

прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. — КуАИ, 1978, вып. 5. — с. 72—78.

5. Ружичка Дж. Е. Резонансные характеристики направленных виброзащитных систем с демпфированием вязким и сухим трением. — Тр. американского общества инженеров-механиков, сер. В, 89, 1967, № 4. — с. 153—168.

УДК 621.822.2

Д. Е. Чегодаев, М. Е. Проданов

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВОГО СЛОЯ В КОЛЬЦЕВОМ ЗАЗОРЕ

Интенсивное развитие техники определило качественно новые требования, предъявляемые к опорам роторов: надежную работу при больших окружных скоростях, значительных циклических нагрузках и высоких температурах, стойкость к действию агрессивных и высокотемпературных сред. Этим требованиям в большей степени удовлетворяют газовые и гидравлические опоры. Они нашли применение в ядерной энергетике, криогенной, вычислительной, космической и авиационной технике. Результаты исследования газовых опор носят общий характер и могут быть обобщены на подшипники, работающие на несжимаемой жидкости.

В работе рассматриваются процессы, происходящие в газовой пленке при динамическом нагружении газостатического подпятника (рис. 1) при следующих допущениях: задача осесимметричная; течение газа изотермическое; рассматриваемый кольцевой элемент объема газа в зазоре  $V = V_0 e^{i\omega t}$  изменяется по гармоническому закону.

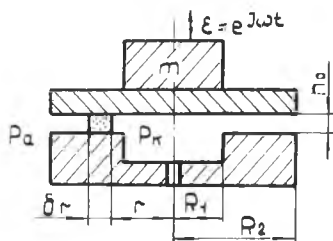


Рис. 1. Схема нагружения газостатического подпятника

Уравнение Рейнольдса в безразмерном виде для изотермического потока между плоскими поверхностями (рис. 1) записывается следующим образом [1]:

$$\frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left( \bar{r} \bar{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}} \right) = \frac{\sigma}{\bar{h}^3} \frac{\partial}{\partial \bar{t}} (\bar{p} \bar{h}), \quad (1)$$

где  $\sigma = \frac{12 \mu R_2^3 \omega}{\rho_0 h_0^3}$  — число сдвливания;  $\bar{r} = \frac{r}{R_2}$ ;  $\bar{h} = \frac{h}{h_0}$ ;

$r, R_1, R_2$  — текущий, внутренний и наружный радиусы;  $h, h_0$  — текущий и фиксированный зазоры;  $\bar{p} = \frac{P}{P_a}$ ;  $p, p_a$  — текущее давление и давление среды;  $t$  — время;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости;  $\omega$  — частота.

Решение уравнения (1) для изменения зазора и давления газа в зазоре находим в виде [2]

$$\bar{h} = 1 + \varepsilon e^{j\omega t}; \quad (2)$$

$$\bar{p} = \bar{p}_0 + \varepsilon \bar{C} e^{j\omega t}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$ ;  $\varepsilon \bar{C} = \frac{\Delta P}{P_a}$ ;  $\Delta h, \Delta P$  — приращения зазора и давления;  $j = \sqrt{-1}$ .

Подстановкой выражений (2) и (3) в уравнение (1) последнее разбивается на два характеризующих распределение давления газа:

в стационарном зазоре

$$\frac{\partial^2 \bar{p}_0^2}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{p}_0^2}{\partial \bar{r}} = 0 \quad (4)$$

и в случае гармонической осцилляции одной из границ зазора

$$\frac{\partial^2 P}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial P}{\partial \bar{r}} = \frac{j\omega (\bar{p}_0^2 + P)}{\bar{p}_0^2}, \quad (5)$$

Уравнение статического распределения давления в зазоре находим из уравнения (4) при граничных условиях  $\bar{r} = \bar{R}_1$ ,  $\bar{p}_0 = \bar{p}_k$ ;  $\bar{r} = 1$ ,  $\bar{p}_0 = 1$ :

$$\bar{p}_0^2 = (\bar{p}_k^2 - 1) \frac{\ln \bar{r}}{\ln \bar{R}_1} + 1.$$

Граничные условия для уравнения (5) запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{r} = \bar{R}_1 \quad \bar{p}_0 = \bar{p}_k; \quad \bar{r} = 1, \quad \bar{p}_0 = 1; \\ \bar{r} = \bar{R}_1 \quad \varepsilon \bar{C} = \Delta \bar{p}_k; \quad \bar{r} = 1, \quad \varepsilon \bar{C} = 0. \end{aligned}$$

Динамическое распределение давления получается с достаточной точностью, принимая величину  $\bar{p}_0$  средней, т. е.

$$\bar{p}_0^2_{\text{ср}} = \frac{2}{1 - \bar{R}_1^2} \int_{\bar{R}_1}^1 \left[ (\bar{p}_k^2 - 1) \frac{\ln \bar{r}}{\ln \bar{R}_1} + 1 \right] \bar{r} d\bar{r},$$

частным решением уравнения (5) будет

$$P = -\bar{p}_0^2.$$

Обозначив  $\frac{\Delta}{\bar{\rho}_0^2} = k^2$ ;  $k^2 = \frac{12 \mu_0 R_0^2}{\rho_0 h_0^2 \bar{\rho}_0^2}$ , общее решение уравнения (5) запишется в виде

$$P = -\bar{\rho}_0^2 + A I_0(\sqrt{j k \bar{r}}) + B K_0(\sqrt{j k \bar{r}}),$$

где  $I_0, K_0$  — функции Бесселя;  $A, B$  — постоянные интегрирования.

При граничных условиях

$$\bar{r} = 1 \quad P = 0;$$

$$\bar{r} = \bar{R}_1 \quad P = \frac{\bar{\rho}_0^2 \Delta \bar{\rho}_k}{\varepsilon},$$

$$P = \bar{\rho}_0^2 \left[ \frac{I_0(\sqrt{j k \bar{r}})}{I_0(\sqrt{j k})} - 1 \right] +$$

$$\left[ \frac{\bar{\rho}_0^2 \Delta \bar{\rho}_k}{\varepsilon} - \bar{\rho}_0^2 \left[ \frac{I_0(\sqrt{j k \bar{R}_1})}{I_0(\sqrt{j k})} - 1 \right] \right] \left[ \begin{array}{cc} \frac{K_0(\sqrt{j k \bar{r}})}{K_0(\sqrt{j k})} - \frac{I_0(\sqrt{j k \bar{r}})}{I_0(\sqrt{j k})} \\ \frac{K_0(\sqrt{j k \bar{R}_1})}{K_0(\sqrt{j k})} - \frac{I_0(\sqrt{j k \bar{R}_1})}{I_0(\sqrt{j k})} \end{array} \right] \quad (6)$$

Жесткость газового слоя из уравнения (6) будет

$$\bar{c}_d = \frac{P}{\bar{\rho}_0^2} = \left[ \frac{I_0(\sqrt{j k \bar{r}})}{I_0(\sqrt{j k})} - 1 \right] + \left[ \frac{\Delta \bar{\rho}_k}{\varepsilon} \left[ \frac{I_0(\sqrt{j k \bar{R}_1})}{I_0(\sqrt{j k})} - 1 \right] \right] \times$$

$$\times \left[ \begin{array}{cc} \frac{K_0(\sqrt{j k \bar{r}})}{K_0(\sqrt{j k})} - \frac{I_0(\sqrt{j k \bar{r}})}{I_0(\sqrt{j k})} \\ \frac{K_0(\sqrt{j k \bar{R}_1})}{K_0(\sqrt{j k})} - \frac{I_0(\sqrt{j k \bar{R}_1})}{I_0(\sqrt{j k})} \end{array} \right]. \quad (7)$$

Выражение для динамической жесткости (7) можно переписать в следующем виде:

$$\bar{c}_d = \bar{C} + j \bar{D}, \quad (8)$$

где  $\bar{C}$  — коэффициент динамической жесткости газовой пленки;  $\bar{D}$  — коэффициент демпфирования газовой пленки, связанный с коэффициентом сопротивления  $b$  зависимо-

стью  $b = \frac{\bar{D}}{\omega}$  [3]. За-

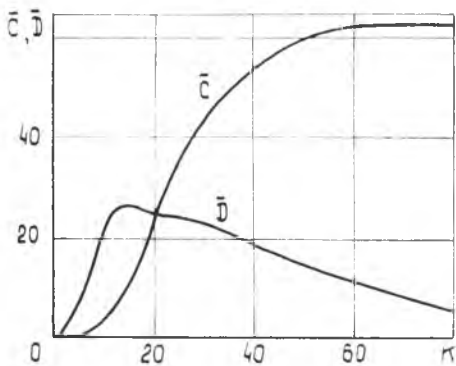


Рис. 2. Зависимость жесткости и демпфирования газовой пленки от числа слоев жидкости

зависимость  $\bar{C}$  и  $\bar{D}$  от частоты и числа сдвигания представлены на рис. 2—4. Из графика (рис. 2) видно, что при сдвигании газовой пленки коэффициент демпфирования  $\bar{D}$  имеет максимум при  $k = 16,5$ . При меньших  $k$  демпфирование падает в связи с уменьшением относительных скоростей движения поверхностей, при высоких значениях  $k$  проявляется сжимаемость среды. Коэффициент жесткости  $\bar{C}$  с увеличением  $k$  возрастает, достигая постоянной величины, определяемой геометрическими размерами демпфера.

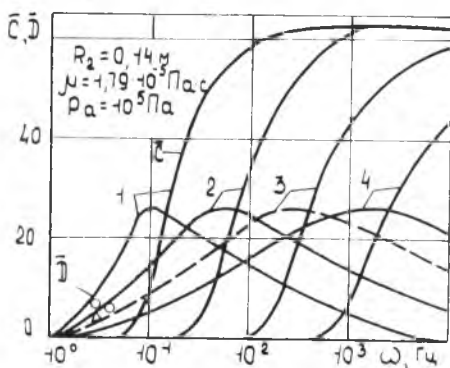


Рис. 3. Зависимость жесткости и демпфирования газовой пленки от частоты возбуждения. Величина зазора: 1 — 5 мкм; 2 — 10 мкм; 3 — 20 мкм; 4 — 40 мкм

Поскольку демпфирование по  $k$  имеет максимум, появляется возможность получить оптимальное соотношение геометрических размеров и рода рабочего тела по частоте возмущения (рис. 3, 4). На рис. 3 показаны зависимости жесткости и демпфирования от частоты возмущения при различных величинах зазоров  $h_0$  для воздуха. Следует отметить, что с уменьшением  $h_0$  оптимальное значение демпфирования не изменяется и смещается по частоте

влево, кроме того, его пик становится более крутым, что означает сужение области частот демпфируемых колебаний. Выбор оптимальной величины зазора  $h_0$ , соответствующего максимальному демпфированию в газовом слое, можно производить с помощью графиков, изображенных на рис. 4. Чем ниже частоты демпфируемых колебаний, тем меньше должны быть за-

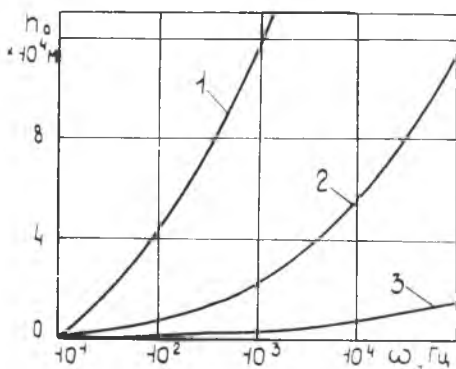


Рис. 4. Распределение оптимальной величины зазора по частоте. Динамическая вязкость: 1 —  $\mu = 1,13 \cdot 10^{-1} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; 2 —  $\mu = 1,05 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ; 3 —  $\mu = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$

зоры демпфера. Существенно влияет на выбор параметров демпфера род рабочего тела, поэтому при ограничении технологических возможностей в изготовлении демпферов можно более успешно применять вязкие жидкости.

Экспериментальные результаты получены при испытании газостатического подпятника (ГСП), рабочим телом которого являлся воздух, на вибрационном электродинамическом стенде ВЭДС-400А.

Регулирование давления воздуха на входе в подпятник осуществлялось редуктором. Величина зазора между плунжером и опорной поверхностью замерялась датчиком перемещений ДПР-3 индуктивного типа, который работал совместно с двухканальной аппаратурой ИВП-2.

К выходу ИВП-2 подключался катодный повторитель ЭП-4М, на выходе которого присоединялся шлейфовый осциллограф И-115. Ко второму каналу ИВП-2 подключался датчик давления ДД-10, измеряющий давление в камере ГСП.

На испытуемом плунжере и вибростоле крепились датчики, которые фиксировали величину ускорения плунжера относительно стола с помощью регистраторов ускорений ПИУ-1. Частота возмущения изменялась от 10 до 500 Гц. При наступлении резонанса регистрировалась его частота и снималась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Из полученных АЧХ определялись коэффициент демпфирования и жесткость по следующим формулам [4]:

$$\bar{D} = \frac{m_0 \omega^2}{m_2^2 - m_1^2};$$

$$\bar{C} = m \omega_0^2. \quad (9)$$

Здесь  $\omega_0$  — собственная частота объема;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — частоты, соответствующие пересечению АЧХ с линией параллельной оси абсцисс на уровне 0,707 от максимального значения резонансной характеристики.

На графике зависимости коэффициента демпфирования (рис. 3, пунктирная линия) отмечены точки, полученные в результате обработки эксперимента по формуле (9). Экспериментальные значения с достаточной точностью совпадают с теоретическими. К сожалению, установка позволяла получить динамические характеристики подпятника в ограниченном диапазоне частот.

Наиболее эффективно на демпфирование влияет величина зазора  $h_0$  (рис. 3). В частности, изменение величины зазора от 5 до 40 мкм приводит к увеличению частоты, соответствующей максимальному демпфированию, на два порядка. Жесткость

при увеличении частоты возмущения изменяется от нулевого значения до величины, характеризующей жесткость пленки газа между пластинами без массообмена со средой.

Для демпфирования низкочастотных вибраций (менее 50 Гц) газостатические демпферы неэффективны и требуется применение более вязких сред, например, масла.

Расчет демпфера с оптимальными характеристиками, обеспечивающего максимальное рассеивание энергии при определенной частоте вибрации, производится по зависимостям (7) и (8) или с помощью графика, представленного на рис. 4. Выбрав рабочую частоту демпфера, его геометрические размеры и рабочую среду, можно однозначно определить величину зазора, обеспечивающего оптимальный режим работы демпфера.

УДК 539.431

*В. П. Харьков*

### СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ

Вибропрочность ответственных деталей машиностроения, например, лопаток турбомашин, предложено [1] оценивать с помощью статистического запаса прочности  $n$ , определяемого как отношение статистически экстремальных значений разрушающих напряжений  $\sigma_{-1}^*$  к действующим напряжениям  $\sigma_v^*$ :

$$n = \frac{\sigma_{-1}^*}{\sigma_v^*}.$$

Экстремальные значения напряжений  $\sigma_v^*$  и  $\sigma_{-1}^*$  определяют с нормированными уровнями значимости  $q$  и доверительной вероятности  $P_d$  по результатам статистической обработки экспериментальных данных с учетом числа измерений. Для нахождения статистических максимальных значений действующих напряжений [2] используют односторонние толерантные коэффициенты для нормального закона распределения:

$$\sigma_v^* = \bar{\sigma}_v + k_t(q, P_d, z) S_{\sigma_v},$$

где  $\bar{\sigma}_v$ ,  $S_{\sigma_v}$  — выборочные оценки параметров среднего значения и среднего квадратического отклонения действующих напряжений;  $z$  — число изделий, на которых измерялись значения  $\sigma_v$ ;  $k_t$  — односторонний толерантный коэффициент, определяемый по таблицам [3] для нормального закона распределения.