

ВПЛИВ СХІДЧАСТИХ ПОЗДОВЖНІХ КАНАВОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДІАЛЬНИХ ГАЗОСТАТИЧНИХ ОПОР

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянуто радіальну газову опору з поздовжніми канавками різної глибини. Досліджувався вплив східчастої форми канавок на характеристики опори (радіальну навантажувальну здатність, жорсткість та витрати газу). З'ясувалося, що запропонована форма поздовжніх канавок радіальної газової опори, порівняно з опорою з канавками сталої глибини і оптимальними конструктивними параметрами має більшу безрозмірну радіальну жорсткість (на 20 %). Витрати газу через робочі зазори опор не залежать від профілю канавок.

Ключові слова: радіальна газова опора, східчасті канавки, радіальна жорсткість, навантажувальна здатність, витрати газу.

Вступ

Шпиндельні вузли на газостатичних опорах широко використовуються в сучасному вітчизняному та закордонному виробництві через здатність працювати надійно і довговічно за досить великої частоти обертання вала та мають низку переваг у порівнянні іншими видами опор.

Стабільність роботи та можливість досягнення високих значень швидкохідності дозволяють широко використовувати такі опори в прецизійних приладах, де практично відсутні динамічні навантаження, а статичні змінюються в межах заданих параметрів.

Дослідження газових опор показали, що мінімальні втрати на тертя, а, отже, і незначне тепловиділення, що є наслідком малої в'язкості газів, дозволяють, з одного боку, досягати дуже великих частот обертання (до 150 тис. об./хв і більше), а з іншого — здійснювати переміщення з мінімальною швидкістю ковзання. Опори з газовим мащенням, не втрачаючи своїх експлуатаційних якостей, можуть працювати в широкому діапазоні температур і тисків. Крім того, в правильно розрахованих і з необхідною точністю виготовлених складальних одиницях на опорах з газовим мащенням знос робочих поверхонь практично відсутній [1].

Серед різного типу радіальних газостатичних опор найбільш технологічними та простими за конструкцією є опори з поздовжніми канавками. Але вони мають відносно невелику навантажувальну здатність в радіальному напрямі порівняно з газовими опорами із зовнішніми дроселями: отвори малого діаметру, щілини для подачі стисненого газу, пористі вставки.

Поліпшити характеристики опор з поздовжніми канавками можна зменшенням колових перетікань газу із зони підвищеного тиску [1]. Конструктивно це досягається використанням канавок змінної глибини та ширини [1] або опор зі східчастими поздовжніми канавками [2].

Основна частина

Метою роботи є дослідження характеристик радіальної газостатичної опори з поздовжніми канавками, нанесеними на вал (рис. 1), із різним профілем сходинок (рис. 1а, б).

Газ від джерела живлення (компресора) під тиском P_H подається в робочий зазор (рис. 1) і послідовно протікає через зони, профільовані поздовжніми канавками глибиною σ та σ_1 , гладеньку ділянку та витікає в навколишнє середовище. Якщо вал зміщується із співвісного з корпусом положення радіально на величину e (радіальний ексцентриситет), то опора (рис. 1) буде симетрична відносно площини, що проходить через точку O , перпендикулярну до осі z , тому для визначення статичних характеристик (навантажувальна здатність та витрат газу) достатньо розглянути одну половину опори, а отримані результати подвоїти.

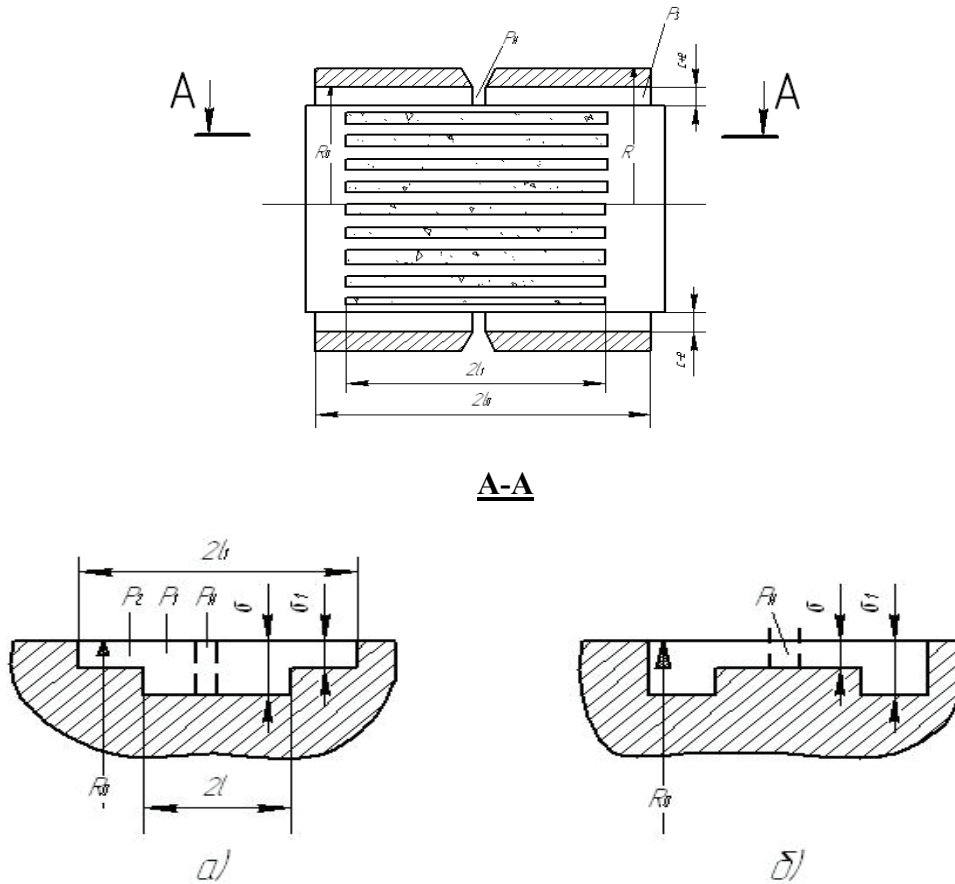


Рис. 1. Радіальна газостатична опора: а — зі східчастими; б — з поздовжніми канавками

Основні позначення: c — робочий зазор між валом і корпусом опори при їх співвісному положенні; $\varepsilon = e/c$ — відносний радіальний ексцентриситет; $\lambda = l_0/R_0$ — відносна довжина опори; $\xi = z/l_0$ — безрозмірна осьова координата; σ, σ_1 — глибина поздовжніх канавок; $v = c/(c+\sigma)$, $v_1 = c/(c + \sigma_1)$ — параметр зміни зазору, внаслідок нанесення канавок; φ_1, φ_2 — центральні кути канавки та виступу, відповідно; $\alpha = \varphi_1/(\varphi_1 + \varphi_2)$ — відносна ширина канавок; $\alpha_1 = l/l_0$ — відносна довжина східця; $\alpha = l_1/l_0$ — відносна довжина канавок; p_a — тиск навколишнього середовища; p_H — тиск газу від зовнішнього джерела стиснутого газу (на вході в робочий зазор опори); $P_H = p_H/p_a$ — безрозмірний тиск газу, що подається в робочий зазор; $p = p(\xi, \varphi)$ — тиск газу в робочих зазорах опори; $P = p/p_a$ — безрозмірний тиск; $U = P^2$ — квадрат безрозмірного тиску; U_1, U_2, U_3 — квадрат безрозмірного тиску газу в профільованих (U_1, U_2) та гладенькій зоні (U_3) опори; $F = 4p_a R_0^2 F^*$ — радіальна навантажувальна здатність опори; F^* — безрозмірна радіальна навантажувальна здатність опори; $K = \frac{4p_a R_0^2}{c} K_\varepsilon^*$ — радіальна жорсткість опори; $K_\varepsilon^* = \frac{dF^*}{d\varepsilon}$ — безрозмірна радіальна жорсткість; k — відношення густини газу до тиску за певної температури шару; μ — динамічний коефіцієнт в'язкості; $Q = \frac{\pi k p_a^2 c^2}{12\mu} Q^*$ — витрати газу; Q^* — безрозмірні витрати.

Для значень відносного радіального ексцентриситету в межах $0 \leq \varepsilon \leq 0,6$ квадрати тиску U_1, U_2 та U_3 (рис. 1) на відповідних ділянках робочого зазору мають такий вигляд [3, 1]:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= a_{01} + a_{02}\xi + (a_{11}e^{\theta\lambda\xi} + a_{12}e^{-\theta\lambda\xi})\cos\varphi; \\
 U_2 &= b_{01} + b_{02}\xi + (b_{11}e^{\theta_1\lambda\xi} + b_{12}e^{-\theta_1\lambda\xi})\cos\varphi; \\
 U_3 &= d_{01} + d_{02}\xi + (d_{11}e^{\lambda\xi} + d_{12}e^{-\lambda\xi})\cos\varphi,
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\text{де } \theta^2 = \frac{v^3}{(\chi + v^3(1-\chi))(\chi v^3 - (1-\chi))}; \quad \theta_1^2 = \frac{v_1^3}{(\chi + v_1^3(1-\chi))(1-\chi + \chi v_1^3)}.$$

Локальні масові витрати газу через відповідні ділянки робочого зазору опори знаходяться з виразів [3, 1]

$$\begin{aligned} \Delta Q_{1\xi} &= -\frac{k(c+\sigma)^3}{24\mu\lambda} \left(\chi(1-\xi\varepsilon v \cos\phi) + v^3(1-\chi)(1-\xi\varepsilon \cos\phi) \right) \frac{\partial U_1}{\partial \xi} d\phi; \\ \Delta Q_{2\xi} &= -\frac{k(c+\sigma_1)^3}{24\mu\lambda} \left(\chi(1-\xi\varepsilon v_1 \cos\phi) + v_1^3(1-\chi)(1-\xi\varepsilon \cos\phi) \right) \frac{\partial U_2}{\partial \xi} d\phi; \\ \Delta Q_{1\xi} &= -\frac{kc^3}{24\mu\lambda} (1-\xi\varepsilon \cos\phi) \frac{\partial U_3}{\partial \xi} d\phi. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{де } k_1 = \frac{k}{24\mu\lambda}, \quad \zeta = 1 - \xi\varepsilon \cos\phi.$$

Сталі інтегрування a_{0i}, b_{0i}, d_{0i} (порядок ε^0) та a_{1i}, b_{1i}, d_{1i} (порядок ε^1) визначаються, враховуючи нерозривність течії газу

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\xi 1} &= \Delta Q_{\xi 2}, \quad \text{якщо } \xi = \alpha_1; \\ \Delta Q_{\xi 2} &= \Delta Q_{\xi 3}, \quad \text{якщо } \xi = \alpha. \end{aligned} \quad (3)$$

На вході в робочий зазор, на границях східчастих ділянок, що показані на рис. 1а, б і на виході з робочого зазору через не профільовані зони опори, квадрати безрозмірного тиску повинні задовольняти умовам

$$\begin{aligned} U_1 &= P_H^2, \quad \text{якщо } \xi = 0; \\ U_1 &= U_2, \quad \text{якщо } \xi = \alpha_1; \\ U_2 &= U_3, \quad \text{якщо } \xi = \alpha; \\ U_3 &= 1, \quad \text{якщо } \xi = 1. \end{aligned} \quad (4)$$

З виразів (1), (2) та умов (3), (4) знаходимо сталі системи рівнянь (1):

$$\begin{aligned} a_{01} &= P_H^2; \quad d_{02} = \frac{\tau(P_H^2 - 1)}{\alpha_2 v^3 - \tau(1-\alpha)}; \quad d_{01} = 1 - d_{02}; \quad b_{02} = \frac{v^3 d_{02}}{\tau}; \quad b_{01} = P_H^2 + \alpha_1(v_2 - 1)b_{02}; \\ a_{02} &= v_2 b_{02}; \quad b_{12} = \frac{\gamma_2 - \gamma_5}{\gamma_3 - \tau_7}; \quad b_{11} = \gamma_5 - \tau_7 b_{12}; \quad a_{12} = \alpha_4 (b_{11} e^{\theta\alpha_1\lambda} + b_{12} e^{-\theta\alpha_1\lambda}); \\ a_{11} &= -a_{12}; \quad d_{12} = \frac{b_{11} e^{\theta\lambda\alpha} + b_{12} e^{-\theta\lambda\alpha}}{e^{-\lambda\alpha} - e^{\lambda(\alpha-2)}}; \quad d_{11} = d_{12} e^{-2\lambda}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{де } v_0 &= \frac{v}{v_1}; \quad \tau = \chi + v^3(1-\chi); \quad \tau_1 = \chi + v_1^3(1-\chi); \quad v_2 = \frac{\tau}{v_0^3 \tau_1}; \\ \alpha_2 &= \alpha_1(1-v_2) - \alpha; \quad \tau_2 = \chi + v^2(1-\chi); \quad \tau_3 = \chi + v_1^2(1-\chi); \\ \gamma &= \lambda v^3 \frac{e^{\lambda(\alpha-2)} + e^{-\lambda\alpha}}{e^{-\lambda\alpha} + e^{\lambda(\alpha-2)}}; \quad \gamma_1 = 3\varepsilon v (\tau_2 b_{02} - v^2 d_{02}); \\ \gamma_2 &= \frac{\gamma_1 e^{-\theta\lambda\alpha}}{\gamma + \theta\lambda\tau}; \quad \gamma_3 = \frac{\gamma - \theta\lambda\tau}{\gamma + \theta\lambda\tau} e^{-2\theta\lambda\alpha}; \quad \alpha_5 = -\frac{1}{1 - e^{-2\theta_1\alpha_1\lambda}}; \quad \alpha_4 = \alpha_5 e^{-\theta_1\alpha_1\lambda}; \\ \tau_4 &= \lambda\theta_1\tau_1\alpha_4 v_0^3 (e^{\theta_1\alpha_1\lambda} + e^{-\theta_1\alpha_1\lambda}); \quad \gamma_4 = -3\varepsilon (v_1\tau_3 v_0^3 a_{02} + v\tau_2 b_{02}); \end{aligned}$$

$$\tau_5 = (\tau_4 + \theta\lambda\tau)e^{\theta\alpha_1\lambda}; \quad \tau_6 = (\tau_4 - \theta\lambda\tau)e^{-\theta\alpha_1\lambda}; \quad \tau_7 = \frac{\tau_6}{\tau_5}; \quad \gamma_5 = \frac{\gamma_4}{\tau_5}.$$

Безрозмірна навантажувальна здатність F^* радіальної газостатичної опори зі східчастими поздовжніми канавками

$$F^* = \lambda \left(\int_0^{\alpha_1} d\xi \int_0^{\pi} \sqrt{U_1} \cos\phi d\phi + \int_{\alpha_1}^1 d\xi \int_0^{\pi} \sqrt{U_2} \cos\phi d\phi + \int_{\alpha}^1 d\xi \int_0^{\pi} \sqrt{U_3} \cos\phi d\phi \right). \quad (5)$$

Безрозмірні витрати газу Q^* знаходяться з одного із виразів (2), якщо $\varepsilon = 0$.

$$Q^* = \frac{\tau(P_H^2 - 1)}{\lambda(\alpha_2 v^3 - \tau(1 - \alpha))}. \quad (6)$$

Результати розрахунків

Безрозмірна радіальна навантажувальна здатність F^* опори та безрозмірна жорсткість $K^* = dF^*/d\varepsilon$ знаходились інтегруванням виразу (5) з використанням пакета Mathcad.

Розрахунки показали, що якщо глибина поздовжньої канавки на вході у робочий зазор менша, а збільшується глибина канавки при $0,4 \leq \alpha_1 \leq \alpha$, то безрозмірна радіальна жорсткість та навантажувальна здатність $F^* = \varepsilon K^*$ починає зростати тільки коли $v \geq 0,35$ (рис. 2а), а якщо глибина поздовжніх канавок в напрямку течії газу по робочому зазору зменшується, то опора буде працездатною коли $v \geq 0,17$ ($\sigma \approx 4,9$ с) (рис. 2б). На практиці глибина канавок за оптимальних параметрів змінюється в межах $\sigma = (0,7 \dots 1,5)$ с [1]. Безрозмірні витрати газу однакові за різних профілів східчастих поздовжніх канавок і однакової глибини східців.

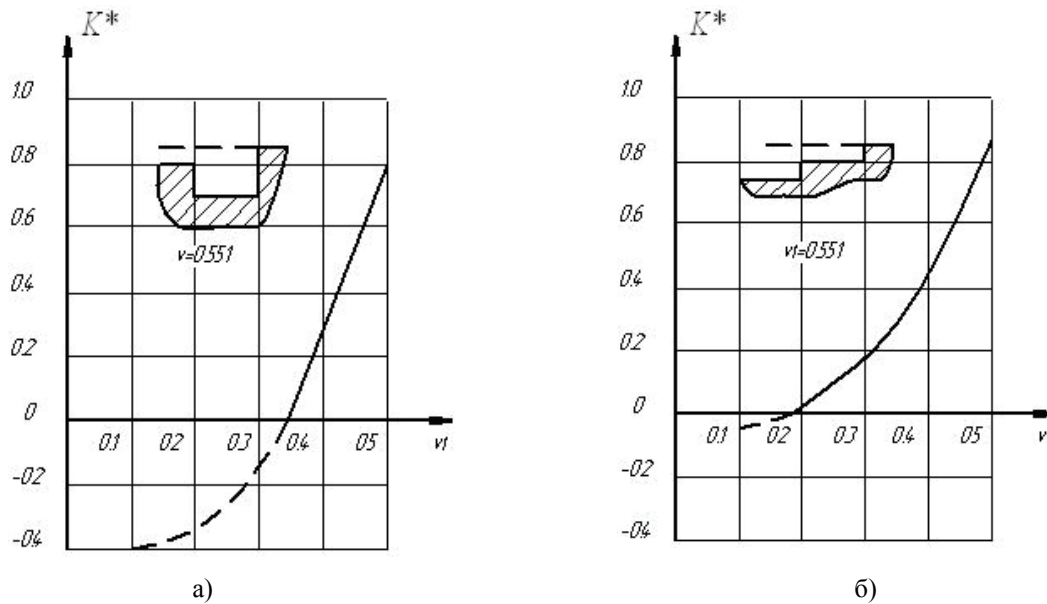


Рис. 2. Залежність безрозмірної радіальної жорсткості газостатичної опори: а — від відносної глибини канавок v_1 ; б — за різних профілів східчастих поздовжніх канавок v ($P_H = 5,0$; $\lambda = 2,0$; $\varepsilon = 0,5$; $\alpha_1 = 0,4$; $\alpha = 0,669$)

У разі збільшення лише відносної довжини східця, без зміни глибини поздовжніх канавок, безрозмірна радіальна жорсткість опори зростає для профілю канавок, у яких глибина сходинки зменшується у напрямку течії газу (рис. 3), для профілю, у якого на вході в робочий зазор глибина поздовжніх канавок менша діапазону $l_1 \dots l$ (рис. 1), то у разі $\alpha_1 = 0,3 \dots 0,45$ газостатична опора непрацездатна (зона нестійкості).

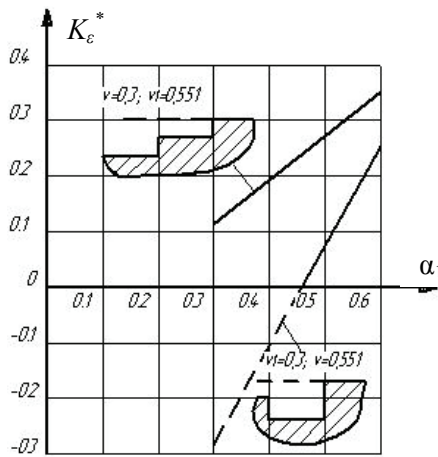


Рис. 3. Залежність безрозмірної радіальної жорсткості K_c^* опори від відносної довжини східчастих поздовжніх канавок α_1 , якщо $P_H = 5,0$; $\lambda = 2,0$; $\varkappa = 0,5$; $\alpha = 0,669$

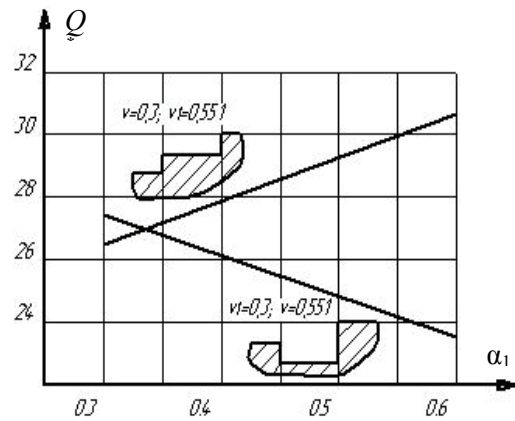


Рис. 4. Безрозмірні витрати газу Q^* для роботи радіального підвісу в залежності від відносної довжини східчастих поздовжніх канавок α_1 , якщо $P_H = 5,0$; $\lambda = 2,0$; $\varkappa = 0,5$; $\alpha = 0,669$

Щодо витрат газу, то зі збільшенням відносної довжини сходинок (рис. 4) витрати газу зростають для опори, у якій глибина канавок зменшується у напрямі течії газу та зменшуються, якщо глибина канавок менше на вході в робочий зазор.

Висновки

Отже радіальна газостатична опора зі східчастими поздовжніми канавками, глибина яких збільшується в напрямі течії газу (рис. 1а), має значно більшу безрозмірну радіальну жорсткість, радіальну навантажувальну здатність та практичну відсутність зон непрацездатності порівняно з опорою, поздовжні канавки якої мають профіль, показаний на рис. 1б.

P_H	\varkappa	α	α_1	v	v_1	K_c^*	Q^*	K^*/Q^*
Радіальна газостатична опора, рис. 1а								
5,0	0,5	0,669	0,4	0,3	0,551	1,2	27,9	0,0430
Радіальна газостатична опора з канавками сталої глибини (оптимум K^*/Q^*)								
5,0	0,5	0,669	—	0,551	—	1,0	25,9	0,0386

З таблиці випливає, що радіальна газостатична опора зі східчастими поздовжніми канавками (див. рис. 1а) має більшу безрозмірну радіальну жорсткість (на 20 %) та відношення K^*/Q^* , порівняно з опорою, у якій канавки сталої глибини і конструктивні параметри оптимальні (максимум K^*/Q^*).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Федотов В. О. Газові підвіси шпindelних вузлів : моногр. / В. О. Федотов, І. В. Федотова. — Вінниця : ВНТУ, 2010. — 244 с.
2. Патент № 102619, F16C 32/06 (2006.01). Електрична машина на газостатичному підвісі / І. В. Віштак, В. О. Федотов. — № U 2015 04323; заявл. 05.05.2015; опубл. 10.11.2015р., Бюл. № 21. — 4 с.
3. Емельянов А. В. Характеристики радиальных газостатических опор с двойным дросселированием газового потока / А. В. Емельянов, В. А. Федотов, В. А. Приятельчук // Машиноведение. — 1977. — № 2. — С. 97—104.

Рекомендовано кафедрою опору матеріалів та прикладної механіки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 11.07.2016

Віштак Інна Вікторівна — канд. техн. наук, старший викладач кафедри безпеки життєдіяльності, e-mail: innavish322@gmail.com;

Федотов Валерій Олександрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри опору матеріалів та прикладної механіки.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

I. V. Vishtak¹
V. O. Fedotov¹

Influence of Stepped Longitudinal Grooves on Characteristics of Gas Radial Bearings

¹Vinnitsia National Technical University

There has been considered the radial gas bearing with longitudinal grooves of varying depths, the impact of stepped form of grooves on the characteristics (radial load capacity, rigidity and gas consumption) of bearing has been investigated. It turned out that the proposed form of longitudinal grooves of radial gas bearing, compared with support of sustainable grooves depth and optimum design parameters has a higher dimensionless radial stiffness (20 %). The gas flow through the working gap bearing is not dependent on the shape and profile grooves.

Keywords: radial gas bearing, stepped grooves, radial stiffness, load capacity, the cost of gas.

Vishtak Inna V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Life Safety, e-mail: innavish322@gmail.com;

Fedotov Valerii O. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Strength of Materials and Applied Mechanics

И. В. Виштак¹
В. А. Федотов¹

Влияние ступенчатых продольных канавок на характеристики радиальных газовых опор

¹Винницкий национальный технический университет

Рассмотрена радиальная газовая опора с продольными канавками разной глубины, исследовано влияние ступенчатой формы канавок на характеристики (радиальную нагрузочную способность, жесткость и расход газа) опоры. Выяснилось, что предложенная форма продольных канавок радиальной газовой опоры по сравнению с опорой с канавками постоянной глубины и оптимальными конструктивными параметрами имеет большую безразмерную радиальную жесткость (на 20 %). Расход газа через рабочие зазоры опор не зависит от формы и профиля канавок.

Ключевые слова: радиальная газовая опора, ступенчатые канавки, радиальная жесткость, нагрузочная способность, расход газа.

Виштак Инна Викторовна — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности, e-mail: innavish322@gmail.com;

Федотов Валерий Александрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры сопротивления материалов и прикладной механики