

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА

И. А. ШВАРЦ (Ленинград)

Вычислены несущая способность и момент силы трения цилиндрического магнито-гидродинамического подшипника. Вычисление произведено для заданных границ смазочного слоя  $(0, \pi)$  при малой величине радиального зазора. Показано, что наличие внешнего магнитного поля, направленного вдоль оси подшипника, и радиального электрического поля приводит к значительному увеличению несущей способности электропроводящего смазочного слоя. Найдено условие, при котором момент силы трения на шпине МГД-подшипника обращается в нуль.

Пусть  $r$  и  $r'$  — радиусы внутреннего и внешнего цилиндров;  $h$  — переменная толщина смазочного слоя;  $\varphi$  — полярный угол, отсчитанный от максимального зазора по часовой стрелке (фиг. 1);  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — углы, соответствующие началу и концу смазочного слоя;  $e$  — эксцентриситет ( $O'O$  на фиг. 1);  $x = r\varphi$  — координата по дуге слоя;  $y$  — координата по толщине слоя;  $\theta$  — угол между направлением внешней нагрузки на шпип и линией центров;  $V_0$  — окружная скорость поверхности шпипа;  $v_x$  — продольная скорость жидкости в смазочном слое;  $p$  — радиальное давление в слое на единицу длины шпипа;  $\mu$  — динамическая вязкость;  $Q$  — расход жидкости;  $F$  — внешняя нагрузка на единицу длины шпипа;  $m$  — момент трения.

Введем в рассмотрение безразмерные величины

$$\psi = \frac{\delta}{r} \quad (\delta = r' - r), \quad \chi = \frac{e}{\delta}, \quad \xi = \frac{h}{\delta} \approx 1 + \chi \cos \varphi$$

$$\eta = \frac{y}{\delta}, \quad u = \frac{v_x}{V_0}, \quad p^\circ = \frac{p\delta^2}{\mu V_0 r}, \quad Q^\circ = \frac{Q}{V_0 \delta}$$

$$F^\circ = \frac{F\psi^2}{\mu V_0}, \quad m^\circ = \frac{m\psi}{\mu r V_0}$$

Здесь  $F^\circ$  — несущая способность подшипника,  $m^\circ$  — безразмерный момент трения.

Пусть  $B$  — индукция внешнего магнитного поля, направленного вдоль оси подшипника,  $\Phi$  — разность потенциалов, приложенная между шпипом и подшипником от внешнего источника (фиг. 1),  $\sigma$  — удельная электропроводность смазочной жидкости.

В работах [1-3] найдено распределение давления в цилиндрическом МГД-подшипнике для случая, когда внешнее магнитное поле направлено по оси цилиндров и между шпипом и подшипником приложена разность потенциалов. При этом предполагается, что шпип и подшипник являются идеальными проводниками, а электропроводная смазочная жидкость несжимаема. При малом радиальном зазоре градиент давления в смазочном слое МГД-подшипника в безразмерной форме имеет вид

$$\frac{\partial p^\circ}{\partial \varphi} = \frac{6}{\xi^2} - \frac{12Q^\circ}{\xi^3} + \frac{M^2(\Phi^\circ - Q^\circ)}{\xi}, \quad M = B\delta \sqrt{\frac{\delta}{\mu}}, \quad \Phi^\circ = \frac{\Phi}{BV_0\delta} \quad (1)$$

Здесь  $M$  — число Гартмана,  $\Phi^\circ$  — безразмерная разность потенциалов.

На границах смазочного слоя давление обращается в нуль, т. е.

$$p^\circ(\varphi_1) = p^\circ(\varphi_2) = 0$$

Поэтому, интегрируя (1) в пределах от  $\varphi_1$  до  $\varphi_2$ , получим

$$6k_2 - 12Q^\circ k_3 + M^2(\Phi^\circ - Q^\circ)k_1 = 0 \quad (2)$$

$$k_n = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{d\varphi}{(1 + \chi \cos \varphi)^n}$$

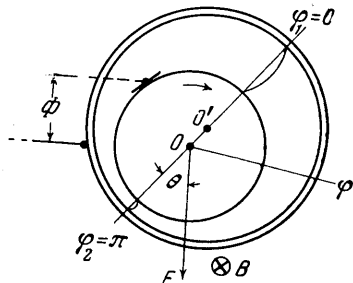
Из уравнения (2) определяется расход  $Q^\circ$  при заданных границах смазочного слоя

$$Q^\circ = \frac{6k_2 + M^2\Phi^\circ k_1}{12k_3 + M^2k_1} \quad (3)$$

Отсюда

$$G = \frac{1}{6} M^2(\Phi^\circ - Q^\circ) = \frac{2M^2\Phi^\circ k_3 - M^2k_2}{12k_3 + M^2k_1} \quad (4)$$

Если при вычислении несущей способности подшипника с весьма малым зазором пренебречь слагаемыми порядка  $\psi = \delta/r$ , то для компонент подъемной силы подшип-



Фиг. 1

ника получаются известные формулы [4]

$$F^{\circ} \cos \theta = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{dp^{\circ}}{d\varphi} \sin \varphi d\varphi, \quad F^{\circ} \sin \theta = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{dp^{\circ}}{d\varphi} \cos \varphi d\varphi \quad (5)$$

Применяя выражения (5) к МГД-подшипнику, находим на основании (1)

$$F^{\circ} \cos \theta = 6i_2 - 12Q^{\circ}i_3 + 6Gi_1 \quad (6)$$

$$F^{\circ} \sin \theta = \frac{6}{\chi} [(1-G)k_1 + (1+2Q^{\circ})k_2 + 2Q^{\circ}k_3 + \pi G]$$

$$i_n = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{\sin \varphi d\varphi}{(1 + \chi \cos \varphi)^n}$$

Чтобы получить конкретные расчетные формулы, рассмотрим случай, когда проводящий смазочный слой охватывает половину кольцевого зазора, т. е.  $\varphi_1 = 0$  и  $\varphi_2 = \pi$ . В этом случае интегралы  $i_n$  и  $k_n$  имеют следующие значения:

$$i_1 = \frac{1}{\chi} \ln \frac{1+\chi}{1-\chi}, \quad i_2 = \frac{2}{1-\chi^2}, \quad i_3 = \frac{2}{(1-\chi^2)^2} \quad (7)$$

$$k_1 = \frac{\pi}{\sqrt{1-\chi^2}}, \quad k_2 = \frac{\pi}{\sqrt{(1-\chi^2)^3}}, \quad k_3 = \frac{\pi(2+\chi^2)}{2\sqrt{(1-\chi^2)^5}} \quad (8)$$

Подставляя (7) и (8) в (3) и (4), получим

$$Q^{\circ} = \frac{6(1-\chi^2) + M^2\Phi^{\circ}(1-\chi^2)^2}{6(2+\chi^2) + M^2(1-\chi^2)^2}, \quad G = \frac{M^2\Phi^{\circ}(2+\chi^2) - M^2(1-\chi^2)}{6(2+\chi^2) + M^2(1-\chi^2)^2} \quad (9)$$

Формулы (6) — (9) определяют величины  $F^{\circ}$  и  $\theta$  как функции относительного эксцентриситета  $\chi$ , если заданы электромагнитные параметры  $M$  и  $\Phi^{\circ}$ .

Магнитные поля, легко осуществимые на практике, могут иметь порядок  $B \sim 10^{-2} - 10^{-1}$  в сек/м<sup>2</sup> (100—1000 гс). Если в качестве смазочной жидкости в МГД-подшипнике применяется жидкий металл, то при указанной величине магнитного поля и радиальном зазоре  $\delta \sim 0.1 - 0.01$  см числа Гартмана имеют порядок  $M \leq 1$  [5]. Для получения значительного дополнительного давления в смазочном слое МГД-подшипника электрическая разность потенциалов  $\Phi$ , созданная внешним источником, должна быть достаточно велика. Следовательно, параметр  $\Phi^{\circ}$  достигает больших значений. Поэтому положим

$$\Phi^{\circ} \gg 1, \quad \text{или} \quad \alpha = M^2\Phi^{\circ} \gg M^2 \quad (10)$$

Если при этом учесть, что  $0 < \chi < 1$ , то в выражениях (9) можно пренебречь слагаемыми  $M^2(1-\chi^2)$  и  $M^2(1-\chi^2)^2$ . Тогда получим

$$Q^{\circ} \approx \frac{1-\chi^2}{2+\chi^2} + \frac{\alpha}{6} \frac{(1-\chi^2)^2}{2+\chi^2}, \quad G \approx \frac{\alpha}{6} \quad (11)$$

Таким образом, действие электромагнитных сил в рассматриваемом МГД-подшипнике характеризуется практически одним параметром

$$\alpha = M^2\Phi^{\circ} = \frac{B\delta\sigma\Phi}{\mu V_0} \quad (12)$$

Из выражений (6) и (11) находим

$$F^{\circ} \cos \theta = \frac{12\chi^2}{(2+\chi^2)(1-\chi^2)} + \frac{\alpha}{\chi} \left( \ln \frac{1+\chi}{1-\chi} - \frac{4\chi}{2+\chi^2} \right)$$

$$F^{\circ} \sin \theta = \frac{6\pi\chi}{(2+\chi^2)\sqrt{1-\chi^2}} + \frac{\pi\alpha}{\chi} \left( 1 - \frac{2\sqrt{1-\chi^2}}{2+\chi^2} \right) \quad (13)$$

Отсюда при  $\alpha = 0$  получаются значения проекций несущей способности обычного гидродинамического подшипника с границами смазочного слоя  $(0, \pi)$  [4].

Исключая из (13) угол  $\theta$ , можно найти выражение для  $F^{\circ}$  как функции  $\chi$  и  $\alpha$ .

На фиг. 2 показаны кривые  $F^{\circ}(\chi)$  при различных значениях параметра  $\alpha$ . Видно, что несущая способность МГД-подшипника резко возрастает с увеличением  $\alpha$ .

Момент силы трения на поверхности шипа вычисляется по известной формуле

$$m^{\circ} = - \int_0^{\pi} \left( \frac{\partial u}{\partial \eta} \right)_{\eta=0} d\varphi \quad (14)$$

Распределение продольной скорости жидкости в тонком слое МГД-подшипника получено в работах [1,2] и может быть представлено в виде

$$u = \frac{v_x}{V_0} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial p^{\circ}}{\partial \varphi} - \frac{M^2 (\Phi^{\circ} - Q^{\circ})}{\xi} \right] (\eta^2 - \xi \eta) - \frac{\eta}{\xi} + 1 \quad (15)$$

Из выражений (14), (15) и (1) получаем

$$m^{\circ} = 4k_1 - 6Q^{\circ}k_2 \quad (16)$$

Здесь  $Q^{\circ}$  определено формулой (9) (или (11)).

Используя (8) и (14), находим

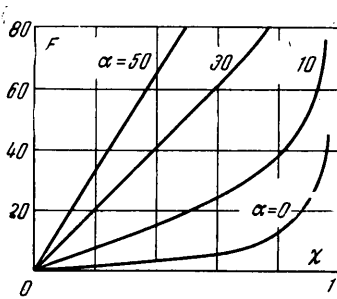
$$m^{\circ} = \frac{2\pi(1+2\chi^2)}{(2+\chi^2)\sqrt{1-\chi^2}} - \pi\alpha \frac{\sqrt{1-\chi^2}}{2+\chi^2} \quad (17)$$

Отсюда при  $\alpha = 0$  получим момент силы трения на шипе обычного гидродинамического подшипника с границами смазочного слоя (0,  $\pi$ ) [4].

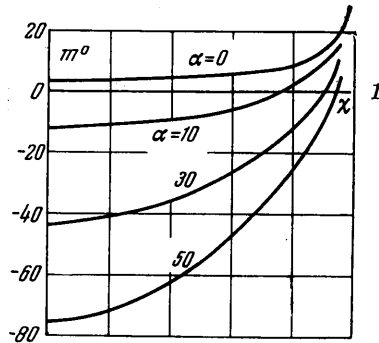
Из выражения (17) следует, что

$$m^{\circ} = 0 \text{ при } \alpha = \frac{2(1+2\chi^2)}{1-\chi^2} \quad (18)$$

Отсюда находим критическое значение  $\chi = \chi_0$ , при котором момент трения на ши-



Фиг. 2



Фиг. 3

пе обращается в нуль

$$\chi_0 = \left( \frac{\alpha - 2}{\alpha + 4} \right)^{1/2} \quad (19)$$

При  $\chi = \chi_0$  момент гидродинамического трения на поверхности шипа полностью компенсируется действием электромагнитных сил на проводящую смазочную жидкость.

Для каждого значения  $\alpha$  при  $\chi < \chi_0$  момент трения на поверхности внутреннего цилиндра отрицателен (фиг. 3). В этом случае под действием электромагнитных сил жидкость обтекает поверхность шипа со скоростью, большей скорости его механического вращения.

Поступило 4 II 1966

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hughes W. F., Elco R. A. The magnetohydrodynamic journal bearing. J. Amer. Rocket Soc., 1962, vol. 32, No 5.
2. Шеварц И. А. Магнитогиродинамический смазочный слой. Докл. 22 научн. конф. Ленингр. инж.-строит. ин-та. Сб. «Физика», 1964.
3. Шеварц И. А. Магнитогиродинамическая теория смазки цилиндрического подшипника. Изв. АН СССР, МЖГ, 1966, № 1.
4. Коровчинская М. В. Теоретические основы работы подшипников скольжения. Машгиз, 1959.
5. Кирко И. М. Жидкий металл в электромагнитном поле. Изд. «Энергия», 1964.