$  із диференціального рівняння (1) отримаємо основне рівняння для ділянок 2 та 4 робочого зазору конічної підвіски

$$\chi^2 \frac{\partial^2 u_i}{\partial \xi^2} + \lambda \chi \operatorname{tg} \alpha \left( 1 - \frac{3\theta \chi}{\lambda h_v \operatorname{tg} \alpha} \cos \varphi \right) \frac{\partial u_i}{\partial \xi} + \frac{\lambda^2}{\cos^2 \alpha} \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial \varphi^2} + \frac{3}{h_v} (\varepsilon - \theta \xi) \frac{\partial u_i}{\partial \varphi} \sin \varphi \right) = 0, \quad (2)$$

де для другої ділянки  $i = 2$ ,  $\alpha_{22} \leq \xi \leq \alpha_{02}$ ;

$$\text{для четвертої ділянки } i = 4, \quad \alpha_{01} \leq \xi \leq -\alpha_{11}; \quad \alpha_{02} = \frac{2l_{02}}{l_{01} + l_{02}}; \quad \alpha_{01} = \frac{2l_{01}}{l_{01} + l_{02}}.$$

Інтегрування диференціальних рівнянь в частинних похідних (1) та (2) для чотирьох ділянок конічної підвіски виконувалось методом сплайнів [10], методика використання якого при дослідженні конічних підвісок розглянута в роботі [5]. Точність розрахунків статичних характеристик газових підвісок з використанням методу сплайнів розглянута в статті [11].

Статичні характеристики конічної газової підвіски визначаються осьюою  $F_\zeta$  та радіальною  $F_\varepsilon$  підйомними силами, відновлювальним моментом  $M$  газового шару при кутових переміщеннях вала та витратами газу  $Q$  [5].

$$F_\zeta = 4R_0^2 P_a F_\zeta^*; \quad F_\varepsilon = 4R_0^2 P_a F_\varepsilon^*; \quad M = R_0^2 P_a M^*; \quad Q = \frac{\pi \rho P_a c^3}{12\mu} Q^*;$$

$$F_\zeta^* = \frac{\lambda}{2} \left( \int_0^{\alpha_{22}} \chi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_1} d\varphi + \int_{22}^{\alpha_{02}} \chi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_2} d\varphi + \int_0^{-\alpha_{11}} \chi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_3} d\varphi + \int_{-\alpha_{11}}^{-\alpha_{01}} \chi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_4} d\varphi \right) \operatorname{tg} \alpha;$$

$$F_\varepsilon^* = \frac{\lambda}{2 \cos \alpha} \left( \int_0^{\alpha_{02}} \chi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_1} \cos \varphi d\varphi + \int_{\alpha_{02}}^{\alpha_{22}} \chi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_2} \cos \varphi d\varphi + \int_0^{-\alpha_{12}} \chi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_3} \cos \varphi d\varphi + \int_{-\alpha_{12}}^{-\alpha_{01}} \chi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_4} \cos \varphi d\varphi \right);$$

$$M^* = \frac{\lambda^2}{2} \left( \int_0^{\alpha_{22}} \chi \xi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_1} \cos \varphi d\varphi + \int_{\alpha_{22}}^{\alpha_{02}} \chi \xi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_2} \cos \varphi d\varphi - \int_{\alpha_{22}}^{-\alpha_{12}} \chi \xi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_3} \cos \varphi d\varphi - \int_{-\alpha_{12}}^{-\alpha_{01}} \chi \xi d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_4} \cos \varphi d\varphi \right) + \frac{\lambda}{2} \left( \int_0^{\alpha_{22}} \chi^2 d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_1} \cos \varphi d\varphi + \int_{\alpha_{22}}^{\alpha_{02}} \chi^2 d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_2} \cos \varphi d\varphi + \int_0^{-\alpha_{12}} \chi^2 d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_3} \cos \varphi d\varphi + \int_{-\alpha_{12}}^{-\alpha_{01}} \chi^2 d\xi \int_0^\pi \sqrt{u_4} \cos \varphi d\varphi \right) \operatorname{tg} \alpha;$$

$$Q^* = \frac{1}{\pi \lambda} \left( \left( x \int_0^{2\pi} h_v^3 \frac{\partial u_4}{\partial \xi} \right)_{\xi=-\alpha_{01}} d\varphi + \left( \chi \int_0^{2\pi} h_v^3 \frac{\partial u_2}{\partial \xi} \right)_{\xi=-\alpha_{02}} d\varphi \right) \cos \alpha,$$

де  $F_\zeta^*$  – безрозмірна осьова підйомна сила;  $F_\varepsilon^*$  – безрозмірна радіальна підйомна сила;  $\rho$  – густина газу (повітря) при атмосферному тиску;  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості газу;  $M^*$  – безрозмірний відновлювальний момент;  $Q^*$  – безрозмірний параметр витрат газу.

### Аналіз результатів досліджень

Дослідження конічної підвіски з поздовжніми канавками сталої глибини [5] показали, що в межах реальних кутових ( $\theta \leq 0,6$ ) та радіальних ( $\varepsilon \leq 0,3$ ) переміщень вала безрозмірний відновлювальний момент  $M^*$  та безрозмірна радіальна сила  $F^*$  лінійно залежать

відповідно від  $\theta$  та  $\varepsilon$ . Тому у розрахунках достатньо визначати безрозмірну радіальну  $K_{\varepsilon\varepsilon}^* = \frac{d F_{\varepsilon}^*}{d \varepsilon}$  та кутову  $K_{\theta\theta}^* = \frac{d M^*}{d \theta}$  жорсткості газового шару.

Характеристики конічної підвіски залежать від параметрів:  $P_n, \alpha, \nu, \beta, \alpha_1, \alpha_{11}, \alpha_{22}, \alpha_{01}, \alpha_{02}, \lambda, \kappa$ . В принципі, за виключеннями параметрів  $P_n, \alpha$ , та  $\lambda$ , інші параметри можуть підлягати оптимізації. Практичне використання конічних підвісок показало [5], що доцільніше приймати  $\kappa = 0,25, \nu = 0,4$ . Інші конструктивні параметри підвіски знаходилися за умови максимуму функції  $\Phi = \frac{K_{\varepsilon\varepsilon}^*}{\sqrt{Q^*}}$ , якщо  $\beta = 0,6$ , причому положення  $\alpha_1$  лінії надду-

вання газу знаходилися за умови відсутності кутових переміщень вала ( $\theta = 0$ ), якщо  $\varepsilon \neq 0$ , тобто рівнодійна радіальної реакції газового шару знаходилися на лінії наддування газу (в табл. 1 показана різниця  $M^*$  визначення моменту сили  $\bar{F}_{\varepsilon}^*$  зліва та справа від лінії наддування газу). Як впливає з табл. 1, кутові переміщення вала в незначній мірі впливають на радіальну силу підвіса ( $K_{\varepsilon\theta}^* = 0,007$ , а  $K_{\varepsilon\varepsilon}^* = 1,78$ , коли  $\lambda = 2$  і  $\alpha = 2^\circ$ ), а радіальні — на відновлювальний момент газового шару ( $K_{\theta\varepsilon}^* = 0,007$ , а  $K_{\theta\theta}^* = 3,82$ , коли  $\lambda = 2$  і  $\alpha = 2^\circ$ ),

Таблиця 1

$\lambda$	$\alpha$	$\xi_0$	$\xi_1$	$\xi_2$	$F_{\zeta}^*$	$K_{\zeta}^*$	$K_{\varepsilon\varepsilon}^*$	$K_{\varepsilon\theta}^*$	$K_{\theta\theta}^*$	$K_{\theta\varepsilon}^*$	$Q^*$	$M^*$
$P_n = 5; \kappa = 0,25; \nu = 0,4; \beta = 0,6$												
2	$2^\circ$	0,52	0,08	0,93	0,93	0,006	1,78	0,007	3,82	0,07	77	0,020
2	$6^\circ$	0,55	0,08	0,93	3,06	0,06	2,02	0,02	4,34	0,25	88	0,020
$\xi_0 = \frac{l_{01}}{l_{01} + l_{02}}; \xi_1 = \frac{l_{01} - l_1}{l_{01} + l_{02}}; \xi_2 = \frac{l_{01} - l_2}{l_{01} + l_{02}}$												

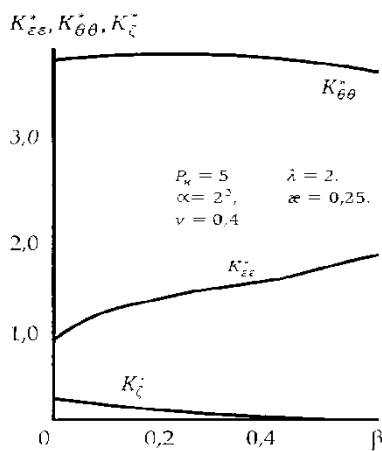


Рис. 3. Залежність безрозмірної радіальної  $K_{\varepsilon\varepsilon}^*$  кутової  $K_{\theta\theta}^*$  та осьової  $K_{\zeta}^*$  жорсткості від параметра канавок змінної глибини  $\beta$

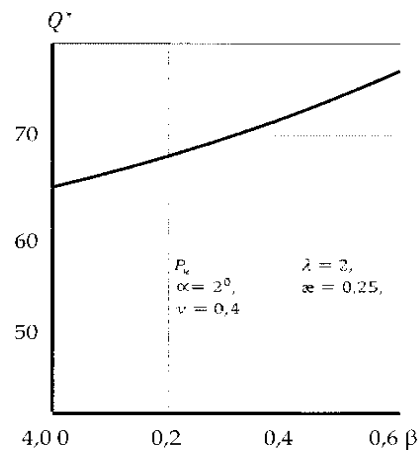


Рис. 2. Вплив параметра канавок змінної глибини  $\beta$  на безрозмірні витрати  $Q^*$  газу (повітря)

Аналіз залежностей (рис. 3 та рис.4) показує, що глибина канавок в незначній мірі впливає на кутову  $K_{\theta\theta}^*$  та осьову  $K_{\zeta}^* = \frac{dF_{\zeta}^*}{d\zeta}$  жорсткості вала  $K_{\varepsilon\varepsilon}^*$  (див. рис. 3) і значно впливає на радіальну жорсткість (див. рис. 3) та витрати  $Q^*$  газу (див. рис. 4). Тому в подальших розрахунках, при знайдених значеннях  $\xi_0, \xi_1, \xi_2$  (табл. 1), визначалися оптимальні значення  $\nu$  та  $\beta$  за умови максимуму функції  $\Phi = \frac{K_{\varepsilon\varepsilon}^*}{\sqrt{Q^*}}$  (табл. 2).

Таблиця 2

$P_n$	$\lambda$	$\alpha$	$\nu$	$\beta$	$F_{\zeta}^*$	$K_{\zeta}^*$	$K_{\varepsilon}^*$	$K_{\theta}^*$	$Q^*$
5	2	2°	0,318	0,071	0,94	0,01	2,43	4,20	76,3
5	2	6°	0,306	0,058	3,03	0,09	2,83	5,16	86,1

### Висновки

З однаковими енергетичним витратами існують значення параметрів  $\nu$  та  $\beta$  поздовжніх канавок конічної підвіски, глибина яких зменшується по ходу течії газу, при яких її радіальна жорсткість, а значить і радіальна підйомна сила, більші на 36 % при  $\alpha = 2^\circ$  і на 40 % при  $\alpha = 6^\circ$  у порівнянні з конічною підвіскою з оптимальними параметрами канавок сталої глибини.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Деркач Н. А. Теория конического воздушного подвеса с прямолинейными канавками при наложении осевых, радиальных и кутационных смещений. — К.: КГУ им. Т. Г. Шевченко, 1987. — 29 с. — Рус. — Деп. В УКРНИИ НТИ 08.06.1987 г.
2. Шнайдер А. Г., Степанчук В. И. Статические характеристики конического газового смазочного слоя радиально-упорных мотор-подшипников и повышение их экономичности по расходу газа // Трение и износ. — Т. 13. — 1992. — № 3. — С. 431—437.
3. Степанчук В. І., Федотов В. О. Лінійний статичний аналіз газостатичних підвісок, профільованих поздовжніми канавками // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1994. — № 3 — С. 57 — 61.
4. Степанчук В. І. Лінійний динамічний аналіз газостатичних конічних підвісок, профільованих поздовжніми канавками // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1995. — № 4 — С. 57 — 64.
5. Шевчук А. І. та інші. Статичні характеристики конічного газового підвісу з поздовжніми канавками при довільних зміщеннях вала // Проблеми Трибології (Problems of tribology). — 2002. — № 4. — С. 107 — 114.
6. Федотов В. О., Степанчук В. І. Оптимізація параметрів шпindelних вузлів на газових конічних підвісках, профільованих поздовжніми канавками // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1997. — № 4 — С. 70—75.
7. Степанчук В. І., Федотов В. О. Лінійний аналіз явища самозбудження осьових коливань в шпindelях на конічних підвісок, профільованих поздовжніми канавками // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1998. — № 2 — С. 90—92.
8. Федотов В. О., Савуляк В. В. Вплив нахилу поздовжніх канавок на характеристики радіальних підвісок // Проблеми трибології (Problems of tribology). — 2003. — № 1. — С. 62—66.
9. Хирс (G.G. Hirs). Конструирование опорных подшипников с продольными канавками и внешним нагнетанием смазки // Проблемы трение и смазки. 1968. — № 4. — С. 324—331.
10. Емельянов А. В., Шевчук А. И. Метод корректирующих спланов и его приложение к теории газовых подвесов // Исследование и приложение опор скольжение с газовой смазкой: Всесоюзное координационное совещание АН СССР. — Винница. — 1983. — С. 470—48.
11. Федотов В. О., Смирнов Є. В. До питання межі застосування метода сплайнів у розрахунках газових підвісів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2002. — № 6. — С. 85—88.

Рекомендована кафедрою опору матеріалів та прикладної механіки

Надійшла до редакції 20.02.08  
Рекомендована до друку 19.03.08

**Федотов Валерій Олександрович** — доцент; **Федотова Інна Вікторівна** — асистент.

Кафедра опору матеріалів та прикладної механіки, Вінницький національний технічний університет