УДК 621.4

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ДЕМПФЕРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Балякин В.Б., Барманов И.С.
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королёва (национальный исследовательский университет), г. Самара

Вопрос о влиянии шероховатости на динамические характеристики гидродинамического демпфера (ГДД) не являлся актуальным до тех пор, пока в качестве рабочей жидкости использовались минеральные и синтетические масла, у которых коэффициент динамической вязкости составляет $10^{-3}…10^{-2}$ Па·с. Это позволяло получать оптимальные значения коэффициента демпфирования при величинах демпферного зазора δ_0>0,1 мм.

При проектировании демпферов опор роторов турбонасосных агрегатов подачи жидкого кислорода или криогенного топлива, например для ТРДД НК-88 самолета ТУ-155, потребная величина демпферного зазора составляет δ_0=25…80 мкм. При работе демпфера с относительным эксцентриситетом ε =0,5 величина слоя смазки может уменьшиться до 12,5 мкм, что соизмеримо с суммарной максимальной величиной шероховатостей $R_{Z1}+R_{Z2}$ поверхностей, образующих демпферный зазор.

Влиянию шероховатости на работоспособность подшипников уделялось большое внимание в течение последних 30 лет. Наиболее общую модель трёхмерной шероховатости применили Патир и Чжен. Они предложили метод получения усредненного уравнения Рейнольдса с помощью средней величины расхода смазки через зазор с изотропной и направленной шероховатостью поверхностей. Согласно их методике математическое ожидание выражения толщины плёнки смазки в формуле расхода заменяется произведением $\psi_x\bar{h}^3$ и $\psi_z\bar{h}^3$, где ψ_x и ψ_z - коэффициенты расхода, которые определяется в зависимости от вида шероховатости и значений скоростей вдоль координатных осей *x* и *z*, $\bar{h}$ - номинальная величина зазора, определяемая как расстояние между средними уровнями рабочих поверхностей. Коэффициенты расхода, например, для поверхностей с изотропной шероховатостью, хорошо аппроксимируются выражением $\psi_z=\psi_x=1-0,9\exp\ -0,56\bar{h}/\sigma_i\ $, где $\sigma_i=\sqrt{\sigma_1^2+\sigma_2^2}$ - среднеквадратичное отклонение совместной шероховатости поверхностей. Сложность данного метода заключается в определении коэффициентов расхода. Аналитически удобно определять номинальную толщину смазочного слоя как расстояние между средними уровнями каждой поверхности. Первыми использовали стохастический подход для решения уравнения Рейнольдса в радиальных подшипниках Кристенсен и Тондер, представив толщину смазочного слоя в виде $\bar{h}=h\ \varphi,z\ +h_s\ \xi\ $, где $h_s\ \xi\ $ - стохастическая составляющая, измеренная от номинального положения поверхности, ξ - случайная переменная, характеризующая шероховатую поверхность. В случае предположения о Гауссовском (нормальном) распределении шероховатости поверхностей, что справедливо при обработке рабочих поверхностей шлифованием или тонким точением, номинальное значение зазора определяется в виде $\bar{h}=\delta_0+3\sigma_i$. Можно доказать, что среднее абсолютное отклонение $R_{ai}=\sigma_i\sqrt{2/\pi}\cong 0,798\sigma_i$, следовательно, $\sigma_i=1,25R_{ai}$.

Влияние шероховатости поверхностей будем рассматривать в области малых величин демпферного зазора, поэтому ограничимся рассмотрением ламинарного режима течения смазки и сделаем допущение о незначительном влиянии сил инерции на гидродинамику.

При использовании таких допущений гидродинамическая задача для ГДД сводится к решению усредненного уравнения Рейнольдса в виде

$$\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\psi_x \bar{h}^3 \frac{\partial P}{\partial\varphi}\right) + R^2 \psi_z \bar{h}^3 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 12\mu R^2 \;\; e\Omega \sin\varphi + \dot{e}\cos\varphi \;\; , \qquad (1)$$

Где $\bar{h} = \delta_0 + 3\sigma_i + e\cos\varphi$ - величина номинального демпферного зазора на угловой координате φ.

Течение смазки в коротком демпфере преобладает в осевом направлении вдоль координаты z. В этом случае можно пренебречь первым слагаемым в левой части уравнения (1) и оно примет следующий вид

$$\psi_z \bar{h}^3 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 12\mu \;\; e\Omega \sin\varphi + \dot{e}\cos\varphi \;\; . \qquad (2)$$

При использовании в ГДД упругих изотропных элементов движение втулки-вибратора происходит по круговым орбитам, при этом $\dot{e} = 0$, а следовательно, уравнение (2) еще более упрощается. Зададим граничные условия в коротком непроточном демпфере в виде

$$P = P_П \text{ при } z = L/2, \;\; \frac{dP}{dz} = 0 \text{ при } z = 0, \qquad (3)$$

где $P_П$ - давление подачи смазки в питающей канавке.

Дважды проинтегрировав уравнение (2) с учетом граничных условий (3), получим зависимость распределения давление в демпферном зазоре

$$P = P_П - \frac{6\mu e\Omega\left[\;\; L/2 \;\;^2 - z^2\right]\sin\varphi}{\psi_z \bar{h}^3}. \qquad (4)$$

В безразмерных параметрах уравнение (4) перепишется в виде

$$\bar{P} = \bar{P}_П - \frac{\lambda^2 \varepsilon\left[0,25 - \bar{z}^2\right]\sin\varphi}{2\left[1 - 0,9\exp \;\; -0,56/\bar{\sigma} \;\; \right] \;\; 1 + 3\bar{\sigma} \;\;^3 \;\; 1 + \varepsilon\cos\varphi \;\;^3},$$

где $\bar{\sigma} = \sigma_i/\delta_0$ - безразмерный параметр шероховатости.

Составляющие безразмерной гидродинамической силы в ГДД найдем для случая симметричного расположения питающей канавки интегрированием безразмерного давления:

$$\bar{F}_\tau = -\int_{\bar{z}_1 \; \varphi}^{\bar{z}_2 \; \varphi} d\bar{z} \int_{\varphi_1 \; z}^{\varphi_2 \; z} \bar{P} \;\; \bar{z}, \varphi \;\; \sin\varphi d\varphi; \; \bar{F}_r = -\int_{\bar{z}_1 \; \varphi}^{\bar{z}_2 \; \varphi} d\bar{z} \int_{\varphi_1 \; z}^{\varphi_2 \; z} \bar{P} \;\; \bar{z}, \varphi \;\; \cos\varphi d\varphi,$$

где $\bar{z}_1 \;\; \varphi \;\;, \; \varphi_1 \;\; z \;\;, \; \bar{z}_2 \;\; \varphi \;\;, \; \varphi_2 \;\; z$ - координаты границы начала и конца плёнки смазки.

Рассмотрим случай половинного охвата втулки-вибратора смазкой в пределах от π до 2π. Выражения для безразмерных составляющих гидродинамической силы в этом случае будут иметь вид

$$\bar{F}_\tau = \frac{\pi\lambda^2\varepsilon}{24 \;\; 1 + 3\bar{\sigma} \;\;^3\left[1 - 0,9\exp \;\; -0,56/\bar{\sigma} \;\; \right] \;\; 1 - \varepsilon^2 \;\;^{1,5}};$$

$$\bar{F}_r = \frac{\lambda^2\varepsilon^2}{6 \;\; 1 + 3\bar{\sigma} \;\;^3\left[1 - 0,9\exp \;\; -0,56/\bar{\sigma} \;\; \right] \;\; 1 - \varepsilon^2 \;\;^2}.$$

Из анализа полученных выражений видно, что безразмерные составляющие гидродинамической силы уменьшаются с ростом параметра шероховатости, причем при значении параметра шероховатости $\bar{\sigma} = 0$ имеет место предельный переход к выражениям для идеально гладкого зазора.