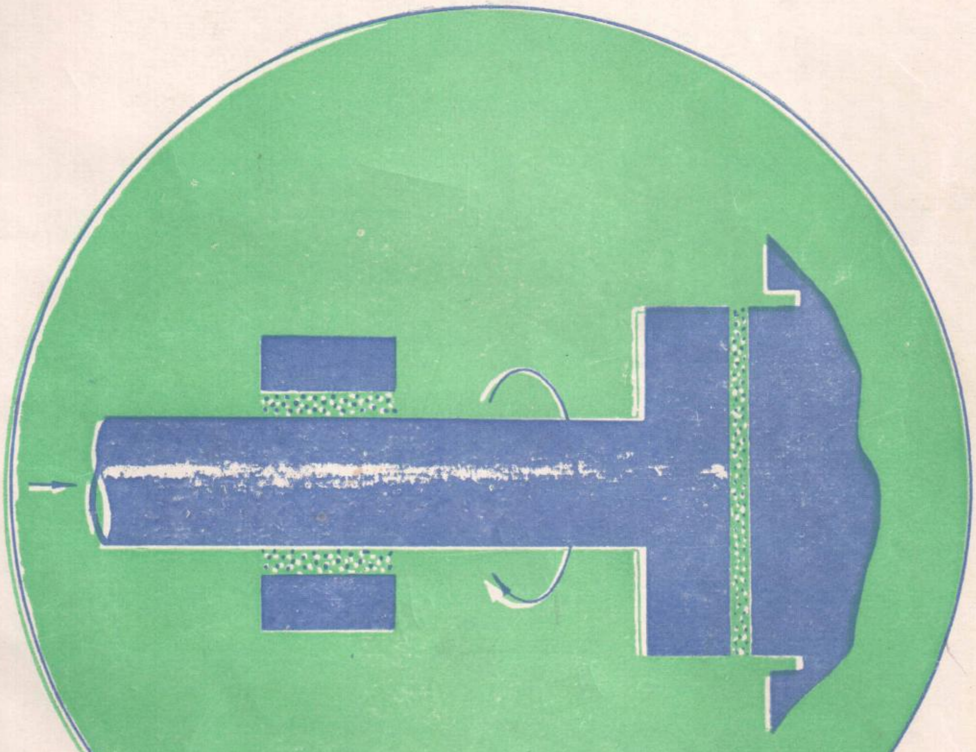
ГАЗОВЫЕ ОПОРЫ ТУРБОМАШИН



КАЗАНЬ · 1975

УДК 532.516:515.5

А.В.Емельянов, Л.С.Емельянова, В.А.Федотов, Г.З.Шнайдер

РАСЧЕТ ГАЗОСТАТИЧЕСКОЙ ОПОРЫ С ОДНОСТОРОННИМ ОСЕВЫМ НАГРУЖЕНИЕМ И НЕРАЗДЕЛЕННЫМ ПИТАНИЕМ ТОРЦЕВОГО И РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКОВ

(Винницкий политехнический институт,
Винницкий электротехнический завод)

В исследуемой конструкции (рис.I) внешний дроссель отсутствует. Сжатый газ поступает в рабочий зазор через относительно широкую щель, окружающую радиальный подшипник. Эта щель делит опору на две части: нижнюю ($z<0$), воспринимающую осевую и часть радиальной нагрузки, и верхнюю ($z>0$), которая одновременно выполняет функции радиальной опоры и уплотнения. Поскольку давление вдоль линии наддува не зависит ни от осевых, ни от радиальных смещений, то обе эти части ведут себя в работе автономно, и исследование нижней (радиально-осевой) опоры может быть проведено независимо от верхней (радиальной) опоры.

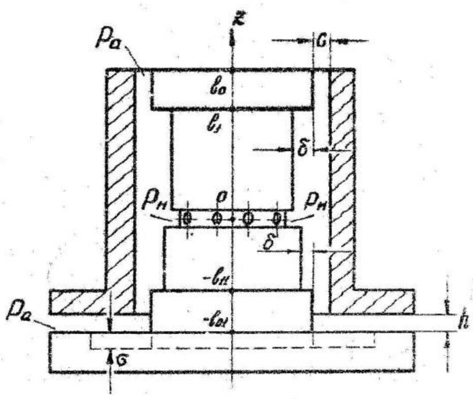


Рис.I. Схема газостатической опоры

Введем следующие обозначения: c – рабочий зазор в области кольцевых выступов радиального подшипника при соосном положении; R – радиус радиального подшипника; ℓ_0 – длина верхней (радиальной) опоры; ℓ_1 – расстояние от линии наддува до верхней ступени; δ – высота верхней ступени; ℓ_{01} – длина радиального подшипника нижней (радиально-осевой) опоры; ℓ_{11} – расстояние от щели наддува до нижней ступени радиального подшипника; δ_1 – высота ступени нижнего радиального подшипника; e – эксцентриситет радиального подшипника; $\varepsilon = e/c$ – относительный эксцентриситет; h – зазор осевого подшипника; h_o – номинальное значение h; r_1, r_2 – радиусы ступени и внешней границы осевого подшипника; σ – высота ступени осевого подшипника; $\xi=(h-h_o)/h_o$ – относительное осевое смещение; $\zeta=z/\ell_o$, $\zeta_1=z/\ell_{01}$ – безразмерные осевые координаты верхнего и нижнего радиальных подшипников; $\chi=r/R$ – безразмерная радиальная координата; P_a – давление окружающей среды; $P_н$ – давление наддува; u – квадрат давления; u_1, u_2, u_3, u_4 – значения u в четырех областях радиально-осевой опоры – микрокармане и микровыступе радиального подшипника и микрокармане и микровыступе осевого подшипника соответственно; $F_\varepsilon^*=4P_a R^2 F_\varepsilon$ – радиальная реакция газового слоя; F_ε – безразмерная радиальная реакция; $F^* = \pi P_a R^2 F_\xi$ – осевая несущая способность опоры; F_ξ – безразмерная осевая несущая способность; K – отношение плотности газа к давлению при температуре газового слоя; μ – коэффициент динамической вязкости.

Введем безразмерные параметры

$$\nu=\frac{c}{c+\delta},\quad \nu_1=\frac{c}{c+\delta_1},\quad \nu_0=\frac{h}{h_0+\delta},\quad \gamma=\frac{h_0}{c},$$

$$\lambda=\frac{\ell_0}{R},\quad \lambda_1=\frac{\ell_{01}}{R},\quad \alpha=\frac{\ell_1}{\ell_0},\quad \alpha_1=\frac{\ell_{11}}{\ell_{01}},\quad \chi_1=\frac{r_1}{R},$$

$$\chi_2=\frac{r_2}{R},\quad P_{H}=\frac{p_{H}}{p_a},\quad P_{12}=\frac{p_{12}}{p_a},\quad P_{23}=\frac{p_{23}}{p_a},\quad P_{34}=\frac{p_{34}}{p_a}.$$

Исходя из уравнений Рейнольдса, можно получить четыре дифференциальных уравнения для определения функции u в четырех сопряженных областях радиально-осевой опоры:

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial \varphi^2}+\frac{3\varepsilon\nu_1\sin\varphi}{1-\varepsilon\nu_1\cos\varphi}\cdot\frac{\partial u_1}{\partial \varphi}+R^2\frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2}=0,$$

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2}+\frac{3\varepsilon\sin\varphi}{1-\varepsilon\cos\varphi}\cdot\frac{\partial u_2}{\partial \varphi}+R^2\frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2}=0,$$

$$r^2\frac{\partial^2 u_3}{\partial r^2}+r\frac{\partial u_3}{\partial r}+\frac{\partial^2 u_3}{\partial \varphi^2}=0, \tag{I}$$

$$r^2\frac{\partial^2 u_4}{\partial r^2}+r\frac{\partial u_4}{\partial r}+\frac{\partial^2 u_4}{\partial \varphi^2}=0.$$

При малых ε решения этих уравнений достаточно точно описываются [I] функциями

$$u_1(\varphi,z)=A_{01}+A_{02}z+(A_{11}e^{\frac{z}{R}}+A_{12}e^{-\frac{z}{R}})\cos\varphi,$$

$$u_2(\varphi,z)=B_{01}+B_{02}z+(B_{11}e^{\frac{z}{R}}+B_{12}e^{-\frac{z}{R}})\cos\varphi,$$

$$u_3(r,\varphi)=C_{01}+C_{02}\ln r+(C_{11}r+C_{12}r^{-1})\cos\varphi, \tag{2}$$

$$u_4(r,\varphi)=D_{01}+D_{02}\ln r+(D_{11}r+D_{12}r^{-1})\cos\varphi.$$

На границах областей функции u_1, u_2, u_3 и u_4 отвечают условиям

$$
\begin{array}{lll}
u_1(\varphi,z)=P_{H}^2 & \text{при} & z=0 \\
u_1(\varphi,z)=u_2(\varphi,z) & \text{при} & z=\ell_{11} \\
u_2(\varphi,z)=u_3(r,\varphi) & \text{при} & z=-\ell_{01},\ r=R, \\
u_3(r,\varphi)=u_4(r,\varphi) & \text{при} & r=r_1, \\
u_4(r,\varphi)=P_a^2 & \text{при} & r=r_2
\end{array} \tag{3}
$$

Рассматривая (2) и (3) совместно, получим пять равенств, каждое из которых распадается на два уравнения. В результате получаем десять уравнений с шестнадцатью неопределенными постоянными:

$$
\begin{array}{l}
A_{01}=P_{H}^2,\quad A_{11}+A_{12}=0, \\
A_{01}-A_{02}\ell_{11}=B_{01}-B_{02}\ell_{11} \\
A_{11}e^{-\alpha_1\lambda_1}+A_{12}e^{\alpha_1\lambda_1}=B_{11}e^{-\alpha_1\lambda_1}+B_{12}e^{\alpha_1\lambda_1}, \\
B_{01}-B_{02}\ell_{01}=C_{01}+C_{02}\ln R, \\
B_{11}e^{-\lambda_1}+B_{12}e^{\lambda_1}=C_{11}R+C_{12}R^{-1}, \\
C_{01}+C_{02}\ln r_1=D_{01}+D_{02}\ln r_1, \\
C_{11}r_1+C_{12}r_1^{-1}=D_{11}r_1+D_{12}r_1^{-1}, \\
D_{01}+D_{02}\ln r_2=P_a^2 \\
D_{11}r_2+D_{12}r_2^{-1}=0.
\end{array} \tag{4}
$$

Для определения 6 недостающих уравнений используем условия неразрывности потока на границах сопряженных областей:

$$
\begin{aligned}
\Delta Q_{z1}(-\ell_{H}) &= \Delta Q_{z2}(-\ell_{11}) \\
\Delta Q_{z3}(R) &= -\Delta Q_{z2}(-\ell_{01}) \\
\Delta Q_{z3}(r_1) &= \Delta Q_{z4}(r_1)
\end{aligned}
\qquad (5)
$$

Общие выражения локальных расходов при малых ε запишем в виде

$$
\begin{aligned}
\Delta Q_{z1} &= -\frac{kR(c+\delta_1)^3}{24\mu}(1-3\nu_1\varepsilon\cos\varphi)\left[A_{02}+\frac{1}{R}\left(A_{11}e^{\frac{z}{R}}-A_{12}e^{-\frac{z}{R}}\right)\cos\varphi\right], \\
\Delta Q_{z2} &= -\frac{kRC^3}{24\mu}(1-3\varepsilon\cos\varphi)\left[B_{02}+\frac{1}{R}\left(B_{11}e^{\frac{z}{R}}+B_{12}e^{-\frac{z}{R}}\right)\cos\varphi\right], \\
\Delta Q_{z3} &= -\frac{k(h_0+\sigma)^3}{24\mu}(1+\nu_0\xi)^3\left[C_{02}+(C_{11}r-C_{12}r^{-1})\cos\varphi\right] \\
\Delta Q_{z4} &= -\frac{kh_0^3}{2\mu}(1+\xi)^3\left[D_{02}+(D_{11}r-D_{12}r^{-1})\cos\varphi\right].
\end{aligned}
\qquad (6)
$$

Подставив выражения (6) в (5), получим три равенства, каждое из которых распадается на два уравнения. Таким образом, к уравнениям (4) добавятся еще шесть:

$$
\begin{aligned}
& RA_{02}-\frac{3}{2}\varepsilon\nu_1\left(A_{11}e^{-\alpha_1\lambda_1}-A_{12}e^{\alpha_1\lambda_1}\right)=\nu_1^3RB_{02}-\frac{3}{2}\varepsilon\nu_1^3\left(B_{11}e^{-\alpha_1\lambda_1}-B_{12}e^{\alpha_1\lambda_1}\right); \\
& -3\varepsilon\nu_1RA_{02}+A_{11}e^{-\alpha_1\lambda_1}-A_{12}e^{\alpha_1\lambda_1}=3\varepsilon\nu_1^3RB_{02}+\nu_1^3\left(B_{11}e^{-\alpha_1\lambda_1}-B_{12}e^{\alpha_1\lambda_1}\right); \\
& -\gamma^3(1+\xi\nu_0)^3C_{02}=\nu_0^3RB_{02}-\frac{3}{2}\varepsilon\nu_0^3\left(B_{11}e^{-\lambda_1}-B_{12}^{\lambda_1}\right); \\
& -\gamma^3(1+\nu_0\xi)^3(C_{11}R-C_{12}R^{-1})=-3\varepsilon\nu_0^3RB_{02}+\nu_0^3\left(B_{11}e^{-\lambda_1}-B_{12}e^{\lambda_1}\right); \\
& (1+\nu_0\xi^3)C_{02}=\nu_0^3(1+\xi)^3D_{02} \\
& (1+\nu_0\xi)^3(C_{11}r_1-C_{12}r^{-1})=\nu_0^3(1+\xi)^3(D_{11}r_1-D_{12}r^{-1}).
\end{aligned}
\qquad (7)
$$

Система шестнадцати уравнений (4), (7) имеет решение

$$
\begin{aligned}
& A_{01}=P_a^2P_H^2, \quad A_{02}=\frac{P_a^2}{R}\cdot\frac{P_H^2-P_{12}^2}{\alpha_1\lambda_1}; \\
& B_{01}=P_a^2\left[P_{12}^2+(P_{12}^2-P_{23}^2)\frac{\alpha_1}{1-\alpha_1}\right], \quad B_{02}=\frac{P_a^2}{R}\cdot\frac{P_{12}^2-P_{23}^2}{\lambda_1(1-\alpha_1)}; \\
& C_{01}=P_a^2\left[P_{23}^2+(P_{23}^2-P_{34}^2)\frac{\ln R}{\ln \varkappa_1}\right], \quad C_{02}=-P_a^2\frac{P_{23}^2-P_{34}^2}{\ln\varkappa_1}; \\
& D_{01}=P_a^2\left[P_{34}^2+(P_{34}^2-1)\frac{\ln r_1}{\ln \varkappa_2/\varkappa_1}\right], \quad D_{02}=-P_a^2\frac{P_{34}^2-1}{\ln\varkappa_2/\varkappa_1};
\end{aligned}
\qquad (8)
$$

где

$$
P_{12}^2=P_H^2-\frac{(P_H^2-1)\lambda_1\alpha_1\gamma^3\nu_0^3}{\lambda_1\gamma^3\left[1-\alpha_1(1-\nu_1^3)\right]+\frac{\nu_0^3\ln\varkappa_1}{(1+\nu_0\xi)^3}+\frac{\ln\varkappa_2/\varkappa_1}{(1+\xi)^3}};
$$

$$
P_{23}^2=P_H^2-\frac{(P_H^2-1)\lambda_1\gamma^3\left[1-\alpha_1(1-\nu_1^3)\right]}{\lambda_1\gamma^3\left[1-\alpha_1(1-\nu_1^3)\right]+\frac{\nu_0^3\ln\varkappa_1}{(1+\nu_0\xi)^3}+\frac{\ln\varkappa_2/\varkappa_1}{(1+\xi)^3}};
$$

$$P_{34}^2 = 1 + \frac{(P_{11}^2 - 1)\cdot \frac{\ln {}^{\chi_2}/_{\chi_1}}{(1+\zeta)^3}}{\lambda_1 \gamma^3 \left[1 - \alpha_1 (1 - \nu_1^3)\right] + \frac{\nu_0^3 \ln \chi_1}{(1+\nu_0 \zeta)^3} + \frac{\ln {}^{\chi_2}/_{\chi_1}}{(1+\zeta)^3}},$$

$$A_{11} = P_a^2 \varepsilon A, \quad A_{12} = -P_a^2 \varepsilon A, \tag{9}$$

$$A = \frac{3}{2}\cdot\frac{\nu_1 \theta_1 [ch\,\lambda_1(1-\alpha_1) + \beta\, sh\,\lambda_1(1-\alpha_1)] + \nu_1^3 \theta_2}{(\nu_1^3 \beta\, sh\,\alpha_1\lambda_1 + ch\,\alpha_1\lambda_1)\, ch\,\lambda_2(1-\alpha_1) + (\nu_1^3\, sh\,\alpha_1\lambda_1 + \beta\, ch\,\alpha_1\lambda_1)\, sh\,\lambda_1(1-\alpha_1)}$$

$$\beta = \frac{\psi_2(\chi_1^2+\chi_2^2)(\chi_1^2+1) + (\chi_2^2-\chi_1^2)(\chi_1^2-1)}{\psi_1\left[\psi_2(\chi_1^2-1)(\chi_1^2+\chi_2^2) + (\chi_1^2+1)(\chi_2^2-\chi_1^2)\right]},$$

$$\theta_1 = \frac{P_{11}^2 - P_{12}^2}{\alpha_1 \lambda_1} + \nu_1^2 \frac{P_{12}^2 - P_{23}^2}{\lambda_1(1-\alpha_1)}, \quad \theta_2 = \frac{P_{12}^2 - P_{23}^2}{\lambda_1(1-\alpha_1)},$$

$$\psi_1 = \frac{\nu_0^3}{\gamma^3(1+\nu_0\zeta)^3}, \quad \psi_2 = \frac{\nu_0^3(1+\zeta)^3}{(1+\nu_0\zeta)^3}, \quad B_{11} = P_a^2 \varepsilon B_{11}^*, \quad B_{12} = P_a^2 \varepsilon B_{12}^*, \tag{I0}$$

$$B_{11}^* = -\frac{3\left[\nu_1(\beta+1)\theta_1 e^{\lambda_1} + z_1^* \theta_2 e^{\alpha_1\lambda_1}\right]}{z_1^*(\beta-1)e^{-\lambda_1(1-\alpha_1)} + z_2^*(\beta+1)e^{\lambda_1(1-\alpha_1)}},$$

$$B_{12}^* = \frac{3\left[\nu_1(\beta-1)\theta_1 e^{-\lambda_1} - z_2^* \theta_2 e^{-\alpha_1\lambda_1}\right]}{z_1^*(\beta-1)e^{-\lambda_1(1-\alpha_1)} + z_2^*(\beta+1)e^{\lambda_1(1-\alpha_1)}},$$

$$z_1^* = \nu_1^3 - cth\,\alpha_1\lambda_1, \quad z_2^* = \nu_1^3 + cth\,\alpha_1\lambda_1,$$

$$C_{11} = \frac{P_a^2}{R}\varepsilon C_{11}^*, \quad C_{12} = P_a^2 R \varepsilon C_{12}^*, \tag{II}$$

$$C_{11}^* = \frac{3}{2}\left\{\psi_1\theta_2 + \frac{(1+\psi_1)\left[\nu_1(\beta-1)\theta_1 e^{-\lambda_1} - z_2^*\theta_2 e^{-\alpha_1\lambda_1}\right]e^{\lambda_1}}{z_1^*(\beta-1)e^{-\lambda_1(1-\alpha_1)} + z_2^*(\beta+1)e^{\lambda_1(1-\alpha_1)}} - \right.$$
$$\left. - \frac{(1-\psi_1)\left[\nu_1(\beta+1)\theta_1 e^{\lambda_1} + z_1^*\theta_2 e^{\alpha_1\lambda_1}\right]e^{-\lambda_1}}{z_1^*(\beta-1)e^{-\lambda_1(1-\alpha_1)} + z_2^*(\beta+1)e^{\lambda_1(1-\alpha_1)}}\right\},$$

$$C_{12}^* = -\frac{3}{2}\left\{\psi_1\theta_2 - \frac{(1-\psi_1)\left[\nu_1(\beta-1)\theta_1 e^{-\lambda_1} - z_2^*\theta_2 e^{-\alpha_1\lambda_1}\right]e^{\lambda_1}}{z_1^*(\beta-1)e^{-\lambda_1(1-\alpha_1)} + z_2^*(\beta+1)e^{\lambda_1(1-\alpha_1)}} + \right.$$
$$\left. + \frac{(1+\psi_1)\left[\nu_1(\beta+1)\theta_1 e^{\lambda_1} + z_2^*\theta_2 e^{\alpha_1\lambda_1}\right]e^{-\lambda_1}}{z_1^*(\beta-1)e^{-\lambda_1(1-\alpha_1)} + z_2^*(\beta+1)e^{\lambda_1(1-\alpha_1)}}\right\},$$

$$Д_{11} = -\frac{P_a^2}{R\chi_1}\varepsilon Д^*, \quad Д_{12} = P_a^2 R \varepsilon \chi_1 Д^*, \tag{I2}$$

$$Д^* = \frac{3\chi_1}{2(\chi_2^2-\chi_1^2)}\left\{\psi_1(\chi_1^2-1)\theta_2 + \frac{z_1\left[\nu_1(\beta-1)\theta_1 e^{-\lambda_1} - z_2^*\theta_2 e^{-\alpha_1\lambda_1}\right]e^{\lambda_1}}{z_1^*(\beta-1)e^{-\lambda_1(1-\alpha_1)} + z_2^*(\beta+1)e^{\lambda_1(1-\alpha_1)}} - \right.$$
$$\left. - \frac{z_2\left[\nu_1(\beta+1)\theta_1 e^{\lambda_1} + z_2^*\theta_2 e^{\alpha_1\lambda_1}\right]e^{-\lambda_1}}{z_1^*(\beta-1)e^{-\lambda_1(1-\alpha_1)} + z_2^*(\beta+1)e^{\lambda_1(1-\alpha_1)}}\right\},$$

$$z_1=\chi_1^2+1+\psi_1(\chi_1^2-1), \quad z_2=\chi_1^2+1-\psi_1(\chi_1^2-1).$$

В соответствии с выражениями (2), (8), (II) и (I2) осевая несущая способность F_φ^* опоры и ее безразмерная осевая несущая способность F_φ представятся

$$F_\varphi^*=\pi P_a R^2 F_\varphi$$

$$F_\varphi=\frac{2}{\pi}\int_1^{\chi_1}\chi\,d\chi\int_0^{\pi}\sqrt{U_3^*}\,d\varphi+\frac{2}{\pi}\int_{\chi_1}^{\chi_2}\chi\,d\chi\int_0^{\pi}\sqrt{U_4^*}\,d\varphi-(\chi_2^2-1), \qquad (I3)$$

где

$$U_3^*=P_{23}^2-(P_{23}^2-P_{34}^2)\frac{\ln\chi}{\ln\chi_1}+\varepsilon(C_{11}^*\chi+C_{12}^*\chi^{-1})\cos\varphi$$

$$U_4^*=P_{34}^2-(P_{34}^2-1)\frac{\ln\chi/\chi_1}{\ln\chi_2/\chi_1}-\varepsilon D^*(\chi\chi_1^{-1}-\chi_1\chi^{-1})\cos\varphi$$

Разложив $\sqrt{U_3^*}$ и $\sqrt{U_4^*}$ в ряд по степеням ε и отбросив члены порядка ε^2 и выше, получим

$$\sqrt{U_3^*}=\sqrt{P_{23}^2-(P_{23}^2-P_{34}^2)\frac{\ln\chi}{\ln\chi_1}}+\frac{\varepsilon(C_{11}^*\chi+C_{12}^*\chi^{-1})\cos\varphi}{2\sqrt{P_{23}^2-(P_{23}^2-P_{34}^2)\frac{\ln\chi}{\ln\chi_1}}},$$

$$\sqrt{U_4^*}=\sqrt{P_{34}^2-(P_{34}^2-1)\frac{\ln\chi/\chi_1}{\ln\chi_2/\chi_1}}-\frac{\varepsilon D^*(\chi\chi_1^{-1}-\chi_1\chi^{-1})\cos\varphi}{2\sqrt{P_{34}^2-(P_{34}^2-1)\frac{\ln\chi/\chi_1}{\ln\chi_2/\chi_1}}}.$$

Если с учетом этих равенств выражение (I3) проинтегрировать по φ, то получим

$$F_\varphi=2\int_1^{\chi_1}\sqrt{P_{23}^2-(P_{23}^2-P_{34}^2)\frac{\ln\chi}{\ln\chi_1}}\cdot\chi\,d\chi+$$
$$+2\int_{\chi_1}^{\chi_2}\sqrt{P_{34}^2-(P_{34}^2-1)\frac{\ln\chi/\chi_1}{\ln\chi_2/\chi_1}}\cdot\chi\,d\chi-(\chi_2^2-1). \qquad (I4)$$

Как видно, при малых ε осевая реакция не зависит от величины относительного эксцентриситета и равна осевой реакции, вычисленной при соосном расположении радиального подшипника.

Радиальная несущая способность $F_{\varepsilon1}^*$ опоры и ее безразмерная несущая способность $F_{\varepsilon1}$ в соответствии с выражениями (2), (8), (9) и (I0) имеют вид

$$F_{\varepsilon1}^*=4P_a R^2 F_{\varepsilon1}, \quad F_{\varepsilon1}=\lambda_1\int_0^{-\alpha_1}d\xi_1\int_0^{\pi}\sqrt{U_1^*}\cos\varphi\,d\varphi+\lambda_1\int_{-\alpha_1}^{-1}d\xi_1\int_0^{\pi}\sqrt{U_2^*}\cos\varphi\,d\varphi,$$

где $U_1^*=P_{11}^2+(P_{11}^2-P_{12}^2)\xi_1+2\varepsilon A\,\mathrm{sh}\,\lambda_1\xi_1\cos\varphi$, $U_2^*=\theta_1^*+\theta_2\xi_1+\varepsilon(B_{11}^*e^{\lambda_1\xi_1}+B_{12}^*e^{-\lambda_1\xi_1})\cos\varphi$,

$$\theta_1^*=P_{12}^2+(P_{12}^2-P_{23}^2)\frac{\alpha_1}{1-\alpha_1}, \quad \xi_1=\frac{z}{\ell_{\varepsilon1}}.$$

Отсюда нетрудно найти безразмерную радиальную жесткость при $\varepsilon=0$ [2] :

$$K_{\varepsilon1}=\frac{1}{2}\pi\lambda_1\left[A\int_0^{-\alpha_1}\frac{\mathrm{sh}\,\lambda_1\xi_1\,d\xi_1}{\sqrt{P_{11}^2+(P_{11}^2-P_{12}^2)\xi_1}}+\int_{-\alpha_1}^{-1}\frac{B_{11}e^{\lambda_1\xi_1}+B_{12}e^{-\lambda_1\xi_1}}{2\sqrt{\theta_1^*+\theta_2\xi_1}}\,d\xi_1\right] \qquad (I5)$$

Если в этом выражении положить $\lambda_1=\lambda$, $\alpha_1=\alpha$, $\xi_1=\xi$, а затем устремить χ_1 и χ_2 к единице, то в пределе получится радиальная жесткость второй части опоры, выполняющей функции радиального подшипника и уплотнения:

$$K_{\varepsilon 0}=\frac{1}{4}\pi\lambda a A\left[\int_0^{\alpha}\frac{sh\lambda\xi d\xi}{\sqrt{P_н^2-\frac{1}{3}A\xi}}+\frac{\sqrt{1-\alpha}\, sh\lambda\alpha}{sh\lambda(1-\alpha)}\int_{\alpha}^{1}\frac{sh\lambda(1-\xi)d\xi}{\sqrt{\xi-\alpha+(P_н^2-\frac{1}{3}A\alpha)(1-\xi)}}\right], \tag{16}$$

где

$$a=\frac{(1-\nu)th\lambda(1-\alpha)}{2\lambda[\nu^3 sh\lambda\alpha+ch\lambda\alpha\, th\lambda(1-\alpha)]}, \quad A=\frac{3\nu^3(P_н^2-1)}{1-\alpha(1-\nu^3)}.$$

Общая радиальная реакция и радиальная жесткость опоры (см.рис.) должны определяться суммированием по двум ее областям, разделенным линией наддува [2] :

$$F_\varepsilon^*=4P_a R^2 F_\varepsilon, \quad F_\varepsilon=\varepsilon K_\varepsilon, \quad K_\varepsilon=K_{\varepsilon 0}+K_{\varepsilon 1} \tag{17}$$

Расход газа Q и безразмерный расход q через опору определяются равенствами

$$Q=\frac{\pi K P_a^2 c^3}{12\mu}q, \quad q=q_0+q_1 \tag{18}$$

где q_0 и q_1 - безразмерные расходы через радиальный и совмещенный подшипники:

$$q_0=\frac{P_н^2-1}{\lambda[1-\alpha(1-\nu^3)]}, \quad q_1=\frac{P_н^2-P_{н3}^2}{\lambda[1-\alpha_1(1-\nu_1^3)]}. \tag{19}$$

Следует отметить, что все полученные выражения справедливы в диапазоне линейности $F(\varepsilon)$, т.е. при $\varepsilon\leq$ 0,4–0,5 [2] . Расчеты, проведенные по изложенной теории, позволяют сказать, что существуют оптимальные значения параметров α и ν , при которых отношение $K_{\varepsilon 0}/q_0$ безразмерной жесткости верхней радиальной опоры к безразмерному расходу газа через нее достигает максимума. Эти оптимальные параметры и соответствующие им значения $K_{\varepsilon 0}$ и q_0 при различных $P_н$ и λ приведены в таблице.

Таблица

Оптимальные параметры α и ν и соответствующие им значения $K_{\varepsilon 0}$ и q_0

$P_н$	λ	α	ν	$K_{\varepsilon 0}$	q_0
2	0,4	0,657	0,681	0,0124	13,62
2	0,6	0,652	0,683	0,0270	9,00
2	0,8	0,647	0,685	0,0460	6,69
2	1,0	0,641	0,688	0,0621	5,28
2	1,5	0,623	0,695	0,1304	3,413
2	2,0	0,605	0,700	0,1932	2,490
2	2,5	0,590	0,704	0,2499	1,949
3	0,4	0,660	0,687	0,0232	36,10
3	0,6	0,655	0,689	0,0504	23,86
3	0,8	0,651	0,691	0,0858	17,73
3	1,0	0,645	0,694	0,1271	14,02
3	1,5	0,628	0,700	0,2439	9,07
3	2,0	0,612	0,706	0,3624	6,64
3	2,5	0,599	0,709	0,4702	5,24
4	0,4	0,661	0,690	0,0332	67,4
4	0,6	0,657	0,692	0,0723	44,62
4	0,8	0,652	0,694	0,1230	33,12
4	1,0	0,647	0,697	0,1825	26,21
4	1,5	0,630	0,703	0,3510	16,99
4	2,0	0,615	0,708	0,522	12,44
4	2,5	0,604	6,711	0,678	9,78