

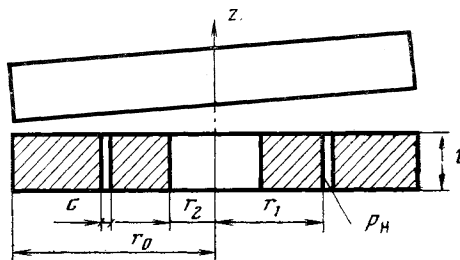
УДК 533.6.011.51

**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ ОПТИМИЗАЦИИ
ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДПЯТНИКОВ**

Шевченко А. В., Федотов В. А., Багдасарьян Г. Н.

Вопросы оптимизации газостатических подпятников в настоящее время рассматриваются с позиций экстремума осевой жесткости для опор с внешним дросселированием или отношения осевой жесткости к расходу сжатого газа для подпятников с внутренней компенсацией [1]. В настоящей работе вводятся более сложные и гибкие критерии оптимизации, включающие в себя три важнейшие интегральные характеристики: осевую и угловую жесткости опоры и расход газа. Численная реализация новых критериев иллюстрируется на примере подпятника со щелевым дросселем и разветвляющимся потоком газа (рисунок), который отличается большими конструктивными возможностями и достаточно высокими характеристиками.

Обозначения: r_0 – радиус подпятника; r_1 – радиус дросселирующей щели; r_2 – радиус внутренней открытой границы подпятника; r – радиальная координата, отсчитываемая от центра подпятника; $\rho = r/r_0$ – безразмерная радиальная координата; ρ_1, ρ_2 – значения ρ при r равно соответственно r_1 и r_2 ; h – расстояние между рабочими поверхностями подпятника в центре; h_0 – номинальное значение h , при котором ведется оптимизация; $\zeta = (h - h_0)/h_0$ – относительное осевое смещение; φ – угловая координата, отсчитываемая от полуплоскости, проходящей через ось подпятника и пункт, где толщина несущего слоя минимальна (положительные значения φ откладываются навстречу часовой стрелке, если смотреть с положительного конца оси z); θ – относительная непараллельность рабочих поверхностей, равная разности между максимальным зазором и зазором в центре, деленной на зазор в центре; $H = h_0(1 + \zeta)(1 - \theta \cos \varphi)$ – локальная толщина несущего слоя газа в общем случае; l – длина дросселирующей щели вдоль образующей; c – расстояние между стенками дросселирующей щели; $\psi = lh_0^3 \ln(r_0/r_2)/r_1 c^3 \ln(r_0/r_1) \ln(r_1/r_2)$ – безразмерный параметр дросселя, равный отношению сопротивления дросселя к полному сопротивлению рабочего зазора при отсутствии осевых и угловых смещений ($H = h_0$); p – давление; p_a – давление окружающей среды; p_n – давление наддува; $P = p/p_a$ – безразмерное давление; U – квадрат безразмерного давления; U_0, U_1, U_2 – значения U соответственно в дросселирующей щели, во внешней и внутренней (по отношению к дросселирующей щели) областях несущего слоя; F – подъемная сила подпятника; $F^* = F/\pi r_0^2 p_a$ – безразмерная подъемная сила (F^* показывает, во сколько раз подъемная сила подпятника превышает силу, с которой окружающая среда давит на круг радиуса r_0); $K_\zeta = dF/dh$ – осевая жесткость опоры; $K_\zeta^* = dF^*/d\zeta = K_\zeta/(\pi r_0^2 p_a/h_0)$ – безразмерная осевая жесткость (K_ζ^* показывает, во сколько раз осевая жесткость опоры превосходит жесткость пружины, которую поршень диаметром $2r_0$ под давлением окружающей среды сжимает на величину h_0 – номинальный зазор подпятника); M – главный момент сил реакции несущего слоя относительно оси углового поворота следящей детали подпятника, направленный на восстановление параллельности рабочих поверхностей; $M^* = M/\pi r_0^3 p_a$ – безразмерный восстанавливающий момент (M^* показывает, во сколько раз восстанавливающий момент больше по сравнению с



тем, который возникает, если на край взвешенной детали в месте минимального зазора надавить с той же силой, с которой окружающая среда давит на круг радиуса r_0); $K_\theta^* = dM^*/d\theta$ – безразмерная угловая жесткость опоры; k – отношение плотности газа к давлению при температуре слоя; μ – динамический коэффициент трения; Q – секундный массовый расход газа через опору; $Q_1^* = Q/(kP_0 r_0^2)$ – безразмерный расход; Q_1^* , Q_2^* – безразмерные расходы газа через внешнюю и внутреннюю области рабочего зазора соответственно.

В случае параллельных поверхностей расчет плоских подпятников прост не только потому, что задача осесимметрична [1], но еще и потому, что скорость вращения подвижной детали практически не влияет на поле давления в несущем слое. Если же рабочие поверхности непараллельны, то давление в газовом слое зависит не только от ρ , но и от φ и, кроме того, в этом случае уже нельзя утверждать, что скорость скольжения твердых стенок не вносит возмущений в поле давления. Однако для того, чтобы эти возмущения действительно сильно влияли на интегральные характеристики подпятника, необходимо, чтобы параметр сжимаемости [2] примерно в 100 раз превосходил избыточное безразмерное давление наддува $(P_n - 1)$. Это условие выполняется редко, поскольку рабочие зазоры опор с наддувом на порядок больше, чем у автономных. Таким образом, в большинстве практически важных случаев подпятники с непрофилированными рабочими поверхностями работают исключительно в режиме подвеса, так что в соответствии с уравнениями Рейнольдса [3] для изотермического слоя газа, функция U (квадрат безразмерного давления) в обеих областях несущего слоя подчиняется уравнению

$$\rho^2 \frac{\partial^2 U}{\partial \rho^2} + \rho \frac{\partial U}{\partial \rho} - \frac{3\theta \rho^2 \cos \varphi}{1 - \theta \rho \cos \varphi} \frac{\partial U}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{3\theta \rho \sin \varphi}{1 - \theta \rho \cos \varphi} \frac{\partial U}{\partial \varphi} = 0. \quad (1)$$

В дальнейшем нас будут интересовать интегральные характеристики опоры (в том числе угловая жесткость) при $\theta = 0$. Поэтому ближайшая задача заключается в том, чтобы с достаточной точностью определить функцию U при сколь угодно малых, но не равных нулю, значениях θ . В этом случае уравнение (1) упрощается

$$\rho^2 \frac{\partial^2 U}{\partial \rho^2} + \rho \frac{\partial U}{\partial \rho} - 3\theta \rho^2 \frac{\partial U}{\partial \rho} \cos \varphi + \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + 3\theta \rho \frac{\partial U}{\partial \varphi} \sin \varphi = 0. \quad (2)$$

Четную и периодическую по φ функцию $U(\rho, \varphi)$ будем искать в форме

$$U(\rho, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} R_n(\rho) \cos n\varphi, \quad \text{где } n=0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Рассматривая (2) и (3) совместно с соотношениями

$$\begin{aligned} 2 \cos n\varphi \cos \varphi &= \cos(n-1)\varphi + \cos(n+1)\varphi, \\ 2 \sin n\varphi \sin \varphi &= \cos(n-1)\varphi - \cos(n+1)\varphi, \\ \cos(m+1)\varphi &= \cos n\varphi \quad \text{при } m=n-1, \\ \cos(m-1)\varphi &= \cos n\varphi \quad \text{при } m=n+1 \end{aligned}$$

получаем равенство

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ -\frac{3}{2} \theta \left[\rho^2 \frac{dR_{n-1}}{d\rho} - (n-1) \rho R_{n-1} \right] + \rho^2 \frac{d^2 R_n}{d\rho^2} + \rho \frac{dR_n}{d\rho} - \right. \\ \left. - n^2 R_n - \frac{3}{2} \theta \left[\rho^2 \frac{dR_{n+1}}{d\rho} + (n+1) \rho R_{n+1} \right] \right\} \cos n\varphi = 0. \end{aligned}$$

Вследствие ортогональности функций $\cos n\varphi$ это равенство распадается на бесконечную систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}
&\rho^2 R_0'' + \rho R_0' - 1,5\theta(\rho^2 R_1' + \rho R_1) = 0, \\
&-3\theta\rho^2 R_0' + \rho^2 R_1'' + \rho R_1' - R_1 - 1,5\theta(\rho^2 R_2' + 2\rho R_2) = 0, \\
&-1,5\theta(\rho^2 R_1' - \rho R_1) + \rho^2 R_2'' + \rho R_2' - 4R_2 - 1,5\theta(\rho^2 R_3' + 3\rho R_3) = 0, \\
&\dots \\
&-1,5\theta[\rho^2 R_{n-1}' - (n-1)\rho R_{n-1}] + \rho^2 R_n'' + \rho R_n' - n^2 R_n - \\
&-1,5\theta[\rho^2 R_{n+1}' + (n+1)\rho R_{n+1}] = 0.
\end{aligned} \tag{4}$$

Известно [4], что ряд Фурье гладкой периодической функции всегда быстро сходится. В данном случае это означает, что R_n и R_n' должны быстро убывать с ростом n . Поэтому, принимая во внимание малость θ , систему (4) можно заменить приближенной

$$\begin{aligned}
\rho^2 R_0'' + \rho R_0' &= 0, \quad \rho^2 R_1'' + \rho R_1' - R_1 = 3\theta\rho^2 R_0', \\
\rho^2 R_2'' + \rho R_2' - 4R_2 &= 1,5\theta(\rho^2 R_1' - \rho R_1), \\
\dots \\
\rho^2 R_n'' + \rho R_n' - n^2 R_n &= 1,5\theta[\rho^2 R_{n-1}' - (n-1)\rho R_{n-1}].
\end{aligned}$$

Первые четыре уравнения этой системы имеют решение

$$\begin{aligned}
R_0 &= C_{01} + C_{02} \ln \rho, \quad R_1 = C_{11}\rho + C_{12}\rho^{-1} - (3\theta/4)C_{02}\rho(1 - 2 \ln \rho), \\
R_2 &= C_{21}\rho^2 + C_{22}\rho^{-2} - (9\theta^2/64)C_{02}\rho^2(1 - 4 \ln \rho) + (3\theta/4)C_{12}, \\
R_3 &= C_{31}\rho^3 + C_{32}\rho^{-3} - (3\theta^3/128)C_{02}\rho^3(1 - 6 \ln \rho) + \\
&\quad + (9\theta^2/32)C_{12}\rho + (3\theta/4)C_{22}\rho^{-1}.
\end{aligned} \tag{5}$$

Если в разложении $U(\rho, \varphi)$ по косинусам угла φ (3) удержать четыре члена и с учетом соотношений (5) довести задачу до конца, то оказывается, что постоянные C_{n1} и C_{n2} имеют порядок θ^n . Поэтому при достаточно малом θ функции U_1 и U_2 имеют вид

$$\begin{aligned}
U_1 &= a_{01} + a_{02} \ln \rho + [-(3\theta/4)a_{02}\rho(1 - 2 \ln \rho) + a_{11}\rho + a_{12}\rho^{-1}] \cos \varphi, \\
U_2 &= b_{01} + b_{02} \ln \rho + [-(3\theta/4)b_{02}\rho(1 - 2 \ln \rho) + b_{11}\rho + b_{12}\rho^{-1}] \cos \varphi.
\end{aligned} \tag{6}$$

Функция U_0 в щели наддува удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial^2 U_0}{\partial z^2} + \frac{1}{r_1^2} \frac{\partial^2 U_0}{\partial \varphi^2} = 0. \tag{7}$$

Учитывая, что длина щели l мала по сравнению с ее радиусом r_1 , введем малую величину $\varepsilon = l/r_1$ и перейдем от переменной z к переменной ξ , положив $z = l\xi$. Как видно, при изменении z от $-l$ до 0 переменная ξ меняется от -1 до 0 , причем газ течет через щель в сторону увеличения ξ . В переменных ξ, φ уравнение (7) запишется так: $\partial^2 U_0 / \partial \xi^2 + \varepsilon^2 (\partial^2 U_0 / \partial \varphi^2) = 0$. Как видно, при достаточно малом ε (обычно ε не превышает $0,1$) функция $U_0(\xi, \varphi)$ хорошо описывается уравнением $\partial^2 U_0 / \partial \xi^2 = 0$. Отсюда с учетом условия на входе в дросселирующую щель ($U_0 = P_n^2$ при $\xi = -1$) получим

$$U_0 = P_n^2 - (1 + \xi)f(\varphi), \tag{8}$$

где $f(\varphi)$ — неизвестная пока функция.

В выражениях (6) и (8) содержится восемь неопределенных констант и одна неизвестная функция, которые можно найти из граничных условий

$$\begin{aligned}
\Delta Q_\xi(0, \varphi) &= \Delta Q_{\rho_1}(\rho_1, \varphi) - \Delta Q_{\rho_2}(\rho_1, \varphi), \quad U_1(1, \varphi) = 1, \\
U_2(\rho_2, \varphi) &= 1, \quad U_1(\rho_1, \varphi) = U_2(\rho_1, \varphi), \quad U_0(0, \varphi) = U_1(\rho_1, \varphi),
\end{aligned} \tag{9}$$

где ΔQ_ξ — локальный массовый расход газа через элементарный участок дросселирующей щели, а ΔQ_{ρ_1} и ΔQ_{ρ_2} — локальные массовые расходы газа

в радиальном направлении во внешней и внутренней областях рабочего зазора соответственно. Они определяются выражениями

$$\Delta Q_{\xi} = -\frac{kp_a^2 c^2 r_1}{24\mu l} \frac{\partial U_0}{\partial \xi} d\varphi, \quad \Delta Q_{\rho_i} = -\frac{kp_a^2 H^3}{24\mu} \rho \frac{\partial U_i}{\partial \rho} d\varphi. \quad (10)$$

Рассматривая соотношения (6), (8)–(10) совместно, можно найти окончательные выражения квадрата безразмерного давления в обеих зонах несущего слоя

$$\begin{aligned} U_1(\rho, \varphi) &= 1 + (\eta/\tau_1) \ln(1/\rho) - \theta f_1(\rho) \cos \varphi, \\ U_2(\rho, \varphi) &= 1 + (\eta/\sigma) \ln(\rho/\rho_2) - \theta f_2(\rho) \cos \varphi; \\ f_1(\rho) &= (3\eta/2\tau_1) [\lambda(1-\rho^2)/\rho - \rho \ln(1/\rho)], \quad f_2(\rho) = \\ &= (3\eta/2\sigma) [\lambda\sigma(1-\rho_1^2)(\rho^2-\rho_2^2)/\tau_1(\rho_1^2-\rho_2^2)\rho - \rho \ln(\rho/\rho_2)], \\ \lambda &= \frac{\tau_1 \tau_2 \rho_1^2 [1 - \psi(1+\xi)]}{\tau_2(1-\rho_1^2) + 2\psi\sigma\tau_1\rho_1^2(1+\nu)(1+\xi)^3}, \quad \nu = \frac{1-\rho_1^2}{\rho_1^2-\rho_2^2}, \\ \eta &= \frac{P_H^2 - 1}{1 + \psi(1+\xi)^3}, \quad \sigma = \ln \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad \tau_1 = \ln \frac{1}{\rho_1}, \quad \tau_2 = \ln \frac{1}{\rho_2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Зная $U_1(\rho, \varphi)$ и $U_2(\rho, \varphi)$, можно записать выражение безразмерной подъемной силы подпятника

$$F^* = \frac{2}{\pi} \int_{\rho_1}^1 \rho d\rho \int_0^\pi \sqrt{U_1} d\varphi + \frac{2}{\pi} \int_{\rho_2}^{\rho_1} \rho d\rho \int_0^\pi \sqrt{U_2} d\varphi - (1-\rho_2^2) \quad (12)$$

Соотношения (11) и малость θ позволяют записать два приближенных равенства

$$\begin{aligned} \sqrt{U_1(\rho, \varphi)} &= P_1 - \theta [f_1(\rho)/2P_1] \cos \varphi, \quad P_1 = \sqrt{1 + (\eta/\tau_1) \ln(1/\rho)}, \\ \sqrt{U_2(\rho, \varphi)} &= P_2 - \theta [f_2(\rho)/2P_2] \cos \varphi, \quad P_2 = \sqrt{1 + (\eta/\sigma) \ln(\rho/\rho_2)}, \end{aligned} \quad (13)$$

где P_1 и P_2 — безразмерные давления во внешней и внутренней областях несущего слоя при $\theta=0$.

После вычисления внутренних интегралов выражение (12) принимает окончательный вид

$$F^* = 2 \int_{\rho_1}^1 \sqrt{1 + (\eta/\tau_1) \ln(1/\rho)} \rho d\rho + 2 \int_{\rho_2}^{\rho_1} \sqrt{1 + (\eta/\sigma) \ln(\rho/\rho_2)} \rho d\rho - (1-\rho_2^2).$$

Продифференцировав $F^* = F^*[\eta(\xi)]$ по ξ , можно найти безразмерную осевую жесткость опоры

$$\begin{aligned} K_{\xi}^* &= -\frac{3\psi\eta(1+\xi)^2}{1+\psi(1+\xi)^3} \left\{ \frac{1}{\tau_1} \int_{\rho_1}^1 \frac{\ln(1/\rho) \rho d\rho}{\sqrt{1 + (\eta/\tau_1) \ln(1/\rho)}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\sigma} \int_{\rho_2}^{\rho_1} \frac{\ln(\rho/\rho_2) \rho d\rho}{\sqrt{1 + (\eta/\sigma) \ln(\rho/\rho_2)}} \right\}. \end{aligned}$$

Если безразмерный восстанавливающий момент

$$M^* = \frac{2}{\pi} \int_{\rho_1}^1 \rho^2 d\rho \int_0^\pi \sqrt{U_1} \cos \varphi d\varphi + \frac{2}{\pi} \int_{\rho_2}^{\rho_1} \rho^2 d\rho \int_0^\pi \sqrt{U_2} \cos \varphi d\varphi$$

преобразовать с учетом соотношений (13), а затем продифференцировать его по θ , то можно найти безразмерную угловую жесткость опоры при $\theta=0$, когда стенки несущего слоя параллельны

$$K_0^* = -\frac{3\eta}{4\tau_1} \left\{ \int_{\rho_1}^1 \frac{\rho^2 \ln(1/\rho) - \lambda(1-\rho^2)}{\sqrt{1+(\eta/\tau_1)\ln(1/\rho)}} \rho d\rho + \int_{\rho_2}^{\rho_1} \frac{(\tau_1/\sigma)\rho^2 \ln(\rho/\rho_2) - \lambda\nu(\rho^2-\rho_2^2)}{\sqrt{1+(\eta/\sigma)\ln(\rho/\rho_2)}} \rho d\rho \right\}.$$

Полный безразмерный расход газа через опору (через дросселирующую щель) Q^* и безразмерные расходы Q_1^* (через внешнюю) и Q_2^* (через внутреннюю) области рабочего зазора при малых θ не зависят от величины θ и определяются выражениями

$$Q^* = (P_n^2 - 1)(1 + \xi)^3 \ln(1/\rho_2) / [1 + \psi(1 + \xi)^3] \ln(1/\rho_1) \ln(\rho_1/\rho_2), \\ Q_1^* = Q^* \chi / (1 + \chi), \quad Q_2^* = -Q^* (1 + \chi), \quad \chi = \ln(\rho_1/\rho_2) / \ln(1/\rho_1).$$

Нетрудно проверить, что безразмерный параметр χ равен отношению $|Q_1^*|/|Q_2^*|$, поэтому его естественно назвать характеристикой разветвления потока газовой смазки или просто коэффициентом разветвления (не следует забывать, что $Q_2^* < 0$, поскольку во внутренней области рабочего зазора газ течет навстречу радиальной координате, так что $Q^* = Q_1^* - Q_2^*$).

Если выражение Q^* исследовать на экстремум, то можно установить, что при заданном ψ расход минимален в том случае, когда $\rho_1 = \sqrt{\rho_2}$. При выполнении этого условия $\chi = 1$. Значит после дросселирующей щели сжатый газ разветвляется на два равных по величине потока. В этом случае в области реальных значений ρ_2 и ψ ($0 < \rho_2 < 1$; $0 < \psi$) существует единственная для заданных P_n и ξ пара чисел (ρ_2 и ψ), доставляющая абсолютный максимум модулю осевой жесткости и единственный набор значений этих же параметров, доставляющий абсолютный максимум модулю угловой жесткости. Эти два критерия, представляющие собой обычные экстремумы функций по двум переменным с наложением дополнительного условия на третью переменную, будем называть для краткости первым ($\partial K_1^* / \partial \psi = 0$, $\partial K_1^* / \partial \rho_2 = 0$, $\rho_1 = \sqrt{\rho_2}$) и вторым ($\partial K_0^* / \partial \psi = 0$, $\partial K_0^* / \partial \rho_2 = 0$, $\rho_1 = \sqrt{\rho_2}$) критериями оптимизации.

В табл. 1 приведены удовлетворяющие этим критериям параметры ρ_2 , ρ_1 и ψ и соответствующие им значения всех безразмерных характеристик опоры при номинальном зазоре ($\xi = 0$) в зависимости от величины безразмерного давления наддува. Анализируя данные таблицы, можно заметить, что второй критерий почти в два раза расширяет диаметр внутренней границы несущего слоя, расширяя одновременно и диаметр линии наддува. Поэтому увеличение угловой жесткости подпятника на 22–24% по сравнению с первым критерием он обеспечивает ценой в 2,1–2,3 раза больших потерь сжатого газа. Первый же критерий доставляет опоре на 18–19% более высокую осевую жесткость и на 13% повышает ее подъемную силу. Следует отметить, что в случае газостатического подпятника возрастание подъемной силы само по себе не повышает ценности критерия оптимизации, поскольку ее всегда можно поднять, снизив сопротивление дросселя, если только запас осевой и угловой жесткости позволяет сделать это. Не следует также забывать о том, что в некоторых случаях значения параметра ρ_2 диктуются конструктивными требованиями, так что рассмотренные критерии оказываются непригодными. Кроме этого, жесткая зависимость ρ_1 от ρ_2 , лежащая в основе первого и второго критериев, хотя и обеспечивает экономное расходование сжатого газа, в некото-

Таблица 1

P_H	$dK_{\zeta}^*/d\psi = 0, dK_{\zeta}^*/d\rho_2 = 0, \rho_1 = \sqrt{\rho_2}$							$dK_{\theta}^*/d\psi = 0, dK_{\theta}^*/d\rho_2 = 0, \rho_1 = \sqrt{\rho_2}$						
	ρ_2	ρ_1	ψ	E^*	$-K_{\zeta}^*$	$-K_{\theta}^*$	Q^*	ρ_2	ρ_1	ψ	E^*	$-K_{\zeta}^*$	$-K_{\theta}^*$	Q^*
2	0,272	0,522	1,268	0,230	0,338	0,069	4,06	0,527	0,726	1,170	0,264	0,286	0,084	8,63
3	0,263	0,513	1,450	0,491	0,697	0,140	9,79	0,524	0,724	1,337	0,434	0,589	0,172	21,2
4	0,257	0,507	1,574	0,768	1,057	0,211	17,2	0,521	0,722	1,449	0,680	0,891	0,260	37,6
5	0,253	0,503	1,662	1,057	1,413	0,281	26,2	0,519	0,721	1,527	0,935	1,191	0,346	58,0
6	0,249	0,499	1,726	1,353	1,765	0,350	37,0	0,518	0,720	1,583	1,196	1,486	0,432	82,4
7	0,247	0,497	1,774	1,656	2,114	0,419	49,5	0,517	0,719	1,624	1,462	1,779	0,517	111
8	0,245	0,495	1,811	1,962	2,461	0,487	63,7	0,516	0,718	1,655	1,732	2,070	0,601	143
9	0,243	0,493	1,840	2,272	2,805	0,554	79,8	0,516	0,718	1,679	2,005	2,358	0,684	180
10	0,242	0,492	1,862	2,585	3,147	0,621	97,6	0,515	0,718	1,698	2,279	2,646	0,767	221

Таблица 2

P_H	$dK_{\zeta}^*/d\psi = 0, d(K_{\zeta}^*/Q^*)/d\rho_1 = 0$							$dK_{\theta}^*/d\psi = 0, d(K_{\theta}^*/Q^*)/d\rho_1 = 0$						
	ρ_2	ρ_1	ψ	F^*	$-K_{\zeta}^*$	$-K_{\theta}^*$	Q^*	ρ_1	ψ	F^*	$-K_{\zeta}^*$	$-K_{\theta}^*$	Q^*	
2	0,25	0,570	1,277	0,247	0,363	0,073	3,94	0,640	1,286	0,265	0,388	0,086	4,34	
	0,50	0,732	1,281	0,206	0,302	0,081	7,67	0,759	1,284	0,210	0,309	0,091	7,91	
	0,75	0,871	1,282	0,122	0,179	0,062	18,3	0,877	1,282	0,122	0,179	0,069	1,4	
4	0,25	0,560	1,587	0,812	1,115	0,219	17,2	0,628	1,601	0,862	1,179	0,260	18,6	
	0,50	0,728	1,596	0,679	0,930	0,233	33,6	0,754	1,600	0,691	0,946	0,277	34,5	
	0,75	0,871	1,599	0,401	0,550	0,173	80,4	0,876	1,599	0,403	0,551	0,213	80,8	
6	0,25	0,555	1,738	1,421	1,847	0,359	37,7	0,621	1,750	1,502	1,944	0,428	40,7	
	0,50	0,727	1,748	1,189	1,541	0,377	74,0	0,752	1,752	1,209	1,566	0,459	75,8	
	0,75	0,870	1,751	0,703	0,911	0,274	177	0,876	1,752	0,705	0,913	0,352	178	
8	0,25	0,552	1,821	2,052	2,564	0,496	65,8	0,618	1,831	2,164	2,692	0,592	70,8	
	0,50	0,726	1,829	1,718	2,139	0,515	129	0,751	1,833	1,745	2,171	0,636	132	
	0,75	0,870	1,832	1,016	1,264	0,371	310	0,875	1,833	1,019	1,267	0,489	311	
10	0,25	0,551	1,871	2,698	3,272	0,633	101	0,616	1,879	2,840	3,429	0,754	109	
	0,50	0,725	1,878	2,257	2,728	0,651	200	0,750	1,880	2,294	2,768	0,811	204	
	0,75	0,870	1,880	1,335	1,612	0,465	478	0,875	1,881	1,339	1,616	0,624	480	

рых случаях может выступать фактором, сковывающим возможности конструкции. Действительно, всегда существует возможность поднять характеристики F , K_{ζ} и K_{θ} ценой некоторого увеличения расхода за счет увеличения ρ_1 при заданном ρ_2 .

Поэтому во многих случаях практическую ценность имеют третий ($dK_{\zeta}^*/d\psi=0, d(K_{\zeta}^*/Q^*)/d\rho_1=0$) и четвертый ($dK_{\theta}^*/d\psi=0, d(K_{\theta}^*/Q^*)/d\rho_1=0$) критерии оптимизации ψ и ρ_1 в зависимости от ρ_2 и P_H . В отличие от двух первых эти критерии можно назвать сложными, поскольку в их основе лежит одновременный экстремум двух разных функций по двум разным переменным из числа оптимизируемых параметров.

В табл. 2 приведены удовлетворяющие этим критериям параметры ρ_1 и ψ и соответствующие им значения безразмерных характеристик F^* , K_{ζ}^* , K_{θ}^* , Q^* . Безразмерное давление наддува в этих таблицах пробегает пять (2, 4, 6, 8, 10) значений, а параметр ρ_2 — три (0,25; 0,50; 0,75) значения — это позволяет находить оптимальные параметры и характеристики для других значений входных параметров путем параболической интерполяции. Как видно из таблицы, четвертый критерий приводит к более высоким значениям ρ_1 , F^* , K_{ζ}^* , K_{θ}^* и Q^* — при малых ρ_2 эта разница заметна сильнее, но по мере увеличения ρ_2 она стирается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов А. В., Федотов В. А. и др. Исследование газостатических подпятников и улучшение их характеристик.— *Машиноведение*, 1976, № 3, с. 96.
2. Пинегин С. В., Емельянов А. В. и др. Газодинамические подпятники со спиральными канавками. М.: Наука, 1977.
3. Константинову В. Н. Газовая смазка. М.: Машиностроение, 1968.
4. Канторович Л. В., Крылов В. И. Приближенные методы высшего анализа. Л.: Физматгиз, 1962.

Винница

Поступила в редакцию 29.V.1979
