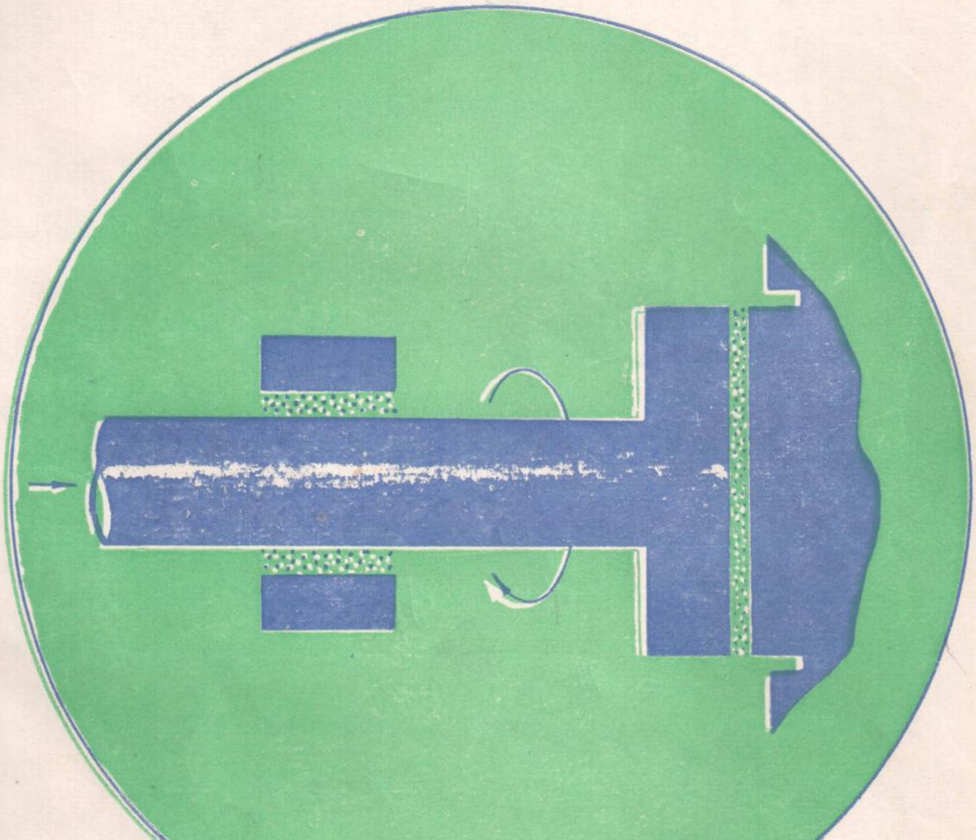
ГАЗОВЫЕ ОПОРЫ ТУРБОМАШИН



КАЗАНЬ · 1975

УДК 532.516:515.5

А.В.Емельянов, Л.С.Емельянова, В.А.Федотов

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ГАЗОВОГО ПОДВЕСА С ДВУМЯ ЩЕЛЯМИ НАДДУВА

(Винницкий политехнический институт)

Конструкция подвеса с двумя щелями наддува (рис.I) позволяет вариацией параметров щелей и расстояний между ними добиваться желаемых соотношений между несущей способностью, жесткостью опоры и расходом газа через нее.

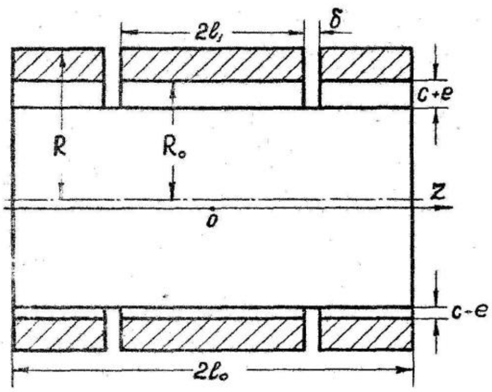


Рис. Схема подвеса

Введем следующие обозначения: c – рабочий зазор подвеса в соосном положении; R_0 – радиус шипа; R – внешний радиус щели наддува; $2\ell_0$ – длина подвеса; $2\ell_1$ – расстояние между щелями наддува; $\alpha=\ell_1/\ell_2$ – относительный интервал между щелями; $\lambda=\ell_0/R_0$ – относительная длина подвеса; δ – зазор в щелях наддува; $\psi=\frac{c^3\ln R/R_0}{\delta^3\lambda(1-\alpha)}$ – параметр, характеризующий отношение гидравлических сопротивлений щели наддува и проточной части рабочего зазора; e – эксцентриситет; $\xi=z/\ell_0$ – безразмерная осевая координата; P_a – давление окружающей среды; P_H – безразмерное давление наддува, отнесенное к давлению P_0; u – квадрат давления в газовом слое; u_0; u_1; u_2 – значения функции u в щели наддува, в центральном несущем слое и в слое с открытой границей соответственно; $F^*=4P_a R_0^2 F$ – реакция несущего слоя; F – безразмерная реакция несущего слоя; $K=dF/d\varepsilon$ – безразмерная жесткость газового слоя; $Q=\frac{\pi K P_a^2 c^3}{12\mu}q$ – расход газа через подвес; q – безразмерный расход; K – отношение плотности газа к давлению при температуре слоя; μ – коэффициент динамической вязкости.

Как показано в работе [I], у осесимметричных радиальных газостатических опор реакция газового слоя является практически линейной функцией относительного эксцентриситета вплоть до $\varepsilon = 0,4 - 0,5$.

Ближайшая задача исследования состоит в том, чтобы с минимальной погрешностью найти реакцию слоя при сколь угодно малых ε. Это позволит определить жесткость слоя при $\varepsilon=0$ и записать все безразмерные характеристики опоры в этом диапазоне:

$$K=K/\varepsilon=0, \quad F=\varepsilon K, \quad q=q/\varepsilon=0 \qquad (I)$$

В соответствии с результатами работ [I-2] функция u в трех сопряженных областях подвеса при малых ε достаточно точно описывается выражениями

$$u_0=P_a^2\left[P_H^2-f(\varphi)\ln\frac{R}{r}\right], \quad u_1=P_a^2(A_0+A_1 ch\lambda\xi\cos\varphi), \quad u_2=P_a^2[C_{01}+C_{02}\xi+(C_{11}e^{\lambda\xi}+C_{12}e^{-\lambda\xi})\cos\varphi] \qquad (2)$$

На границах областей эти функции отвечают условиям

$$u_0(R_0,\varphi)=u_1(\alpha,\varphi); \quad u_1(\alpha,\varphi)=u_2(\alpha,\varphi); \quad u_2(1,\varphi)=P_a^2.$$

Отсюда

$$f(\varphi)=\frac{P_н^2-A_0-A_1 ch\lambda\alpha\cos\varphi}{\ln R/R_0},\qquad C_{01}=1+\frac{A_0-1}{1-\alpha},\tag{3}$$

$$C_{11}=-\frac{1}{2}A_1 e^{-\lambda}\frac{ch\lambda\alpha}{sh\lambda(1-\alpha)},\qquad C_{02}=-\frac{A_0-1}{1-\alpha},\qquad C_{12}=\frac{1}{2}A_1 e^{\lambda}\frac{ch\lambda\alpha}{sh\lambda(1-\alpha)}.$$

Локальные массовые расходы газа через щель наддува ΔQ_{z0}, через межщелевой зазор $\Delta Q_{\xi 1}$ и зазор с открытой границей $\Delta Q_{\xi 2}$ запишутся

$$\Delta Q_{z0}=-\frac{K\delta^3 P_a^2}{24\mu\ln R/R_0}(P_н^2-A_0-A_1 ch\lambda\alpha\cos\varphi)d\varphi;$$

$$\Delta Q_{\xi 1}=-\frac{Kc^3P_a^2}{24\mu}(1-3\varepsilon\cos\varphi)A_1 sh\lambda\xi\cos\varphi d\varphi;\tag{4}$$

$$\Delta Q_{\xi 2}=\frac{Kc^3P_a^2}{24\mu\lambda}(1-3\varepsilon\cos\varphi)\left[\frac{A_0-1}{1-\alpha}+A_1\lambda ch\lambda\alpha\frac{ch\lambda(1-\xi)}{sh\lambda(1-\alpha)}\cos\varphi\right]d\varphi.$$

Условие неразрывности потока на общей границе трех областей имеет вид

$$\Delta Q_{\xi 2}(\alpha,\varphi)-\Delta Q_{\xi 1}(\alpha,\varphi)=-\Delta Q_{z0}(R_0,\varphi).\tag{5}$$

Совместное рассмотрение соотношений (3) – (5) позволяет определить постоянные, содержащиеся в выражениях (2) :

$$A_0=1+\frac{P_н^2-1}{1+\psi},\quad C_{01}=1+\frac{P_н^2-1}{(1-\alpha)(1+\psi)},\quad C_{02}=-\frac{P_н^2-1}{(1-\alpha)(1+\psi)};$$

$$A_1=3\varepsilon\frac{P_н^2-1}{1+\psi}\cdot\frac{\psi sh\lambda(1-\alpha)}{\psi\lambda(1-\alpha)ch\lambda+ch\lambda\alpha\, sh\lambda(1-\alpha)};$$

$$C_{11}=-\frac{3}{2}\varepsilon\frac{\psi(P_н^2-1)}{1+\psi}\cdot\frac{e^{-\lambda}ch\lambda\alpha}{\psi\lambda(1-\alpha)ch\lambda+ch\lambda\alpha\, sh\lambda(1-\alpha)};\tag{6}$$

$$C_{12}=\frac{3}{2}\varepsilon\frac{\psi(P_н^2-1)}{1+\psi}\cdot\frac{e^{\lambda}ch\lambda\alpha}{\psi\lambda(1-\alpha)ch\lambda+ch\lambda\alpha\, sh\lambda(1-\alpha)}.$$

Безразмерная реакция газового слоя определяется равенством

$$F=\lambda\int_0^{\alpha}d\xi\int_0^{\pi}\sqrt{U_1}\cos\varphi d\varphi+\lambda\int_{\alpha}^{1}d\xi\int_0^{\pi}\sqrt{U_2}\cos\varphi d\varphi.$$

Отсюда с учетом соотношений (2), (3) и (6) нетрудно найти жесткость как производную F по ε при $\varepsilon=0$:

$$K=\frac{3}{4}\pi A\left[\frac{sh\lambda\alpha\, sh\lambda(1-\alpha)}{\sqrt{\frac{P_н^2+\psi}{1+\psi}}}+\lambda ch\lambda\alpha\int_{\alpha}^{1}\frac{sh\lambda(1-\xi)d\xi}{\sqrt{1+\frac{(P_н^2-1)(1-\xi)}{(1+\psi)(1-\alpha)}}}\right],\tag{7}$$

где

$$A=\frac{\psi(P_н^2-1)}{(1+\psi)[\psi\lambda(1-\alpha)ch\lambda+ch\lambda\alpha\, sh\lambda(1-\alpha)]}.$$

Безразмерный параметр потока q находится с учетом соотношений (I) и (2) в виде

$$q=\frac{2(P_н^2-1)}{\lambda(1-\alpha)(1+\psi)}.\tag{8}$$

Таким образом, выражения (I), (7) и (8) представляют собой расчетные формулы для основных безразмерных характеристик подвеса в диапазоне линейности F ($\varepsilon\leq$ 0,4-0,5). Существенно, что эти формулы получены на основе уравнений Рейнольдса без каких-либо допущений о течении газа в зазоре. Анализ расчетов, проведенных градиентным методом на ЭВМ, показал, что:

I. При фиксированном параметре α всегда существует оптимальное значение параметра ψ, зависящее от α, при котором жесткость K достигает максимума. Однако чем ближе α к единице, тем выше соответствующее экстремальное значение жесткости. Поэтому жесткость K не имеет абсолютного максимума по двум параметрам α и ψ.

2. При фиксированном ψ существует α, при котором отношение жесткости к расходу достигает максимума. Однако чем больше ψ, тем выше это отношение. Таким образом, отношение K/q не имеет абсолютного максимума по двум параметрам α и ψ.

Абсолютный максимум по параметрам α и ψ имеет функция K_i^2/q, которая в диапазоне линейности F по смыслу соответствует отношению произведения несущей способности и жесткости к расходу газа. Значения оптимальных параметров α и ψ, при которых достигается этот максимум, даны в табл.

Таблица

Оптимальные параметры α и ψ
и соответствующие им значения K и q

$p_н$	Λ	α	ψ	K	q
2	0,4	0,276	2,992	0,2554	5,188
2	0,6	0,281	2,879	0,3678	3,585
2	0,8	0,288	2,742	0,4649	2,814
2	1,0	0,296	2,593	0,5456	2,373
2	1,5	0,324	2,232	0,6815	1,830
2	2,0	0,360	1,947	0,7471	1,590
2	2,5	0,403	1,747	0,7731	1,464
3	0,4	0,234	4,027	0,4741	10,39
3	0,6	0,241	3,883	0,6809	7,199
3	0,8	0,251	3,708	0,8559	5,670
3	1,0	0,263	3,516	1,003	4,805
3	1,5	0,302	3,058	1,244	3,764
3	2,0	0,352	2,692	1,361	3,345
3	2,5	0,411	2,445	1,410	3,154
4	0,4	0,203	5,017	0,6647	15,66
4	0,6	0,212	4,845	0,9524	10,85
4	0,8	0,223	4,641	1,197	8,559
4	1,0	0,237	4,414	1,396	7,266
4	1,5	0,285	3,861	1,723	5,755
4	2,0	0,347	3,421	1,883	5,195
4	2,5	0,417	3,134	1,955	4,978

ЛИТЕРАТУРА

1. Снопов А. И., Юдина Л. М. Радиальный газовый подвес с компенсирующей кольцевой щелью. Сб. "Проблемы развития газовой смазки", ч.1. М., "Наука", 1972.

2. Константинеску В. Н. Газовая смазка. М., "Машиностроение", 1972.