

УДК 533.6.011:621.822.5

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДПЯТНИКОВ  
И УЛУЧШЕНИЕ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

*А. В. Ежельянов, В. А. Федотов, Г. Г. Дзюбинский*

(Винница)

Среди газостатических подпятников наиболее широко распространены опоры с одним [1, 2, 7] и несколькими [1-7] питающими отверстиями. Однако подача газа через цепочку отверстий малого диаметра приводит к резкому падению давления в сравнительно небольших зонах смазочного слоя, локализованных вокруг отверстий наддува. Преобладающая же область несущего слоя оказывается под относительно невысоким давлением и не может воспринимать существенную нагрузку. Это объясняется тем, что при дискретном наддуве суммарная площадь поперечного сечения проточных каналов резко сокращается на входе в рабочий зазор —

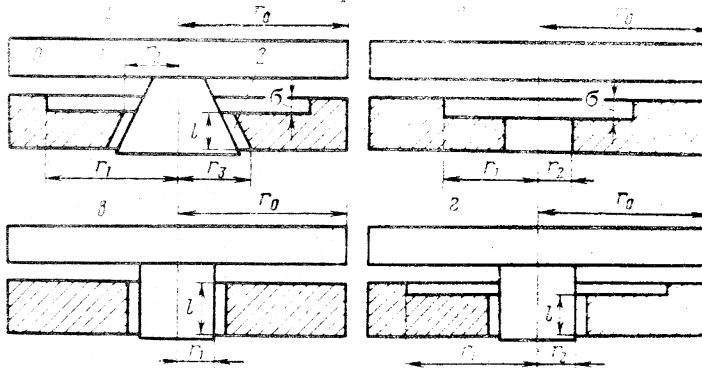


Рис. 1. Комбинированный газостатический подпятник и его разновидности

столько раз, во сколько суммарный диаметр дросселирующих отверстий меньше диаметра линии наддува. Задача исследования — обсуждение характерных особенностей работы подпятников с внешней (за счет дросселирующей щели) и внутренней (за счет ступенчатого зазора) компенсацией, выяснение преимуществ дросселя переменного сопротивления и поиски путей улучшения характеристик подпятников за счет специального сочетания всех этих элементов в комбинированном подпятнике (рис. 1, а).

Аналитическая часть статьи получена не стандартным путем, который обычно начинается с уравнений Рейнольдса для каждой области осесимметричной опоры и приводит к длинным и утомительным выкладкам, если число областей больше двух [1, 7]. Вместо этого в статье уравнения Рейнольдса для осесимметричных каналов преобразованы к уравнению между тремя величинами — расходом газа, сопротивлением канала и пере-

шлом квадратом давлений между его границами. Благодаря этому упрощаются все выкладки, и проясняется физический смысл процесса, лежащего в основе работы та инсталлических опор.

**Основные величины и их обозначения:**  $\zeta = (A - A_0)/A_0$  — относительное осевое смещение;  $A$  — зазор;  $A_0$  — номинальный зазор между рабочими поверхностями;  $c$  — зазор в дросселирующей щели при  $\zeta = 0$ ;  $l$  — протяженность щели в направлении оси подпитника;  $\alpha$  — угол ее конусности;  $o$  — глубина ступени;  $r_0, r_1, r_2, r_3$  — радиусы внешней границы подпитника, ступени, внутренней границы несущего слоя и внешней границы дросселирующей щели соответственно;  $r = r_1/r_0$  — безразмерная радиальная координата;  $r_1, r_2, r_3$  — значения  $r$  при  $r_1$  равном соответственно  $r_1, r_2, r_3$ ;  $p_a$  — давление окружающей среды;  $p_n$  — давление наддува;  $p_{01}$  — давление на границе глубокого и мелкого участков несущего слоя;  $p_{02}$  — давление на выходе из дросселирующей щели;  $P = p/p_a$  — безразмерное давление;  $P_n, P_{01}, P_{02}$  — значения  $P$  при  $r$ , равном соответственно  $r_n, r_{01}, r_{02}$ ;  $\lambda = l/r_0$ ;  $\nu = h_0/(h_0 + o)$ ;  $\gamma = c/(h_0 + o)$  — безразмерные параметры;  $\psi$  — основной безразмерный параметр дроссели;  $F = \lambda r_0^2 p_a K^*$  — несущая способность подпитника;  $F^*$  — безразмерная несущая способность;  $K = (\lambda r_0^2 p_a / h_0) K^*$  — жесткость опоры;  $K^* = dF^* / d\zeta$  — безразмерная жесткость;  $Q = (\lambda^2 r_0^2 h_0^3 / 12 \mu) Q^*$  — массовый расход газа через опору;  $Q^*$  — безразмерный расход;  $k$  — отношение плотности газа к давлению при температуре слоя;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости;  $R$  — сопротивление щелевого канала.

**Метод гидравлических сопротивлений и его применение к расчету комбинированного подпитника.** Рассмотрим осесимметричное изотермическое течение газа в щелевом канале между соосными коническими поверхностями (рис. 2). Пусть  $H$  — зазор между стенками канала,  $\alpha$  — угол его конусности, а  $p_1$  и  $p_2$  — давления на его границах:  $p = p_1$  при  $r = r_1'$  и  $p = p_2$  при  $r = r_2'$ . Тогда на основе уравнений Рейнольдса [1] можно получить равенство, связывающее три величины: расход газа  $Q$ , разность квадратов давлений  $p_1^2 - p_2^2$  и сопротивление  $R$  канала по отношению к данному газу:

$$p_1^2 - p_2^2 = QR, \quad (1)$$

где

$$R = \frac{12\mu \ln(r_2'/r_1')}{k\lambda H^2 \sin \alpha}. \quad (2)$$

В дифференциальной форме соотношение (1) запишется

$$dp^2 = QdR, \quad (3)$$

где

$$dR = \frac{12\mu dr}{k\lambda H^2 r \sin \alpha}. \quad (4)$$

Для трех областей комбинированного подпитника (рис. 1, а) введем следующие названия и индексы: нулевая область (индекс 0) — для мелкого кольцевого канала, прилегающего к внешней границе опоры; первая область (индекс 1) — для глубокого кольцевого канала, связывающего нулевую область с дросселирующей щелью; вторая область (индекс 2) — для дросселирующей щели наддува. В качестве индексов для давлений, сопротивлений и зазоров будем использовать номера соответствующих областей.

В соответствии с общим выражением (2) можно записать сопротивление каждого из трех каналов комбинированного подпитника

$$R_0 = \frac{12\mu \ln(r_0'/r_1')}{\lambda k h_0^2 (1 + \zeta)^2}, \quad R_1 = \frac{12\mu \ln(r_1/r_2)}{\lambda k [o + h_0(1 + \zeta)]^2}, \quad R_2 = \frac{12\mu \ln(r_2/r_3)}{\lambda k (c - A_0 \zeta \sin \alpha)^2 \sin \alpha}. \quad (5)$$

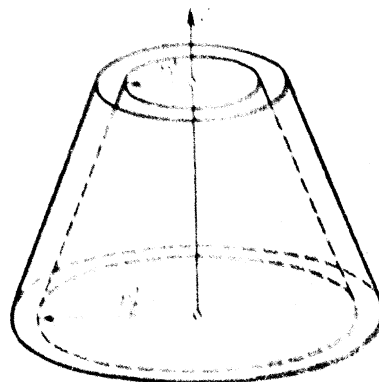


Рис. 2. Щелевой канал между соосными коническими поверхностями

Так как полное сопротивление проточного канала подпятника равно сумме сопротивлений трех его последовательно соединенных участков, то на основании равенства (1) можно найти расход газа через опору

$$Q = \frac{P_a^2 - P_b^2}{R_0 + R_1 + R_2} \quad (6)$$

Вместе с тем справедливо тройное равенство

$$Q = \frac{P_{01}^2 - P_a^2}{R_0} = \frac{P_{12}^2 - P_{01}^2}{R_1} = \frac{P_{12}^2 - P_a^2}{R_0 + R_1} \quad (7)$$

Рассматривая соотношения (5)–(7) совместно, можно определить безразмерные давления  $P_{01}$  и  $P_{12}$  на границах первой области и безразмерный расход газа через подпятник

$$P_{01}^2 = 1 + \frac{P_a^2 - 1}{1 + v^2 [\xi + \psi \eta (1 + \zeta)^2]}, \quad P_{12}^2 = 1 + \frac{P_a^2 - 1}{1 + \psi \theta (1 + \zeta)^2} \quad (8)$$

$$Q = \frac{(P_{12}^2 - 1) (1 + \zeta)^2 (1 + v\zeta)^2}{(1 + v\zeta)^2 \ln(1/\rho_1) + v^2 (1 + \zeta)^2 \ln(\rho_1/\rho_2)} \quad (9)$$

Здесь

$$\psi = \frac{\ln[1 + (\lambda/\rho_2) \operatorname{tg} \alpha]}{(\gamma - v\zeta \sin \alpha)^2 \ln(1/\rho_2) \sin \alpha}, \quad \eta = \frac{\ln(1/\rho_1)}{\ln(1/\rho_2)}, \quad \xi = \frac{(1 + \zeta)^2 \ln(\rho_1/\rho_2)}{(1 + v\zeta)^2 \ln(1/\rho_1)}$$

$$\theta = \frac{\eta v^2}{1 + \xi v^2} \quad (10)$$

Если  $P_0$ ,  $P_1$  и  $P_2$  — безразмерные давления в нулевой, первой и второй областях газового слоя соответственно, то безразмерная несущая способность комбинированной опоры может быть представлена выражением

$$F = 2 \int_{\rho_1}^1 P_{01} \rho d\rho + 2 \int_{\rho_1}^{\rho_2} P_{12} \rho d\rho - 2 \int_{\rho_1}^{\rho_2} P_{12} \rho d\rho + P_a \rho_2^2 - 1 \quad (11)$$

В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением только таких разновидностей комбинированного подпятника, у которых проекция стенок дросселирующего канала на плоскость, перпендикулярную оси подпятника, мала по сравнению с площадью несущего слоя, что равносильно близости значений  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . Понятно, что это условие не накладывает никаких ограничений на сопротивление дросселирующей щели и ее способность автоматически реагировать на осевые смещения опоры. При соблюдении этого условия третий интеграл в выражении (11) можно отбросить ввиду малости и с учетом соотношений (3)–(9) безразмерная несущая способность запишется так:

$$F = 2 \int_{\rho_1}^1 \sqrt{P_{01}^2 - (P_{01}^2 - 1)} \frac{\ln(\rho/\rho_1)}{\ln(1/\rho_1)} \rho d\rho +$$

$$+ 2 \int_{\rho_1}^{\rho_2} \sqrt{P_{12}^2 - (P_{12}^2 - P_{01}^2)} \frac{\ln(\rho/\rho_2)}{\ln(\rho_1/\rho_2)} \rho d\rho + P_a \rho_2^2 - 1 \quad (12)$$

**Исследование ступенчатого подпятника.** Ступенчатый подпятник (рис. 1, б) представляет собой частный случай комбинированной опоры (рис. 1, а), когда высота  $l$  дросселирующей щели равна нулю. Так как при этом  $\lambda = 0$ ,  $\rho_1 = \rho_2$ ,  $\psi = 0$ , то выражения (8), (9) и (12) принимают вид

$$P_{01}^2 = 1 + \frac{(P_a^2 - 1) (1 + v\zeta)^2 \ln(1/\rho_1)}{(1 + v\zeta)^2 \ln(1/\rho_1) + v^2 (1 + \zeta)^2 \ln(\rho_1/\rho_2)}$$

$$P_{02} = P_{01}; \quad Q = \frac{(P_{01}^2 - 1)(1 + \zeta)^2(1 + v\zeta)^2}{(1 + v\zeta)^2 \ln(1/\rho_1) + v^2(1 + \zeta)^2 \ln(\rho_1/\rho_2)} \quad (13)$$

$$F = 2 \int_{r_1}^{r_2} \sqrt{P_{01}^2 - (P_{01}^2 - P_{02}^2) \frac{\ln(\rho/\rho_2)}{\ln(\rho_1/\rho_2)}} \rho d\rho + \\ + 2 \int_{r_1}^{r_2} \sqrt{P_{01}^2 - (P_{01}^2 - 1) \frac{\ln(\rho/\rho_1)}{\ln(1/\rho_1)}} \rho d\rho + P_{01} \rho_2^2 - 1.$$

Вычислим безразмерную жесткость подпятника. Так как  $F = F[P_{01}^2(\zeta)]$ , то

$$K = \frac{dF}{dP_{01}^2} \frac{dP_{01}^2}{d\zeta} \quad (14)$$

Рассматривая (14) и (13) совместно, находим

$$K = - \frac{3v^2(1-v)(1+\zeta)(1+v\zeta)(P_{01}^2-1)}{[(1+v\zeta)^2 \ln(1/\rho_1) + v^2(1+\zeta)^2 \ln(\rho_1/\rho_2)]^2} J, \quad (15)$$

где

$$J = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\ln(1/\rho_1) \ln(\rho/\rho_2) \rho d\rho}{\sqrt{P_{01}^2 - (P_{01}^2 - P_{02}^2) \frac{\ln(\rho/\rho_2)}{\ln(\rho_1/\rho_2)}}} + \int_{r_1}^{r_2} \frac{\ln(\rho_1/\rho_2) \ln(1/\rho) \rho d\rho}{\sqrt{P_{01}^2 - (P_{01}^2 - 1) \frac{\ln(\rho/\rho_1)}{\ln(1/\rho_1)}}}. \quad (16)$$

Чтобы подпятник был статически устойчив, его несущая способность должна возрастать при сближении рабочих поверхностей и падать при их удалении. Это означает, что жесткость подпятника должна быть отрицательной. Исследуем знак выражения (15). Так как подинтегральные функции в выражении (16) положительны и верхние пределы интегралов больше нижних, то  $J > 0$  и знак безразмерной жесткости совпадает со знаком выражения, стоящего множителем перед  $J$  в (15). Рассматривая этот коэффициент, можно сделать следующие выводы:

1.  $K < 0$ , если  $0 < v < 1$ . Таким образом ступенчатый подпятник имеет отрицательную жесткость и работоспособен, если высота ступени  $\sigma$  имеет конечную положительную величину. Это соответствует случаю, когда проточный канал на входе шире, чем на выходе.

2.  $K = 0$  в двух случаях: при  $v = 0$ , что соответствует бесконечно большому значению  $\sigma$ , когда ступенчатая поверхность подпятника вырождается в плоское кольцо, ограниченное радиусами  $r_1$  и  $r_2$ ; и при  $v = 1$ , что соответствует  $\sigma = 0$ , когда ступенчатая поверхность вырождается в кольцо, ограниченное радиусами  $r_1$  и  $r_2$ . В обоих случаях подпятник неработоспособен, так как статически неустойчив.

3.  $K > 0$ , если  $\sigma < 0$  — это соответствует случаю обратной ступени, когда проточный канал на выходе шире, чем на входе. Такой подпятник с обратной жесткостью работать не может, так как при сближении его пластин реакция газового слоя падает, а при удалении растет.

Исследуем теперь функцию  $F = F[P_{01}^2(v)]$  на экстремум по параметру  $v$ . Производная  $F$  по  $v$  запишется  $dF/dv = (dF/dP_{01}^2)(dP_{01}^2/dv)$ .

Из соотношений (13) можно найти производные, входящие в это выражение, и тогда получаем

$$\frac{dF}{dv} = - \frac{3v^2(1+\zeta)^2(1-v\zeta)^2(P_{01}^2-1)}{[(1-v\zeta)^2 \ln(1/\rho_1) - v^2(1+\zeta)^2 \ln(\rho_1/\rho_2)]^2} J. \quad (17)$$

Рассматривая выражение (17), в котором  $J$  (16) — величина положительная, можно сделать следующие выводы:

1. При величии  $\rho$  до  $\rho_1$  ступенчатость при  $\mu > 0$ . Это означает, что несущая способность подпятника растет при уменьшении  $\mu$ , что соответствует уменьшению ступени и падает при увеличении  $\mu$ , достигая наибольшего значения при  $\mu = 1$ , когда ступенчатая поверхность вымывается в плоский диск и опора теряет жесткость. Эта нижняя граница несущей способности определяется выражением

$$\frac{1}{2} P_1^2 = \int_0^1 \left[ P_1^2 - (P_1^2 - 1) \frac{\ln(\rho_1 \rho_2)}{\ln(1/\rho_2)} \rho^2 d\rho - P_1 \rho_2^2 - 1 \right] \quad (18)$$

2. Проведенная  $\bar{P}$  до  $\mu$  обращается в нуль только при  $\mu = 0$ , что соответствует бесконечной глубине ступени. В этом случае несущая способность ступенчатого подпятника достигает максимального значения. Однако при этом жесткость опоры, как было показано ранее, обращается в нуль.

3. Такие значения параметров ступенчатого подпятника не имеют оптимума по отношению к несущей способности опоры. Существуют ли экстремумы у таких значений характеристик ступенчатого подпятника, как жесткость, отношение жесткости к расходу газа и отношение произведения расхода газа к жесткости к расходу газа? Если такие экстремумы существуют, то каковы оптимальные значения параметров  $\mu$  и  $\rho$ , при которых эти экстремумы реализуются?

Следует отметить, что нахождение экстремумов сложных функций несложных переменных обычно сопряжено со значительными трудностями. Причем нахождение максимума каждой конкретной задачи требует особого подхода. Поэтому в рамках статьи на поставленные вопросы пришлось выполнить большой объем вычислительных работ на ЭВМ. Основные результаты можно было кратко обобщить так.

4. При неизменном значении параметра  $\rho$ , определяющего положение границы раздела глубокого и мелкого слоев газа, существует оптимальное значение параметра  $\mu$ , при котором модуль жесткости ступенчатого подпятника достигает максимального (для данного  $\rho$ ) значения. Однако чем ближе параметр  $\rho$  к единице (это соответствует перемещению границы раздела двух слоев к внешнему краю подпятника), тем меньше соответствующее оптимальное значение параметра  $\mu$  (это соответствует уменьшению глубины ступени  $s$  и выше максимальная величина жесткости). При этом жесткость ступенчатого подпятника не имеет абсолютного максимума по параметру  $\rho$  в  $\mu$ . Следует отметить, что при перемещении ступени к внешнему краю и увеличении оптимального значения ее глубины величина жесткости сопровождается быстрым увеличением расхода газа в сопле. Поэтому подпятники с глубокой ступенью и узкой внешней обечайкой имеют лучшее отношение жесткости к расходу.

5. У ступенчатого подпятника существуют оптимальные значения параметров  $s$  и  $\mu$ , при которых отношение модуля жесткости к расходу достигает максимума. Эти оптимальные параметры и соответствующие им значения  $F^*$ ,  $K^*$  и  $Q^*$  при различных  $P_1$  и  $\rho_2$  приведены в таблице.

6. У ступенчатого подпятника существуют оптимальные значения параметров  $s$  и  $\mu$ , при которых отношение произведения несущей способности к жесткости к расходу газа достигает максимума. Эти оптимальные параметры и соответствующие им значения  $F^*$ ,  $K^*$  и  $Q^*$  при различных  $P_1$  и  $\rho_2$  приведены в таблице.

**Несущая способность плоского подпятника с постоянным внешним дросселем.** Если в рассматриваемом подпятнике (рис. 1, а) положить  $\alpha = 0$ , то величина сопротивления газу будет в цилиндрической конфигурации, сопротивление которой не зависит от величины осевого смещения. Если, кроме того, параметр  $\mu$  в момент расчета единицы, то ступень исчезнет и несущий слой будет ограничен двумя параллельными дисками, ограничиваемыми радиусами  $r = 1$  и  $r = \rho$ . В этом случае следует принять  $\rho = \rho_1 = \rho_2$ , тогда комбинация  $\mu$  и  $\rho$  превращается в подпятник с цилиндрической щелью наддува

постоянного сопротивления и с плоскими поверхностями (рис. 1, а), а расчетные формулы (8)–(10) и (12) принимают вид

$$\psi = \frac{\lambda \nu^2}{\gamma \rho_1 \ln(1/\rho_1)}, \quad P_{01}^2 = 1 + \frac{P_w^2 - 1}{1 + \psi(1 + \zeta)}, \quad Q = \frac{P_{01}^2 - 1}{\ln(1/\rho_1)},$$

$$F = 2 \int_{\rho_0}^1 \sqrt{P_{01}^2 - (P_{01}^2 - 1) \frac{\ln(\rho/\rho_1)}{\ln(1/\rho_1)}} \rho d\rho + P_w \rho_1^2 - 1. \quad (19)$$

Безразмерную жесткость опоры найдем как производную сложной функции  $F^*[P_{01}^2(\zeta)]$  по относительному осевому смещению  $\zeta$

$$K = \frac{3\psi(P_w^2 - 1)(1 + \zeta)^2}{[1 + \psi(1 + \zeta)]^2 \ln(1/\rho_1)} \int_{\rho_0}^1 \frac{\ln(1/\rho) \rho d\rho}{\sqrt{P_{01}^2 - (P_{01}^2 - 1) \frac{\ln(\rho/\rho_1)}{\ln(1/\rho_1)}}}. \quad (20)$$

Рассматривая это выражение, можно заметить, что подынтегральная функция в нем положительна и верхний предел интеграла больше или

$r_{01}$	$\rho_1$	Оптимум по $K^*/Q^*$					Оптимум по $P^* K^*/Q^*$				
		$\nu$	$\rho_1$	$P^*$	$-K^*$	$Q^*$	$\nu$	$\rho_1$	$P^*$	$-K^*$	$Q^*$
2,0	0,1	0,63	0,63	0,381	0,147	3,16	0,54	0,69	0,505	0,191	4,43
	0,2	0,65	0,69	0,509	0,134	4,20	0,57	0,73	0,560	0,163	5,36
	0,3	0,66	0,74	0,575	0,121	5,35	0,60	0,76	0,611	0,141	6,43
	0,4	0,66	0,78	0,637	0,106	6,77	0,61	0,80	0,662	0,120	7,73
	0,5	0,67	0,82	0,697	0,091	8,69	0,63	0,83	0,713	0,099	9,64
3,5	0,1	0,66	0,63	1,161	0,343	11,32	0,57	0,68	1,314	0,432	15,32
	0,2	0,67	0,69	1,350	0,312	15,31	0,60	0,72	1,455	0,370	18,90
	0,3	0,67	0,74	1,509	0,279	19,59	0,61	0,76	1,584	0,319	23,03
	0,4	0,68	0,78	1,656	0,244	24,89	0,63	0,80	1,708	0,271	28,12
	0,5	0,68	0,82	1,799	0,208	32,08	0,64	0,83	1,833	0,226	35,11
5,0	0,1	0,67	0,63	1,934	0,527	23,96	0,58	0,68	2,150	0,655	31,41
	0,2	0,67	0,69	2,228	0,477	32,24	0,60	0,72	2,382	0,562	39,33
	0,3	0,68	0,74	2,475	0,426	41,37	0,62	0,76	2,583	0,484	48,07
	0,4	0,68	0,78	2,705	0,373	52,67	0,64	0,80	2,780	0,413	59,13
	0,5	0,68	0,82	2,924	0,317	67,87	0,65	0,83	2,973	0,342	73,85

него, поэтому знак  $K^*$  совпадает со знаком коэффициента, стоящего перед интегралом. В этот коэффициент входит параметр  $\psi$ , который, как видно из (19), представляет собой отношение сопротивления дросселя к сопротивлению рабочего зазора. Таким образом  $\psi$  может принимать только отрицательные значения ( $0 \leq \psi < \infty$ ). Учитывая эти замечания, можно сделать два вывода.

1.  $K^* = 0$  только при  $\psi = 0$ , когда сопротивление дросселирующей цепи падает до нуля и подпятник вырождается в конструкцию, состоящую из плоского диска и плоского кольца, ограниченного радиусами  $r_1$  и  $r_0$ . В этом случае опора статически неустойчива и, следовательно, не работоспособна.

2.  $K^* < 0$ , если  $\psi > 0$ . Таким образом любой дроссель, сопротивление которого отлично от нуля, обеспечивает подпятнику отрицательную жесткость и делает его статически устойчивым.

Исследуем на экстремум функцию  $F^* = F^*[P_{01}^2(\psi)]$ . Из соотношений (19) имеем

$$\frac{\partial F^*}{\partial \psi} = \frac{(P_w^2 - 1)(1 + \zeta)^2}{[1 + \psi(1 + \zeta)]^2 \ln(1/\rho_1)} \int_{\rho_0}^1 \frac{\ln(1/\rho) \rho d\rho}{\sqrt{P_{01}^2 - (P_{01}^2 - 1) \frac{\ln(\rho/\rho_1)}{\ln(1/\rho_1)}}} - \frac{P_w^2 - 1}{\ln(1/\rho_1)} \frac{\partial P_{01}^2}{\partial \psi}. \quad (21)$$

Выражения (21) и (20) имеют много общего, поэтому нетрудно исследовать знак производной (21) и сделать выводы.

1. Производная  $F^*$  по  $\psi$  отрицательна при любых значениях  $\psi$  имеющих физический смысл ( $0 < \psi < \infty$ ). Следовательно, несущая способность подпятника возрастает с уменьшением  $\psi$  и достигает максимального значения при  $\psi=0$ , когда сопротивление дросселирующей щели падает до нуля, а опора теряет жесткость. Эта верхняя граница несущей способности определяется выражением

$$\lim_{\psi \rightarrow 0} F^* = 2 \int_{r_1}^1 \sqrt{P_n^2 - (P_n^2 - 1) \frac{\ln(\rho/r_1)}{\ln(1/r_1)}} \rho d\rho + P_n r_1^2 - 1. \quad (22)$$

2. Производная  $F^*$  по  $\psi$  обращается в нуль только при  $\psi = \infty$ , что равносильно сужению дросселирующей щели до ее полного перекрытия. Однако, как видно из соотношений (19), при бесконечно большом значении  $\psi$  несущая способность подпятника обращается в нуль.

3. Таким образом, основной параметр подпятника с постоянным внешним дросселем не имеет оптимума по отношению к несущей способности опоры.

Поиски экстремумов у жесткости и у отношения жесткости к расходу газа проводились численными методами на ЭВМ и показали следующее.

1. Существует оптимальное значение параметра  $\psi$ , при котором модуль жесткости подпятника с постоянным внешним дросселем достигает максимального значения. Это оптимальное значение параметра  $\psi$  зависит от давления наддува  $P_n$  и безразмерного радиуса  $r_1$  линии наддува. При  $P_n=3$  и  $r_1=0,1$  максимальная жесткость достигается при  $\psi=1,332$ . С ростом  $P_n$  оптимальное  $\psi$  возрастает, а с уменьшением  $P_n$  оно падает, так что при увеличении  $P_n$  от 1,5 до 8 оно возрастает примерно на 50%. Зависимость оптимального  $\psi$  от  $r_1$  носит аналогичный характер, хотя она выражена значительно слабее.

2. Отношение жесткости к расходу газа у подпятника с постоянным внешним дросселем растет по модулю с увеличением параметра  $\psi$  и достигает максимального значения при  $\psi = \infty$ , когда и жесткость опоры, и расход газа через нее обращаются в нуль. Предельные значения  $K^*/Q^*$  не зависят от  $P_n$  и могут быть найдены аналитически:

$$\lim_{\psi \rightarrow 0} \frac{K^*}{Q^*} = 0, \quad \lim_{\psi \rightarrow \infty} \frac{K^*}{Q^*} = -\frac{3}{4} \left[ 1 - r_1 \left( 1 + 2 \ln \frac{1}{r_1} \right) \right].$$

**Сравнение ступенчатого и цельного подпятников по несущей способности и расходу.** Будем считать, что сравниваемые опоры представляют одним газом при одинаковых давлениях наддува и одном и том же давлении окружающей среды и, кроме этого, имеют следующие одинаковые параметры: радиус внешней границы несущего слоя  $r_0$ ; радиусы внутренних границ несущего слоя  $r_2$  (у ступенчатого) и  $r_1$  (у цельного); номинальный зазор  $h$  между рабочими поверхностями.

Если сравнить выражения (18) и (22), учитывая, что у обоих подпятников радиусы внутренних границ несущего слоя считаются одинаковыми ( $r_1=r_2$ ), то нетрудно заметить эквивалентность этих выражений. Таким образом, нижняя граница несущей способности ступенчатого подпятника и верхняя граница несущей способности подпятника с внешним дросселем совпадают. Однако у реальных подпятников эти границы не должны достигаться, так как при этом опора полностью теряет жесткость и становится статически неустойчивыми.

Отсюда следует первый вывод: каковы бы ни были значения параметра  $\psi$  и  $r_1$  у ступенчатого подпятника и параметра  $\psi$  у плоского подпятника с постоянным внешним дросселем, несущая способность первой опоры всегда остается выше, чем у второй.

Пусть  $Q_1^*$  и  $Q_2^*$  — безразмерные расходы через ступенчатый и цельевой подпятники при номинальном значении рабочего зазора ( $\xi=0$ ). На основании соотношений (13) и (19) имеем

$$\frac{Q_1^*}{Q_2^*} = \frac{(1+\psi)\ln(1/\rho_2)}{\ln(1/\rho_1) + v^2 \ln(\rho_1/\rho_2)} \quad (23)$$

Так как параметр цели  $\psi$  может принимать значения от 0 до  $\infty$ , а параметр  $v$  — от 0 до 1, то это отношение будет минимальным и равным единице при  $\psi=0$  и  $v=1$ , когда обе опоры полностью теряют жесткость. У работоспособных опор это отношение больше единицы.

Итак, получен второй вывод: расход газа через ступенчатый подпятник всегда превышает расход газа через подпятник с внешним дросселем. Это справедливо при любом давлении наддува и любых параметрах сравниваемых опор.

С практической точки зрения было бы желательно сравнить данные подпятники по таким важным характеристикам, как жесткость и отношение жесткости к расходу. Однако никаких разумных результатов при этом получить не удастся, так как параметры сравниваемых опор имеют оптимум по разным характеристикам. Следует отметить, что оба подпятника имеют общий недостаток: при уменьшении нагрузки на опору расход газа через нее возрастает. Свободным от этого недостатка может быть только подпятник, у которого сопротивление дросселирующего канала возрастает при увеличении рабочего зазора. Этому условию удовлетворяет, например, цельевой дроссель конической формы (рис. 1, а).

Исследование подпятников со ступенчатой формой рабочего зазора и с внешними дросселями постоянного и переменного сопротивления. При  $\alpha=0$  и  $\rho_1=\rho_2$  коническая цель наддува переходит в цилиндрическую и мы получаем опору с внешним дросселем постоянного сопротивления (рис. 1, б). В этом случае все соотношения (8)–(10) и (12) сохраняют силу, за исключением параметра  $\psi$ , который принимает вид  $\psi=\lambda/[\gamma^2 \rho_2 \ln(1/\rho_2)]$ .

Если у комбинированного подпятника (рис. 1, а) номинальный зазор с конической цели наддува связать с номинальным значением рабочего зазора  $h$  условием  $c=h \sin \alpha$ , то осевые перемещения подвижной детали подпятника будут ограничены пределами  $1 \leq \xi \leq 1$ , причем зазор цели будет возрастать вдвое при  $\xi=1$ , когда рабочая поверхность подпятника приходит в соприкосновение, а при  $\xi=1$ , когда рабочий зазор опоры равен  $2h$ , дросселирующая цель будет перекрываться. В этом случае параметры  $\gamma$  и  $\psi$  будут определяться выражениями  $\gamma=v \sin \alpha$ ,  $\psi=\ln(\rho_1/\rho_2)/[\gamma^2 \ln(1/\rho_2) \sin^2 \alpha]$ . Остальные соотношения (8)–(10) и (12) сохраняют прежний вид.

Поскольку функция  $F^*(\xi)$  в обоих случаях весьма сложна, то безразмерную жесткость подпятников целесообразно находить численным дифференцированием  $F^*$  по  $\xi$ .

На рис. 3, а представлена зависимость безразмерной несущей способности от относительного осевого смещения у подпятников с постоянным и переменным (пунктир) дросселями. Кривые соответствуют различным  $v$ : 1 —  $v=1$  (ступени нет), 2 —  $v=0,9$  (малая ступень), 3 —  $v=0,8$  (большая ступень) (эти же обозначения соответствуют рис. 3, б и рис. 4 при  $P_0=3$ ,  $\rho_1=0,9$ ,  $\rho_2=0,4$ ,  $\psi=1,33$ ). Значение давления наддува и безразмерных координат  $\rho_1$  и  $\rho_2$  остается одним и тем же. Что касается параметра  $\psi$ , характеризующего отношение гидравлических сопротивлений дросселя и зазора, то он выбран таким, чтобы жесткость подпятника без ступени при номинальном зазоре была максимальной. Оказалось, что оптимальное значение  $\psi$  практически одинаково в обоих случаях и составляет 1,33.

Рассматривая рис. 3, а, нетрудно заметить, что при  $\xi \geq 0$  у обоих подпятников несущая способность мало зависит от глубины ступени. Однако при уменьшении зазора по сравнению с номинальным значением кривые



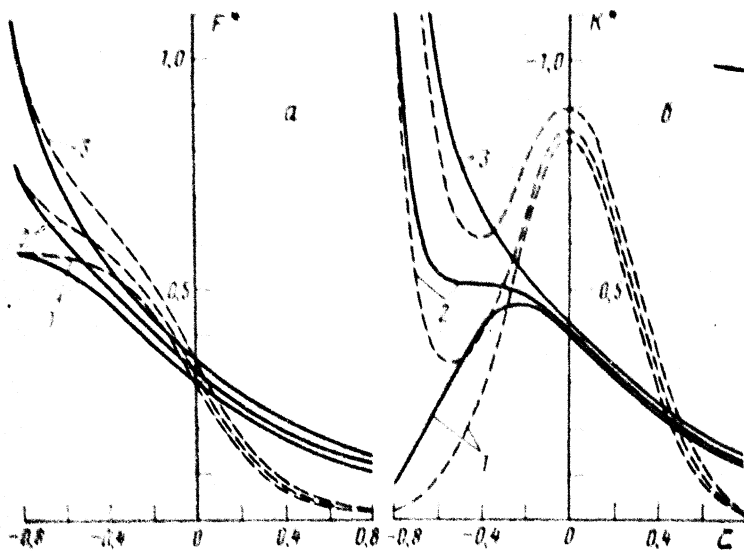


Рис. 3

$F^*(z)$  расщепляются. При сильном сближении рабочих поверхностей несущая способность подпятника со ступенчатым зазором оказывается noticeably выше, чем у подпятника без ступени или с меньшей ступенью.

Следует обратить внимание на более медленное падение несущей способности при увеличении зазора у подпятника с постоянным дросселем по сравнению с подпятником, у которого сопротивление дросселирующей щели меняется за счет конусности.

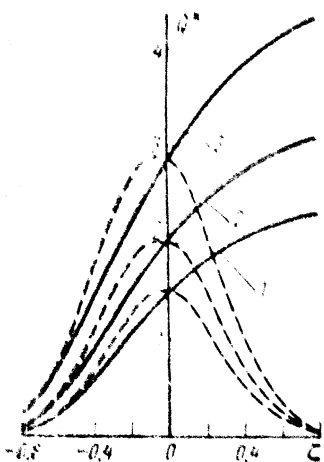


Рис. 4

На рис. 3, б представлена зависимость безразмерной жесткости от относительно осевого смещения для тех же подпятников. Из него видно, что при номинальном зазоре  $\zeta = 0$  подпятник с переменным дросселем имеет примерно в 2 раза большую жесткость, чем подпятник с постоянным дросселем. При  $\zeta > 0$  у обоих подпятников кривые  $K^*(\zeta)$  мало зависят от глубины ступени. Однако при  $\zeta < 0$  кривые быстро расщепляются, так что при сильном сближении пластины жесткость подпятника даже с небольшой ступенью оказывается значительно выше, чем при номинальном зазоре (кривые 2, 3), и то

время как у гладкого подпятника жесткость оказывается близкой к нулю (кривая 1). Интересно отметить, что у подпятника с постоянным дросселем и малой ступенью (сплошная кривая 2) имеется область  $-0,5 < \zeta < -0,3$ , где жесткость почти не меняется. У подпятника же с переменным дросселем и малой ступенью жесткость имеет локальный максимум при  $\zeta = 0$  и локальный минимум в отрицательной области  $\zeta$  (пунктирные кривые 2, 3). Это объясняется тем, что при малой глубине ступени ее влияние начинает сказываться при меньших значениях  $\zeta$ . Поэтому у подпятника с постоянным дросселем и малой ступенью должна существовать такая область  $\zeta$ , в которой внешний дроссель уже в значительной степени утратил свои функции, а ступенчатый зазор еще не начал оказывать своего влияния. Понятно, что при достаточной глубине ступени падение жесткости за счет ухудшения дросселирования будет полностью компенсиро-

ваться возрастающим влиянием ступенчатого зазора. Что касается подпятника с переменным дросселем, то у него при сближении пластин рас согласование между гидравлическими сопротивлениями дроссели и зазора происходит быстрее, чем у подпятника с постоянным дросселем. Поэтому при одинаковой высоте ступени «провалы» жесткости в отрицательной области  $\xi$  у первой опоры проявляются сильнее, чем у второй. Иско, что путем увеличения глубины ступени «провалы» жесткости можно устранить, причем в случае переменного дроссели ступень должна быть более глубокой, чем при постоянном дросселе.

На рис. 4 представлена зависимость безразмерного расхода  $Q^*$  от относительного осевого смещения  $\xi$  для тех же подпятников. Как видно, в случае постоянного дроссели кривые  $Q^*(\xi)$  (сплошные линии) представляют собой монотонно возрастающие функции. У подпятника же со ступенчатым дросселем конической формы расход максимален при номинальном значении зазора и падает как при опускании, так и при поднятии подвижной пластины подпятника (пунктирные кривые 1, 2, 3). Таким образом, стечки дренки затрат мощности конической дроссели значительно выгоднее обычного.

Поступила 22 V 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Константинов В. П. Газовая смазка. М., «Машиностроение», 1968.
2. Подпятники с газовой смазкой. Перевод с английского, М., «Мир», 1966.
3. Проблемы развития газовой смазки. Ч. 1, 2. М., «Наука», 1972.
4. Табачникова Ю. Б. Плоские паростатические опоры металлорежущих станков и приборов. М., Изд-во НИИМАШ, 1973.
5. Шейберт С. А., Жель В. П., Шишова М. Д. Опоры скольжения с газовой смазкой. М., «Машиностроение», 1969.
6. Design of Gas Bearings. Mechanical Technology Incorporated. N. Y., 1969.
7. Gray W. A. Gas film lubrication. Wiley, N. Y., 1962.