

В. А. Голодняк, П. Ф. Петик

*Украинский научно-исследовательский институт масел и жиров,
310019 Харьков, Украина*

УСИЛИЯ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ МЕЖДУ ВАЛОМ И ПОЛЮСОМ В МАГНИТОЖИДКОСТНОМ УПЛОТНЕНИИ

V. A. Golonyak, P. F. Petik

INTERACTION BETWEEN SHAFT AND POLES WITH MAGNETIC FLUID SEAL

Dependences of magnetic forces values of interaction between shaft and poles and also held pressure in magnetic fluid seal from eccentricity have been considered.

Рассмотрим традиционную схему магнитожидкостного уплотнения (МЖУ) с магнитным валом. Поскольку в реальном устройстве вал и полюс всегда имеют эксцентриситет, в результате несимметричного распределения магнитного поля по периметру зазора возникает магнитная сила, действующая между валом и полюсом. С ней конкурирует выталкивающая сила магнитной жидкости, заполняющей зазор МЖУ. Сила, действующая на ферромагнитное тело, помещенное в магнитную жидкость, определяется соотношением [1]

$$F = \oint_S (\mu_0 H^2 / 2 - \mu_0 \bar{J} H) dS, \text{ где } \bar{J} = \int_0^H J dH.$$

Если в зазоре МЖУ магнитное поле достаточно велико, чтобы везде $J = J_0 = \text{const}$, тогда

$$F = \oint_S (\mu_0 H^2 / 2 - \mu_0 J_0 H) dS. \quad (1)$$

Первый член в этом выражении соответствует силе, действующей на тело в магнитном поле, а второй обуславливается выталкивающей силой магнитной жидкости.

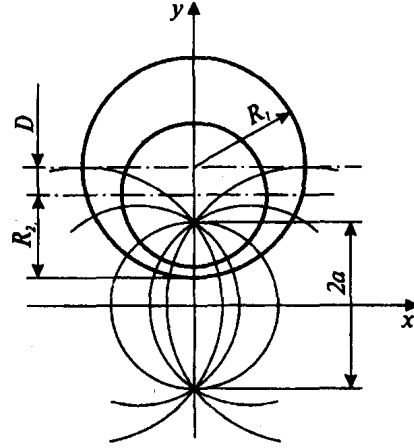
Для определения значения этих сил необходимо знать распределение магнитного поля в зазоре МЖУ. Эта задача решается при следующих допущениях. Полюс и вал рассматриваются как поверхности с бесконечной магнитной проницаемостью. Профилированием полюса пренебрегается и расчет ведется на эффективный магнитный зазор. Задача предполагается плоской, поскольку зазор в МЖУ намного меньше диаметра вала и толщины полюса. В силу сделанных допущений полюс и вал являются эквипотенциалами, а магнитное поле определяется скалярным потенциалом

$$\mathbf{H} = -\Delta U, \quad (2)$$

что позволяет воспользоваться известным решением задачи о распределении электрического поля между двумя бесконечными цилиндрами [2]. Для геометрии и в координатах, приведенных на рис. 1, решение (2) имеет вид

$$U = \text{arccth} \frac{x^2 + y^2 + a^2}{2ay}. \quad (3)$$

Рис. 1. Геометрия задачи.



Потенциал на поверхности вала и полюса, а также постоянная a определяются соотношениями

$$R_1 = a|\operatorname{cosech} U_1|, \quad R_2 = a|\operatorname{cosech} U_2|, \quad D = a(|\operatorname{cth} U_1| - |\operatorname{cth} U_2|). \quad (4)$$

Выполним преобразование координат к системе с началом в центре одного из цилиндров, а затем к полярной системе координат ρ, φ , используя (3), запишем

$$H^2 = \frac{4a^2[r^4 + R_i^4 + 2r^2(R_i^2 \operatorname{ch}^2 U_i + a^2) + 4r(r^2 + R_i^2)R_i \operatorname{ch} U_i \sin \varphi + 4r^2 R_i^2 \sin^2 \varphi]}{\left[4a^2 R_i^2 \operatorname{ch}^2 U_i - (R_i^2 \operatorname{ch}^2 U_i + a^2 + r^2)^2 - 4r(r^2 + R_i^2)R_i \operatorname{ch} U_i \sin \varphi - 4r^2 R_i^2 \sin^2 \varphi\right]^2} \quad (5)$$

Распределение напряженности магнитного поля на поверхности внутреннего цилиндра (вала) для значений $r = R_i$, $R_i = R_2$, $U_i = U_2$ с учетом (4) имеет вид

$$H = \frac{\operatorname{sh} U_2}{R_2(\operatorname{ch} U_2 + \sin \varphi)}. \quad (6)$$

Полученное соотношение с точностью до размерной постоянной определяет значение поля в зазоре. Из (4) находим

$$a = \frac{R_2^2}{2D} \left\{ \left[\left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 - 1 \right]^2 - 2 \left[\left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 + 1 \right] \left[\left(\frac{D}{R_2} \right)^2 + \left(\frac{D}{R_2} \right)^4 \right] \right\}^{1/2}, \quad \operatorname{sh} U_2 = \frac{a}{R_2}. \quad (7)$$

Согласно (6) и (7) для соосных цилиндров при $D \rightarrow 0$ поле в зазоре $H_0 = 1/R_2$ и (6) можно записать в виде

$$\frac{H}{H_0} = \frac{\operatorname{sh} U_2}{\operatorname{ch} U_2 + \sin \varphi}, \quad (8)$$

где H_0 – напряженность магнитного поля в равномерном зазоре между цилиндрами.

Из (1) видно, что магнитное давление на единицу площади ферромагнитной поверхности составляет $p = \mu_0 H^2 / 2$ и, если обозначить через

$p_0 = \mu_0 H_0^2 / 2$, относительное магнитное давление на поверхность ферромагнитного вала

$$\bar{p} = \frac{p}{p_0} = \left(\frac{\text{sh}U_2}{\text{ch}U_2 + \sin \varphi} \right)^2.$$

Плотность объемных сил в магнитной жидкости определяется выражением

$$f_m = \mu_0 J \nabla H,$$

подставив в которое значение градиента, вычисленное из (8), определим относительное значение

$$\bar{f}_m = \frac{f_m}{\mu_0 J_0 H_0 / R_2} = - \frac{\text{sh}U_2 \cos \varphi}{(\text{ch}U_2 + \sin \varphi)^2}.$$

Выполним преобразования, позволяющие упростить дальнейшие вычисления. Обозначив $\lambda = D/(R_1 - R_2)$, запишем

$$a = \frac{R_1 + R_2}{2} \frac{\sqrt{1 - \lambda^2}}{\lambda} \left[1 - \left(\lambda \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \right]^{1/2},$$

поскольку обычно $(R_1 - R_2) \sim 10^{-4}$ м, а $(R_1 + R_2) > 10^{-2}$, последний член в квадратных скобках можно опустить. Кроме того, с достаточной степенью точности можно допустить, что $(R_1 + R_2)/2 \cong R_2$.

Тогда $a = R_2 \sqrt{1 - \lambda^2} / \lambda$, $\text{sh}U_2 = \sqrt{1 - \lambda^2} / \lambda$, $\text{ch}U_2 = \lambda^{-1}$ и из (7) после подстановки получим

$$\frac{H}{H_0} = \frac{\sqrt{1 - \lambda^2}}{1 + \lambda \sin \varphi}. \quad (9)$$

Подставив в соотношения (1) выражения (9), получим

$$F_m = 2\mu_0 R_2 H_0^2 \left[4\lambda + \frac{\arcsin \lambda}{\sqrt{1 - \lambda^2}} \right]; \quad F_{ma} = 4\mu_0 R_2 J_0 H_0 \arctg \frac{\lambda}{1 - \lambda^2}.$$

Эти силы направлены в противоположные стороны и определяют положение вала.

На рис. 2 показан характер зависимости безразмерных составляющих сил в функции λ :

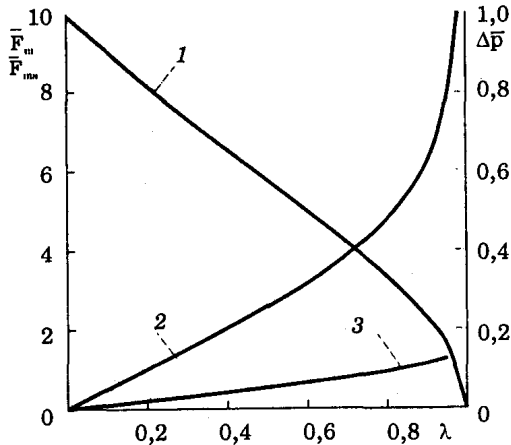


Рис. 2. Зависимость сил (1, 2) и удерживаемого давления (3) от эксцентриситета. 1 - F_m , 2 - F_{ma} , 3 - $\Delta \bar{p}$.

$$\bar{F}_m = \frac{F_m}{2\mu_0 R_2 H_0^2}, \quad \bar{F}_{ma} = \frac{F_{ma}}{4\mu_0 R_2 J_0 H_0^2}.$$

При реальных значениях параметров намагниченность насыщения магнитной жидкости обычно на порядок ниже напряженности магнитного поля, поэтому выталкивающая сила практически всегда меньше силы магнитного притяжения вала к втулке. Как следует из оценки порядка слагаемых, сила притяжения на порядок и более превышает магнитную выталкивающую силу и поэтому при практических расчетах последней можно пренебречь.

Удерживаемый уплотнением перепад давления определяется соотношением $\Delta p = J \cdot B$.

Несоосное положение вала и полюса приводит к снижению удерживаемого уплотнением перепада. При сделанных нами допущениях отнесенный к перепаду при равномерном зазоре фактический перепад равен

$$\Delta \bar{p} = \sqrt{\frac{1-\lambda}{1+\lambda}}.$$

Согласно приведенной на рис. 2 зависимости для сохранения значения удерживаемого перепада в пределах 20% от номинального эксцентриситет не должен превышать 0,20 – 0,21.

Таким образом, при проектировании МЖУ для определения долговечности и реально удерживаемого перепада необходимо учитывать несоосность вала и полюсов.

Все результаты работы были получены при достаточно жестких допущениях, в которых не учитывалась реальная геометрия устройства. Однако все соотношения приведены к единичной длине и при достаточно большой экспериментальной статистике их можно применять, вводя эмпирические коэффициенты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. – М., 1989. – 357 с.
2. Смайт В. Электростатика и электродинамика. – М., 1954. – 604 с.

Поступила в редакцию 06.05.96